



Co-funded by the
European Union



Muqobil energiyaga asoslangan yangi texnik ishlanmalarni loyihalash

O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar
vazirligi

Silicon

Perovskite

Organic

A. Yarbekov

Toshkent-2025

Ushbu o'quv qo'llanma Toshkent shahridagi Turin Politehnika universitetining (TTPU) Ilmiy kengashi tomonidan 2026 yil «2» fevral sanasidagi № «02/26» qarori asosida nashr etishga tavsiya etilgan.

Muallif:

A. Yarbekov –Tabiiy-matematik fanlar kafedrasining dotsenti, Toshkent shahridagi Turin politehnika Universiteti.

Taqrizchilar: O. Ruzimuradov –Tabiiy-matematik fanlar kafedra professori,
Toshkent shahridagi Turin politehnika Universiteti.

O. Ismoilova – Toshkent davlat texnika universiteti,
dotsent.

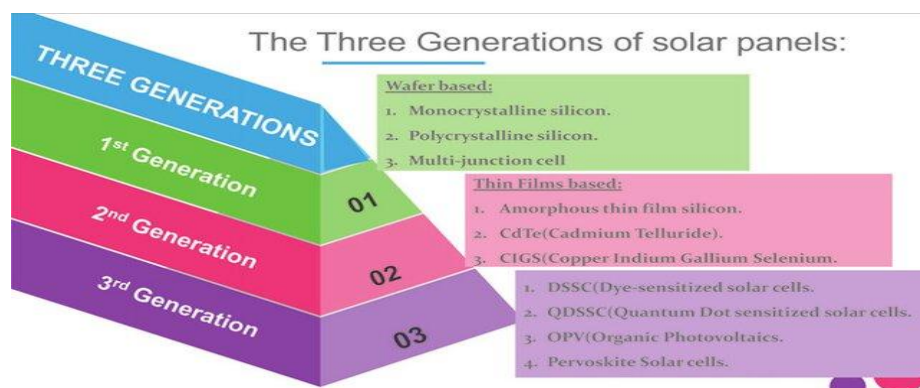
Terminologiyalar:

- **CIGS** – Copperindium gallium selenide
- **ITO** – Indium-doped tin oxide
- **DSSC** – Dye-sensitized solar cells
- **FTO** – Fluorine-doped tin oxide
- **MFI** – Metallorganic Frameworks
- **LUMO** - Lower unoccupied molecular orbit
- **HOMO** - Highest occupied molecular Orbital
- **NREL** - National Renewable Energy Laboratory
- **RI** – Refractive Index
- **NCS** – Nanocomposite Solar Cell
- **FAD** – Ferrocenedicarboxylic Acid
- **HTM** – Hole Transport Material
- **PCE** – Power conversion efficiency
- **J_{max}** – Maximum Current Density for Light Exposure
- **AE** – Apparent Efficiency (Photon-to-electricity conversion efficiency)
- **AJ** – I-t Curve Current Efficiency (the ratio of effective current density to J_{light})
- **P_{max}** – Maximum Power under light exposure (W)
- **J_p** – Photon-current per cm² (μA/cm²)
- **I_p** – Probe current (μA)
- **EQE** – External Quantum Efficiency
- **P** – Power (W)
- **IST** – Integrated STC
- **voltage** – Voltage (V)
- **current** – Current (A)
- **FF** – Fill Factor
- **Voc** – Open-circuit Voltage
- **Isc** – Short-circuit Current

KIRISH

Yigirma birinchi asr global energetika paradigmasida hal qiluvchi o'zgarishlarni anglatadi. Elektr energiyasiga talabning ortib borishi, qazib olinadigan yoqilg'ı zahiralarning kamayishi va iqlim o'zgarishi oqibatlarining kuchayishi barqaror, ekologik toza energiya manbalariga favqulodda ehtiyoj tug'dirdi. Eng istiqbolli va tez rivojlanayotgan yechimlar qatoriga muqobil energiya tizimlari, xususan, quyosh va shamol energiyasidan foydalanishlar kiradi. *Muqobil energiyaga asoslangan yangi texnik ishlanmalarni loyihalash* kursi talabalarni zamonaviy dizayn yondashuvlari, materiallari va texnologiyalari bilan tanishtiradi. U talabalarni barqaror texnologiya sohasida professional tadqiqot va ishlanmalarga tayyorlash uchun nazariy asoslarni amaliy muhandislik tamoyillari bilan birlashtiradi.

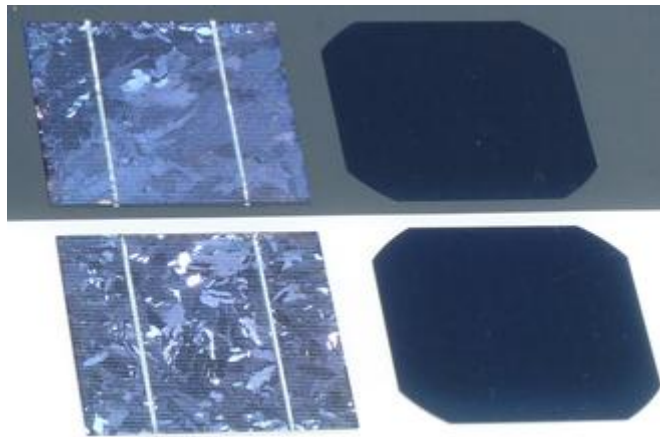
Quyosh fotovoltaik (PV) texnologiyasi an'anaviy kremniy panellaridan ancha kengaydi (1-rasm). Zamonaviy PV tadqiqotlari samaradorlik, xarajat va shakl-faktorni yaxshilash uchun ikkinchi avlod yupqa plyonkali qurilmalar va yangi materiallarni qamrab oladi. Masalan, yupqa plyonkali elementlar shisha yoki polimerda nanometr o'lchamdagi yutuvchi qatlam (absorber) qatlamlardan foydalanadi, bu esa engil, moslashuvchan modullarni ta'minlaydi. Boshqa yondashuvlar kremniyga yangi qatlamlar yoki tuzilmalarni qo'shadi (quyida PERC va heteroo'tishli quyosh elementlarni qarang) yoki quyosh spektrining ko'proq qismini yutush uchun yarimo'tkazgichlarni ko'p o'tkazgichli quyosh elementi qilib yaratildi. Yangi absorber materiallari - perovskitlar, bo'yoqlar va organiklar - juda arzon yoki shaffof qurilmalar tayyorlash yo'nalishda istiqbolga ega. Ikki tomonli modular ham old yuzadan nurni yutadi ham yerdan qaytgan nurni quyosh panelining orqa yuzasidan ham yorug'likni yig'adi. Bunga parallel ravishda shamol turbinalari atmosfera harakatini quvvatga aylantirib, shamolni yetuk qayta tiklanadigan manbaga aylantiradi. 2024 yilga kelib, shamol global miqyosda 800 GVt dan oshib, elektr energiyasining $\approx 8\%$ ni ta'minladi. Nihoyat, PV tizimining ishlashi (tozalash, masofadan turib kuzatish va quyoshni kuzatish) energiya olsih uchun juda muhimdir. Quyidagi bo'limlar o'z navbatida ushbu ilg'or quyosh texnologiyalari va shamol energiyasi tushunchalarini taqdim etadi.



1-rasm. 3 avlod quyosh elementlari diagrammasi

Birinchi avlod (kristalli kremniy) quyosh elementlari

Birinchi avlod (kristalli kremniy) quyosh elementlari monokristalli (mono -Si) yoki polikristalli (poli-Si) qalin kristalli kremniy plastinalariga asoslangan bo'lib, yetuk tayyorlash texnologiya darajasiga va ishonchli ishlash tufayli global PV qurilmalarining 90% dan ortig'ini ifodalaydi. **Kristalli kremniy** yoki (**c-Si**) kremniyning kristall shakllari, yoki polikristalli kremniy (poli-Si, kichik kristallardan iborat) yoki monokristalli kremniy (mono-Si, uzluksiz kristall). Kristalli kremniy quyosh elementlari ishlab chiqarish uchun fotovoltaiik texnologiyada qo'llaniladigan dominant yarim o'tkazgich materialdir. Ushbu elementlar quyosh nuridan quyosh energiyasini ishlab chiqarish uchun fotovoltaiik tizimning bir qismi sifatida quyosh panellariga yig'iladi .



2-rasm. Poli kremniydan (chap tomonda) yoki mono kremniydan (o'ng tomonda) tayyorlangan kristalli kremniy quyosh elementlari .

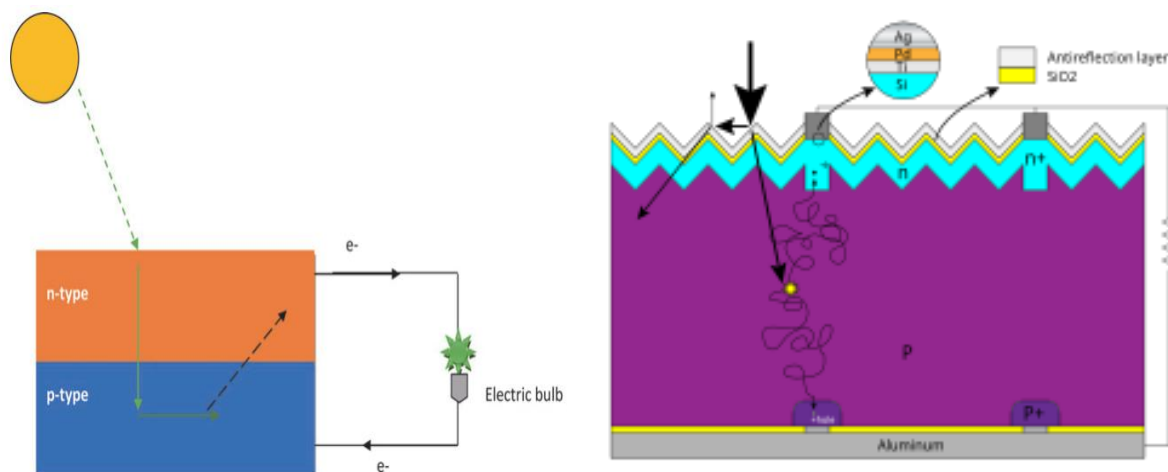
Tasniflar: PV sanoati

Fotovoltaiik sanoatda materiallar odatda quyidagi ikki toifaga bo'linadi:

- Kristalli kremniy (c-Si), an'anaviy plastina asosidagi quyosh batareyalarida ishlatiladi.
 - Monokristalli kremniy (mono-Si)
 - Polikristal kremniy (ko'p Si)
 - Ribbon kremniy (lenta-Si), hozirda bozorga ega emas
- Yupqa qatlamli va boshqa quyosh elementi texnologiyalarida ishlatiladigan kristalli kremniy deb tasniflanmagan boshqa materiallar.
 - Amorf kremniy (a- Si)
 - Nanokristalli kremniy (nc-Si)
 - Protokristalin kremniy (pc-Si)
 - CdTe , CIGS kabi boshqa o'rnatilgan kremniy bo'lmagan materiallar
 - Rivojlanayotgan fotovoltaiiklar
 - Ko'p o'tishli quyosh elementlari (MJ)

Tuzilishi va faoliyati

Ular kremniy plastinalarni doping(kirishma kiritish) qilish natijasida hosil bo'lgan p-n birikmasidan iborat bo'lib, aks ettirishga qarshi qoplama (SiO_2) va old/orqa elektrodlar bilan qoplangan. Ommaviy kremniydagi yorug'likning yutilishi ulanishning elektr maydoni bilan ajratilgan elektron-g'ovak juftlarini hosil qiladi (3-rasm).



3-rasm. Kremniy asosidagi quyosh elementlari

Afzalliklar va Cheklovlar:

Afzalliklari: Yuqori barqarorlik, yaxshi ishonchlil va sodda tushunish mumkin, uzoq xizmat muddati, ta'minot zanjiri ustuvor(dominant).

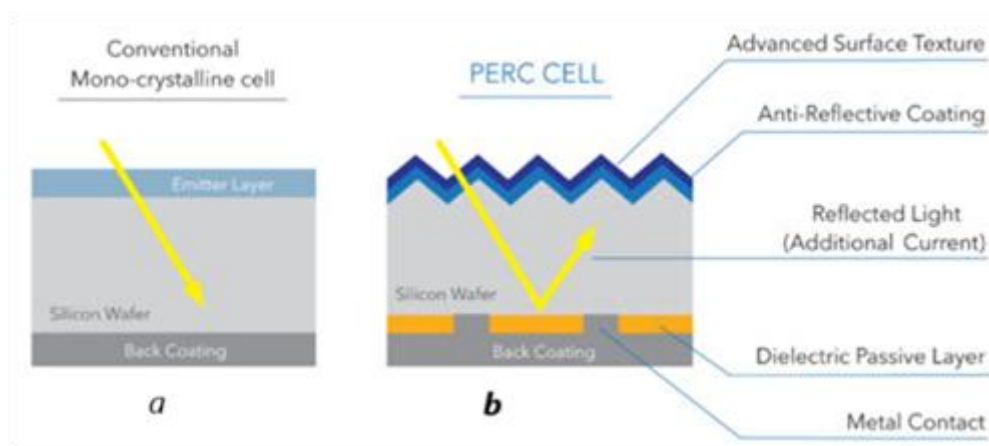
Cheklovlar: Yuqori material (kremniy) iste'moli, plastina ishlab chiqarish jarayonida energiyani ko'p talab qilishi, har bir vatt uchun yuqori xarajatlar va bitta p-n-o'tishli element uchun samaradorligi Shockley- Queisser chegarasi bilan cheklangan (nazariy jihatdan eng yuqori smaradorlik ~ 31%).

Quyosh elementini samaradorligi oshirish, elementdagi mavjud kamchiliklarni bartaraf etish va element tomonidan beradigan energiya tan narxini tushirish bo'yicha katta hajmda ishlab olib borilgan. Quyida quyosh elementlar ustida olib borilgan tadqiqotlar bn tanishish mumkin.

Passivlashtirilgan emitent va orqa kontaktli (PERC) quyosh elementlari

PERC elementlari yaxshilangan kristalli kremniy dizayni bo'lib, u dielektrik "passivatsiya" qatlamini va orqa yuzada mahalliy kontaktlarni qo'shadi. Standart PERC elementida (pastda ko'rsatilgan) aks ettirishga qarshi tekstura va oldingi panjara odatdagidek yorug'likni to'playdi, lekin orqa tomonda yupqa $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ plyonka va alyuminiy qo'llaniladigan mayda g'ovaklar mavjud. Ushbu struktura (rasmda ko'rsatilgan) qisman orqa oynani va orqa yuzada tashuvchining rekombinatsiyasini kamaytiradigan elektr maydonini yaratadi. Buning natijasida yuqori kuchlanish va samaradorlikdir erishiladi. PERC elementlari 1980-yillarda ishlab chiqilgan va 2010-yillarda keng tijoratga aylangan. Bugungi kunda PERC

asosiy kremniy element texnologiyasi hisoblanadi, chunki u an'anaviy Al-BSF elementlariga nisbatan samaradorlikni bir necha foizga oshiradi. Tijoriy PERC modullari muntazam ravishda 22% samaradorlikdan oshadi va PERC elementlari samaradorlik record ko'rsatkichi (laboratoriya sharotida) 25% dan oshadi. Shunday qilib, PERC standart kremniyni qayta ishlashga nisbatan oddiy qayta jihozlashni ifodalaydi, bu esa sezilarli samaradorlikni beradi.



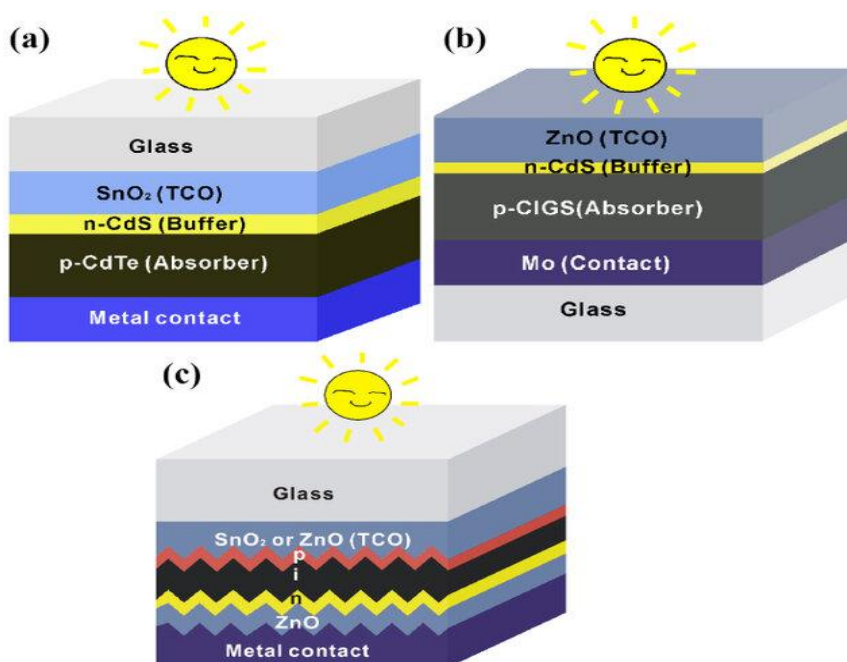
4-rasm. a) An'anaviy kristalli kremniy (c -Si) quyosh batareyalari; b) Passivlashtirilgan emitent orqa kontaktli (PERC) quyosh batareyalari

Ikkinchi avlod (yupqa plyonkali) quyosh elementlari

Yupqa qatlamli quyosh elementlari

Yupqa plyonkali quyosh elementlari yarimo'tkazgichning mikron yoki mikron osti qatlamlarini asos material(substrat)ga joylashtiradi. Ushbu "ikkinchi avlod" PV juda nozik shaklda kadmiy tellurid (CdTe), mis-indiy-galiy-selenid (CIGS) yoki amorf kremniy (a-Si) kabi materiallardan foydalanadi. 5-Rasmda (kadmiy tellurid elementi kesmasi keltirilgan) odatdagi yupqa qatlamli plyonka ko'rsatilgan: shisha, shaffof o'tkazgich, CdSeTe / CdTe Yutuvchi qatlam(absorber) va metall orqa kontakt. Yutuvchi qatlam(absorber) juda nozik bo'lgani uchun, bu elementlar yengil va moslashuvchan yoki yarim shaffof bo'lishi mumkin. Ular binoga o'rnatilgan fotovoltaiklarga yoki egri sirtlarga mos keladi va ularni roll-to-roll(noldan to tayyor elementgacha) ishlab chiqarish kristalli kremniyga qaraganda soddaroq va arzonroq bo'lishi mumkin. Zamonaviy CdTe yupqa plyonkali modullar yetuk darajaga erishdi: masalan, CdTe hozirda kremniydan keyin ikkinchi yirik PV texnologiyasi bo'lib, AQSh bozorining ~21% va global miqyosda ~4% ni egallaydi (2022). Bir ol'tishli(yanoga p-n-o'tishli) yupqa plyonkalar (masalan, GaAs) uchun rekord samaradorlik hatto 29% dan oshdi va kremniy uchun o'rnatilgan Shockley- Queisser chegarasidan oshib ketdi. Biroq, ko'plab yupqa plyonkali elementlar hali ham kremniyga nisbatan chidamlilik va uzoq muddatli barqarorlik bo'yicha orqada qolmoqda, bu ularning bozor ulushini (butun dunyo bo'ylab ~ 5%) nisbatan past darajada ushlab turdi. Umuman olganda, yupqa plyonkalar birinchi avlod

elementlariga nisbatan bir oz pastroq samaradorlik va uzoq umr ko'rish hisobiga vatt uchun arzon narx va egiluvchanlik dizayn taklif qiladi.

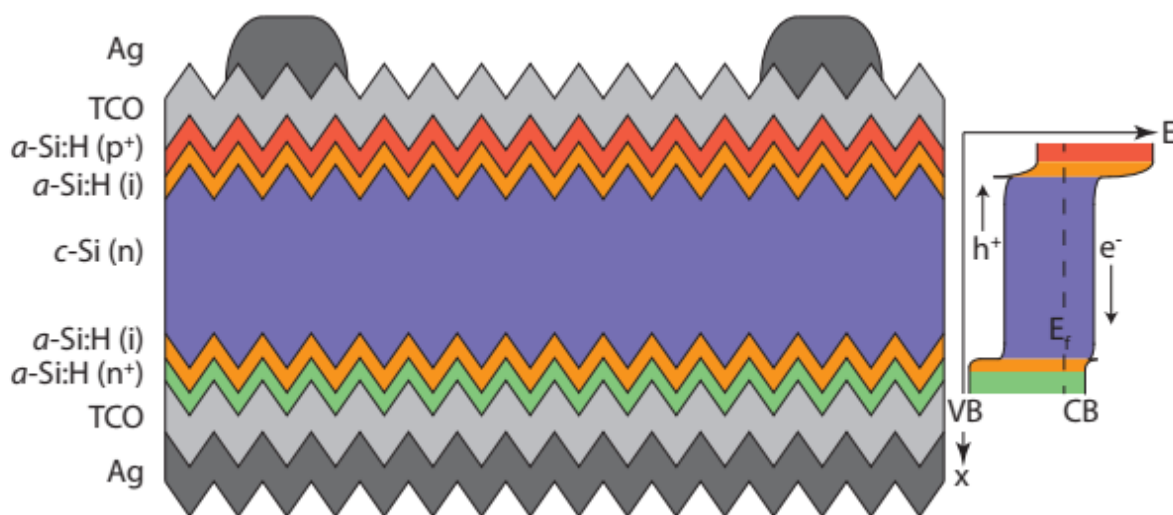


5-rasm. CdTe , CIGS va superstrate tipidagi yupqa plyonka Si yagona birikma quyosh elementlarining tipik tuzilmalari . (a) CdTe . (b) CIGS. (c) Si yupqa plyonka (hammasi masshtabli emas).

Uchinchi avlod (rivojlanayotgan va ilg'or) quyosh elementlari

Geteroo'tishli quyosh elementlari

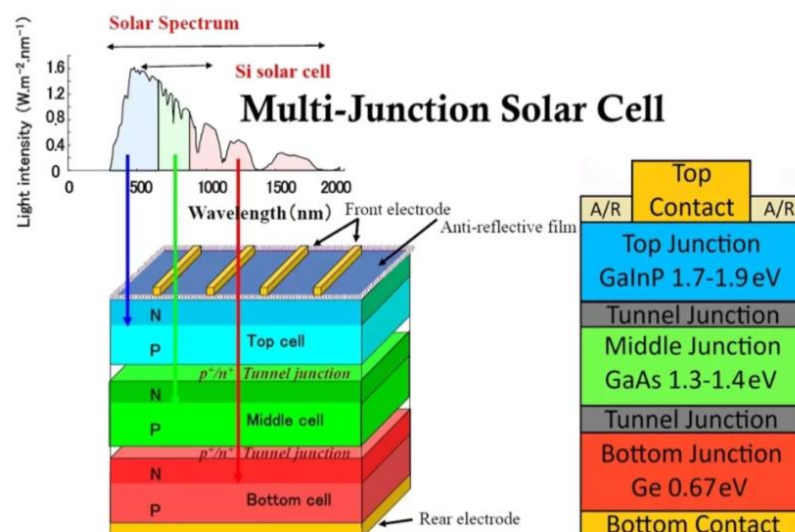
Geteroo'tishli (Heterojunction (ko'pincha "HJT" yoki "SHJ")) elementlari kristalli kremniy plastinalarini yupqa amorf kremniy qatlamlari bilan birlashtiradi va birikma hosil qiladi. 6-rasmda dagi sxema kremniyning getero-birikma elementini ko'rsatadi: n-tipli kristalli Si plastina o'ziga xos(doplanmagan tabiiy) va doplangan amorf -Si qatlamlari orasida joylashgan. Bu juda yaxshi sirt passivatsiyasi va yuqori ochiq kuchlanishga olib keladi. Amorf qatlamlar p-n interfeysiga o'xshash hetero-birikma hosil qiladi, shuning uchun elementda qo'zg'atilgan elektronlar samarali to'planishi mumkin. a-Si(amorf kremniy) qatlamlaridagi ajoyib passivatsiya heterojunction elementlariga juda yuqori ishlash imkonini beradi; Haqiqatan ham, HJT hozirda ommaviy ishlab chiqarilgan kremniy element samaradorligi bo'yicha jahon rekordiga ega. Amalda, heterounction modullari deyarli ikki tomonli (ular tabiiy ravishda orqa tomondan yerdan qaytgan yorug'linkni oz miqdorda ushlaydi) va past harorat koeffitsientini namoyish etadi. Ularning asosiy kamchiliklari murakkabroq ishlab chiqarishdir (a-Si ning vakuumli cho'kishi bunga misol bo'la oladi). Shunga qaramay, amaliyotga tadbiq qilsih ko'paydi: 2022–2024 yillarga kelib HJT an'anaviy quyosh elementi Al-BSFni ortda qoldirdi va hozirda yangi element ishlab chiqarishning ~10% ni tashkil etadi, bu uning yuqori samaradorlik potentsialini aks ettiradi.



6-rasm. Yaponiyaning Sanyo tomonidan birinchi marta ishlab chiqilgan SHJ quyosh batareyasining eskizi, shu jumladan uning tarmoqli diagrammasi. Plastina n -tipi. Tuzilma masshtabga tortilmagan

Ko'p o'tishli quyosh elementlari

Ko'p o'tishli (tandem) elementlar Quyosh nurlarining kengroq spektrni o'zlashtirish uchun turli xil taqiqlangan zonali ikki yoki undan ortiq fotovoltaiik o'tishlarini birlashtiradi. Odatiy yerda foydalaniladigan tandem kremniy ustiga keng taqiqlangan zonali elementni o'stirish yoki ketma-ket ulash orqali bir nechta III-V birikmali elementlardan foydalanish mumkin. Bu bir quyoshli yorug'lik ostida bitta o'tishli element uchun belgilangan nazariy $\sim 33,7\%$ samaradorlik chegarasini chetlab o'tadi. Laboratoriyada ko'p birikmali konsentrator elementlari Quyosh konsentratori ostida $>46\%$ ga erishdi. Biroq, ko'p o'tishli qurilmalar murakkab va qimmatga tushadi, shuning uchun ular asosan kosmosda va yuqori konsentratsiyali QE(PV)da qo'llaniladi. So'nggi paytlarda kremniy ustidagi perovskit tandemplari qiziqish uyg'otdi: laboratoriya prototiplari samaradorlik 30% dan oshadi, bu kelajakda yuqori samarali panellarga ishora qiladi. Xulosa qilib aytadigan bo'lsak, ko'p o'tish texnologiyasi juda yuqori samaradorlikni va'da qiladi, ammo hali ham tashqi ko'rinishdagi ilovalar paydo bo'ladi.

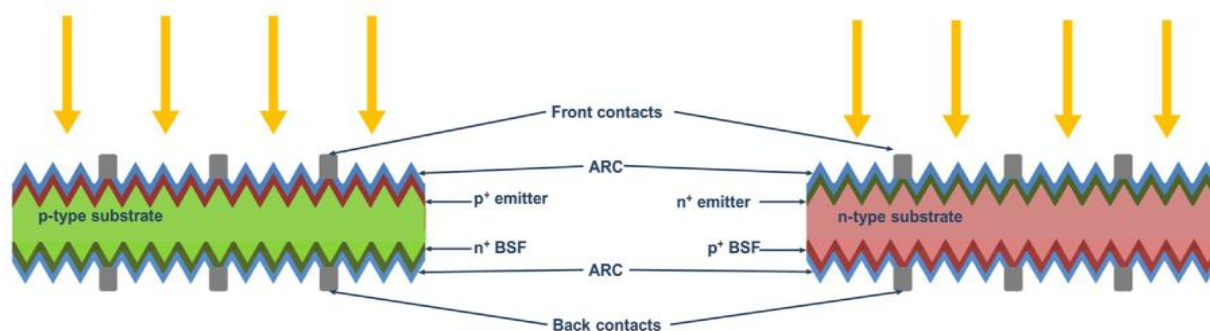


7-rasm. Ko'p o'tishli quyosh elementining tuzilishi.

<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/weisse2/>

Ikki tomonli quyosh elementlari

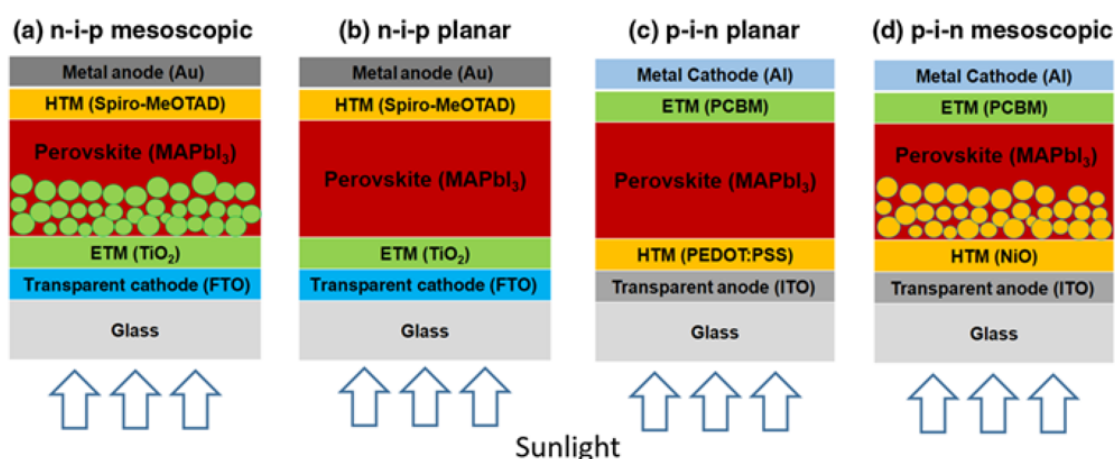
Ikki tomonli panellar old va orqa tomonlardagi yorug'likdan quvvat hosil qiladi . Ular yer tomonida qaytgan (albedo) yoki diffuz yorug'likdan foydalanadilar. Bu nurlar Quyosh panellarining orqa tomoniga tushadi. Masalan, yorqin qumli joylarda yoki panel ostidagi oq tomlari bo'lgan joyda Quyosh panellarining orqa tomonidan ishlab chiqarish an'anaviy panel(bir tomonli)ga nisbatan 10-30% ko'proq energiya qo'shishi mumkin. Ikki tomonli elementlar va modullar 20-asr oxirida ishlab chiqilgan, ammo 2010-yillarda keng miqyosda foydalanishga aylandi. Ular yassi o'rnatishga (yerga yoki tomga) juda mos keladi va chang va ifloslanishdan kamroq ta'sirlanishning amaliy foydasiga ega (chunki orqa tomon ham tok generatsiya qiladi). Joriy prognozlar shuni ko'rsatadiki, ikki tomonli dizaynlar 2030 yilgacha yuqori yillik ishlab chiqarish va o'rnatilishi universalligi tufayli PV ishlab chiqarishda yetakchilikni qo'lga kiritadi.



8-rasm. Standart n-tipli va p-tipli ikki tomonli kristalli kremniyli quyosh elementlarining kesma ko'rinishi.

Perovskit quyosh elementlari

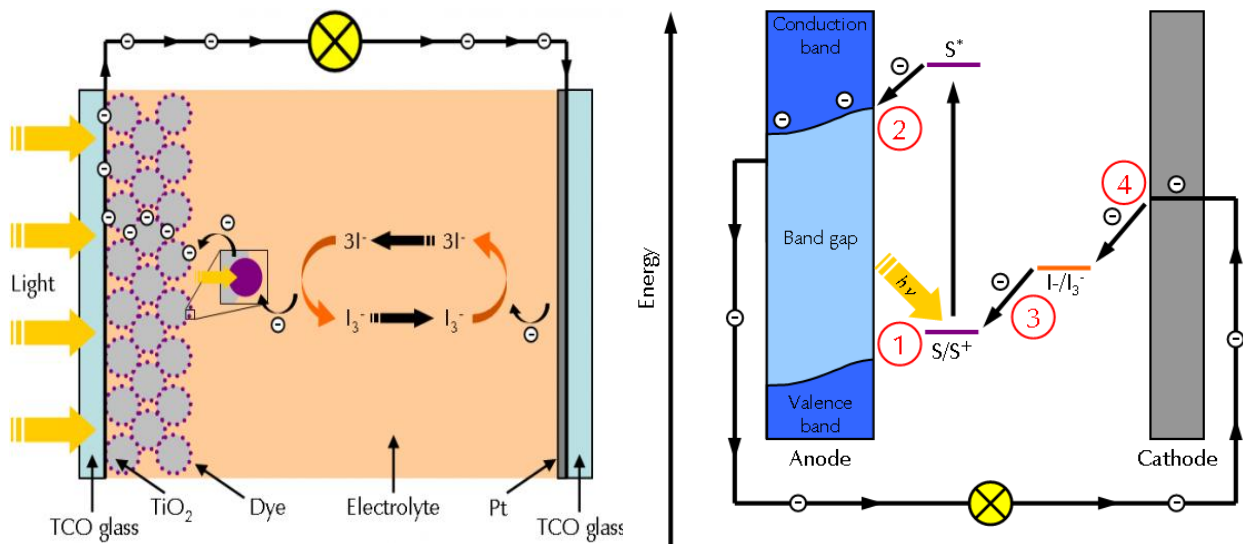
Perovskit quyosh elementlari perovskit kristalli tuzilishga ega bo'lgan yorug'likni yutuvchi qatlamdan foydalanadi (ko'pincha qo'rg'oshin-galoidli perovskitlar). Ushbu materiallar juda yuqori singdiruvchanlikka ega va juda yupqa plyonkalarda (~ 500 nm) quyosh nurlarining ko'p qismini yutish imkonini beradi. Mazkur turdagi Quyosh elementlari eritmadan past haroratda qayta ishlanishi mumkin, bu esa potentsial juda arzon ishlab chiqarishga olib keladi. Perovskitlarning ishlash ko'rsatkichlari keskin oshdi: bir o'tishli laboratoriya elementlari samaradorlikgi 25% dan oshadi. Bundan tashqari, perovskitlar tandem arxitekturasida kremniy yoki boshqa pastki elementlar bilan yaxshi birlashadi. Masalan, barcha perovskitli ikki terminalli tandemlar laboratoriyada $\sim 31,9\%$ samaradorlikka erishdi. Agar barqarorlik va toksiklik bilan bog'liq muammolarni (qo'rg'oshin tarkibi, namlikka sezgirlik) hal qilish mumkin bo'lsa, perovskit elementlari yupqa, yengil va hatto yarim shaffof panellarni taklif qilish orqali PVni inqilob qilishi mumkin.



9-rasm. Oddiy planar perovskit quyosh elementining sxematik tuzilishi (n– i –p konfiguratsiyasi)

Bo'yoqqa sezgir bo'lgan quyosh elementlari

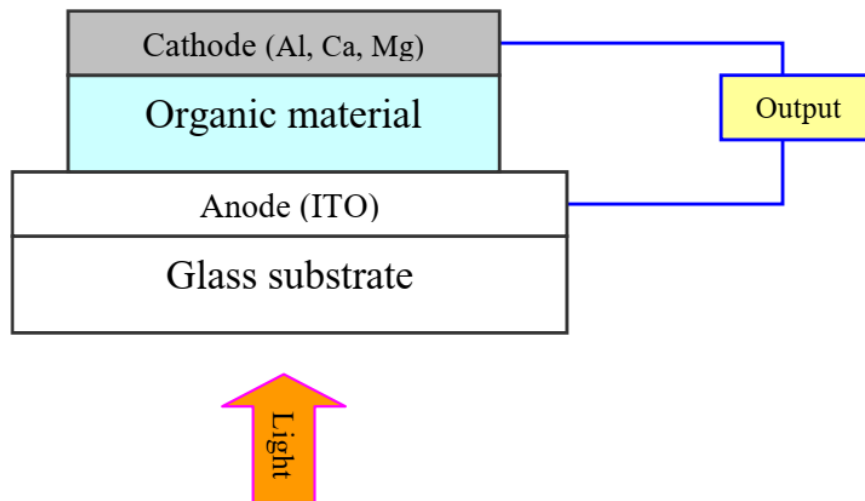
Bo'yoqqa sezgir quyosh elementlari (DSSC yoki Grätzel elementlari) yorug'likni yutuvchi bo'yoq bilan qoplangan porali yarimo'tkazgichga (odatda TiO_2) asoslangan yupqa plyonkali PV turidir. Quyosh nurlari bo'yoq molekulalarini qo'zg'atadi, elektronlarni yarimo'tkazgichga kiritadi, bunda sxema suyuq (yoki qattiq) elektrolit bilan tok hosil bo'ladi. DSSC-lar arzon materiallar va oddiy ishlab chiqarish (ko'pincha bosib chiqarish / qoplama yordamida) bilan ajralib turadi. Ular yarim shaffof va rang-barang bo'lishi mumkin, bino bilan integratsiya uchun amaliy tatbiqi mos keladi. Biroq, odatdagi samaradorlik ($\sim 5\text{-}10\%$) kremniydan ancha past. Asosiy qiyinchiliklarga suyuq elektrolitning uzoq muddatli barqarorligi va qimmat katalizatorlardan (masalan, platina) foydalanish kiradi. Ushbu muammolarga qaramay, DSSC muhim tadqiqot sohasi bo'lib qolmoqda, ayniqsa yopiq yoki kam yorug'likli muhitlar uchun ularning tarqoq yorug'lik reaksiyasi qulay bo'lishi mumkin.



10-rasm. DSSC ning asosiy tuzilishi va uning ishlash mexanizmi tasviri

Organik quyosh elementlari

Organik quyosh elementlari (polimer yoki plastik quyosh elementlari deb ham ataladi) yarimo'tkazgich sifatida uglerodga asoslangan molekula yoki polimerlardan foydalanadi. Ushbu organik yarimo'tkazgichlar moslashuvchan asos material(substrat)larda eritmada (inkjet yoki roll-to-roll chop etish) qayta ishlanishi mumkin. Bu juda yengil va mos modullarni beradi. Taqiqlangan zona kengligi kimyoviy o'zgartirilish (molekulyar muhandislik orqali) orqali turli rangli yoki yarim shaffof elementlarni yaratishga yo'l ochishi mumkin. Organik moddalarning yuqori yutilish koeffitsienti yorug'likni yutish uchun faqat 100 va bir necha 100 nanometrli materiallar kerakligini anglatadi. Kompramis shundaki, organik PV hozirda past samaradorlik va barqarorlikka ega: odatiy laboratoriya qurilmalari hali ham 10-15% oralig'ida (garchi samaradorlik yaqinda 19% ga yaqinlashgan bo'lsa ham). Ular quyosh nuri ostida ham tezroq buziladi. Shunga qaramay, organik elementlar moslashuvchanlik va arzon narx past samaradorlikdan ustun turadigan portativ yoki ichki quvvatda foydalanish o'rnini topishi mumkin.



11-rasm. Organik quyosh elementlari OSC qurilmasining prototip tuzilishi

Shaffof quyosh elementlari

Shaffof fotovoltaiklar quyosh elementlarini derazalar, displeylar va boshqa sirtlarga ko'rinadigan yorug'likni o'tkazish orqali birlashtirishga qaratilgan. Yondashuvlardan biri (MIT uslubi) element ko'rinadigan yorug'likdan o'tkazib, faqat ko'rinmaydigan to'lqin uzunliklarini (UV va IQ) yutishdir. Misol uchun, tadqiqotchilar UV / IR nurlari yutuvchi, lekin ko'zga aniq ko'rinadigan qatlamlar bilan qoplangan shisha yaratishdi(12-rasm). Boshqa yondashuv neytral rangga erishish uchun maxsus mikro-optikaga ega bo'lgan juda yupqa yoki naqshli kremniy elementlaridan foydalanadi. So'nggi yutuqlar taxminan 20% ko'rinadigan shaffoflik va $\approx 15-16\%$ konversiya samaradorligi bilan *rangsiz shaffof modullarni* ishlab chiqardi. Bunday shaffof panellar aqlli oynalar yoki mobil qurilma ekranlari bo'lib xizmat qilishi mumkin, ular ko'rinishni qoraytirmasdan quvvat ishlab chiqaradi. Biroq, asosiy kompromis saqlanib qolmoqda: yuqori shaffoflik odatda past samaradorlikni anglatadi, shuning uchun optimallashtirish davom etadi.



12-rasm Mexanik egiluvchan organik shaffof quyosh elementlari

Shamol Energiya

Shamol energiyasi turbinalar yordamida harakatlanuvchi havodan kinetik energiya oladi. Zamonaviy shamol turbinalari (uzunligi 100+ m gacha) shamol tezligini minimal chiqindilar bilan elektr energiyasiga aylantiradi. Shamol fermalari - quruqlikda va dengizda - tez sur'atlar bilan kengaydi. 2024 yilga kelib global o'rnatilgan shamol quvvati 800 GVt dan oshib, 2500 TVt/soatdan ortiq (jahon elektr energiyasining qariyb 8 foizini) ishlab chiqaradi. Shamol energiyasi qazib olinadigan yoqilg'ilarga nisbatan juda past operatsion xarajat va kichik uglerod iziga ega. Turbinaning yangi konstruksiyalari (yengilroq pichoqlar, balandroq minoralar) va dengizga o'rnatilishi (offshore) quvvat omillarini yaxshilashda davom etmoqda. Boshqa tomondan, shamol tabiatan o'zgaruvchan va odatda ta'minotni to'g'rilash uchun zaxira yoki saqlashni talab qiladi. Shamollar kuchliroq va barqarorroq bo'lgan degizda o'rnatish, o'rnatishning yuqori xarajatlariga qaramay, asosiy e'tibor qaratilgan. Umuman olganda, shamol quyosh energiyasini to'ldiruvchi etuk, arzon energiya texnologiyasidir.



13-rasm

Quyosh fermasiga texnik xizmat ko'rsatish va quyoshni kuzatish

Katta quyosh fermalari ishlashni davom ettirish uchun muntazam parvarishlashni talab qiladi. Panellar toza bo'lishi kerak (chang, loy, qorlar ishlab chiqarishni kamaytirishi mumkin. Shuning uchun ba'zi o'rnatishlarda avtomatlashtirilgan yuvish vositalari yoki davriy qo'lda tozalash ishlatiladi. Eng muhimi, zamonaviy PV fermalarida murakkab monitoring (SCADA) va nazorat qilish tizimlari qo'llaniladi. Tarqalgan SCADA tarmog'i sayt bo'ylab invertorlar, sensorlar va hatto ikki o'qli trekerlarni bog'laydi. Real vaqtdagi ma'lumotlar xatolarni tezda aniqlash va ishlashni optimallashtirish imkonini beradi. Ikki o'qli quyosh kuzatuvchilari kun va yil davomida panellarning egilishi va azimutini sozlab, ularni quyosh tomon yo'naltiradi. Ushbu kuzatuv yillik energiya ishlab chiqarishni

barqaror o'rnatishlarga nisbatan 15-30% ga oshirishi mumkin (ayniqsa, yuqori kenglikdagi yoki ochiq osmonli joylarda). Xulosa qilib aytganda, toza panellar, aqlli monitoring/IT va dinamik quyosh kuzatuvi birgalikda PV tizimlarining energiya chiqishi va ishonchliligini oshiradi.



14-rasm. SCADA kompyuteri

Ta'lim maqsadlari va kutilayotgan natijalar

Ushbu kurs oxirida talabalardan quyidagilar kutiladi:

- Asosiy fotovoltaik va shamol energiyasi tizimlarining fizik printsiplari va materialshunosligini tushunish.
- Muqobil energiya konvertatsiyasiga asoslangan innovatsion qurilmalarni tahlil qilish, modellashtirish va loyihalash qobiliyatiga ega bo'lish.
- Turli quyosh va shamol texnologiyalarining samaradorligi, narxi va atrof-muhitga ta'sirini baholash.
- Qayta tiklanadigan qurilmalarning ishlashi va texnik xizmat ko'rsatishini yaxshilash uchun avtomatlashtirish va raqamli boshqaruv (SCADA) bo'yicha bilimlarni qo'llash.
- Ijodkorlikni, barqarorlikni va texnologik innovatsiyalarni rivojlantiruvchi tadqiqotga yo'naltirilgan fikrlashni rivojlantirish.

Kursdan nima o'rganiladi

Kurs ma'ruzalar, amaliy hisob kitoblar, laboratoriya tajribalari, kompyuter simulyatsiyalari va loyihaga asoslangan topshiriqlarni birlashtirib, talabalarni nazariy bilimlarni haqiqiy dizayn yechimlariga aylantirishga undaydi. Fizika, materialshunoslik, elektronika va atrof-muhit muhandisligi fanlararo integratsiyasi

orqali ushbu dastur bitiruvchilarni dekarbonizatsiya va energiya mustaqilligi bo'yicha global sa'y-harakatlarda ishtirok etishga tayyorlaydi.

Xulosa

Barqaror energiya kelajagiga o'tish nafaqat ilmiy kashfiyotlarga, balki yangi texnik ishlanmalarning aqlli dizayniga ham tayanadi. Muqobil energiya tizimlarini - yupqa plyonkali va perovskit quyosh elementlaridan tortib yirik shamol turbinalariga qadar - o'rganish orqali talabalar mavjud texnologiyalar haqida to'liq tushunchaga ega bo'lishadi va ularni rivojlantirish uchun zarur bo'lgan innovatsion fikrlash qobiliyatiga ega bo'ladilar. Ushbu kurs muhandislar va tadqiqotchilarning yangi avlodini qayta tiklanadigan energiya g'oyalarini amaliy, samarali va ijtimoiy foydali yechimlarga aylantirishga ilhomlantirishga qaratilgan.

I bob

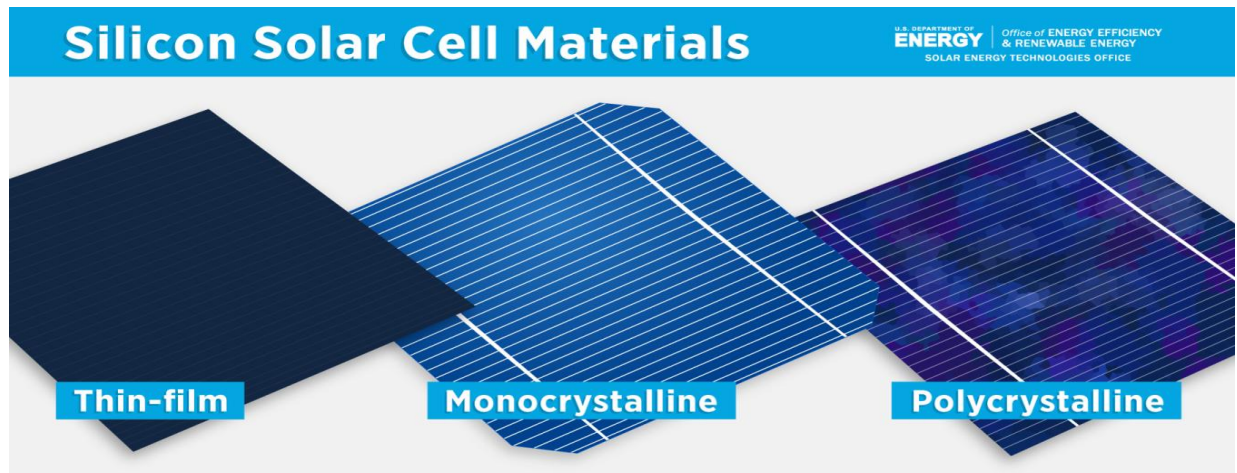
1. YUPQA QATLAMLI QUYOSH ELEMENTLARI

Yupqa plyonkali quyosh elementlari bir yoki bir nechta **nanometr**dan **mikrometr**gacha bo'lgan fotovoltaik material qatlamlarini asos materialga (shisha, metall yoki plastmassa) joylashtirish orqali amalga oshiriladi. Bu qalinligi $\sim 100\text{--}200$ mikron bo'lgan birinchi avlod plastinalaridan (kristalli Si) farq qiladi. Yupqa plyonkalar (TF) ancha kam material ishlatadi, moslashuvchan yoki engil bo'lishi mumkin va yangi shakl imkoniyatlariga (masalan, binoga o'rnatilgan PV, moslashuvchan modullar) ega [1] [2]. Asosiy yupqa plyonka texnologiyalariga amorf kremniy (a-Si:H), kadmii tellurid (CdTe), mis-indiy-galiy diselenidi (CIGS) va turli xil materiallar (perovskitlar, organik moddalar, bo'yoqqa sezgir elementlar(DSSC) va boshqalar) kiradi. Yupqa plyonkalar odatda "ikkinchi avlod" PV deb tasniflanadi, yangi materiallar (perovskit, kvant nuqta, organik) uchinchi avlod paydo bo'lgan PV sifatida [1]. Yupqa qatlamli elementlarning kristalli Si ga nisbatan asosiy afzalliklari arzon materiallardan foydalanish, potentsial tan narxi arzonroq, moslashuvchanlik, yengil vaznli va katta maydonda ishlab chiqarishi soddaligi kabilardir [1] [3]. Biroq, yupqa plyonkalarining ko'p turlari plastina elementlariga qaraganda tarixan pastroq samaradorlikka va qisqa umrga ega, bu ularning bozor ulushini cheklaydi [1].

Rivojlanish Tarixi

Yupqa plyonkali PV bo'yicha tadqiqotlar 1970-yillarda boshlangan. 1970 yilda Ioffe institutida (Rossiya) Alferov jamoasi birinchi GaAs quyosh batareyalarini yaratdi (keyinchalik Nobel mukofotiga sazovor bo'lgan ish) [1]. 1972 yilda Karl Böer Delaverdagi Energiyani aylantirish institutini $\text{Cu}_2\text{S} / \text{CdS}$ va Zn_3P_2 va amorf kremniy (a-Si) plyonkalarini o'rganish uchun tashkil qildi [1]. Dastlabki samaradorlik ortishi kuzatildi: 1980 yilga kelib $\text{Cu}_2\text{S} / \text{CdS} \sim 10\%$ ga yetdi [1]. 1986 yilda ARCO Solar birinchi tijorat yupqa plyonkali a-Si modulini (G-4000, ~ 4 Vt) taqdim etdi [1]. 1990-yillarga kelib, bir nechta kompaniyalar va laboratoriyalar yupqa plyonka samaradorligini oshirdi: masalan, Univda $>15\%$ a-Si . Janubiy Florida (1992) [1] va 3-birikma GaAs elementi 32% ga yetdi (1999) [1]. Organik (polimerik) yupqa qatlamli elementlar 2001 yilda (Linz) paydo bo'lgan [1]. 2009 yilda tadqiqotchilar Univ. Tokioda birinchi perovskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) yupqa plyonkali element ($\approx 3\%$ PCE) yaratildi [1]. 2010-yillarda kvant-nuqta va perovskit elementlari $>20\%$ samaradorlikka ko'tarildi (masalan, 2020-yillarning boshiga kelib perovskitlar $>25\%$) [2]. GaAs yupqa plyonkasi (III-V) davomida rekord samaradorlikni o'rnatdi (bir tutashuvli GaAs uchun $29,1\%$ gacha [1]).

Yupqa plyonkali quyosh elementlari

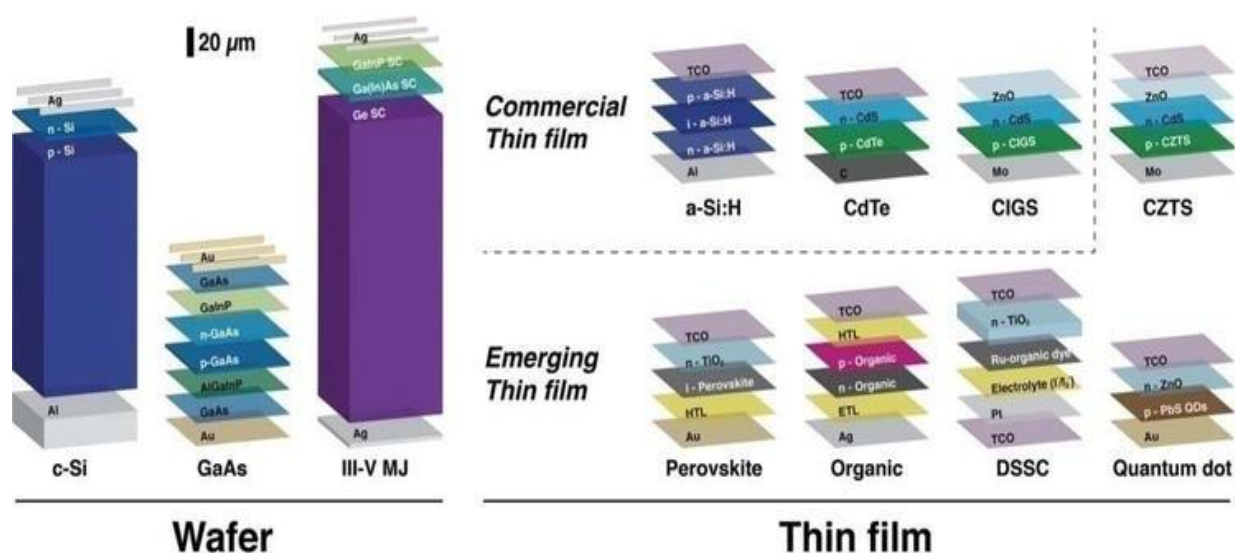


1-Rasm. Quyosh batareyalarining turlari

Fotovoltaik texnologiyalar: plastina(wafer) asosidagi elementlar va yupqa plyonkali elementlar.

Hozirgi PV texnologiyalarini ikkita toifaga bo'lish mumkin: **1. Plastina asosidagi Quyosh elementlari.** **2. Yupqa plyonkali Quyosh elementlari** (2- rasm). Plastina asosidagi elementlar yarim o'tkazgichli plastinalarda ishlab chiqariladi va ularni qo'shimcha asos materialsiz ishlatish mumkin, modullar esa mexanik barqarorlikni oshirish va ko'proq himoya qilish uchun odatda shisha bilan qoplangan. Yupqa plyonkali elementlar yarim o'tkazgich qatlamlardan iborat bo'lib, ular plastmassa, shisha yoki metall kabi turli asos materiallarga yotqizilishi mumkin. Yupqa plyonkalarni tijorat va rivojlanayotgan yupqa plyonka texnologiyalariga batafsil bo'linish strukturasi 2-rasmda keltirilgan .

Bozorda uchta asosiy plastinaga asoslangan texnologiya mavjud: 1. Kristalli kremniy (c-Si), 2. Galliy arsenid (GaAs) va 3. III-V ko'p o'tishli (MJ) elementlar. Ushbu turlar orasida c-Si PVlar hozirgi global ishlab chiqarish quvvatining ~90% ni egallagan va barcha PV texnologiyalari ichida eng etuk hisoblanadi. Silikon quyosh elementlari bitta kristalli (sc -Si) yoki ko'p kristalli (mc-Si) bo'linadi .



2-rasm. Plastina va Yupqa plyonka asosidagi texnologiyalarga ajratilgan tipik Quyosh elementlari(PV) tuzilmalari. Birlamchi yutuvchi qatlamlari oq rangda etiketlanadi va qalinligi shkala bo'yicha ko'rsatilgan (Qirolik kimyo jamiyati). <http://xlink.rsc.org/?DOI=C4EE04073B>

PV asoslari: samaradorlik va I-V xususiyatlari

Quyosh elementining samaradorligi η - elektr energiyasining quyosh energiyasining tushishiga nisbati. I-V egri chizig'idagi asosiy parametrlar qisqa tutashuv oqimi I_{SC} ($V = 0$ da), ochiq tutashuv kuchlanishi V_{OC} ($I = 0$ da) va maksimal quvvat nuqtasi (V_{max} , I_{max}). To'ldirish omili [16]:

$$FF = (V_m \cdot I_m) / (V_{OC} \cdot I_{SC}) \quad (1)$$

sifatida aniqlanadi. Chiqish samaradorligi esa quydagicha aniqlanadi:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_{in}} \quad (2).$$

Bu erda P_{in} - nurlanish vaqtining element maydoni (standart sinov shartlari). Shunday qilib, agar V_{OC} , I_{SC} va FF ma'lum bo'lsa, η ni hisoblash mumkin [16]. Amalda, turli xil quyosh elementi texnologiyalarining I-V egri chiziqlari (masalan, yupqa plyonka va kristall) o'xshash shaklga ega, ammo parametr qiymatlari boshqacha.

Yupqa plyonkali elementlar odatda kristalli Si ga qaraganda kamroq ochiq elektron kuchlanish va tokka ega, chunki yupqaroq yutuvchi qatlamlar kamroq kuchlanish yoki kamroq tok hosil qiladi (ayniqsa, uzoq to'liqinli yorug'lik o'tishi mumkin). Ularning to'ldirish omillari ham biroz pastroq bo'lishi mumkin. Natijada, laboratoriya elementlarining odatdagi samaradorligi pastroq (ko'pincha yupqa plyonkalar uchun 10-20% va kristalli Si uchun 20-27%). Masalan, eng yaxshi laboratoriya GaAs yupqa plyonkali element 29,1% ga yetadi [1] (har qanday c-Si

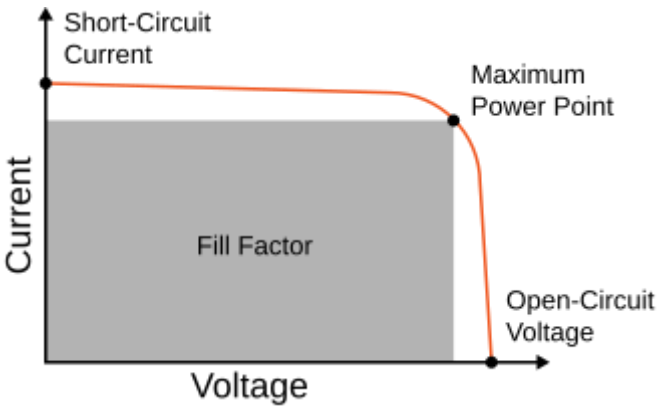
dan yuqori, 26,7%), lekin III-V tan narxi juda yuqori. Odatda, rekord samaradorlik: mono-Si ~26,7%, multi-Si ~23%, CIGS ~23,6% , CdTe ~22%, perovskit ~25,7% va a-Si ~13% [2],[5],[6] . (1-jadvalga qarang.) O'rnatilgan modullarda rekord darajadagi tijorat samaradorligi biroz pastroq (masalan, eng yaxshi Si modullari uchun 25,4% va CdTe modullari uchun ~19,9% [5]). NREL tomonidan ishlab chiqilgan global samaradorlik jadvali bu ierarxiyani tasdiqlaydi [1],[5] .

Jadval 1. Har xil quyosh elementi texnologiyalarining rekord samaradorligi [1],[2],[5],[6] . (Bular tadqiqot-element rekordlari, tijorat modullari emas.)

Quyosh element turi	Tasdiqlangan eng yuqori samaradorlik (%)	Manba
Kristalli Si (mono)	26,7% [2]	NREL ma'lumotlari [2]
GaAs (III-V yupqa plyonka)	29,1% [1]	(bir tutashgan)
CIGS (mis-indiy-galyum-selenid)	~23,6% [6]	(2024 yil rekord da'vo)
CdTe (kadmiy tellurid)	~19,9% [5]	(modul yozuvi)
Perovskit (bir tutashgan)	25,7% [2]	(2022 yil tadqiqoti)

Yupqa plyonkalar odatda kristalli elementlarga qaraganda past samaradorlik va katta harorat koeffitsientlariga ega [1] , lekin ular oddiyroq ishlab chiqarish va engilroq / moslashuvchan asos materiallardan foydalanishlari mumkin. Qanday bo'lmasin, samaradorlikni taqqoslashda element va modul (modul har doim yo'qotishlar tufayli past) va ommaviy ishlab chiqarishni qayd etishi kerak. 2023 yil holatiga ko'ra, CdTe yupqa plyonkalari (AQShda ustun bo'lgan yupqa plyonkali PV) AQSh PV qurilmalarining ~21% ni tashkil qiladi [7] , kristalli kremniy esa hali ham global bozorning ~80-90% ni egallaydi.

I-V (tok-kuchlanish) tipik quyosh batareyasi egri tasvirlangan (3-rasmga qarang).



3-rasm. I-V (tok-kuchlanish) tipik quyosh batareyasining egri chizig'i tasviri. (Tasvir: Fourmatter , CC BY-SA 4.0)

3-rasm : Quyosh elementining odatiy I-V egri chizig'i (sxematik). Qisqa tutashuv oqimi I_{SC} (vertikal o'q bo'yicha), ochiq zanjirli kuchlanish V_{OC} (gorizontal o'q bo'yicha), maksimal quvvat nuqtasi (V_m , I_m) va to'ldirish omili (FF) elementning quvvatini va samaradorligini aniqlaydi.

Tayyorlash texnologiyasi va materiallar

Yupqa plyonkali quyosh elementlari odatda yarimo'tkazgich qatlamlarini asos materialga joylashtirish orqali ishlab chiqariladi. Ikkita keng yondashuv mavjud: vakuumga asoslangan cho'kma va eritma (ho'l) cho'kma [2].

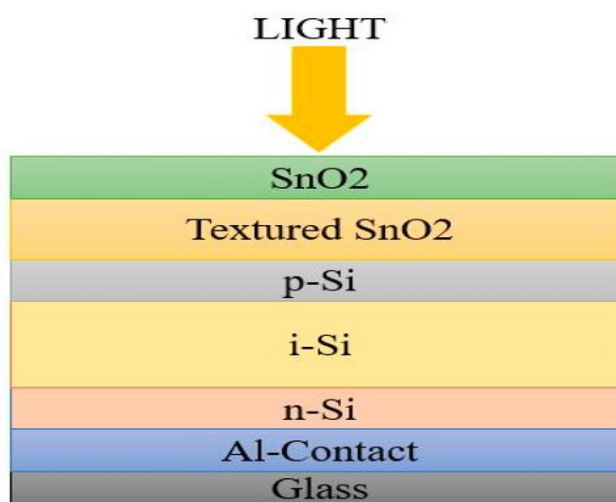
- **VakuumpVD usullari** : Bularga purkash, bug'lanish, molekulyar nur epitaksisi (MBE) va impulsli lazer yotqizish kiradi. Misol uchun, CIGS yutuvchi qatlamlari ko'pincha Cu, In, Ga, Se ning birgalikda bug'lanishi yoki metall prekursorini sepib, keyin selenizatsiya yo'li bilan tayyorlanadi [6]. CdTe qatlamlari odatda bug 'tashuvi yoki o'tkazuvchan oynaga purkash yo'li bilan yotqiziladi [7]. Ushbu vakuum usullari yuqori sifatli plyonkalarni beradi, ammo qimmat uskunalarni talab qiladi.

- **Yechimga asoslangan usullar** : Bularga spin-qoplama, shifokor-blading, spray-coating sepish bilan qoplash, kimyoviy vannani cho'ktirish (CBD), elektrodepozitsiya va chop etish kiradi. Masalan, perovskit qatlamlari odatda eritmadan spin-qoplama usulida olinadi; CdS bufer qatlamlari CBD tomonidan ishlab chiqariladi; organik moddalar ko'pincha chop etiladi. Bu usullar sodda va arzonroq, lekin tekis taqsimlanish yoki barqarorlik kabi muammolar yuzaga chiqishi mumkin [2].

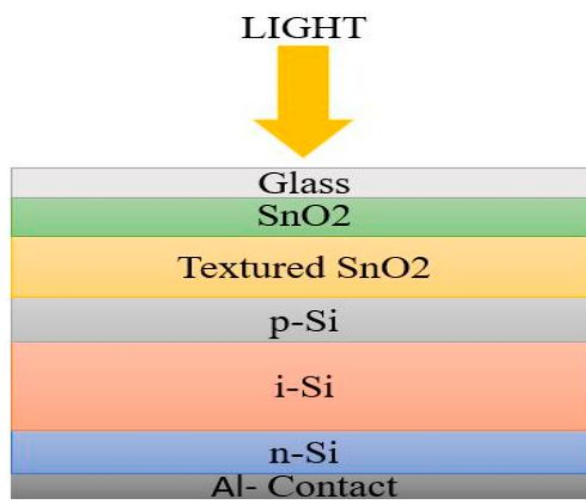
Oddiy yupqa plyonkali qatlamda ketma-ketlik quyidagicha bo'ladi: asos material → orqa kontakt (metall yoki TCO) → yutuvchi qatlam (yarim o'tkazgich) → shaffof oldingi kontakt (TCO) [6]. Shisha tagliklar keng tarqalgan (u arzon va yuqori haroratga chiday oladi), ammo egiluvchan modullar uchun moslashuvchan asos materiallar (metall folga yoki polimid) ham ishlatiladi. Har bir material cheklovlarni qo'yadi: masalan, CIGS foydali natriy bilan ta'minlash uchun ko'pincha sodali ohak oynasiga yotqiziladi, ba'zi GaAs yoki organik elementlar plastikdan foydalanishi mumkin.

Amorf va mikrokristalli kremniy (a-Si, m c-Si)

Amorf kremniy (a-Si:H) birinchi amaliy yupqa plyonkali PV materiallaridan biri edi. Bu oddiygina buzuq atom tuzilishiga ega kremniy bo'lib, ko'pincha nuqsonlarni passivlashtirish uchun **gidrogenlanadi** (a-Si:H) . Gidrogenatsiya 1969 yilda (Chittick va boshqalar) osilgan bog'lanishlarni kamaytirish uchun kiritilgan [3] . a-Si:H odatda a p– i –n birikmasini hosil qiladi: yupqa p-tipli qatlam, ichki yutuvchi qatlam (~300 nm qalinlikdagi) va n-tipli oyna qatlami, barchasi shaffof o'tkazuvchan oksid (TCO) kontaktlari orasiga biriktirilgan [3] . **4-rasm** va **5-rasmdagi** sxematik diagrammalar superstrat va asos material konfiguratsiyasidagi a-Si SC ning oddiy arxitekturasini ifodalaydi.



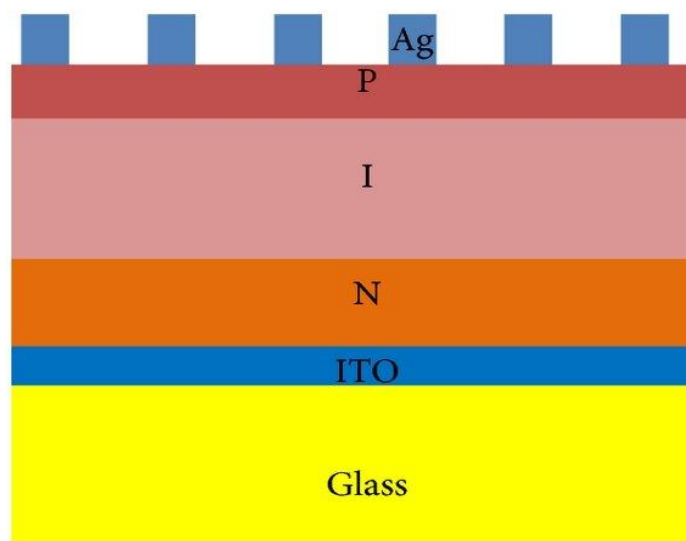
4-rasm. Superstrat konfiguratsiya.
(<https://doi.org/10.3390/en15228688>
)



5-Rasm. Asos material konfiguratsiya.
(<https://doi.org/10.3390/en15228688>)

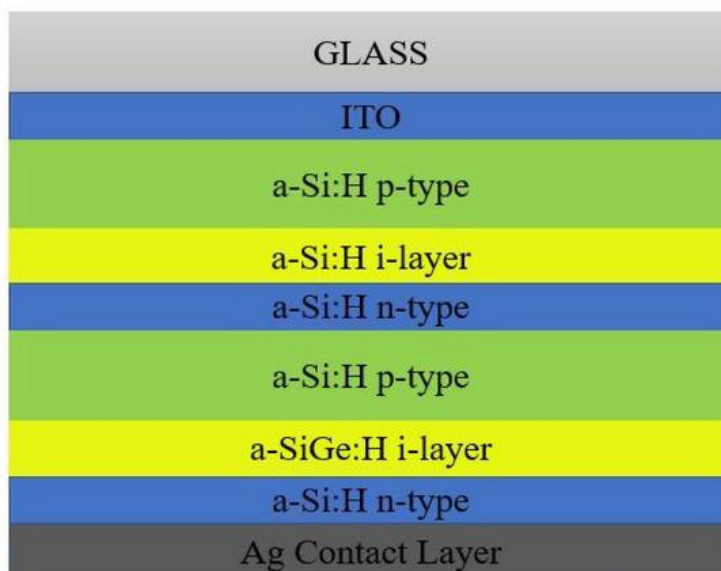
Afzalliklari: a-Si elementlari juda yupqa (<1 μm) va egiluvchan asos materiallarda tayyorlanishi mumkin, shuning uchun ular yengil va arzonroq material narxiga ega. Ular, shuningdek, nisbatan past ishlab chiqarish haroratiga ega. Qalinligi uchun yorug'lik singishi yuqori (amorf Si yuqori tarmoqli oralig'iga ega ~1,7 eV, ko'k nurni yaxshi yutadi) [3] .

Shu bilan bir qatorda, “mikromorf” elementi uzun to‘lqin uzunliklarini yutish uchun a-Si ni $\mu\text{c-Si}$ (mikrokristalli kremniy) ustiga to‘playdi (6-rasm).



6-rasm. $\mu\text{c-Si:H}$ yupqa plyonkali quyosh batareyasining sxematik ko'rinishi.
(DOI: 10.1155/2015/327596)

Kamchiliklar: a-Si Staebler - Wronski effektini namoyish etadi: yorug'lik ta'sirida samaradorlik pasayadi (metastabil nuqsonlarni yaratadi). Bundan tashqari, uning taqiqlangan zona oralig'i kattaroq, shuning uchun kamroq infraqizil nuri yutiladi. Odatda bitta ulanishli a-Si elementlari laboratoriya sharoitida $\sim 10\%$ samaradorlikka erishadi [3] , ishlab chiqarish modullari esa $\sim 6\text{--}8\%$ ni tashkil qiladi. Tadqiqot kombinatsiyalari (a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ tandemi, Ge yoki uglerod qo'shish) (7-rasm) bu muammoni bartaraf etishga intiladi [3] . 1-jadvalda a-Si rekordi ($\sim 13\%$, bu ko'p o'tishli element) c-Si ga nisbatan ko'rsatilgan.



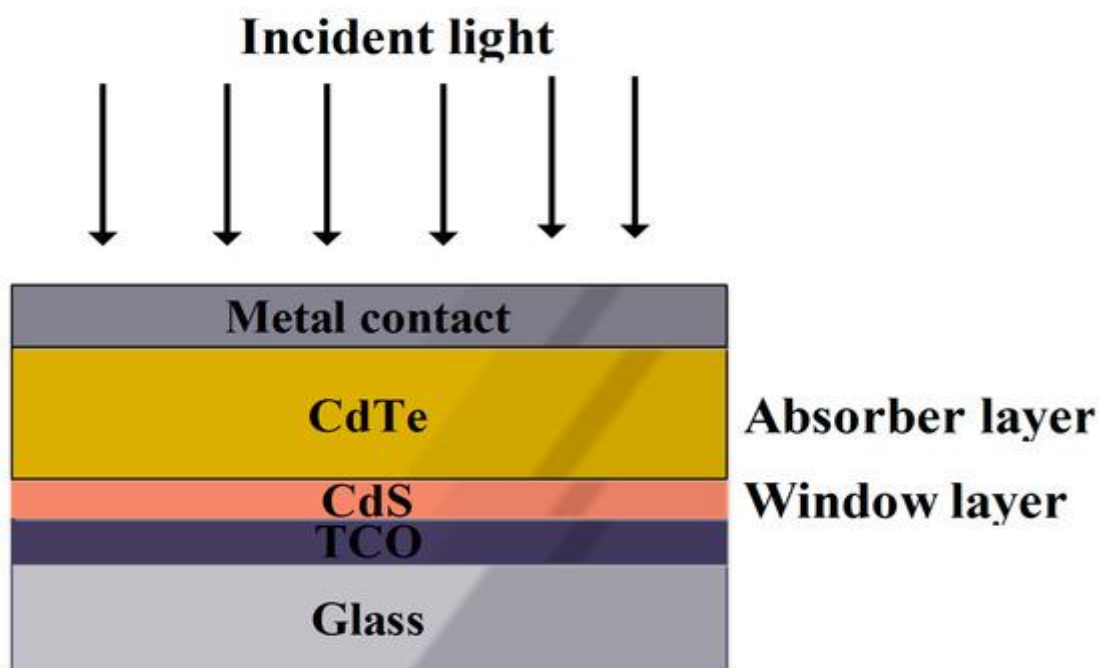
7-Rasm. a-Si:H&a-SiGe:H heterobirikmasi QE. (DOI: 10.1155/2015/327596)

Tayyorlash texnologiyasi: a-Si plyonkalari odatda past haroratlarda ($\sim 200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$) shisha/TCO [3] ga plazma kuchaytirilgan kimyoviy bug 'cho'ktirish (PECVD) orqali yotqiziladi . Odatiy element to'plami shisha/TCO/p-a-SiH/i-a-SiH/n-a-SiH/TCO (yoki metall) dir [3]. Elementlar "superstrat" (yorug'lik shisha

orqali kiradi) yoki "asos material" (yorug'lik plyonka tomondan kiradi) konfiguratsiyalarida tayyorlanishi mumkin [2]. Mikrokrystalli yoki polimorf qatlamlarni qo'shish ($\mu\text{c-Si}$, pm-Si) yutilishni uzaytirishi mumkin. Si plastinalaridagi geteroo'tishli quyosh elementlari (HJT) kristalli Si ustidagi a-Si qatlamlaridan foydalanadi; bular quyida muhokama qilinadi.

Kadmiy tellurid (CdTe)

CdTe eng tijoriy yupqa plyonkali PV hisoblanadi (Birinchi Quyosh va boshqalar). Birinchi CdTe elementi 1969 yilda ishlab chiqarilgan [7] va 1980-yillarda tadqiqotlar $>10\%$ ga yetdi [7] . Bugungi kunda CdTe modullari $\sim 19\text{--}20\%$ samaradorlikka ega [5] . CdTe to'g'ridan-to'g'ri taqiqlangan zonaga ega $\sim 1,48\text{ eV}$, yagona p-n o'tishli uchun ideal va juda yuqori yutulish koeffitsientiga ega. Faqat $\sim 2\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$ qalinlikdagi CdTe qatlami quyosh nurlarining ko'p qismini o'zlashtira oladi [7] .



8-rasm. Oddiy CdTe QE ning exematik ko'rinishi .
(<https://doi.org/10.3390/en15228688>)

Tuzilishi: Odatda CdTe modullari shisha/Mo orqa kontakt/ CdTe yutuvchi qatlam/ CdS bufer/TCO old-kontaktidan foydalanadi [6][7] (8-rasm). Ishlab chiqarish ko'pincha elementlarni aniqlash uchun ketma-ket lazer skripsiysi bilan CdTe ni asos materialga yaqin masofada sublimatsiyasi yoki bug 'tashilishini kabilarni o'z ichiga oladi[7] . Yupqa CdS qatlami ($\sim 100\text{ nm}$) (kimyoviy vanna orqali) n-tipli oyna/bufer sifatida, so'ngra oldingi kontakt sifatida shaffof TCO (ZnO:Al kabi) yotqiziladi[6][7]. Kadmiy ta'sir qilish muammo tug'diradi, shuning uchun ba'zi jarayonlar CdS buferini yo'q qiladi (o'rniga ZnMgO oynasidan foydalaniladi).

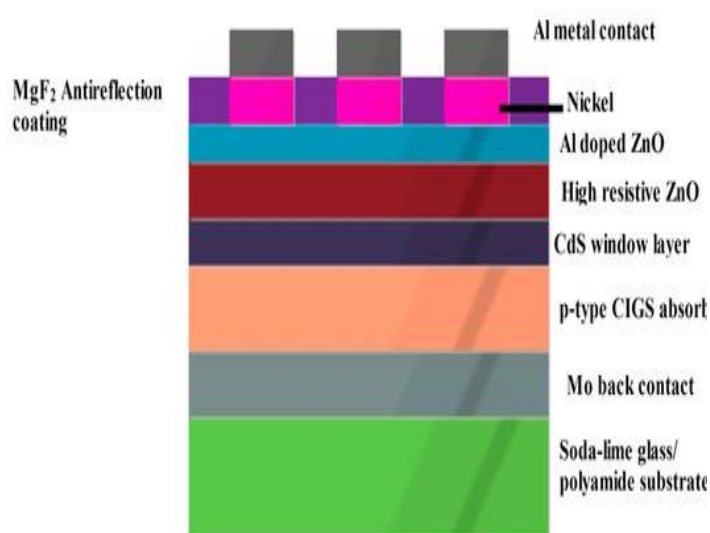
Ishlash: CdTe modullari Si elementlariga qaraganda pastroq V_{OC} ($\sim 800\text{ mV}$) ga ega, ammo kuchli yutilish tufayli J_{SC} yuqori. Ularning har bir yuza uchun ishlab chiqarish narxi past. Jahon rekordi bo'lgan CdTe element samaradorligi $\sim 22,1\%$ (kichik

element) [5] , ommaviy ishlab chiqarish modullari esa ~19-20% ga etadi [5] . CdTe PV AQSHda foydalanish miqyosda ustunlik qiladi (masalan, 2021 yilda yangi AQSh PV ning ~29% CdTe edi) [1] .

Mis-indiy-galiy selenid (CIGS)

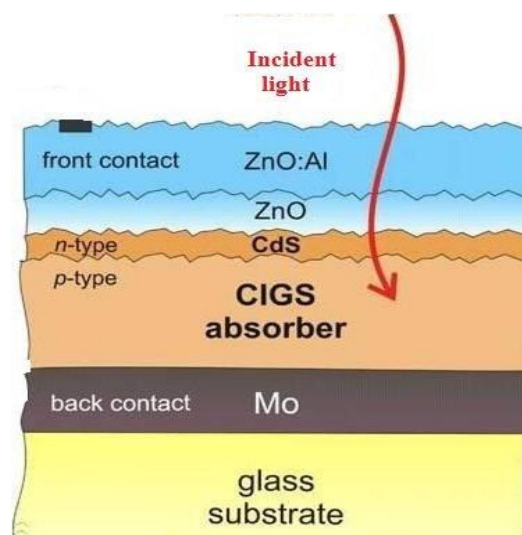
CIGS ($\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$) taqiqlangan zonasi o'zgartirish mumkin bo'lgan xalkopirit(chalcopyrite) materialdir (Ga tarkibiga qarab 1,0–1,7 eV) [6] . Uning yutilish ko'effitsienti ko'rinadigan nur uchun juda yuqori ($>10^5 / \text{sm}$) [6] , shuning uchun faqat ~1–2 μm CIGS quyosh nurlarining ko'p qismini o'zlashtira oladi. Odatiy tuzilma: shisha/Mo orqa kontakt/CIGS yutuvchi qatlam/ CdS bufer/ ZnO oynasi [6] , yutuvchi qatlam tarkibidan tashqari CdTe ga o'xshaydi(9-rasm).

Yoritish ostida fotonlar yutuvchi qatlamda elektron-g'ovak juftlarini hosil qiladi. Elektronlar bufer va TCO orqali yig'iladi, g'ovaklar esa Mo ning orqa kontaktiga tortiladi (9b-rasmda ko'rsatilganidek).



9a-rasm. CIGS element arxitekturasining diagrammatik ko'rinishi. (

<https://doi.org/10.3390/en15228688>)



9b-rasm. CIGS quyosh elementlarining ishlashi.

[European Scientific Journal](#) 11(6)

Tayyorlash texnologiyasi: CIGS qatlamlari birgalikda bug'lanish (bir vaqtning o'zida Cu, In, Ga va Se ni bug'lash) yoki metall prekursorlarni sepib, keyin "selenizatsiya" (Se bug'ida tavlaniş) orqali cho'ktirilishi mumkin[6]. Ishlab chiqarishda soda-ohakli shisha asos material (Na bilan) keng tarqalgan, chunki natriy CIGSga tarqaladi va don o'sishi va dopingni yaxshilaydi[6]. CIGS yotqizilgandan so'ng, CdS yupqa qatlami qo'llaniladi (kimyoviy vanna usuli bilan), so'ngra shaffof elektrodlar sifatida ichki ZnO va Al-doped ZnO qo'llaniladi [21] . Ba'zi kompaniyalar muqobil bufer qatlamlarini qo'llash orqali kadmiydan qochishadi.

Samaradorlik: CIGS elementlari har qanday yupqa plyonkaning konsentrator bo'lmagan eng yuqori samaradorligiga ega: 2024 yil holatiga ko'ra taxminan 23,6%. Masalan, laboratoriyalar sharoitida (NREL, ZSW va boshqalar) uzoq vaqt davomida ~20% CIGS element samaradorligini ko'rsatdi [6] . Odatda CIGS V_{OC} 0,6–0,7 V atrofida, J_{SC} esa 35–40 mA/sm² atrofida. Ishlab chiqarishdagi CIGS modullari (masalan, Solar Frontier) ~17–20% samaradorlikka erishadi. Uning afzalliklari yuqori yutulush ko'rsatkichiga ega (shuning uchun yupqa qatlam), egiluvchanlik (plyonkalarda) va toksik elementlarning yo'qligi (kadmiysiz buferdan foydalanilganda Cd bo'lmaydi) [6] .

Boshqa yupqa plyonka texnologiyalari

Katta uchlikdan tashqari yana bir qancha yupqa plyonkali yoki “rivojlanayotgan” PV mavjud:

GaAs va boshqa III-V elementlar: Juda yuqori samaradorlik (>25%), lekin juda qimmat. Ko'pincha kosmik yoki konsentratorlar uchun ko'p ulanishli elementlar sifatida ishlab chiqariladi. (Yagona ulanish GaAs yupqa plyonka texnologiyasi bo'lib, 29,1% rekord [1] .)

Mis indiy sulfid (MIS) / CZTS: Tegishli xalkopiritlar (CuInSe₂, Cu₂ZnSnS₄). Bular yerda ko'p bo'lgan elementlardan foydalanadi (Ga, Cd yo'q). MIS (Ga yo'q) elementlari ~ 22% rekordga erishdi; CZTS rekordi esa ~ 12–13% ni tashkil qiladi. Hali ham R&D bosqichi.

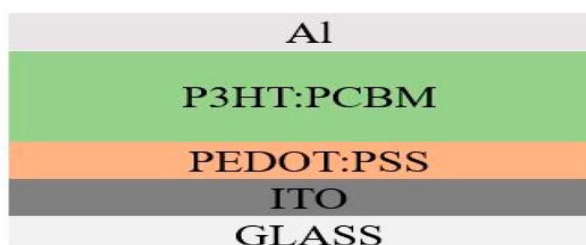
Bo'yoqqa sezgir quyosh elementlari (DSSC): nanostrukturali oksidda fotoaktiv bo'yoq. Oddiy samaradorlik ~ 10-12%. Afzalliklari: arzon narx, ishlab chiqarish oson; kamchilik: barqarorlik va past kuchlanish.



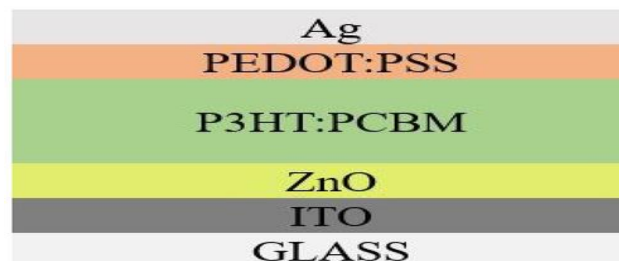
10-rasm. DSSC ning oddiy element arxitekturasini. (<https://doi.org/10.3390/en15228688>)

Organik fotovoltaiklar (OPV): uglerod asosidagi yarim o'tkazgichlar (polimerlar, kichik molekulalar). Moslashuvchanlik va juda past narx potentsiali.

Laboratoriya sharoitda samaradorligi ~18–19% tashkil qiladi; lekin elementni umri qisqa (oylar teng). Ikki terminalli va tandemli OPV (turli polimerlarni birlashtirgan) quysoh elementlarning samaradorligi ~ 17-18% gacha erishilgan [1]. Oddiy va teskari tuzilmalarda polimer asosidagi element arxitekturasining misoli 11-rasmda va 12-rasmda diagramma shaklida keltirilgan.



11-rasm. Oddiy arxitektura.



12-rasm. Teskari arxitektura.

(<https://doi.org/10.3390/en15228688>)

Perovskit quyosh elementlari: qo'rg'oshin-galoidli perovskitlar (masalan, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) yupqa plyonkali PVda inqilob qildi. 2009 yildagi debyutidan boshlab 3% samaradorlik bilan yagona p-n-o'tishli perovskit elementlari taxminan 25,7% [2] ga ko'tarildi (2022 yil rekordlari) va yaxshilanishda davom etmoqda. Ular past haroratli eritma jarayonlari (spin-qoplama va boshqalar) bilan yotqizilishi mumkin. Perovskitlar yuqori yutulush ko'rsatkichi va uzoq tashuvchining diffuziya uzunligiga ega, ammo barqarorlik muammolariga duch keladi. Perovskitlar ko'pincha tandem ichida ishlatiladi(13-rasmga qarang).

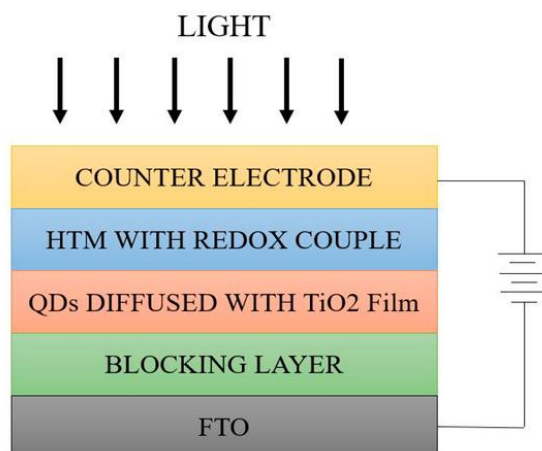


13-rasm. Sxematik diagramma oddiy Perovskit Arxitekturasini ifodalaydi.

(<https://doi.org/10.3390/en15228688>)

Kvant-nuqta(Quantum dot) va nanokristal elementlar: PbS yoki qo'rg'oshin-galoid perovskit QDlari eritmani qayta ishlash va taqiqlangan zonani

o'zgartirish imkoniga ega elementlarni taklif qiladi. To'liq noorganik perovskit QD uchun rekord $\sim 16\%$, kolloid nanokristal qurilmalar uchun $\sim 11-12\%$. Mazkur ko'rsatkichlar ko'pincha laboratoriya sharoitida olingan.



14-rasm. QD QE qurilma arxitekturası (<https://doi.org/10.3390/en15228688>)

14-rasmda oddiy QD asosidagi QE tuzilishi ko'rsatilgan. Bu yerda qarshi elektrod orqali kiradigan yorug'lik, asosan, g'ovakni tashishga yordam beradi [11]. Keyin HTM hosil bo'lgan g'ovaklarni uzatish uchun mas'ul bo'lgan redoks juftligiga (I-/I³⁺-juft) yopishadi. Ushbu hodisadan so'ng, qo'zg'alish uchun TiO₂ plyonkasi (foto yutuvchi qatlam materiali) bilan diffuziyalangan QDlar tanlanadi. FTO oynasi kabi Supero'tkazuvchilar shisha asos material, hosil bo'lgan elektronlarni tashqi kontaktlarning zanglashiga olib o'tish uchun mas'ul bo'lgan fotoaktiv materialning yoniga joylashtiriladi [12].

Bu elementlarning har biri bir xil yotqizish konsepsiya ishlatadi(ingichka yutuvchi qatlam, bufer, kontaktlar) ishlatadi, lekin ma'lum materiallar va ma'lum jarayonlar qo'llaniladi.

Samaradorlikni taqqoslash: yupqa plyonka va kristalli kremniy

Yupqa plyonkali elementlar odatda xarajat va shakl-faktor afzalliklari uchun samaradorlikni "qurbon qilishadi". Masalan, 1-jadval eng yuqori yupqa qatlam samaradorligi (20-25%) kristalli Si elementlaridan ($\approx 26-27\%$) past ekanligini ko'rsatadi. DOE 2024 yilda Si modulining samaradorligi jahon rekordini 25,4% ni tashkil qilgani haqida xabar berdi, CdTe modullari esa atigi 19,9% ga yetadi[5] . (Tijoriy va laboratoriya sharoitlari farq qiladi, ammo bu bo'shliqni ko'rsatadi.) Amaliyotda:

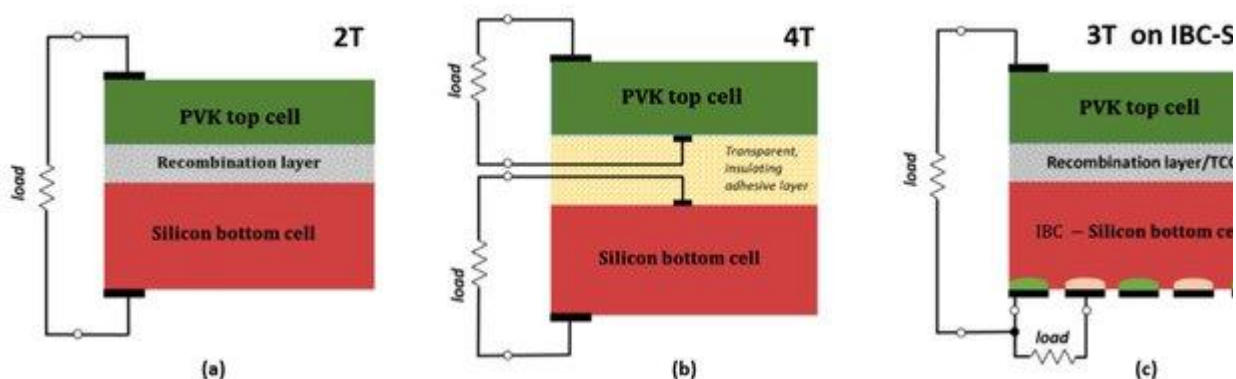
- **Kristalli Si (mono va multi):** Modullar odatda 20-24% (mono yuqori), laboratoriya elementlari $\sim 26-27\%$ gacha.
- **Yupqa plyonkalar:** Modullar $\sim 15-20\%$ (CdTe , CIGS); laboratoriya elementlari $\sim 20-24\%$ (CIGS $\sim 23,6\%$, CdTe $\sim 22\%$, a-Si $\sim 13\%$, perovskit $\sim 25,7\%$).

Yupqa plyonkalar odatda pastroq V_{OC} (masalan, $\sim 0,5-0,7$ V va Si da $\sim 0,7-0,75$ V) va biroz pastroq to'ldirish omillariga ega bo'lib, ular yupqaroq yutuvchi qatlam bilan birgalikda kamroq chiqish quvvatini beradi. Biroq, yupqa plyonkalar ko'pincha yuqori haroratda yaxshiroq ishlashga va kamroq energiyaga ega. Tanlov qayerda qo'llanilishiga bog'liq: maydoni cheklangan uyingiz tomida yoki kommunal PV uchun kristalli asosidagi yuqori samarali panellar ustunlik qiladi. Binolarga integratsiyasi yoki tatbi etishning moslashuvchan ekanligi yupqa plyonkalar (yoki HJT/PERC kabi gibridlar) yengilroq va estetik (yarim shaffoflik) va tizimning past narxi tufayli past samaradorlikka qaramay jozibali bo'lishi mumkin.

Tandem va ko'p birikmali yupqa qatlamli elementlar

Tandem elementlarida yupqa plyonkalarni boshqa PV bilan birlashtirish Shockley-Queisser chegarasini yengib o'tishning istiqbolli usuli hisoblanadi (yagona p-n o'tishli element uchun samaradorlik chegarasi $\sim 33\%$ tashkil etadi). G'oya har xil taqiqlangan zonali ikkita (yoki undan ko'p) p-n o'tish elementlarni yig'ishdir. Shunda har bir qatlam quyosh spektrining bir qismini (o'ziga taluqli qismini) o'zlashtiradi. Ko'p hollarda yupqa plyonkali materiallar tandemda yuqori yoki pastki elementlar sifatida ishlatiladi:

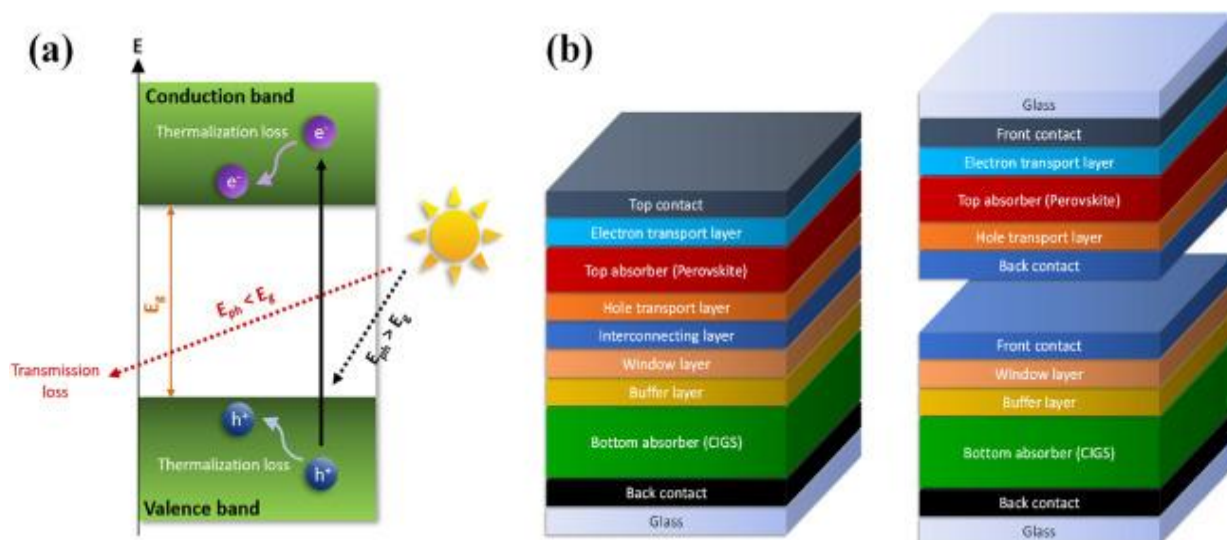
Perovskite/c-Si tandem: Perovskit elementi (taqiqlangan zona kengligi $\sim 1,6-1,8$ eV) Si elementi ($\sim 1,1$ eV) ustiga joylashtirilgan. Bu perovskitning keng taqiqlangan zonasi ($\sim 1,6-1,8$ eV) tufayli ko'k yorug'likni va kremniyning kichik taqiqlangan zonasi ($\sim 1,1$ eV) esa qizil yorug'likni yig'ish uchun foydalaniladi. Monolitik (ikki terminalli) perovskit/Si tandem elementlari $33,9\%$ samaradorlikka erishdi (rekord, Longi tomonidan 2023 yil noyabr) [8]. Bu har qanday bitta ulanishli elementdan ancha oshib ketadi va yupqa plyonka va plastina texnologiyasining gibridini tasvirlaydi. Ikki tomonli konfiguratsiyalar yoki to'rt terminalli konstruktsiyalar (jismoniy jihatdan alohida elementlar) ham o'rganiladi.



15-rasm. 2 terminalli (a), 4 terminalli (b) va 3 terminalli (c) konfiguratsiyaga ega PVK/Si tandem quyosh batareyalarining sxemasi. (DOI: [10.3390/en15218146](https://doi.org/10.3390/en15218146))

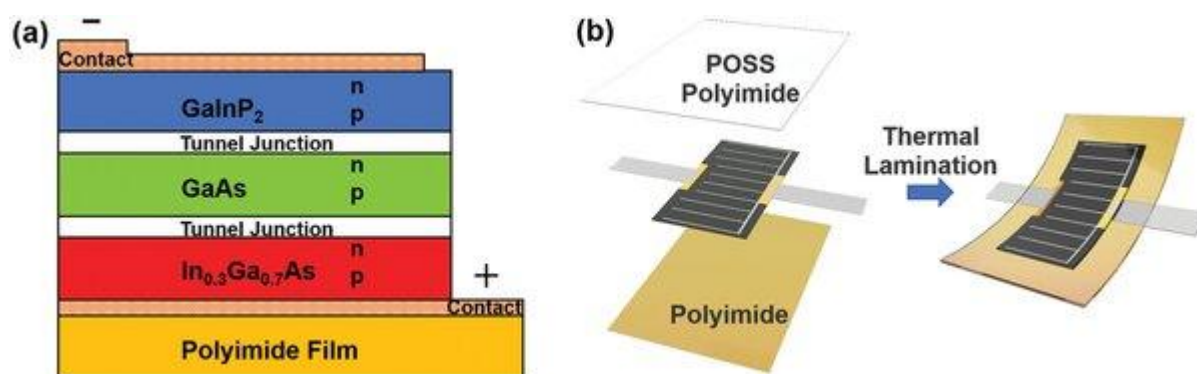
Perovskite/CIGS tandem: Perovskit elementi CIGS yoki boshqa yupqa plyonkaga ham joylashtirilishi mumkin. Yaqinda o'tkazilgan tadqiqotlar *perovskite / CIGS*

tandemini taxminan 24,2% da qayd etdi [1] . Bunday tandemlar butunlay yupqa plyonka bo'lib, perovskit/Si ga qaraganda potentsial pastroq og'irlikda.



16-Rasm. Perovskite/CIGS tandem quyosh elementlari(<https://doi.org/10.1016/j.mtener.2023.101473>)

Ko'p o'tishli yupqa plyonkalar: GaAs va boshqa III-V elementlar ko'pincha allaqachon ko'p ulanishga ega (masalan, GaInP /GaAs / GaInAs konsentratorlar ostida $\sim 44\%$ da to'planadi [1]). Samaradorlik $\sim 28\%$ ga yetadigan barcha perovskit tandemlari (tor bo'shliqli perovskitda keng bo'shliqli perovskit) va organik-organik tandemlar (rekord $\sim 14\%$) kabi misollar mavjud . Biroq, ularning tijorat qo'llanilishi hali ham ilmiy-tadqiqot ishlarida yoki cheklangan foydalanishda (kosmik yoki yuqori darajadagi konsentratorlar uchun GaAs tandem).



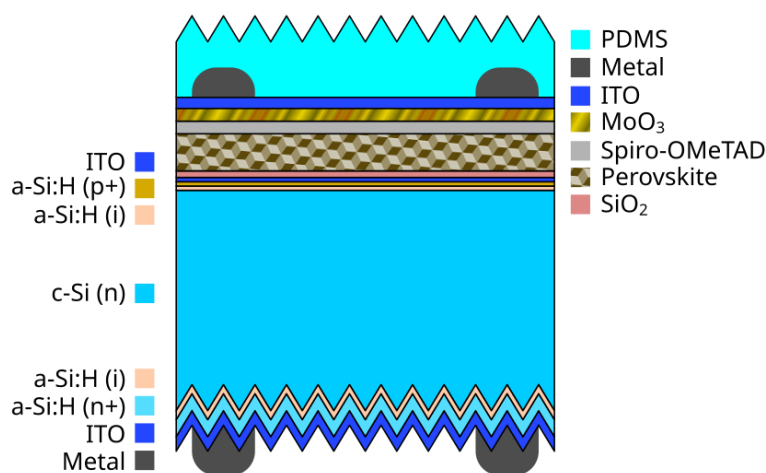
17-rasm. a) Egiluvchan uch p-n-o'tishli GaAs yupqa plyonkali quyosh elementining tuzilishi. b) POSS poliimid muhrlangan egiluvchan uch o'tishli GaAs yupqa plyonkali quyosh elementining tuzilishi. (DOI: [10.1002/admt.202100603](https://doi.org/10.1002/admt.202100603))

Geteroo'tishli (HJT) elementlar va tandemlar

Yupqa qatlamli quyosh elementi integratsiyaning alohida holati - bu hetero-birikma (HJT) kremniy elementi. Bu yerda kristalli Si plastinai (n-tip yoki p-tipi) ikkala tomondan passivlashtiruvchi kontaktlar bo'lib xizmat qiluvchi yupqa vodorodlangan amorf Si qatlamlari (ichki va qo'shilgan a-Si) bilan qoplangan [3][8]. HJT samarali tarzda a-Si yupqa plyonkalarni c-Si bilan birlashtiradi. Bu elementlar kristalli Si ning yuqori samaradorligi va barqarorligini a-Si ning mukammal sirt passivatsiyasi yordamida taminlaydi.

Zamonaviy HJT elementlari (Panasonic va boshqalar tomonidan tijoratlashtirilgan) Si texnologiyalari orasida jahon rekordi samaradorligiga erishdi. Misol uchun, 2022 yilda Panasonic 150 mm SHJ elementida 26,61% ga erishdi (tijorat Si uchun rekord) [8]. HJT elementlari ham juda yuqori V_{OC} (~ 740-750 mV) va yuqori to'ldirish omillariga (FF) (~85-86%) ega. Natijada HJT hozirda bozor ulushi bo'yicha PERC va TOPConni ortda qoldirmoqda [8]. 2023-yilda o'rtacha tijoriy HJT element samaradorligi ~25.0% ni tashkil etdi, TOPCon uchun ~24.9% va PERC uchun 23.3% [8]. HJT elementlari ishlab chiqarishi murakkabroq (past haroratli jarayonlar, ikki tomonlama kontaktlar) jarayonlarni talab qiladi, lekin ularning yuqori samaradorlik va ikki tomonli ishlash kabi kombinatsiyasi ularni jozibador qiladi.

HJT ham tandemda qo'llaniladi: 18-rasmda bo'lgani kabi, perovskit ostidagi HJT pastki elementi 2023 yilda 33,9% tandem rekordini berdi [8]. HJT dagi ichki a-Si qatlamlari tandemga juda yuqori kuchlanish berib, mukammal passivatsiyaga imkon beradi.



18-rasm. Kremniyning hetero-o'tishli pastki elementini perovskit ustki elementi bilan birlashtirgan tandem tuzilishiga misol. Perovskit (keng taqiqlangan zonali) qatlami yuqori energiyali fotonlarni o'zlashtiradi, SHJ (c-Si ustidagi yupqa plyonkali a-Si qatlamlari) esa qolgan qismini ushlaydi. PDMS - aks ettirishga qarshi tekstura. (Tasvir: Radiotrefoil, CC BY-SA 4.0)

18-rasmda perovskit/heterojunction tandem elementining mumkin bo'lgan dizayni ko'rsatilgan [10]. Bunday holda, pastki element *kremniy hetero-birikmasi* (SHJ) - yupqa amorf Si qatlamlari bilan qoplangan kristalli Si plastinai va yuqori element perovskit plyonkasi. Umuman olganda, tandem elementlari joriy

moslashuvni (2Tda) yoki alohida kontaktlarni (4T) va aniq tarmoqli muhandisligini talab qiladi.

Geteroo'tishli elementlar yupqa plyonkali qatlamlar an'anaviy elementlarni qanday kuchaytirishi mumkinligini ko'rsatadi. p-n-o'tishni va kontaktlarni yaratish uchun ular kristalli Si ning ikkala tomonida yupqa amorf kremniydan (bir necha nm qalinlikdagi plyonka) foydalanadilar [3]. Bu juda past rekombinatsiya va yuqori kuchlanishni keltirib chiqaradi, bu esa jahon rekordi natijalariga erishishga yordam beradi.

Xulosa

Yupqa plyonkali quyosh elementlari PV texnologiyalarining turli oilasini qamrab oladi. Amorf kremniy va CdTe dan CIGS, perovskitlar va organiklarga qadar har birining o'ziga xos materiallari va ishlab chiqarish usullari mavjud. Yupqa plyonkalar odatda plastinalarga qaraganda oddiyroq, past haroratli jarayonlar va kamroq yarim o'tkazgich materialdan foydalanadi. Ularning samaradorligi kristalli Si dan ortda qolmoqda, ammo tandem dizaynlari va davom etayotgan yaxshilanishlar (ayniqsa perovskitlar va HJTda) bo'shliqni yopmoqda [2][8]. I-V xususiyatlarini (V_{oc} , I_{sc} , FF) va samaradorlikni tushunish ularni solishtirish uchun asos hisoblanadi. Amalda, texnologiyani o'zaro kelishuv asosida tanlaydi: xarajat va samaradorlik va shakl omili va barqarorlik. Yupqa plyonkali PV kelajagi tandem elementlari (masalan, perovskit/Si), yangi materiallar (qo'rg'oshinsiz perovskitlar, CZTS) va gibrid modullarni o'z ichiga oladi. Umuman olganda, yupqa plyonkali quyosh elementlari quyosh energiyasi landshaftidagi kristalli Si uchun muhim qo'shimcha bo'lib qoladi [7][8].

ADABIYOTLAR:

- [1] Thin-film solar cell - Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_solar_cell
- [2] Comprehensive Review on Thin Film Homojunction Solar Cells: Technologies, Progress and Challenges <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/11/4402>
- [3] A Comprehensive Review on Current Performance, Challenges and Progress in Thin-Film Solar Cells <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8688>
- [4] Chapter 5 <https://www.ee.uconn.edu/course-materials/crsdata/250ln14.pdf>
- [5] CdTe Perspective Paper - Exec Sec.
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-01/DOE%20SETO%20CdTe%20Photovoltaics%20Perspective%20Paper.pdf>
- [6] Copper indium gallium selenide solar cell - Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Copper_indium_gallium_selenide_solar_cell
- [7] Cadmium Telluride | Department of Energy
<https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>
- [8] Heterojunction solar cell - Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Heterojunction_solar_cell
- [9] All-perovskite tandem solar cells achieving >29% efficiency ... - Nature
<https://www.nature.com/articles/s41563-024-02073-x>
- [10] File:Example cross-section of a Silicon Heterojunction and Perovskite tandem solar cell.svg - Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Example_cross-section_of_a_Silicon_Heterojunction_and_Perovskite_tandem_solar_cell.svg
- 11. Kramer, I.J.; Sargent, E.H. Colloidal quantum dot photovoltaics: A path forward. *ACS Nano* **2011**, *5*, 8506–8514. [**Google Scholar**] [**CrossRef**] [**PubMed**]
- 12. Ip, A.H.; Thon, S.M.; Hoogland, S.; Voznyy, O.; Zhitomirsky, D.; Debnath, R.; Levina, L.; Rollny, L.R.; Carey, G.H.; Fischer, A. Hybrid passivated colloidal quantum dot solids. *Nat. Nanotechnol.* **2012**, *7*, 577–582. [**Google Scholar**] [**CrossRef**] [**PubMed**]

1.1. HAR XIL TURDAGI QUYOSH ELEMENTLARI UCHUN BOSIB CHIQUARISH TEXNIKASI

Maxsus printer yordamida chop etilgan(pechatlangan) quyosh elementlari deganda funktsional materiallarni (o'tkazuvchan siyohlar, yarimo'tkazgichli siyohlar va boshqalar) asos material(substrate)larga joylashtirish uchun bosib chiqarish(pechatlash) jarayonlari yordamida ishlab chiqariladigan fotovoltaik qurilmalarga ishora qiladi. Zamonaviy quyosh elementlari qatlamlarini yoki elektrodlarini hosil qilish uchun bosib chiqarish texnikasi (qo'shimchalarni joylashtirish usullari) yordamida ishlab chiqarilishi mumkin. An'anaviy kremniy quyosh elementlari metall kontaktlarni yotqizish ekranli bosma usuli (screen-printing) ga tayanadi, yangi yupqa plyonkali elementlar, masalan, perovskit, organik, bo'yoqlarga sezgir bo'lgan(DSSC) va kvant nuqta elementlari funktsional qatlamlarni joylashtirish uchun turli bosib chiqarish usullarini (masalan, inkjet, ekran(screen-printing), slot-matritsa, spray) ishlatishi mumkin[1] . Quyida biz quyosh elementining har bir asosiy turini va ularni ishlab chiqarishda inkjet bosib chiqarish (va boshqa chop etish usullari) qanday qo'llanilishini, asosiy bosqichlarni ko'rsatadigan diagrammalar bilan birga muhokama qilamiz.

Rivojlanish Tarixi

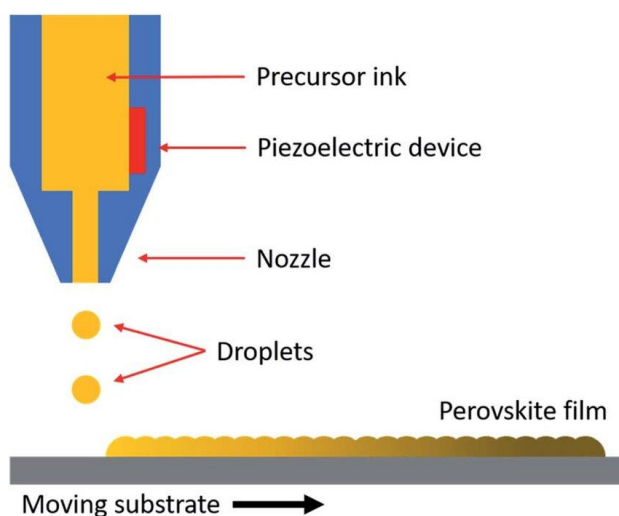
Bosma elektronikaning birinchi ishi 1903 yilda Albert Xanson "bosma" sim uchun patent topshirganida ko'rilgan. Shundan so'ng radio bosma elektronika sanoatini oldinga siljitdi. Yaqin vaqtgacha inkjet printerlar bosma elektronika sanoatida ishlatilmagan. Sanoat arzonligi va foydalanishning moslashuvchanligi tufayli inkjet bosib chiqarishga o'tishga qaror qildi. Ulardan biri inkjet quyosh elementi ishlatiladi. Inkjet printer bilan quyosh elementini tayyorlashning birinchi namunasi 2008 yilda Konarka tomonidan bo'lgan. 2011 yilda Oregon shtati universiteti inkjet printer yordamida CIGS quyosh elementlarini yaratish yo'lini kashf etishga muvaffaq bo'ldi . O'sha yili MIT qog'ozda inkjet printer yordamida quyosh elementini yaratishga muvaffaq bo'ldi. Quyosh elementlarini yaratish uchun inkjet printerdan foydalanish juda yangi va hali ham tadqiq qilinmoqda. 2014 yilda Olga Malinkevich MRS kuzgi yig'ilishida Bostonda (AQSh) perovskit qog'ozlari uchun siyohli bosma ishlab chiqarish jarayonini taqdim etdi - buning uchun u MIT Technology asoschisi 35 yoshgacha bo'lgan innovatorlari mukofotiga sazovor bo'ldi.

Inkjet bosib chiqarilgan quyosh elementlari nima?

Inkjet bosilgan quyosh elementlari fotovoltaik materiallarni asos materiallarga joylashtirish uchun raqamli, kontaktsiz bosib chiqarish texnikasidan foydalanadi. Ushbu yondashuv aniq naqsh, minimal materiallarni isrof qilish va moslashuvchan yoki noan'anaviy yuzalar bilan moslashish imkonini beradi. Texnologiya yengil, moslashuvchan va moslashtirilgan quyosh panellarini ishlab chiqarish uchun ayniqsa foydalidir.

Tayyorlash texnologiyasi

Umuman olganda, inkjet quyosh elementlari yarimo'tkazgich materiali va elektrodلarni quyosh elementi asos materialiga yotqizish uchun inkjet printer yordamida ishlab chiqariladi. Organik va noorganik quyosh elementlarini inkjet printer usuli yordamida tayyorlash mumkin. Inkjet printer yordamida tayyorlangan noorganik quyosh elementlari ilgari CIGS quyosh elementlari bo'lgan. Organik quyosh elementlari polimer quyosh elementlaridir. Gibridd perovskit quyosh elementlarini inkjet bosib chiqarish orqali tayyorlash mumkin va hozir mazkur yo'nalishga e'tibor qaratib kelinmoqda. Inkjet bosib chiqarish hatto kremniy asosidagi quyosh elementlariga boshqa element komponentlarini qo'shish usuli sifatida ham o'rganilmoqda. Injekt printingni eng muhim komponenti funksional materialdir: metall tuzi aralashmasi (CIGS), polimer fulleren aralashmasi (polimer quyosh elementlari) yoki aralash organik va noorganik tuzlar(perovskit quyosh elementlari) dir. Ushbu komponentlar tegishli erituvchida eritiladi. Bosib chiqarishni yaxshilash va asos materialda namlash uchun siyohning yopishqoqligi va sirt tarangligiga ta'sir qilish uchun qo'shimcha komponentlar qo'shilishi mumkin. Siyoh(Ink) kartrijda joylashgan bo'lib u yerdan turli xil asos materialga uzatiladi. Chop etish odatda printer uchidagi shlankada(Nozzle) piezoelektrik siyoh yuboruvchi mavjud bo'lib, jihozni bu qismi dasturlashtirilgan bo'lib oldindan o'rnatilgan naqshlarga qo'llash uchun tomchilarni chiqarib bosma amalga oshiriladi(1-rasm). Ko'p hollarda ishlaydigan quyosh elementini yaratish uchun bir nechta funksional materiallar qatlamlari bir-birining ustiga joylashtiriladi. Bosib chiqarishning to'liq jarayoni xona sharoitida amalga oshirilishi mumkin. Ammo ko'p hollarda qo'shimcha issiqlik bilan ishlov berish talab etiladi. Inkjet bosilgan organik quyosh elementlarining samaradorligi uchun muhim omillar inkjet kechikish vaqti, inkjet bosib chiqarish stolining harorati va polimer donorining kimyoviy xususiyatlarining ta'siri kabilar hisoblanadi.



1-rasm. Inkjet bosib chiqarish jarayonining sxematik tasviri. (DOI: 10.1039/d2se00162d)

Kremniyga asoslangan quyosh elementlari (kristalli kremniy)

An'anaviy kristalli kremniy elementlari kremniy plastinalarda ishlab chiqariladi va metall elektrodni hosil qilish uchun ekranli chop(screen printing) etishdan foydalanadi. Kirishma kiritish (Doping) yo'li bilan p-n birikmasini yaratgandan so'ng, ishlab chiqaruvchilar aks ettiruvchiga qarshi qoplamani qo'llaydilar, so'ngra old tomonda panjara shaklida **kumush pasta** va orqa tomonda alyuminiy pastasini [2] bosadi. Keyinchalik bu bosilgan metall plyonkalar metallarni sintirlash va aks ettirishga qarshi qatlam(**Anti-reflektiv qoplama**) [3] orqali ohmik kontaktlarni hosil qilish uchun yuqori haroratda **qizdiriladi(yondiriladi) (birgalikda)**. Oddatiy bosqichma-bosqich jarayon:

1. **Birlashma hosil bo'lishi:** kremniy plastinasida p-n birikmasini yaratish uchun diffuziya yordamida qo'shimcha moddalar (bosib chiqarish bosqichi emas) kiritiladi.
2. **Anti-reflektiv qoplama:** aks ettirishni kamaytirish uchun kremniy nitridi (SiN_x) qatlamini qo'ying (bu bosqich ham chop etish jarayoni emas).
3. **Old elektrodni chop etish:** ekran niqobini tekislang va o'tkazgichli kumush pasta panjarasini screen-print yordamida old (n-tip) tomoniga yotqiziladi [2] . Pasta kumush zarralari, shisha frit va bog'lovchilarning aralashmasi bo'lib, ular kontakt chiziqlari va shinalari hosil qiladi.
4. **Orqa elektrodni chop etish:** Xuddi shunday, orqa (p-tipi) tomonda alyuminiy (va ba'zan kumush) pasta qatlamini orqa kontakt sifatida [3] chop etiladi.
5. **Quritish va pishirish:** Chop etilgan pastalar quritiladi so'ngra plastinani o'choqqa ($\sim 750\text{--}850^\circ\text{C}$ temperatura) qo'yiladi va organik moddalari yoqib yuboriladi va metall kontaktlarni kremniy bilan qotishtiriladi [3]. Ushbu yoqish bosqichi kumushni SiN_x qatlamidan o'tkazadi va past qarshilikli kontakti hosil qiladi.
6. **Inkapsulatsiya(Encapsulation):** Chop etish shinalariga element konnektorlari yopishtiriladi va elementni himoya moduliga (chop etishdan keyingi yig'ilish) o'raladi.

Screen-printing usuli, past narxlari va yuqori o'tkazuvchanligi tufayli kremniy PV ishlab chiqarishda metallizatsiya qilishda asosiy usuli hisoblanadi [2]. Aslida, kremniy quyosh elementi zavodlarining 89% dan ortig'i screen-printing usulidan foydalanib elementlarning kontaktlarini yaratiladi [2]. Nozik kontakt chiziqlarni yaratish uchun kontakt yaratish jarayoni optimallashtiriladi (barmoqlar $\sim 50\text{--}70$ mikron kengligida) va ba'zan chiziqlarni kengaytirmasdan metall balandligini oshirish uchun ikki marta bosib chiqarish(screen printing)dan foydalanadi [3]. *Inkjet bosib chiqarish* kremniy elementlari uchun kamroq tarqalgan, ammo tadqiqotlar uni yuqori aniqlikdagi doping yoki urug 'qatlamlari uchun o'rganmoqda. Umuman olganda, **bosilgan kontaktlar** kremniy elementlarni arzon narxlarda ishonchli

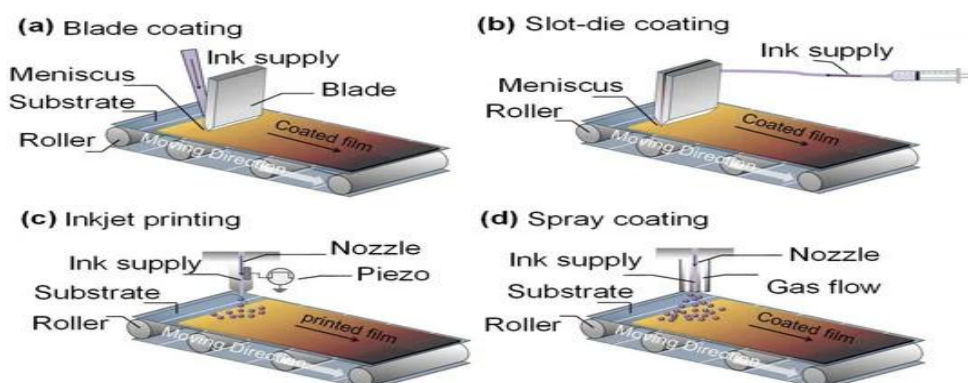
ishlashga erishishga imkon berdi, bu kremniyning PV dagi $\sim 96\%$ bozor ulushini mustahkamladi [2].

Mis indiy galiy selenidli quyosh elementi (CIGS) uchun inkjet bosib chiqarish

Inkjet bosib chiqarish texnikasi yupqa plyonkali CIGS quyosh elementlarini ishlab chiqarish uchun o'rganilgan va materiallarni o'stirishda juda kam material qoldiqlar ortishi tufayli ayniqsa 'tibor tortgan. Sputtering texnikasi ko'pincha bu elementlardagi CIGS qatlamini o'stirish uchun ishlatiladi, bu nisbatan kam material qoldikli texnikadir; ammo, inkjet bosib chiqarish materialni faqat qoplanadigan sirtning kerakli joylariga joylashtirish imkonini berib, undan ham kamroq material qoldiq variantini taklif etadi. CIGS elementlarini ishlab chiqarish jarayonida chiqindilarni kamaytirish muhim ahamiyatga ega, chunki yorug'lik yutuvchi qatlam komponentlarining narxi (mis, indiy, galiy va selenid) quyosh elementlarining boshqa turlariga qaraganda ancha qimmat, ayniqsa In, Ga va Se ning noyobligi tufayli. CIGS quyosh panellari asosan yupqa plyonkali quyosh elementi vazifasini bajaradiganligi (shuning uchun juda kam materiallarni talab qiladigan) va an'anaviy kristalli kremniy quyosh panellariga (26,7%) nisbatan o'xshash samaradorlikka ega (23,6%), CIGS quyosh elementlari Si elementlariga qaraganda yuqori samaradorlik bilan ishlashga moyilligi bilan o'ziga jalb qiladi. Inkjet bosib chiqarish usullari ekologik jihatdan qulayroq variantni ham taklif qilishi mumkin, chunki u boshqa usullar kabi quyosh elementini tayyorlash uchun zaharli kimyoviy moddalardan foydalanishni talab qilmaydi. Inkjet bosib chiqarish, shuningdek, CIGS elementlari uchun oldingi kontakt qatlamini joylashtirishda foydalanish uchun o'rganilmoqda.

Perovskit quyosh elementlari

Perovskit quyosh elementlari (PSC) butunlay eritmani qayta ishlash orqali tayyorlanishi mumkin bo'lgan yupqa plyonkali elementlardir, shuning uchun ular inkjet bosib chiqarish va boshqa bosib chiqarish texnikasi uchun ajoyib nomzodlardir [1] (2-rasm). Odatda perovskit elementi qatlamlarga ega: shaffof elektrod (ITO bilan qoplangan shisha), elektron transport qatlami (ETL, masalan, TiO_2), perovskit yorug'lik yutuvchi qatlam, g'ovakni tashish qatlami (HTL) va yuqori elektrod. Ushbu qatlamlarning ko'pchiligi chop etish (screen printing) orqali joylashtirilishi mumkin:



2-rasm: Yupqa plyonkali quyosh elementini ishlab chiqarish uchun umumiy chop etish usullari tasvirlangan: (a) pichoq qoplamasi (blade coating), (b) tirqishli

qoplama(Slot-die coating), (c) inkjet bosib chiqarish va (d) Spray qoplamasi(Spray coating). Ushbu qo'shimcha usullar bilan eritma siyohlaridan bir xil yupqa plyonkalarni o'stirish mumkin [1] . Inkjet bosib chiqarish (c) aniq naqshli perovskit prekursorli siyoh tomchilarini chiqarish uchun talab bo'yicha tushadigan trubka(nozzle)dan foydalanadi.

Chop etish texnikasi qatlam qalinligi va tarkibi ustidan nozik nazoratni ta'minlaydi va to'g'ridan-to'g'ri dizayn bo'yicha (monolitik modul integratsiyasi uchun) pastki elementlar va o'zaro ulanishlarni naqshlash imkonini beradi. Oxirgi bosqichlar bosilgan perovskitlarning hayotiyiligini ko'rsatadi: tadqiqotchilar 20% dan ortiq samaradorlikka ega qisman inkjet bosilgan perovskit elementlarini namoyish etdilar [13] , bu esa spin bilan qoplangan laboratoriya elementlari bilan bo'shliqni deyarli yopadi. Bundan tashqari, to'liq bosilgan perovskit modullari atrof-muhit sharoitida roll-to-roll(noldan boshlab to tayyor elementgacha) jarayonlari yordamida ishlab chiqarilgan - masalan, 2024 yilgi olib borilgan tadqiqotda ko'p elementli modullar butunlay sanoat bosib chiqarish (jumladan, bosilgan uglerodli orqa elektrod) orqali yaratilgan va 50 sm² modul uchun taxminan 11% samaradorlikka erishgan [14] . Ushbu natijalar kengaytiriladigan bosib chiqarish usullari bilan yuqori samaradorlikka erishish mumkinligini ta'kidlaydi. Inkjet bosib chiqarish, ayniqsa, raqamli ishlab chiqarish imkonini beradi: oddiygina raqamli dizayn faylidan [13] foydalanib, maxsus naqshlarni (hatto san'at asarlari yoki turli shakllarni) chop etish mumkin, bu bino bilan birlashtirilgan PV kabi elementlar uchun dizayn moslashuvini taklif qiladi. Chop etilgan perovskitlar uchun asosiy qiyinchiliklar yagona katta maydonli plyonkalarga va uzoq muddatli barqarorlikka erishish bo'lib qolmoqda, ammo davom etayotgan tadqiqotlar siyoh formulalarini va qayta ishlashni tez sur'atlar bilan takomillashtirishdir.

Umuman olganda, perovskit quyosh elementlari bosib chiqarish mumkin bo'lgan PV texnologiyasida yetakchi o'rinni egallab, inkjet va boshqa bosib chiqarish texnikasi *yuqori unumdorlikni arzon narxlardagi, keng miqyosida ishlab chiqarishni birlashtirib* , quyosh elementini ishlab chiqarishni qanday inqilob qilishi mumkinligini namoyish etadi .



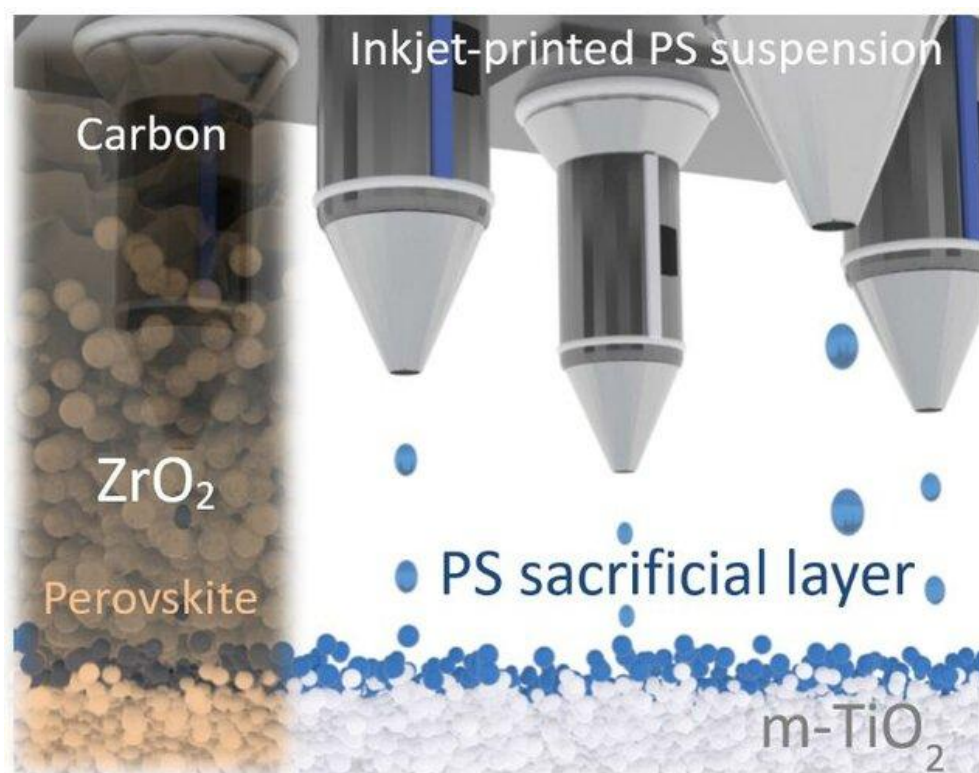
3-rasm: Sxema inkjet bosib chiqarish quyosh siyohini joylashtirish jarayoni. Inkjet printerlar eritma asosidagi siyohning pikolitr tomchilarini kontaktsiz aniq shaklda chiqaradi. Ushbu raqamli, niqobsiz usul perovskit yarimo'tkazgich plyonkalari va naqshli elektrodlarni yotqizish uchun ishlatiladi. Bu katta hajmli va moddiy tejamkor bo'lib, bosma dizaynni dasturiy ta'minot orqali oson o'zgartirish imkonini beradi [16] .

Perovskit elementi uchun inkjet bosib chiqarish jarayoni :

1. **Asos materialni tayyorlash (4-rasm):** ITO (shaffof elektrod) bilan qoplangan shisha asos materialdan boshlanadi. Elektron tashuvchi qatlam(ETL) sifatida yupqa ixcham TiO_2 qatlamini chop etiladi yoki qoplanadi (bu qatlamni purkash yoki spin qoplamasi kabi usullar bilan joylashtirish yoki hatto ba'zi hollarda screen printerda bosib chiqarish va sinterlash mumkin). Ko'pincha mezopora TiO_2 qatlami ham bosiladi yoki perovskit infiltratsiyasiga yordam berish uchun qoplanadi [1].
2. **Perovskite inkjet bosib chiqarish:** Perovskit prekursorli siyohni (erituvchida metall galoid tuzlari va organik kationlarni o'z ichiga olgan) siyohli chop etish kallagiga yuklanadi. Printer ho'l plyonka hosil qilish uchun rastr naqshidagi mayda tomchilarni asos materialga joylashtiradi [4] . Chop etishdan so'ng erituvchilarni bug'lantirish va perovskit qatlamini kristallashtirish uchun **quritish/tavlanish** bosqichi (ko'pincha issiq taxtada yoki boshqariladigan isitish orqali) ishlatiladi. Bu bosib chiqarishda kerakli qalinlikka erishish uchun bir marta yoki bir necha marta amalga oshirilishi mumkin [1] . Tadqiqotchilar ba'zan ushbu bosqichda qatlam sifatini yaxshilash uchun vakuum yordamida quritish kabi usullardan foydalanadilar.
3. **G'ovak tashish qatlami:** HTLni (masalan, spiro-OMeTAD yoki PTAA kabi polimer) perovskit ustiga qo'yiladi. Buni laboratoriya sozlamalarida siqish bilan qoplash orqali amalga oshirish mumkin, lekin u ham chop etilishi

mumkin (masalan, *inkjet bosib chiqarish* yoki HTL siyohini *pichoq bilan qoplash*) [1]. Har bir qatlamning siyoh formulasi (yopishqoqlik, quritish harakati) chop etish uchun sozlanishi kerak.

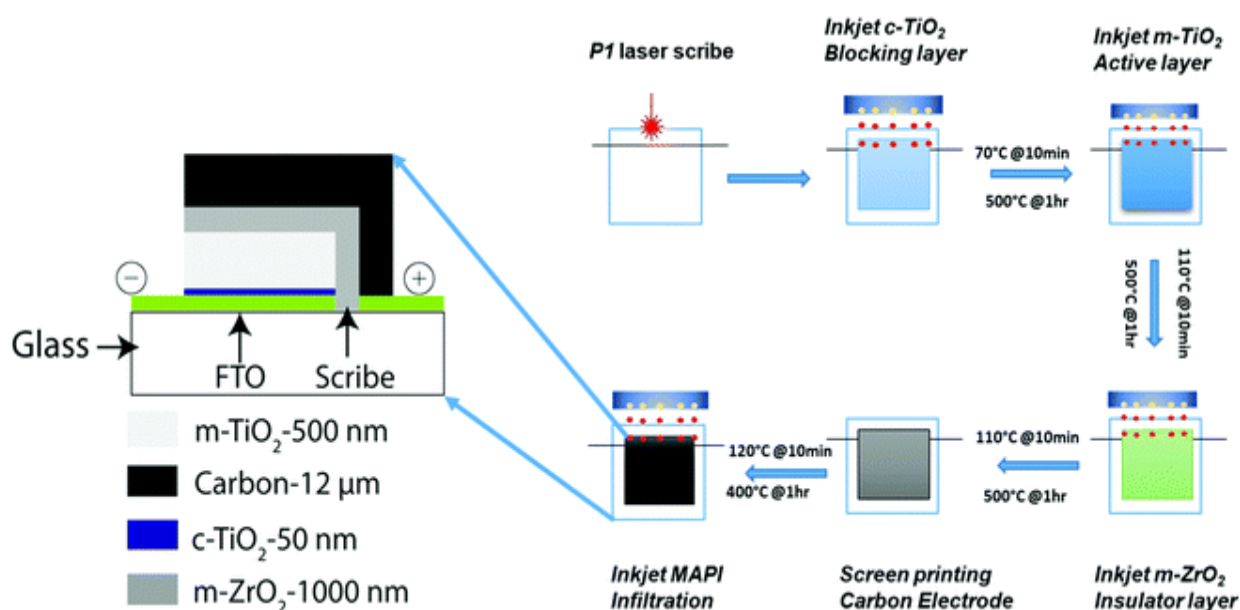
4. **Elektrod bosib chiqarish:** Nihoyat, yuqori elektrod qo'shiladi. Ko'pgina bosma perovskite quyosh element (PQE)larda uglerod elektrodi (uglerod pastasi) oltin yoki kumush elektrodlarni tejamkor almashtirish sifatida screen printing usulida chop etiladi[1]. Uglerod pastasi kerakli naqshda chop etiladi va keyin quritiladi. (Shu bilan bir qatorda, metall panjaralar yoki plyonkalar bosib chiqarilishi yoki termal bug'lanishi mumkin; uglerod va bosma o'tkazuvchan siyohlar vakuumli cho'ktirishni talab qilmaydi.)
5. **Qayta ishlashdan keyingi:** Chop etilgan to'plamni to'liq quritishga/tavlanishiga ruxsat beriladi. Natijada ko'p qatlamli bosma element tayyor bo'ladi. Ba'zi arxitekturalarda (masalan, to'liq bosib chiqarish mumkin bo'lgan **mezoskopik PSClar**) g'ovakli uglerodli yuqori qatlam va mezoporli $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ karkaslar barchasi screen printing usulida bosiladi, so'ngra perovskit g'ovaklar tomchilab yoki siyohli bosish orqali kiritiladi [1].



4-rasm. Chapda tasvirlangan quyosh elementi tuzilishiga ega uglerod asosidagi elektrodlar bilan perovskit quyosh elementi nanoarxitekturasini yaratish uchun polistirol (PS) zarralarining qurbonlik qatlamini inkjet bosib chiqarish jarayoni tasvirlangan kontseptual rasm (DOI: [10.48550/arXiv.221410](https://doi.org/10.48550/arXiv.221410)).

Turli xil perovskit qurilmalari arxitekturalari orasida g'ovakli uglerodli orqa kontakt (MPSC) yordamida uch qatlamli mezopozozli metall oksidi monolit

arxitekturasi faol perovskit yutush qatlami siyohli bosib chiqarish usulida katta afzalliklarga ega (5-rasm).



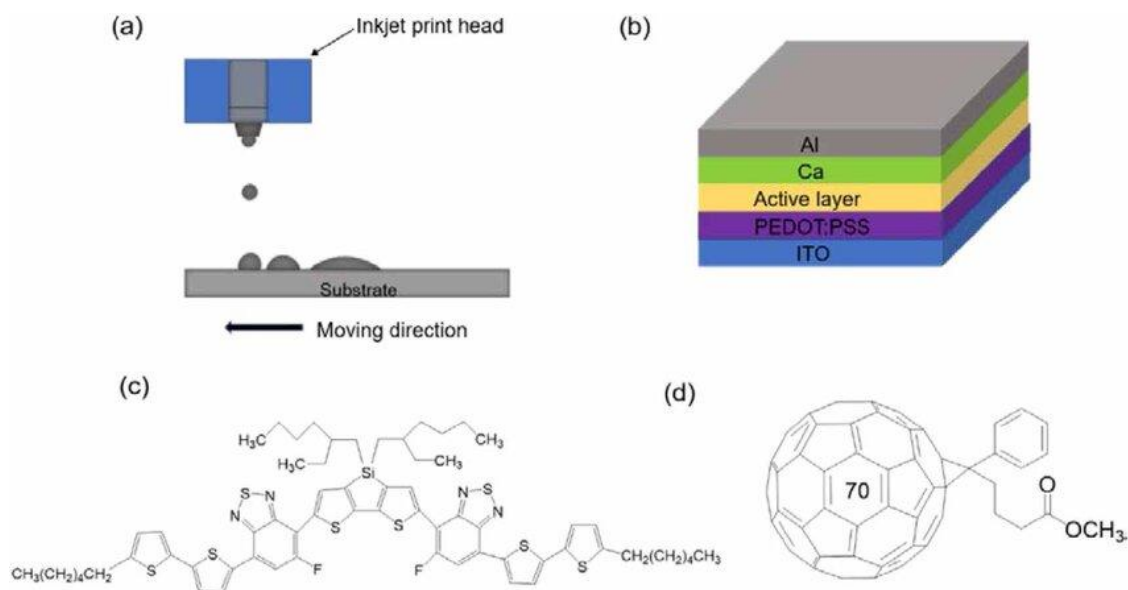
5-rasm Kesma ko'rinishida kerakli qatlam qalinligi bilan MPSC qurilmasi arxitekturasi. Yilni titaniya (c-TiO₂), mezoporoz titaniya (m-TiO₂), mezoporoz tsirkoniya (m-ZrO₂) va metil ammoniy qo'rg'oshin tri-yodid (MAPI) perovskit prekursorining infiltratsiyasidan tashkil topgan to'rtta qatlamni inkjet bosib chiqarishni namoyish qiluvchi jarayon oqimi. Sariq nuqtalar chop etish boshi nozullarini, qizil nuqta esa chiqarilgan tomchilarni ifodalaydi [39] (DOI: [10.1039/D0MA00077A](https://doi.org/10.1039/D0MA00077A)).

Bunday turdagi elementlarda mezoporoz TiO₂ qatlami (m-TiO₂), mezoporoz ZrO₂ (m-ZrO₂) qatlami va undan keyin g'ovakli uglerod qatlamidan iborat bo'lgan g'ovakli karkas qo'rg'oshin-galoid tuzi siyoh tomchilarini infiltratsiya qilish uchun ajoyib teksturani taqdim etadi. Bundan tashqari, mustahkam va ancha qalin element arxitekturasi nuqsonlarga chidamli bo'lib, to'g'ridan-to'g'ri katta maydonni kengaytirishni va'da qiladi. Haddan tashqari qalin gidrofobik uglerod qatlami faol qatlamga suv kirishining oldini oladi va shuning uchun uzoq umr ko'rishni kafolatlaydi (15) va parchalanish holatida qo'rg'oshin tuzining yuvilishining oldini oladi. Faol perovskit yutulish qatlamining inkjet bosib chiqarish orqali infiltratsiya qilinishi, o'rtacha samaradorligi 7% (16) bo'lgan barqaror MPSC elementlariga olib kelishi ko'rsatildi. Agar so'rov bo'yicha raqamli DOD texnologiyasining moslashtirilganligidan foydalanilsa, MPSC ning barcha steklari inkjet yordamida chop etilishi kerak. Peng va boshqalar (17) va Karunakaran va boshqalar. tomonidan ko'rib chiqilgan (18) hozirga qadar qilingan sa'y-harakatlarning aksariyati yutush qatlamini yoki qurilma elektrodlaridan birini inkjet bosib chiqarishga qaratilgan. Bizning ma'lumotlarimizga ko'ra, barcha faol qatlamlarni inkjet bosib chiqarish orqali perovskit quyosh elementlarini ishlab chiqarish bo'yicha hech qanday hisobot yo'q.

Chop etishning afzalliklari: Inkjet va shunga o'xshash texnikalar ishlab chiqarishni kengaytirish uchun muhim bo'lgan minimal chiqindi bilan perovskit qatlamlarini **raqamli naqshlash imkonini beradi** [1], [5]. Ular plyonka qalinligi va bir xilligi ustidan nozik nazoratni taklif qiladi, bu optimallashtirilganda yuqori samarali ishlashga olib keladi [1]. Misol uchun, tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, to'liq inkjet bosilgan perovskit elementlari (barcha qatlamlar bosilgan) spin qoplamali qurilmalar bilan taqqoslanadigan samaradorlikka erisha oladi [1]. Tadqiqotchilar Alxarbi va boshqalar. PQE uchun ko'plab bosib chiqarish usullarini ko'rib chiqishgan - pichoq qoplamasi (blade coating), slot-matritsa (slot die), inkjet, ekran (screen printing), Spray coating, gravur, fleksografiya - bularning barchasi perovskit quyosh elementlarini ishlab chiqarish uchun ishlatilgan [1]. Bosib chiqarish yaxshi samaradorlikni saqlab, katta maydonli perovskit modullarini ishlab chiqarishda muhim rol o'ynadi. Bitta ko'rgazmali perovskit qatlami [1] uchun doktor-pichoq qoplamasi (doctor-blade coating) yordamida 15% dan ortiq samaradorlikka erishdi va inkjet bosilgan perovskit qatlamlari tadqiqot elementlarida 11% samaradorlikdan oshdi [1]. Umuman olganda, **inkjet bosib chiqarish** perovskit siyohlarini aniq yotqizish imkonini beradi, ammo qahva halqasi effekti (bir xil bo'lmagan quritish) kabi muammolarni kamaytirish uchun ehtiyot bo'lish kerak - bir xil plyonkalarni olish uchun siyoh kimyosini optimallashtirish kabi strategiyalar qo'llaniladi [4]. Natijada, har bir qatlamni xona sharoitida o'stirish mumkin bo'lgan arzon narxlardagi, rulonli bosib chiqariladigan quyosh elementlariga istiqbolli yo'l ochish mumkin.

Organik quyosh elementlari (OPV)

Egiluvchan asos materiallarda suyuq siyohlardan tayyorlanishi mumkinligi sababli **chop etish texnikasiga** juda mos keladi. Aslida, inkjet bosib chiqarish organik quyosh elementlari uchun qo'shimchalar, niqobsiz cho'kma va yuqori materiallardan foydalanish tufayli muhim ishlab chiqarish usuli sifatida paydo bo'ladi [6]. Oddiy organik quyosh elementi quyidagi tuzilishga ega: shaffof asos material (plastik yoki shishada ITO), g'ovakni tashish qatlami (masalan, PEDOT: PSS), faol qatlam (elektron-donor va qabul qiluvchi organik yarimo'tkazgichlar aralashmasi) va yuqori elektrod. Chop etish bosqichma-bosqich qo'llaniladi (6-rasm):



6-rasm: (a) Organik fotovoltaik siyohni asos materialga yotqizuvchi inkjet bosib chiqarish tomchilarining sxemasi (talab bo'yicha tomchi). (b) Inkjet bosilgan organik quyosh elementining qatlam tuzilishi: ITO bilan qoplangan asos material, bosilgan PEDOT: PSS g'ovakli transport qatlami (ko'k), bosilgan faol qatlam (donor/akseptorning ommaviy hetero-birikmasi, sariq), bosilgan yoki bug'langan elektron tashish qatlami (yashil, masalan, Ca) va yuqori nurli elektrod (Al, g) (Al, g). Inkjet bosib chiqarish niqoblarsiz eritma asosidagi qatlamlarni aniq naqshlash imkonini beradi.

Organik elementi uchun bosib chiqarish jarayoni

1. **G'ovak tashish qatlamini bosib chiqarish:** ITO bilan qoplangan asos materialdan boshlanadi (ko'pincha moslashuvchan PET plyonkasi yoki shisha). Asos material tozalanadi, so'ngra PEDOT: PSS (o'tkazuvchan polimer) siyohi ITO [7] da yupqa g'ovakli transport qatlami (HTL) sifatida inkjet bosilishi yoki slot-matritsa(slot die) bilan qoplanishi mumkin. Ushbu qatlam sirtini tekislaydi va g'ovaklarni yig'ishni yaxshilaydi. Odatda erituvchilarni olib tashlash uchun past haroratda quritiladi.
2. **Faol qatlam inkjetli bosib chiqarish:** organik erituvchida donor polimer (masalan, P3HT yoki zamonaviy past diapazonli polimer) va qabul qiluvchi material (masalan, PCBM yoki fulleren bo'lmagan qabul qiluvchilar) o'z ichiga olgan eritma bo'lgan hajmiy hetero birlashma (BHJ) siyoh tayyorlang. Bu siyoh inkjet printeriga yuklanadi, u uni HTL [7] ustidagi uzluksiz plyonkaga birlashadigan tomchilar qatori sifatida joylashtiradi. Chop etish parametrlari (tomchilar oralig'i, asos material harorati, siyoh yopishqoqligi) plyonka morfologiyasini nazorat qilish uchun sozlangan bo'ladi. Chop etishdan so'ng, plyonka fotoaktiv qatlamni hosil qilish uchun quritiladi (ko'pincha isitiladigan asos materialda). *Misol:* Sumaiya va boshqalar. Inkjet usulida bosilgan P3HT: PCBM faol qatlamlari muvaffaqiyatli namoyish etishganiga guvoh bo'lish mumkin. Bu inkjet usuli katta maydonli elementlar

uchun spin qoplamasi kabi yaxshi filmlar ishlab chiqarishi mumkinligini ko'rsatdi [6] .

3. **Elektron tashish qatlami va elektrod:** Faol qatlam chop etilgandan va quritilgandan so'ng, ZnO yoki nozik LiF kabi elektron transport qatlami (ETL) qo'shilishi mumkin. Bu eritma ham yotqizilishi mumkin (masalan, ZnO nanopartikulli siyohli bosib chiqarish yoki purkagich bilan qoplash). Nihoyat, yuqori elektrod (odatda alyuminiy yoki o'tkazuvchan siyoh kabi kam ishlaydigan metall) qo'llaniladi. To'liq chop etish usulidan foydalanganda **kumush nanozarrachali siyoh** yuqori elektrod panjarasi [7] *sifatida* screen printing yoki inkjetda chop etilishi mumkin, keyin past haroratda sinterlanadi (yoki o'tkazuvchan PEDOT/CNT siyoh shaffof elektrod sifatida chop etilishi mumkin). Biroq, ko'plab laboratoriya OQElari hali ham qulaylik uchun alyuminiy elektrodni bug'lantiradi (metallarni bosib chiqarish *barcha bosma* qurilmalarni [7] faollashtirish uchun faol tadqiqot sohasidir).

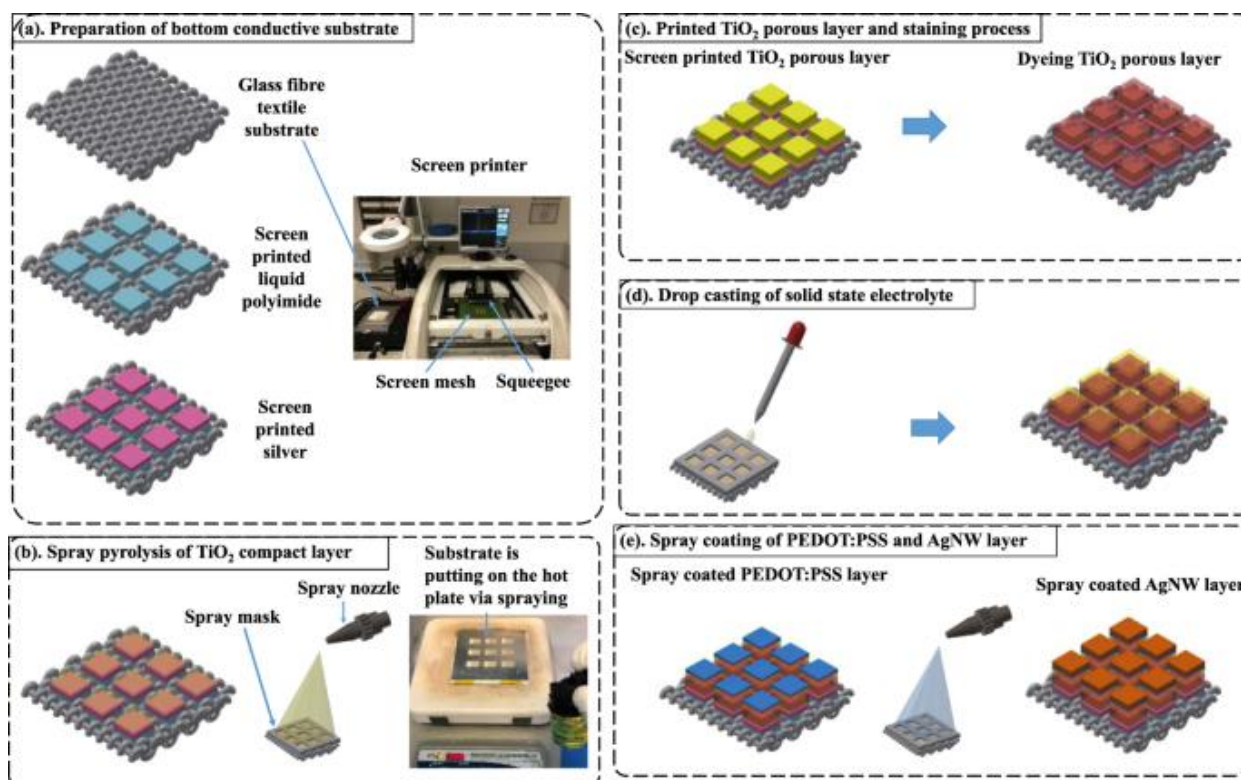
Inkjet bosib chiqarish, ayniqsa, organik quyosh elementini ishlab chiqarishga moslashuvchanlikni beradi: naqshlarni dasturiy ta'minot orqali osongina o'zgartirish mumkin, bu moslashtirilgan modul dizaynlarini (hatto estetik naqshlar yoki "quyosh fon rasmi" dizaynlarini yaratishga imkon beradi. Bundan tashqari, yuqori o'tkazuvchanlik uchun roll-to-roll(noldan boshlab tayyor elementgacha) jarayonlari bilan mos keladi [6] . Gravur bosib chiqarish, fleksografiya, ekranli bosib chiqarish va tirqishli qoplama kabi boshqa bosib chiqarish usullari ham organik PVlar uchun muvaffaqiyatli ishlatilgan [7]. Masalan, katta maydonli organik modullar elektrodan tashqari barcha qatlamlarni roll-to-roll gravur bosib chiqarish yo'li bilan qilingan. Har bir usulning o'z joyi bor: ekranli(screen printing) bosib chiqarish qalinroq plyonkalarni (masalan, elektrodlar uchun) o'stirish mumkin, inkjet esa yuqori aniqlikdagi naqshlar va prototiplashda ustundir. Inkjet bosib chiqarilgan OQElar uchun asosiy muammolar bir xil(tekis taqsimlanish) quritishni ta'minlash (kofe-ring naqshlaridan qochish), yaxshi qatlam interfeyslariga erishish va ba'zi organik siyohlar bilan trubka(nozul)larning tiqilib qolishining oldini olishdir [6]. Davom etilayotgan tadqiqotlar siyoh formulalarini sozlash (masalan, quritishni nazorat qilish uchun erituvchi qo'shimchalar qo'shish) orqali ularni hal qiladi [7]. Ajablanarlisi shundaki, optimallashtirilgan inkjet jarayonlari orqali chop etilgan so'nggi organik elementlar 7-9% dan yuqori quvvatni konvertatsiya qilish samaradorligiga erishdi va yangi materiallar va bosib chiqarish strategiyalari buni yanada yuqori darajaga ko'tarishda davom etmoqda [7]. Xulosa qilib aytganda, in'eksion bosib chiqarish (inkjet) xona sharoitida organik quyosh elementlarini bosqichma-bosqich ishlab chiqarish imkonini beradi va deyarli "bosma elektronika" kabi ishlab chiqarilgan arzon, moslashuvchan quyosh panellariga yo'l beradi.

Bo'yoqqa sezgir quyosh elementlari (DSSCs)

Bo'yoq bilan sezgir bo'lgan quyosh elementlari(Dye sentized solar cell) nozik plyonkali elementlarning yana bir turi bo'lib, unda bosib chiqarish texnikasi, ayniqsa keng miqyosda ishlab chiqarishda katta rol o'ynaydi. DSSC g'ovakli nanokristaldan iborat TiO₂ qatlami yorug'likni yutuvchi bo'yoq, suyuq yoki qattiq elektrolit va

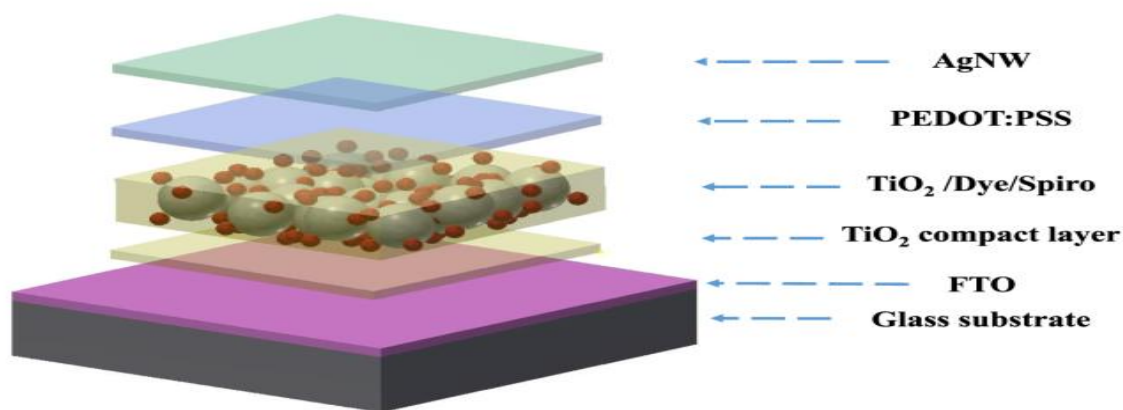
qarshi elektrod (ko'pincha platina yoki uglerod) bilan qoplangan. Ushbu komponentlarning ko'pchiligi chop etish orqali joylashtirilishi mumkin (7,8-rasm):

- **Fotoanod (TiO_2) Chop etish (7,8-rasm):** Shaffof o'tkazuvchi oynadagi g'ovakli TiO_2 qatlami FTO oynasiga TiO_2 nanozarracha pastasini ekranli bosib chiqarish va keyin uni sinterlash orqali amalga oshirilishi mumkin [8] . Bu bo'yoq adsorbsiyasi uchun bir necha mikron qalinlikdagi TiO_2 plyonka hosil qiladi. Tadqiqotchilar ko'rsatdiki, bir nechta TiO_2 qatlamlarini ekranli bosib chiqarish yoki turli zarracha o'lchamlarini ishlatish porali sturkturani va ishlashini yaxshilashi mumkin. TiO_2 siyohli chop etish ham mumkin - Raissi va boshqalar. inkjet bosilgan TiO_2 plyonkalarini (raqamli cho'kma usuli yordamida) namoyish etdi. Ular an'anaviy ekranli bosilgan qatlamlarga qaraganda ko'proq porali va yuqori samaradorlikka erishdi [4].
- **Bo'yoqni qo'llash:** An'anaviy laboratoriya qurilmalarda TiO_2 qatlami bir necha soat davomida bo'yoq eritmasiga (masalan, N719 ruteniy bo'yog'i) namlanadi. Biroq, bu sensibilizatsiya bosqichini bo'yoq eritmasini TiO_2 plyonkasiga inkjet bosib chiqarish orqali tezlashtirish mumkin [8]. Inkjet bosib chiqarish bo'yoqni chiqindisiz kerakli joyga aniq joylashtirish imkonini beradi. Masalan, Aalto universiteti tadqiqoti shuni ko'rsatdiki, siyohli bosilgan bo'yoq botirish bilan solishtirganda ekvivalent yoki yaxshiroq bo'yoq olishiga erisha oladi va hatto fotoanodda naqshlar yoki ko'p bo'yoqli dizaynlarni yaratishi mumkin [9] . Bu erda quyidagi bosqichma-bosqich jarayonlarni o'z ichiga oladi: inkjet kartrijini konsentrlangan bo'yoq eritmasi bilan to'ldirish va uni TiO_2 yuzasi bo'ylab teng ravishda bosib chiqarish, keyin yuvish va quritishni o'z ichiga oladi.
- **Elektrolit va muhr:** DSSC ko'pincha suyuq yodid/triiodid elektrolitidan foydalanadi. Bu elementlarni yig'gandan keyin vakuumli to'ldirish yoki agar qattiq elektrolit yoki gel ishlatilsa, chop etish orqali kiritilishi mumkin. Ba'zi hollarda bosma qattiq elektrolitlar ham mavjud (masalan, bosma polimer gellari). Elementni muhrlashdan oldin ular doktor pichog'i(doctor blade) usuli yoki inkjet usuli yordamida boshqariladigan tarzda bo'yoq bilan qoplangan TiO_2 ustiga yotqiziladi.
- **Qarshi (Kontur) elektrodni bosib chiqarish:** Kontur elektrod platina katalizatori yoki uglerodning ekranli bosilgan(screen printing) qatlami bo'lishi mumkin. Keng miqyosda DSSC ishlab chiqarishda keng tarqalgan yondashuv kontur elektrodni (oqim kollektori vazifasini bajaradi) hosil qilish uchun asos materialda uglerod pastasini ekranli(screen printing) chiqarishdir [10]. Shu bilan bir qatorda, platina prekursorli siyohni ekranli bosib chiqarish va keyin uni yupqa Pt qatlamini hosil qilish uchun qizdirish mumkin. Uglerodga asoslangan bosma elektrodlar (bog'lovchida grafit yoki uglerod qora) arzon narxlardagi DSSClar uchun jozibali - ular oddiygina ikkinchi shisha elektrodga chop etiladi va quritiladi. Nihoyat, element bo'yalgan TiO_2 elektrodini va qarshi elektrodni sendvichlash va qirralarni yopish (ko'pincha termal plomba bilan) orqali yig'iladi.

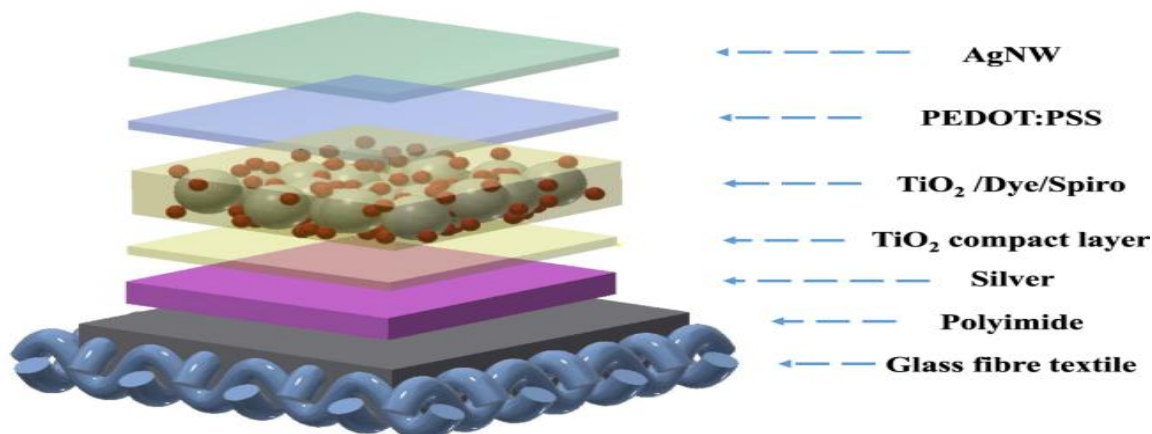


7-rasm. To'qimachilik asosidagi ssDSSC ishlab chiqarish jarayoni diagrammasi , (**a**) pastki o'tkazuvchan asos materialni hosil qilish uchun ekranli poliimid va kumush qatlami, (**b**) TiO_2 ixcham qatlamining purkagichli pirolizasi, (**c**) ekranli bosilgan TiO_2 gözenekli qatlam va bo'yash jarayoni, (**d**) **qattiq holatdagi elektrolit** va PS DO3 ning tomchilab quyilishi . AgNW qatlami (DOI: [10.1038/s41598-018-37590-8](https://doi.org/10.1038/s41598-018-37590-8)).

(a)



(b)



8-rasm. Sxematik diagrammaning izometrik ko'rinishi, (a) FTO shisha asosidagi ssDSSC qurilma tuzilishi; (b) to'qimachilik asosidagi ssDSSC qurilma tuzilishi (DOI: [10.1038/s41598-018-37590-8](https://doi.org/10.1038/s41598-018-37590-8)).

To'liq bosilgan DSSC'lar: Etiborlisi shundaki, kompaniyalar va laboratoriyalar to'liq ekranli bosma DSSC modullarini ishlab chiqdilar, bu yerda har bir qatlam (shaffof o'tkazgich, TiO_2 , ixtiyoriy ZrO_2 izolyatsion qatlam, uglerod katalizator qatlami) katta maydonlarda ekranli bosib chiqarish orqali o'stiriladi [10]. Masalan, Meyer va boshqalar. barcha qatlamlari bosilgan va arzon narxlardagi materiallar (shisha, TiO_2 , uglerod, polimer elektrolit) bilan 10×10 sm DSSC modulini namoyish etdi [10]. Bu holda chop etish ketma-ketligi quyidagicha edi: porali TiO_2 qatlamini chop etiladi → porali ZrO_2 ajratgich qatlamini chop etiladi (elektrod va bo'yoq qatlami o'rtasida to'g'ridan-to'g'ri aloqa qilishning oldini olish uchun) → qarshi elektrod sifatida uglerod qatlami chop etiladi. Ushbu qatlamlarni bosib chiqarish va sinterlashdan so'ng bo'yoq va elektrolitlar kiritiladi va modul muhrlanadi. Natijada tez va arzon ishlab chiqarilishi mumkin bo'lgan to'liq bosilgan quyosh moduli yaratish imkonini beradi.

Qimmat vakuum asboblarsiz naqshlash va o'stirish imkonini berish orqali DSSC ning o'lchamini yaxshilaydi. Masalan, TiO_2 fotoanodi va hatto bo'yoq uchun raqamli inkjet bosib chiqarishdan foydalanish ishlab chiqarishni soddalashtirishi mumkin va hatto unumdorlikni oshirishi ko'rsatilgan – bir tadqiqotda siyohli bosilgan TiO_2 /bo'yoq elementlari ekvivalent ekranli bosilgan elementlar uchun ~ 5,5% va ~7,4% samaradorlikka erishganligi haqida xabar berilgan [4]. Xulosa qilib

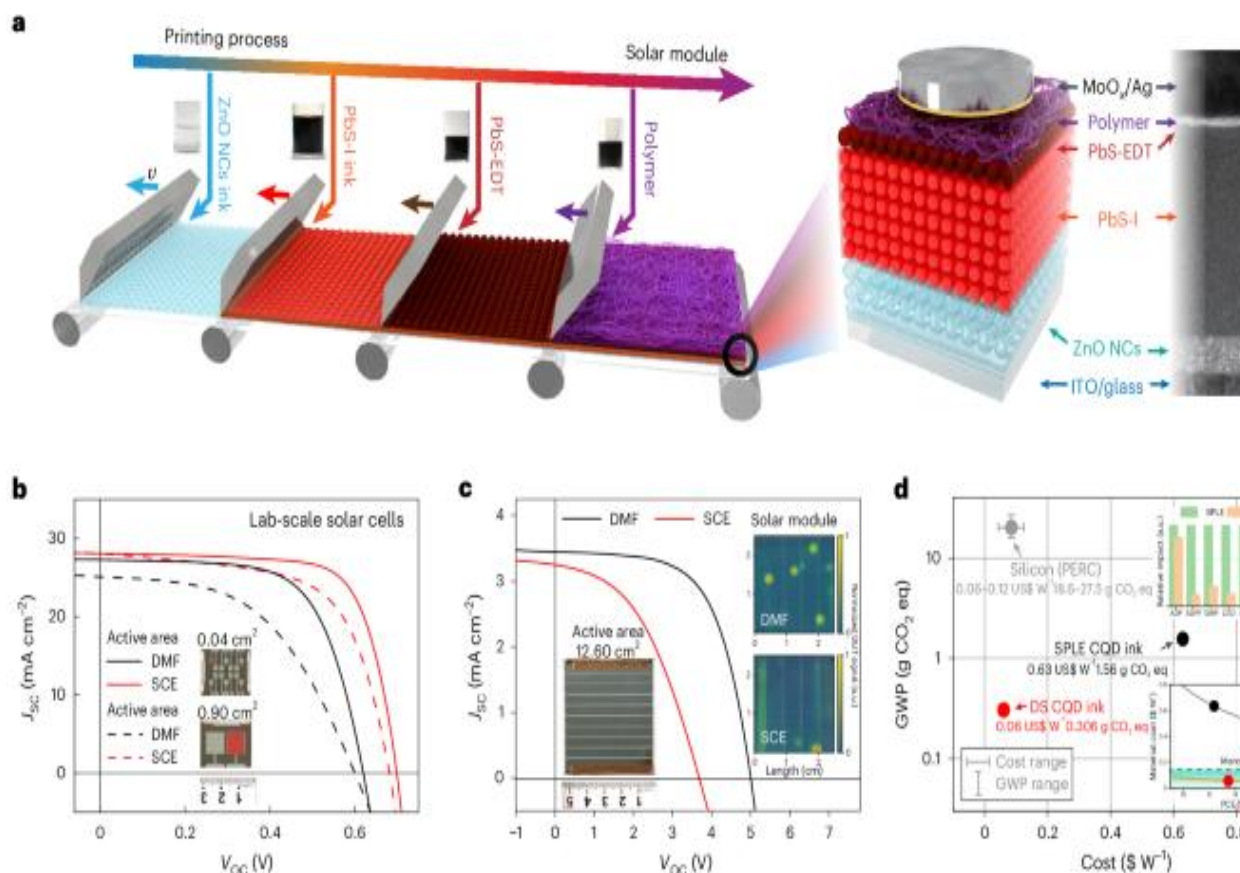
aytganda, DSSC-larda bosqichma-bosqich inkjet yoki ekranli bosib chiqarish g'ovakli oksid qatlamini chop etish, bo'yoqni chop etish yoki namlash va qarshi elektrodni bosib chiqarishni, so'ngra yig'ishni o'z ichiga oladi. Ushbu yondashuv ta'lim va prototiplash uchun mos bo'lgan nisbatan arzon uskunalarga ega samarali DSSC-larni ishlab chiqaradi (haqiqatan ham, DSSC-ni ekranli chop etish oddiyligi tufayli umumiy bakalavr talabalari uchun laboratoriya loyihasi sifatida foydalanishi mumkin).

Kvant nuqtali quyosh elementlari

Kvant nuqtali quyosh elementlari (QDSC) yorug'likni yutuvchi sifatida yarim o'tkazgichli nanokristallar (kvant nuqtalari)dan foydalanadi. Ular DSSC-larga o'xshash arxitekturada (TiO_2 ga adsorbsiyalangan kvant nuqtalari, "kvant nuqta sezgir quyosh elementlari" deb nomlanadi) yoki qalin kvant nuqta qatlamlari (masalan, PbS kolloid kvant nuqtali quyosh elementlari) bilan yupqa plyonkali qurilmalar sifatida tuzilishi mumkin. Chop etish usullari bu yerda ham tobora ko'proq qo'llanilmoqda, ayniqsa kvant nuqtali siyohlarni sintez qilish va eritmada qayta ishlash mumkinligi sababli. Quyidagi bosib chiqarish bilan bog'liq qadamlarni o'z ichiga oladi (9-rasm):

- **Kvant nuqtali siyohni tayyorlash:** Kolloid kvant nuqtalari (masalan, PbS, PbSe yoki perovskit kvant nuqtalari) barqaror kvant nuqtalari (QD) siyohini hosil qilish uchun tegishli ligandlar bilan erituvchida tarqaladi. Tadqiqotchilar katta maydonda chop etish uchun barqaror bo'lib qoladigan formulalarni ishlab chiqdilar (masalan, agregatsiyani oldini olish uchun sirt kimyosini nazorat qilish orqali) [11]. Keyinchalik, bu siyohlarni inkjet, spray qoplamasi yoki slot-matrisa qoplama kabi bosib chiqarish usullari bilan joylashtirish mumkin.
- **Faol qatlamli chop etish:** Oddiy yupqa plyonkali QD quyosh elementida kvant nuqtali siyoh asos materialga (elektrod va ehtimol bufer qatlamiga ega) qoplanishi yoki chop etilishi mumkin. Masalan, PbS QD quyosh elementi fotoaktiv absorber sifatida shisha/ITO asos materialidan, ZnO yoki TiO_2 elektron transport qatlamidan (ko'pincha spin yoki chop etilishi mumkin) va keyin inkjet bosilgan QD qatlamidan foydalanishi mumkin. Inkjet QD eritmasini boshqariladigan naqshda joylashtirishi mumkin; oraliq quritish bilan bir nechta o'tish ba'zan qalinroq plyonka hosil qilish uchun ishlatiladi. Shu bilan bir qatorda, tirqishli qoplama (siyoh doimiy ravishda harakatlanuvchi asos materialga tirqish orqali qo'llaniladigan chop etish turi) kabi yuqori o'tkazuvchanlik usullari kvant nuqta plyonkalari uchun muvaffaqiyatli ishlatilgan [11]. QD qatlamini qo'ygandan so'ng, plyonkani mustahkamlash va ba'zan zaryadni yaxshiroq tashish uchun ligandlarni almashtirish uchun yengil termal yoki kimyoviy ishlov berish amalga oshiriladi.
- **Elektrodlarni bosib chiqarish:** QD elementlarida yuqori kontakt bosilgan panjara yoki shaffof o'tkazuvchan siyoh bo'lishi mumkin. Misol uchun, agar egiluvchan qurilma plastmassadan yasalgan bo'lsa, elektr o'tkazuvchan

kumush panjara tokni to'plash uchun kattaroq maydondagi QD quyosh modullarida ekranli chop etilishi mumkin. Laboratoriya qurilmalarida ko'pincha bug'langan metall, oltin yoki bosilgan uglerod qatlami orqa elektrod bo'lib xizmat qilishi mumkin.



9-rasm. Kvant nuqtali siyoh tayyorlash <https://doi.org/10.1038/s41560-025-01746-4>

Namuna yutuqlari: Liu va boshqalar tomonidan yaqinda xabar qilingan yutuq (2025) 12,6 sm² qurilmada sertifikatlangan ~10% samaradorlikka erishib, PbS CQD siyohini slot-matrisa bilan qoplash orqali keng maydonli chop etiladigan kvant nuqtali quyosh modullarini namoyish etdi [11]. Ularning laboratoriya miqyosidagi elementlari bir xil(teng taqsimlangan) bosilgan QD qatlami yondashuvidan foydalangan holda 13,4% samaradorlikka erishdi [11]. Jarayon bir bosqichda QD qatlamini havoda, spin-qoplamasiz bosib chiqarishni o'z ichiga oldi, bu masshtabni kengaytirishning realligini ko'rsatadi. Xuddi shunday, tadqiqotchilar spektral konvertatsiya qatlamlarini yaratish uchun kremniy elementlari ustiga Si kvant nuqtalarining inkjetli bosilgan naqshlariga ega va gibridd quyosh elementlari uchun CdTe kvant nuqta siyohlarini chop etish uchun inkjetdan foydalanganlar [12]. Umuman olganda, QD quyosh elementlarida inkjet bosib chiqarish plyonkaning bir xilligi va tarkibini aniq nazorat qilish imkonini beradi, bu juda muhim, chunki kvant nuqta qatlamlari ko'pincha bir nechta ishlov berishni talab qiladi (masalan, turli ligandlar bilan qatlam-qatlam cho'kish). Chop etish usuli changni yutish qatlamlarini vakuumda cho'ktirishdan qochib, ishlab chiqarishni soddalashtiradi. Bosqichma-bosqich bosilgan QD elementini ishlab chiqarish quyidagicha ko'rinishi mumkin:

metall oksidi ETL (agar ishlatilsa) chop etiladi → quritiladi/tavlaniladi → QD absorber qatlami chop etiladi (ehtimol, quritish bosqichlari bilan bir nechta pastki qatlamlarda) → QD plyonkasini kimyoviy tozalash/tavlash → yuqori elektrodni chop etiladi yoki biriktirladi. Ularning har biri nisbatan past haroratlarda moslashuvchan asos materiallarda amalga oshirilishi mumkin, bu esa bosib chiqariladigan QD quyosh elementlarini kiyiladigan yoki ko'chma ilovalar uchun istiqbolli qiladi.

Xulosa qilib aytadigan bo'lsak, barcha quyosh elementlari turlarida - kremniy, perovskit, organik, bo'yoqqa sezgir bo'lgan va kvant nuqta - in'ektsiya / inkjet bosib chiqarish va boshqa bosib chiqarish usullari yanada soddalashtirilgan, kengaytiriladigan ishlab chiqarish yo'lini taklif qiladi. Funktsional siyohlarni aniq, qo'shimchalar bilan joylashtirish orqali bosib chiqarish texnikasi moddiy chiqindilarni kamaytiradi va fotolitografiyasiz naqsh solish imkonini beradi. Har bir quyosh texnologiyasi umumiy g'oyani o'z materiallariga moslashtiradi (masalan, kremniy uchun metall pastalari, yupqa plyonkalar uchun eritma bilan qayta ishlangan yarimo'tkazgichlar). Natijada, quyosh elementlari, ko'p hollarda, gazetaga o'xshab, bosqichma-bosqich "chop etilishi" mumkin - bu qayta tiklanadigan energiya muhandisligi bo'yicha tahsil olayotgan bakalavriat talabalari uchun juda qulay va qiziqarli tushuncha.



10-rasm: Tadqiqotchi egiluvchan bosma quyosh elementi modulini ushlab turibdi. Yupqa plyonkali quyosh elementlari (masalan, organik yoki perovskit elementlari) chop etiladigan "quyosh siyohlari" yordamida ultra yupqa plastmassa plyonkalarda ishlab chiqarilishi mumkin. Ushbu siyohlar qatlamlarda egiluvchan asos materiallarga yotqiziladi, masalan mikro gravur qoplamasi usuli, slot-die qoplama usuli, va ekranli bosib chiqarish usuli, yengil, yarim shaffof quyosh panellarini ishlab chiqarish [19] .

Kelajak istiqbollari

Inkjet bosib chiqarishni quyosh elementi ishlab chiqarishga integratsiyalashuvidan kelajakda quyidagilarga kutish mumkin:

- **Tandem quyosh elementlari:** Quyosh nurlarining kengroq spektrini olish uchun turli xil perovskit kompozitsiyalarini birlashtiridi.

- **Building -Integrated Photovoltaics (BIPV):** uzluksiz energiya ishlab chiqarish uchun quyosh elementlarini qurilish materiallariga(bino derazalariga) joylashtirish.
- **Kiyiladigan elektronika:** portativ qurilmalar uchun yengil va moslashuvchan quyosh panellarini ishlab chiqish.

Davomli tadqiqot va ishlanmalar inkjet bosma quyosh elementlarining samaradorligi, barqarorligi va tijorat realigini oshirishi kutilmoqda, bu esa barqaror energiya texnologiyalarini rivojlantirishga hissa qo'shadi.

Yuqoridagi ma'lumotlar so'nggi adabiyotlar va bosma quyosh elementi ishlab chiqarish bo'yicha sharhlardan olingan [\[1\]](#) [\[2\]](#) [\[4\]](#) [\[7\]](#) [\[11\]](#), ular ekranda bosilgan kremniy elementlardan to'liq inkjet bosilgan keyingi avlod quyosh elementlari evolyutsiyasini chuqurroq tushunish imkonini beradi. Har bir bosib chiqarish texnikasi o'ziga xos afzalliklarga ega, ammo ularning barchasi umumiy maqsadga xizmat qiladi - xarajatlarni pasaytirish va quyosh panellarini yuqori samarali ishlab chiqarish imkonini beradi.

Foydalanilgan Adabiyotlar:

[1] Perovskit quyosh elementlarini tijoratlashtirish yo'lida bosib chiqarish texnikasi bo'yicha taraqqiyotni ko'rib chiqish | MDPI

<https://www.mdpi.com/1996-1073/18/1/6>

[2] (a) Ekranda chop etilgan PERC quyosh elementlarini ishlab chiqarish jarayoni ketma-ketligi... | Ilmiy diagramma yuklab olish

https://www.researchgate.net/figure/a-Process-sequence-for-producing-screen-printed-PERC-solar-cells-15-b-PERC_fig2_361010788

[3] Ekranni chop etish va birgalikda otish - PV-Manufacturing.org

<https://pv-manufacturing.org/screen-printing/>

[4] (PDF) Samarali bo'yoqqa sezgir quyosh elementlarini (DSSC) raqamli bosib chiqarish

https://www.researchgate.net/publication/339201499_Digital_printing_of_efficient_dye-sensitized_solar_cells_DSSCs

[5] Perovskite quyosh elementlari | Energetika boshqarmasi

<https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>

[6] Inkjet bosib chiqarish orqali organik quyosh elementi - umumiy ko'rinish

<https://www.mdpi.com/2227-7080/5/3/53>

[7] (a) Inkjet bosib chiqarish orqali organik plyonka shakllanishining sxematik diagrammasi. (b)... | Ilmiy diagramma yuklab olish

https://www.researchgate.net/figure/a-Schematic-diagram-of-organic-film-formation-by-inkjet-printing-b-Device-structure_fig1_353951474

[8] Barcha ekranli bo'yoq quyosh elementi - SPIE raqamli kutubxonasi

<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/6656/665608/All-screen-printed-dye-solar-cell/10.1117/12.734545.pdf>

[9] Inkjet bosilgan bo'yoqlar bilan bo'yoq sezgir quyosh elementlari - Aaltodoc

<https://aaltodoc.aalto.fi/items/612ec8ee-e36a-49a4-9add-39e89b7b0374>

[10] [PDF] Barcha ekranli bosilgan bo'yoq sezgir quyosh modullari - Shveytsariya fotonikasi

<https://www.swissphotoniks.net/libraries.files/TobyMeyerSolaronix.pdf>

[11] Fotovoltaiklar uchun arzon o'tkazuvchan kvant nuqta siyohlari - pv jurnali International

<https://www.pv-magazine.com/2025/04/22/low-cost-conductive-quantum-dot-inks-for-photovoltaics/>

[12] [PDF] CdTe kvant nuqtali bosma gibridni ishlab chiqarish tartibi ...

<https://peer.asee.org/a-fabrication-procedure-for-a-cdte-quantum-dot-printable-hybrid-solar-cell.pdf>

[13] https://www.optika.org/haqida/yangiliklar_xonasi/yangiliklar_relizlar/2020/inkjet_chop_etish_ishlab_chiqarish_amaliy_perovskit_quyosh_element_ishlab_chiqarish_uchun_yo_l_ochadi/

[14] https://www.tabiat.com/maqolalar/s41467-024-46016-1?xato=cookie_fayllari_qo'llab-quvvatlanmaydi_va_kod=5994_bb41-b1ce-4426-9989-63bc92311f3f

(15) G. Grancini , C. Roldan-Carmona, I. Zimmermann, E. Mosconi , X. Li, D. Martineau, S. Narbey , F. Oswald, F. De Angelis, M. Graetzel va MK Nazeeruddin , Bir yillik barqaror perovskite tomonidan solar3 elementlari, perov2D solar3 interfeysi . *Kommuna .* , 2017, **8** , 15684 [CrossRef](#) [CAS](#) [PubMed](#)

(16) SG Hashmi, A. Tihoonen , D. Martineau, M. Ozkan , P. Vivo, K. Kaunisto , V. Ulla, SM Zakeeruddin va M. Gratzel , uzoq muddatli barqarorlik havo qayta ishlangan inkjet infiltratsiyalangan uglerod asosidagi bosilgan perovskite quyosh elementlari, JJ intense nuri ostida ultravittering so. *Kimyo. A* , 2017, **5** , 4797–4802 [RSC](#) .

(17) XJ Peng, J. Yuan, S. Shen, M. Gao, ASR Chesman , H. Yin, JS Cheng, Q. Zhang va D. Angmo , Perovskit va Inkjet bosib chiqarish tomonidan ishlab chiqarilgan organik quyosh elementlari: taraqqiyot va istiqbollar, *Adv. Funktsiya . Mater.* , 2017, **27** , 1703704 [CrossRef](#) .

(18) SK Karunakaran , GM Arumugam , WT Yang, SJ Ge, SN Khan, XZ Lin va GW Yang, inkjet bosilgan quyosh elementlaridagi so'nggi yutuqlar, *J. Mater. Kimyo. A* , 2019, **7** , 13873–13902 [RSC](#) .

[19] Yengil energiya uchun chop etiladigan quyosh elementlari - CSIRO

<https://www.csiro.au/en/research/technology-space/energy/electricity-transition/photovoltaics/printable-solar-cells>

II Bob

2. PASSIVLASHTIRILGAN EMITTER VA ORQA KONTAKTLI (PERC) QUYOSH ELEMENTLARI (PASSIVATED EMITTER AND REAR CELL)

Kirish

Passivlashtirilgan Emitter va orqa kontaktli (PERC) texnologiyasiga asoslangan quyosh elementlari yuqori samarali kremniy fotovoltaiik elementlari bo'lib, an'anaviy alyuminiy orqa yuzali maydon (Al-BSF) element dizaynini takomillashtiradi. 1980-yillarda joriy etilgan PERC texnologiyasi elementning orqa yuzasiga dielektrik pasivatsiya qatlamini (odatda alyuminiy yoki kremniy nitrat qoplami) qo'shadi va mahalliy orqa kontaktlardan foydalanadi. Bu elektron rekombinatsiyasini sezilarli darajada kamaytirib, yorug'likni yutishni oshiradi[1]. Bu yangilik PERC elementlariga odatdagi elementlarga nisbatan bir xil quyosh nuri ostida ko'proq quvvat ishlab chiqarish imkonini beradi. 2020-yillarga kelib PERC butun dunyo bo'ylab gegemonlik qilib kelayotgan kremniy quyosh elementlarining arxitekturasini bo'lib, quyosh elementlari ishlab chiqarishining katta qismini tashkil etdi[2]. PERC texnologiyasining muvaffaqiyati samaradorlikni oshirish va qo'shimcha ishlab chiqarish murakkabligining nisbatan past bo'lishidagi muvozanatda yotadi, bu esa keng sanoat miqyosida ishlab chiqarish qamroviga olib keldi.

PERC qanday ishlaydi

Standart kremniy quyosh elementida old yuzasida n-tipli emitter va metall panjarali kontaktlar, p-tipli kremniy asos esa orqa alyuminiy kontakt (BSF) bilan orqa yuzali maydon hosil qiladi. PERC bu dizaynga quyidagi o'zgarishlarni kiritadi: elementning orqa yuzasiga ingichka dielektrik pasivatsiya qatlamini (odatda alyuminiy yoki kremniy nitrat qoplamasi) joriy qilinadi va lazer yordamida unda kichik ochilishlar hosil qilib, mahalliy metall kontaktlarni qo'shadi. Pasivatsiya qatlami ikki asosiy vazifani bajaradi: (1) orqa yuzadagi bog'liqsiz atom bog'lanishlarini kimyoviy pasivatsiya qilish va statik zaryadlar ta'siri bilan tashuvchilar rekombinatsiyasini kamaytiradi; (2) aks ettiruvchi (akastuvi) oynasi sifatida harakat qilib, yutilmagan yorug'likni kremniy elementga qaytadan yo'naltiradi[1].

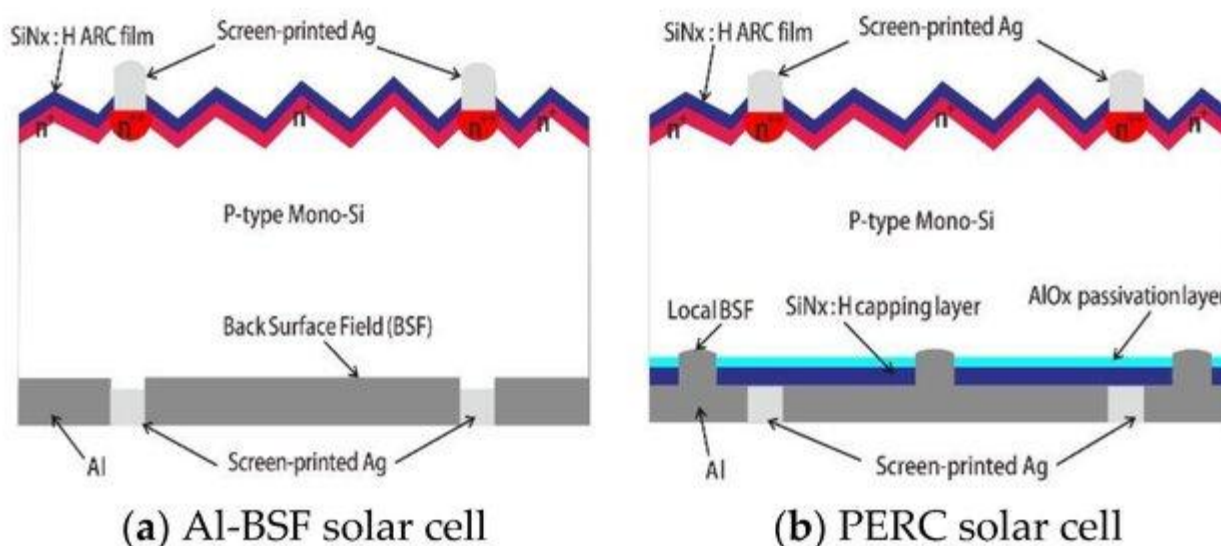


Figure 1: (a) An'anaviy Al-BSF kremniy quyosh batareyasining ko'ndalang kesim ko'rinishi. (b) PERC quyosh elementlari bn solishtirilishi

1-rasmda an'anaviy Al-BSF kremniy quyosh elementi (o'ngda) bilan PERC elementi (chapda) kesim ko'rinishida taqqoslangan. PERC arxitekturasida dielektrik pasivatsiya qatlamidan mahalliy alyuminiy kontaktlar bilan foydalanadi, bu esa orqa yuzadagi rekombinatsiyani kamaytirib, ishlatilmagan yorug'likni aks ettirish orqali samaradorlikni oshiradi[3]. Har ikkala holatda old yuzada n^+ emitter, antirefleksiv qoplama va metall panjaralar mavjud.

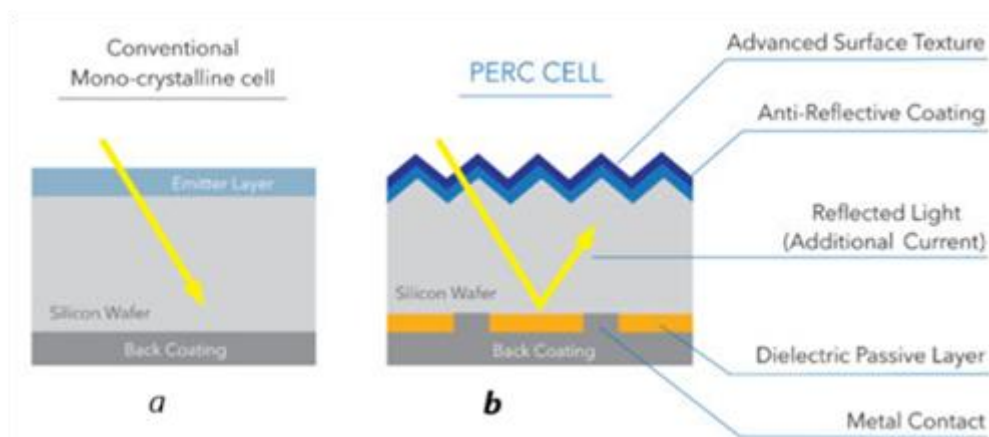


Figure 2. a) Conventional crystalline silicon (c-Si) solar cells; b) Passivated emitter rear contact (PERC) solar cells

2-rasmda (b) PERC konsepti ko'rsatilgan. PERC g'oyasi elementning orqa yuzasiga dielektrik "pasivatsiya" qatlamini qo'shib, rekombinatsiyani kamaytiradi va yutilmagan yorug'likni qaytaradi — bu g'oya birinchi marta 1980-yillarda taklif qilingan va 2010-yillarda tijoratlashtirilgan.

Old yuzada (emitter) va orqa yuzasida (interfeysda) rekombinatsiyani kamaytirish orqali PERC elementlari elektron-g'ovaklar juftliklarini uzoqroq jonli

holatda ushlab turish va ularni samaraliroq yig'ishga imkon beradi[2]. 1980-yillar boshidagi elementlar bilan (~16% samaradorlik) solishtirganda, PERC dizayni laboratoriya sharoitida samaradorlikni nisbatan 50% dan ortiq oshirib, 2000-yillar boshida kremniydagi samaradorlik(FIK) taxminan 25% darajasiga yetdi[2]. Bugungi kunda tijoratda ishlab chiqarilayotgan mono-kristall PERC panellari odatda ~20–22% modul samaradorlikka erishadi, bu an'anaviy BSF panellarga nisbatan taxminan 1–2% (jami) ko'proqdir[1]. Bundan tashqari, PERC elementlari past yorug'lik va yuqori harorat sharoitida ham yaxshi ishlash ko'rsatkichini saqlaydi, chunki ular yengil yutilish va rekombinatsiya yo'qotishlarini kamaytirish imkoniyatiga ega[1]. Ushbu afzalliklar PERCni quyosh energiyasi sanoatining asosiy texnologiyalaridan biriga aylantirdi.

Odatdagi kremniy quyosh elementlari

Quyidagi diagrammada modulga o'rnatilgan odatdagi kremniy quyosh elementining kesma ko'rinishi tasvirlangan. Uning qatlamlari tepadan pastga:

- Old kontakt
- Antirefleksiv qoplamali shisha
- Manfiy (n-tipli) kremniy qatlam
- Musbat (p-tipli) kremniy qatlam
- Orqa yuzali maydon (BSF)
- Orqa kontakt

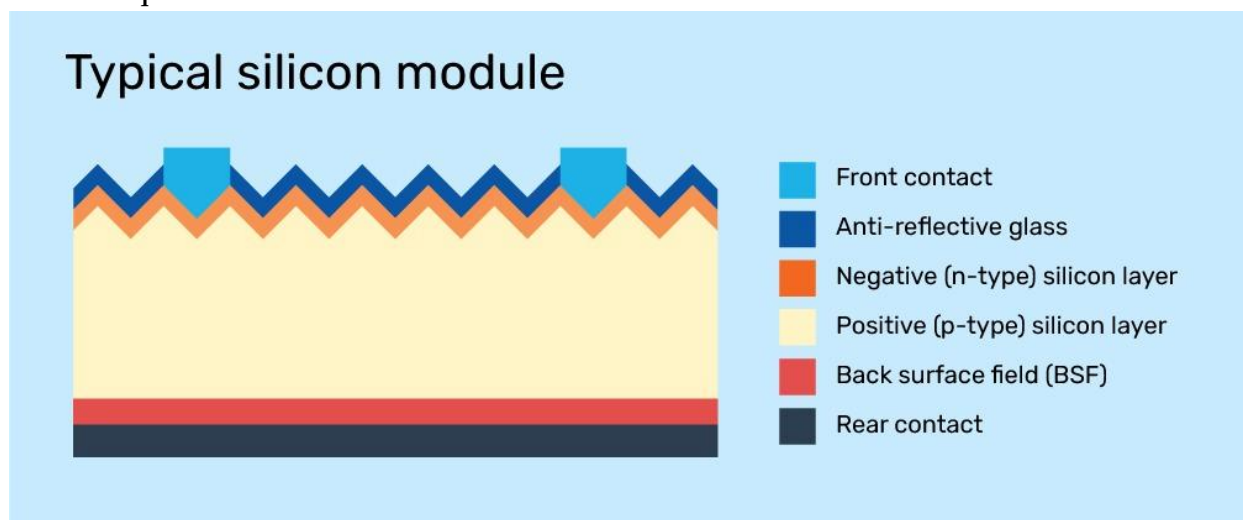


Figure 3. Ananaviy kremniy quyosh elementi

3-rasm. Ananaviy kremniy modul (oddiy elementning qatlam diagrammasi).

PERC quyosh moduli

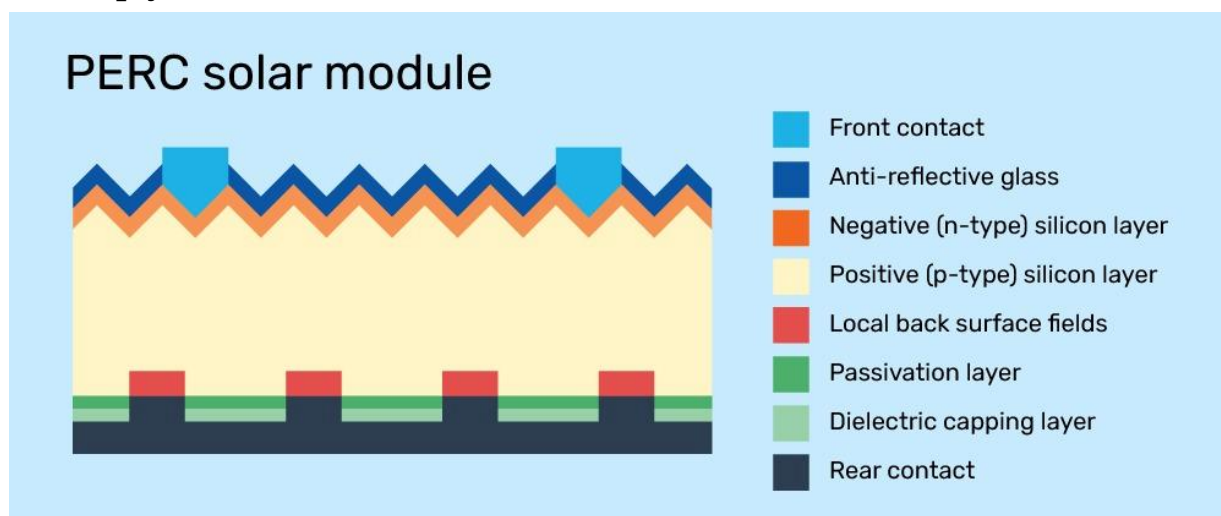


Figure 4. PERC quyosh elementi

4-rasmda PERC modulining kesma ko‘rinishi berilgan. Uning qatlamlari tepadan pastga:

- Old kontakt
- Antirefleksiv qoplamali shisha
- Manfiy (n-tipli) kremniy qatlam
- Musbat (p-tipli) kremniy qatlam
- Mahalliy orqa yuzali maydonlar (orqa kontakt o‘rnida)
- Pasivatsiya qatlami
- Dielektrik qoplama qatlami
- Orqa kontakt

4-rasm: **PERC quyosh moduli** (PERC elementining moduldagi qatlamlari).

PERC elementlarining rivojlanish tarixi

1983–1989: PERC g‘oyasi birinchi marta 1983-yilda Avstraliyaning UNSW universiteti professor Martin Grin va uning hamkasblari tomonidan ilgari surildi[3][4]. Grinning jamoasi kremniy elementning old emitteri va orqa yuzasi samaradorlikni sezilarli oshirishini aniqladi. PERC bo‘yicha birinchi ilmiy nashr 1989-yilda Blakers va boshq. tomonidan e‘lon qilindi; unda pasivatsiya qilingan emitter va orqa texnikasi yordamida 22.8% samaradorlikka ega element haqida xabar berildi[16]. Bu o‘sha paytdagi dunyo rekord samaradorligi bo‘ldi. PERL (Passivated Emitter, Rear Locally diffused) dizaynida orqa kontaktlar mahalliy qalin p^+ diffuziyaga ega bo‘lib, metall/kremniy interfeysida rekombinatsiyani minimallashtirdi[5].

1990–2000: PERCning samaradorlik salohiyatiga qaramay, 1990-yillardagi sanoat ishlab chiqarishi asosan oddiy dizaynlarga asoslangan holda davom etdi. Ikki raqobatchi yuqori samarali kontseptsiyalar paydo bo'ldi: barcha kontaktlarni orqa tomonga ko'chiruvchi orqa kontaktsiz elementlar (masalan, SunPower texnologiyasi) va amorf kremniy qatlamlari yordamida pasivatsiya qiluvchi gibrid juftlikli elementlar (HIT/HJT, Sanyo/Panasonic tomonidan ommaviylashtirilgan)[4]. PERC bu davrda asosan laboratoriyalarda sinovdan o'tdi, chunki orqa dielektrik qatlamni aniq cho'kirilishi va lazer yordamida kontakt ochilishi kabi texnologik muammolar uning keng ishlab chiqarilishini chekladi[4]. Sanoatda esa Al-BSF elementlari ustida metallizatsiya, yuzani teksturalash va antirefleksiv qoplamalarni yaxshilash orqali bosqichma-bosqich takomillashtirishlar olib borildi[4]. 2000-yillarning boshiga kelib, bu kichik takomillar natijasida tijorat Al-BSF elementlari amaliy samaradorlik bo'yicha o'z chegaralariga (~18–19% seriyada, yuqori holatda ~20%) yaqinlashdi[3].

2010–2015 yillar: Sanoat ishlab chiqarishga o'tish – PERC texnologiyasining amaliy konsepsiyadan sanoat ishlab chiqarishiga o'tishi taxminan 25–30 yilni talab qildi[6][4]. 2010–2012 yillar atrofida dastlabki ishlab chiqarish liniyalari yangi lazer va qoplama uskunalari mavjud bo'la boshlagach, PERC jarayonlarini qabul qila boshladi. Muhim burilish nuqtasi 2014–2015 yillarga to'g'ri keldi – bu davrda PERC foydasi iqtisodiy jihatdan o'zini oqlay boshladi: samaradorlikdagi taxminan 1% absolyut yutuq biroz yuqoriroq ishlab chiqarish xarajatini kompensatsiya qilardi, chunki yuqori samarali panellar umumiy tizim xarajatlarini kamaytiradi (xuddi shu quvvat uchun kamroq panel talab etiladi)[4]. Sanoat hisobotlariga ko'ra, 2014 yilda qo'shilgan yangi fotoelement ishlab chiqarish quvvatining katta qismi PERC asosida bo'lgan va shu vaqtga kelib u ikkinchi yirik texnologiyaga aylangan[7]. 2015 yilga kelib, PERC “yuqori quvvatli, yuqori samarali quyosh panellarini ishlab chiqarish uchun yangi real platforma” sifatida shakllangan edi[4]. Muhim jihatlardan biri shundaki, mavjud fotoelement ishlab chiqarish liniyalariga faqat bir nechta qo'shimcha jarayonlar (orqa passivatsiya va lazerli kontakt ochish) orqali PERC texnologiyasini joriy etish mumkin edi[4][8]. Standart p-tip kremniy va ekranli bosma texnologiyalaridan foydalanish imkoniyati PERCning keng tarqalishini tezlashtirdi. FuturaSun (2023) ma'lumotlariga ko'ra, 2015 yildan boshlab PERC tez sur'atlar bilan joriy etila boshlagan va PV sanoatining yangi yetakchisiga aylangan[8].

2016–2022 yillar: Bozorga to'liq hukmronlik – 2010-yillarning ikkinchi yarmida PERC kristalli kremniyli fotoelementlar orasida ustun texnologiyaga aylandi. Xususan, Xitoydagi ishlab chiqaruvchilar (masalan, LONGi, JA Solar, Jinko) o'z ishlab chiqarishlarini mono-PERC va multi-PERC texnologiyalariga o'tkazdilar. Global bozor ulushida PERC/PERL/PERT dizaynlari tez sur'atlar bilan o'sdi, eski Al-BSF liniyalari esa bosqichma-bosqich yopildi[4]. 2019 yilga kelib, sanoat miqyosida ishlab chiqarilgan p-tip PERC fotoelementlari o'rtacha 22% samaradorlikka ega bo'lgan, ilg'or ishlab chiqarish liniyalari esa 23% dan yuqori natijalarga erishgan[9]. 2021–2022 yillarda global miqyosda ishlab chiqarilgan quyosh elementlarining 50% dan ortig'i p-tip PERC turlariga to'g'ri kelgan, agar n-PERT va boshqa variantlar ham inobatga olinsa, PERC oilasiga mansub elementlar

aksariyatni tashkil qilgan[10][2]. Aslida, PERC texnologiyasining ta'siri shu qadar katta bo'lganki, 2022 yilda Martin Green ushbu innovatsiya uchun Millennium Technology mukofoti bilan taqdirlangan – mukofot komissiyasi PERC texnologiyasi eng tijoratga yo'naltirilgan va eng samarali kremniyli fotoelementga aylanganini, 2022 yilga kelib global bozorning deyarli 90% ini egallaganini ta'kidlagan[2].

2023 yildan keyin: PERCning merosi va o'rni bosish – 2023–2025 yillarda PERC texnologiyasi o'z amaliy imkoniyatlarining chegarasiga yaqinlashmoqda; yirik maydonli ilg'or elementlar 24.5% samaradorlikka erishgan (p-tip), ommaviy ishlab chiqarilayotgan elementlar esa ~23% samaradorlikda[11]. Yanada yuqori natijalarga erishish uchun sanoat n-tip kremniyga asoslangan yangi arxitekturalarga o'tmoqda, xususan, TOPCon, HJT (heterotuzilmali) va IBC (interdigitated back contact) elementlariga[8]. Bu yangi avlod elementlar PERCdagi passivatsiya va yorug'likni ushlab tamoyillarini asos qilib olib, 26–27% laboratoriya samaradorligiga erishmoqda. Ayniqsa, tunnel oksidli passivatsiyalangan kontakt (TOPCon) elementlari – PERC texnologiyasining orqa kontakti takomillashgan shakli – 2024 yildan boshlab yangi ishlab chiqarish quvvatlarida PERCdand ustunlikka erishdi[12]. Shunga qaramay, PERC 2020-yillarning o'rtalarigacha yuqori hajmda ishlab chiqarishda qoladi, ayniqsa, narxga sezgir loyihalarda. PERC dizayni ko'plab tandem elementlar tadqiqotlari uchun ham asos bo'lib xizmat qilmoqda. Masalan, tadqiqotchilar PERC elementlaridan perovskit bilan birlashtirilgan tandem konfiguratsiyada kremniyli pastki qatlam sifatida foydalanib, 2025 yilda 30% dan ortiq samaradorlikka erishdilar[13] (bu haqda keyingi bo'limda batafsilroq). Xulosa qilib aytganda, PERC fotoelementlari so'nggi o'n yillikda kremniyli quyosh texnologiyasining samaradorlikdagi sakrashida hal qiluvchi rol o'ynadi va hozirgacha PV tadqiqotlari hamda ishlab chiqarish yo'nalishlariga katta ta'sir ko'rsatmoqda.

1-jadval – PERC quyosh elementi rivojlanishidagi asosiy bosqichlar

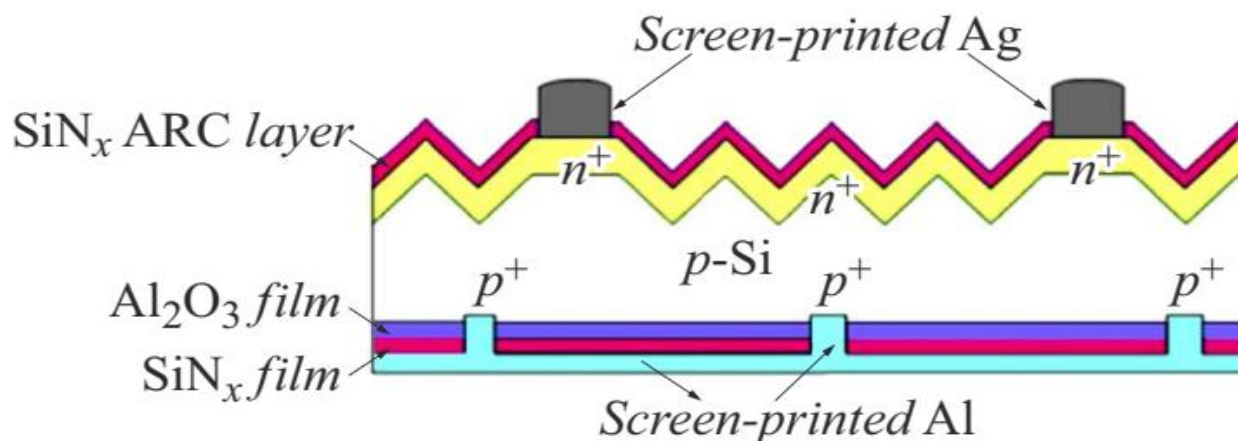
Yil	Bosqich / Yutuq	Manba
1983	Martin Green (UNSW) birinchi PERC element konsepsiyasini taklif qiladi (passivlashtirilgan emitter va orqa qatlam)	Green (2022)[2]
1989	Birinchi PERC-turidagi laboratoriya elementi namoyish etiladi – 22.8% samarali passivlashtirilgan emitter va orqa lokal diffuziyalangan (PERL) element (Blakers va boshq., UNSW)	Blakers et al. (1989)[4]
1999–2000	UNSW 24–25% samarali PERT elementlarini ishlab chiqadi (p-tur va n-tur kremniy asosida, Zhao, Green va boshq.) – 25% silikon samaradorlik rekordiga yaqinlashadi	Zhao et al. (2000)[4]
2014	PERC sanoat miqyosida ishlab chiqarishga kiradi; birinchi katta hajmdagi qabul qilinishi (~19% samaradorlik)	Green (2015)[4]

Yil	Bosqich / Yutuq	Manba
	chegarasiga yaqinlashgan). Sanoat Al-BSF liniyalarini PERC'ga moslashtirishni boshlaydi	
2015	PERC texnologiyasi keng tijorat miqyosida joriy qilinadi – >20% modul samaradorligi. PERC yuqori samarali, tejamkor panellar uchun “yangi platforma”ga aylanadi	FuturaSun (2023)[8]
2018	PERC yangi ishlab chiqarishda Al-BSFni ortda qoldiradi. PERC elementi samaradorligi yiliga taxminan 0.4% (mutlaq) ga oshmoqda	PV-Tech (2018)
2020	PERC elementi laboratoriya rekordi ~24.5% (p-tur, Fraunhofer ISE). Tijorat mono-PERC modullari 21% samaradorlikdan oshadi	Green et al. (2020)
2022	PERC silikon PV ishlab chiqarishining ~80–90% ini tashkil etadi. Martin Green PERC innovatsiyasi uchun Millennium mukofotini oladi[2]. n-Tur TOPCon va HJT PERC ustunligiga jiddiy raqobat keltira boshlaydi	Millennium Prize (2022)[2]
2025	Tandem perovskit+PERC elementlari >30% samaradorlik bilan namoyish etiladi (Park va boshq., Janubiy Koreya)[13]. Sanoat TOPCon/HJT'ga o'tishni tezlashtiradi; PERC arzonligi sababli keng ishlab chiqarishda qoladi	Park et al. (2025)[13]

You've hit the plus plan limit for deep research requests. You can access more deep research when the limit resets on 2025-11-24.

PERC Quyosh Elementi Tuzilishi va Ishlash Printsipi

Zamonaviy PERC (Passivlashtirilgan Emitter Orqa Kontaktli) quyosh elementi kristall silikondan tayyorlangan plastinka asosida quriladi va tashqi ko'rinishdan oddiy elementga o'xshash bo'lsa-da, orqa qatlamda asosiy farqlarga ega. 5-rasmda PERC elementi tuzilmasining ko'ndalang kesimi va ishlab chiqarish texnologik jarayoni ko'rsatilgan.



5-rasmda PERC elementning tipik tuzilishi ko'rsatilgan. (DOI: 10.21883/TP.2022.04.53606.224-21)

PERC elementining asosiy xususiyatlari quyidagilardan iborat [39][40]:

Old tomon: Quyosh nurlari tushadigan tomoni odatiy quyosh elementi bilan deyarli bir xil. Bu yerda p-turdagi kremniy plastinka sirtiga fosfor diffuziyasi orqali n^+ emitter qatlami hosil qilinadi, u p-n o'tishni (pn-uzelni) shakllantiradi. Emitter qatlam antiaks ettiruvchi qoplama (ARC — odatda kremniy nitridi, SiN_x) bilan qoplangan bo'lib, bu qatlam yorug'likning aks etishini kamaytiradi va sirtni passivlashtiradi. Tok yig'uvchi metall kontaktlar (kumush pastasi bilan chop etilgan barmoqlar va magistral chiziqlar) old tomonda joylashadi [16]. Ilg'or PERC dizaynlari selektiv emitterni o'z ichiga oladi — kontakt ostidagi emitter kuchli doplangan bo'ladi (past kontakt qarshiligi uchun), qolgan sohalarda esa doplash darajasi past bo'lib, rekombinatsiyani kamaytiradi [16]. Bu yuqori ochiq kontakt kuchlanmasi (V_{oc}) ni saqlagan holda ketma-ket qarshilikni oshirmaydi.

Orqa tomon passivlashtirish: Ilgari ishlatilgan to'liq maydonli alyuminiy qotishmali orqa sirtli elementlardan farqli o'laroq, PERC elementining orqa sirtida dielektrik passivlashtiruvchi qoplama mavjud. Odatda bu kremniy sirtiga 5–20 nm qalinlikda qo'llaniladigan alyuminiy oksidi (Al_2O_3) bo'lib, u yuqoridan taxminan 100 nm qalinlikdagi kremniy nitridi (SiN_x) bilan yopiladi [15]. Al_2O_3 yuqori sifatli kimyoviy passivlashtirish xususiyatlariga ega (sirt defektlarini kamaytiradi) va silikondagi sirtga nisbatan salbiy zaryadlar ($\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) ni saqlaydi. Bu salbiy zaryadlar elektr maydoni hosil qilib, p-tipdagi asosda elektronlarni orqa sirtga yaqinlashishidan to'sadi (ya'ni, maydon-effektli passivlashtirish amalga oshadi) [15]. Bu juda foydali, chunki p-tip bazali elementlarda elektronlarning orqa sirt orqali rekombinatsiyasi asosiy yo'qotish manbaidir. SiN_x qatlamining vazifalari quyidagilardir: Al_2O_3 ni namlikdan va metall pastadan himoya qilish, vodorodni chiqarish orqali qo'shilmagan bog'larni passivlashtirish, va uzoq to'liqlik yorug'likni aks ettirish orqali optik reflektor bo'lish [15]. Umuman olganda, bu orqa passivlashtiruvchi strukturaviy qoplama sirt rekombinatsiyasini sezilarli darajada kamaytiradi va V_{oc} ni oshiradi.

Mahalliy orqa kontaktlar: Tokni yig'ish uchun PERC elementlari to'liq metall bilan qoplash o'rniga, faqat alohida nuqtalarda kontaktlar qo'llaydi. Dielektrik qoplama qo'yilgach, lazer yordamida taxminan 50–100 mikrometr o'lchamli teshiklar hosil qilinadi (panjara yoki nuqta shaklida) [1]. Ushbu mikroskopik teshiklar orqali metall pastasi (odatda alyuminiy, ba'zida kumush bilan) plastinka bilan qotishib, har bir kontakt nuqtasi ostida p⁺-turdagi mahalliy orqa sirtli qatlam hosil qiladi [17]. Bu p⁺ qatlamlar rekombinatsiyani kamaytiradi va ohmik kontakt ta'minlaydi. Metall kontaktlar teshiklar orqali tok tashuvchilarni (ya'ni teshiklarni) yig'adi va tashqi zanjirga ulanadi. PERC elementlarida orqa metallizatsiya odatda alyuminiy padlar panjarasi shaklida bo'ladi. Bu yondashuv — eski Al-BSFga nisbatan — yuqoriroq Voc va kuchliroq yorug'lik oqimi (Jsc) ni ta'minlaydi, chunki orqa sirtning katta qismi hali ham passivlashtirilgan bo'lib, metall bilan bevosita aloqa qilmaydi [17][18].

Yorug'likni ushlab (light trapping): Dielektrik passivlashtiruvchi qatlam, shuningdek, orqa reflektor sifatida xizmat qiladi. Kremniy infraqizil (uzun to'liqlik) yorug'likni yomon so'radi; oddiy elementlarda bunday yorug'lik sirt orqali chiqib ketadi. PERC'ning Al₂O₃/SiN_x orqa dielektrik strukturasining sinish koeffitsienti silikondan pastroq bo'lgani uchun, yorug'likni ichki aks ettirish sodir bo'ladi. Metall qatlam ham bu yorug'likni aks ettiradi. Natijada, infraqizil fotonlar silikon ichida ikkinchi bor so'rilish imkoniga ega bo'ladi, bu esa Jsc ni oshiradi. Shu sababli, PERC elementlari 800–1100 nm diapazonda spektral javobni yaxshiroq ko'rsatadi [19]. Ya'ni, PERC optik (orqa oynavand reflektor) va elektr (sirt passivlashtirish) foydalarni birlashtiradi.

PERC Elementlarini Ishlab Chiqarish Jarayoni

PERC quyosh elementlarini ishlab chiqarish an'anaviy kristalli kremniy elementlarini tayyorlash texnologiyasiga asoslanadi, biroq unga bir nechta muhim qo'shimcha bosqichlar qo'shiladi. PERC texnologiyasini joriy qilish uchun mavjud Al-BSF elementlarini ishlab chiqarish liniyasiga odatda quyidagi bosqichlar qo'shiladi: orqa sirtning jilalash, dielektrik qatlamni cho'ktirish va lazer orqali kontakt ochilishi bosqichi (15). Quyida p-turdagi monokristalli kremniy asosida ishlab chiqariladigan PERC elementining bosqichma-bosqich ishlab chiqarish jarayoni keltirilgan bo'lib, u an'anaviy elementdan farqli jihatlarni ta'kidlaydi:

- **Plastina va Matritsa:** p-turdagi Si plastina (~150 µm), old tomonida yorug'likni tutuvchi tasodifiy piramida teksturasi, orqa tomon silliqlangan – yaxshi passivatsiya uchun (15).
- **Emitter Diffuziyasi:** POCl₃ orqali diffuziya natijasida n⁺ emitter hosil qilinadi (~80–100 Ω/□); PSG ni olib tashlash va orqa tomondagi n⁺ qatlamni yuvib tashlash (p-tur orqa qatlamni saqlab qolish) (15).
- **Orqa Sirtning Silliqlash:** Orqa sirt tekis va silliq bo'lishi kerak (agar u teksturalangan bo'lsa, ~1 µm ni yuvib tashlash kerak) – bu Al₂O₃/SiN_x passivatsiya qoplamasining sifatli yotishini ta'minlaydi (15).

- **Old Tomon ARC/Passivatsiya:** ~75 nm PECVD usulida SiN_x qoplama hosil qilinadi – bu nurlanishga qarshi qoplama va vodorodlanish orqali sirt passivatsiyasi vazifasini bajaradi (15).
- **Orqa Passivatsiya:** ALD usulida ~10 nm Al_2O_3 + PECVD usulida ~100 nm SiN_x qoplama orqa sirtga cho'ktiriladi; keyinchalik termik qayta ishlash yoki kuydirish orqali Al_2O_3 ning passivatsiya xususiyati faollashtiriladi (15).
- **Lazer Teshiklari:** Orqa dielektrik qoplamada lazer yordamida mayda teshikchalar ochiladi (odatda 1–5% yuzani qamrab oladi), bu kontaktlar joylashadigan nuqtalar bo'lib, past qarshilik va kam rekombinatsiyani ta'minlaydi (20).
- **Metallizatsiya:** Old tomonga Ag (kumush) panjarasi (fingrlar va shinabarglar) va orqa tomonga to'liq Al (alyuminiy) qatlami chop etiladi. (Qo'shimcha: orqa shinabarglar uchun Ag/Al pastasi yoki qo'shimcha Ag) (15).
- **Yopish (Co-Firing):** Yuqori haroratli konveyer pechida (~800 °C) kuydirish. Old tomondagi Ag pastasi SiN_x orqali emitter bilan kontakt hosil qiladi; orqa tomondagi Al pastasi lazer teshiklaridagi Si bilan qotishib, p^+ BSF hosil qiladi, qolgan joylarda esa alyuminiy oynali qatlam sifatida qoladi (dielektrik ustida elektr kontakt yo'q) (17).
- **Sinov va Saralash:** Element samaradorligi o'lchanadi (PERC elementlari yuqori V_{oc} , BSF bilan taqqoslanadigan I_{sc} , umumiy yuqori samaradorlik beradi). Elementlar samaradorligi va tashqi ko'rinishiga qarab saralanadi. PERC elementlari orqa sirtida dielektrik qoplamaga ega (kulrang/oq) bo'lib, ularni ikkiyoqlama yoritilgan (bifacial) qilish mumkin – orqa yorug'likni ham ushlab, qo'shimcha quvvat hosil qiladi (1).

Yuqoridagi ketma-ketlikdan ko'rinib turibdiki, standart elementdan PERC ga o'tish uchun zarur asosiy qo'shimcha bosqichlar quyidagilar: orqa sirtni tayyorlash (yuvish/jilalash), orqa dielektrik qoplama va lazer orqali kontakt ochish (59) (60). Bu bosqichlarning har biri aniq bajarilishi zarur, aks holda kutilgan samaradorlik oshmaydi. Qolgan jarayonlar (teksturalash, diffuziya, ARC, metallizatsiya) asosan o'zgarishsiz qoladi – bu esa PERC texnologiyasiga kremniy PV sanoatidagi mavjud ishlab chiqarish tajribasini to'liq qo'llash imkonini beradi.

Shuni ta'kidlash lozimki, ishlab chiqaruvchilar PERC texnologiyasi bosqichlarini uzluksiz takomillashtirib borishmoqda. Masalan, plazmali lazer dopingi orqaligina kontakt ostidagi BSF ni hosil qilish mumkin – bu esa to'ldirish koeffitsientini yaxshilaydi. Kumush sarfini kamaytirish uchun ekranga bosish o'rniga elektrokaplama metallizatsiya (masalan, PERC elementlarida Ni/Cu qoplama) ham tadqiq qilinmoqda (21). Biroq, asosiy oqimdagi PERC ishlab chiqarishi hali hamyonbop bosma va kuydirish jarayonlariga tayanadi. Shu yetuk texnologiyalar asosida yillik PERC elementlari samaradorligi ~0.4% (mutlaq) ga oshib bormoqda (14) – bu juda tez sur'at bo'lib, 2023-yilda yetakchi ishlab chiqaruvchilarning mahsuloti ~23% ga yetdi. Bu esa PERC texnologiyasining ishlab chiqarishdagi imkoniyatlari hali ham to'liq tugamaganligini ko'rsatadi – ko'p shinabargli panjaralar, yupqa plastinalar, takomillashtirilgan pastalar va ilg'or texnologik nazorat (ba'zan sun'iy intellekt va mashina ko'ruvi yordamida) bu yutuqlarga erishishga sabab bo'lmoqda.

PERC Texnologiyasining Variantlari va Takomillashuvi

“PERC” (Passivated Emitter and Rear Cell) atrofida yuqori samaradorlikka ega bir nechta turdosh quyosh elementi dizaynlari mavjud bo‘lib, ular PERL, PERT va boshqa shakllarni o‘z ichiga oladi. Ilgari alohida ko‘rib chiqilgan bo‘lsa-da, hozirda ular ko‘pincha PERC variantlari sifatida tasniflanadi (4). Ularning barchasida emitter va orqa sirtни passivatsiyalash asosiy g‘oya bo‘lib, orqa kontaktlar va doping usullarida farqlanadi:

- **PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)** – Hozirgacha muhokama qilingan asosiy struktura: odatda p-turdagi asos, diffuziya orqali hosil qilingan n^+ emitter, orqa sirt AlO_x/SiN_x passivatsiyasi va nuqtaviy alyuminiy kontaktlar. “Mono-PERC” – monokristalli kremniy asosida, “Poly-PERC” – ko‘p kristalli kremniy asosida ishlangan variant bo‘lib, u ham polikristalli Al-BSF elementlariga nisbatan yaxshiroq natija beradi (1). Mono-PERC odatda samaradorlikda poly-PERC dan bir necha foiz yuqori, ammo ikkalasi ham PERC dizaynidan foyda ko‘radi. Bugungi kunda PERC elementlari ko‘pincha Selektiv Emitter (SE) va ko‘p shinalik panjara (Multi-Busbar) bilan ishlanadi. Bular ba’zida “PERC+” yoki “PERC-SE” deb ataladi. “PERC-ULE” (ultra-low emitter) esa kontaktlar ostidan tashqari emitter dopingini kamaytirish orqali V_{oc} ni oshirishga xizmat qiladi. Asosiy tamoyil esa o‘zgarmaydi: dielektrik orqa passivatsiya va lokal kontaktlar.

- **PERL (Passivated Emitter and Rear Locally-diffused)** – UNSW tomonidan yaratilgan laboratoriya chempioni strukturasi. PERL elementlarida orqa kontakt zonalarida og‘ir bor diffuziyasi (p^+) qo‘llaniladi, kontaktlar orasidagi zonalar esa termal oksid bilan passivatsiyalangan bo‘ladi (17). PERL Al-BSF o‘rniga lokal yuqori-past junctionlardan foydalanadi. Old sirt ham termal oksid + nitrid qoplama bilan yuqori darajada optimallashtirilgan. PERL elementlari bir quyosh nurlanishida ~25% samaradorlikka erishgan. Biroq, PERL fotolitografiya va ko‘p bosqichli diffuziya talab qilgani uchun sanoat ishlab chiqarishiga mos emas edi. Uning g‘oyalari PERC ishlab chiqarishiga soddalashtirilgan shaklda (masalan, ekranli kontaktlar orqali) o‘tkazildi. PERL – passivatsiyalangan kontaktlarning kremniydagi maksimal imkoniyatlarini namoyon etganligi bilan ahamiyatli.

- **PERT (Passivated Emitter and Rear Totally-diffused)** – PERL ga qarama-qarshi tarzda, PERT butun orqa sirtни diffuziya orqali doplashadi (p-tur uchun p^+ , n-tur uchun n^+). Bu struktura Al-BSF o‘rniga orqada to‘liq diffuziya bilan BSF yaratadi. Misol uchun, p-turdagi plastinada bor diffuziyasi orqali orqa sirt p^+ qilinadi va passivatsiyalanadi – bu PERC ga o‘xshash, ammo boron asosidagi BSF bilan. PERT LID ni kamaytiradi va ikkiyoqlama (bifacial) xususiyatga ega bo‘lishi mumkin (5). Ko‘plab yuqori samarali n-turdagi elementlar aslida PERT hisoblanadi. 1990-yillarda Zhao va boshqalar PERT struktura bilan 24.7% samaradorlikka erishgan (4). Bugun PERT p-turda kamroq qo‘llaniladi, ammo n-PERT ba’zi ishlab chiqaruvchilar tomonidan qo‘llaniladi (n-tur kremniyning LID ga chidamliligi va boshqa afzalliklari sababli). PERT – to‘liq diffuziyali PERC deb qaralishi mumkin.

- **PERF** – Ilmiy adabiyotda kamroq uchraydi. U “Passivated Emitter, Rear Floating junction” yoki “Rear Free diffusion” degan ma’noni anglatishi mumkin. Ba’zi

holatlarda, PERF – PERC ga o'xshash, ammo orqa junction diffuziya qilinmagan (floating) bo'lgan struktura sifatida tasvirlanadi. U PERC ning orqa sirtida BSF dopingsiz faqat passivatsiyalangan holda ko'rinadi. PERF keng tarqalmagan, ko'pchilik uni PERC tarkibida deb hisoblaydi.

- **Ikkiyoqlama (Bifacial) PERC** – Oddiy PERC elementlarini ikkiyoqlama qilish uchun modullarda shaffof orqa qatlam ishlatiladi va orqa dielektrikdan yorug'lik o'tishi uchun moslashuv kiritiladi. Ba'zi ishlab chiqaruvchilar orqa passivatsiyani o'zgartirib (masalan, SiN_x ni optik jihatdan kam zich), orqa tomondan 5–10% yorug'likni o'tkazishga erishadilar. Natijada bunday modullar 5–15% ko'proq energiya hosil qiladi (77). Biroq, to'liq optimallashtirilgan bifaciallik odatda n-turdagi elementlarda bo'ladi. Shunday bo'lsa-da, "bifacial PERC" modullari mavjud bo'lib, PERC dizaynining moslashuvchanligini ko'rsatadi (1).

- **PERC/T++** – PERC ni boshqa texnologiyalar bilan birlashtiruvchi nomlar mavjud: masalan, MWT-PERC (Metal-Wrap-Through) – old kontaktlar orqa tomonga o'tkazilgan; yoki PERC-SE – shingled (qatlamli) interkonektlar bilan ishlangan PERC elementlari (Boviet kabi ishlab chiqaruvchilar tomonidan) (4). Bular ko'proq modul darajasidagi innovatsiyalar bo'lib, PERC dizaynining boshqa yondashuvlar bilan integratsiyalashuvini ko'rsatadi.

Davomli Takomillashtirishlar: PERC arxitekturasini doimiy ravishda yaxshilashmoqda. Kumush o'rniga mis bilan qoplangan kontaktlar (xarajatni kamaytirish maqsadida) ishlanmoqda (23); metall kontaktlardagi rekombinatsiyani kamaytirish uchun ilg'or passivatsiya kontaktlari (masalan, orqada oksid ustiga joylashtirilgan polikremniy – POLO-PERC) tadqiq qilinmoqda. Dielektrik qatlamlar ham yaxshilashmoqda (masalan, SiO_2 oraliq qatlamlarini qo'shish orqali). Shuningdek, PERC ga xos degradatsiyalarni hal etish yo'llari – masalan, galliy bilan doplangan plastinalar orqali B–O LID ni kamaytirish – muhim ahamiyat kasb etmoqda (4). PERC modullari PID ga (Potential-Induced Degradation) chidamliligini ta'minlash uchun IEC 62804 sinovlariga mos materiallar tanlanadi va ba'zan modul chetlarida elektr oqimlarini yo'naltirish uchun mikrokonduktiv folga ham qo'llaniladi (4).

Xulosa: PERC bir xil dizayn emas – bu yuqori samaradorlikka erishish yo'lida ko'plab variantlarni o'z ichiga olgan platformadir. PERL va PERT kabi variantlar maksimal samaradorlik darajasini ko'rsatgan bo'lsa, sanoatda PERC asosiy, amaliy komponentlarni o'zlashtirgan. Yangi avlod texnologiyalar – masalan, TOPCon – aynan PERC g'oyalariga asoslanib, passivatsiyalovchi kontaktlar bilan ularni yanada rivojlantirmoqda. Bu texnologik taraqqiyot uzluksizligini ko'rsatadi.

PERC va TOPCon taqqoslanishi

PERC bilan bir qatorda, so'nggi yillarda TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) texnologiyasi ham keng tarqalgan. TOPCon, PERCning rivojlanishi sifatida, orqa yuzada ultratin kremniy oksidi (~1–2 nm) qatlamini va unga qoplangan doplangan poli-kristalli kremniy qatlamini o'z ichiga oladi. Bu kombinezon zararkor rekombinatsiyani deyarli to'xtatadi. Asosan n-tipi TOPCon elementlari PERCning

mahalliy Alyuminiy p^+ kontaktlarini butun yuzaga tarqalgan poli-Si/oksid kontaktlar bilan almashtiradi. Shunday qilib, n -tipli TOPCon elementida tuzilma odatda: p -tipli bazaga qarshi, old tarafda p^+ bo'yalgan bor element, orqada esa n^+ poli-Si/oksid pasivatsiyalangan kontakt bilan ta'minlanadi (Al-BSF kontakt talab qilinmaydi). Masalan, quyidagi ko'rinishda chapda PERC va o'ngda TOPCon kontseptsiyasi keltirilgan; TOPConda orqa butun n^+ poli-Si qatlami mavjud, PERCda esa faqat ajratilgan Al kontaktlari.

Samaradorlik afzalligi: TOPCon elementlari odatda yuqori ochiq zanjir kuchlanish (V_{OC}) va to'ldirish faktori (FF)ga ega, chunki pasivatsiyalangan kontaktlar metall–kremniy rekombinatsiyasini deyarli yo'q qiladi. So'nggi ma'lumotlarga ko'ra, masshtabda ishlab chiqarilayotgan TOPCon elementlari $\sim 25\text{--}25.5\%$ samaradorlikka erishgan, bu PERCning $\sim 23\%$ samaradorligidan $1.5\text{--}2\%$ yuqori ekanligini ko'rsatadi[11][24]. Laboratoriya sharoitida TOPCon $\sim 26.0\text{--}26.1\%$ gacha, PERC esa $22.5\text{--}23\%$ atrofida cho'qqiga erishgan[24]. Modular darajasida ham farqlar saqlanadi: TOPCon modullari (odatda ikki tomonli n -tipli) hozirda $22\text{--}23\%$ modul samaradorligiga erishgan, bu PERC modullari qatoridagi ko'rsatkichlardan yuqori[11]. Boshqa izlanishlarda TOPConning masshtabdagi 25.2% samaradorlik bilan PERCning 23.2% samaradorligini 2% ball yuqoriga chiqargani qayd etilgan[11]. Bu yuqori samaradorlik asosan yuqori V_{OC} (n -TOPCon elementlar ~ 720 mV, p -PERC ~ 680 mV) va ba'zan yuqori I_{SC} (xususan ikki tomonli hosildorlik yoki n -tipli substratning ko'k spektrga javobi tufayli) bilan bog'liq.

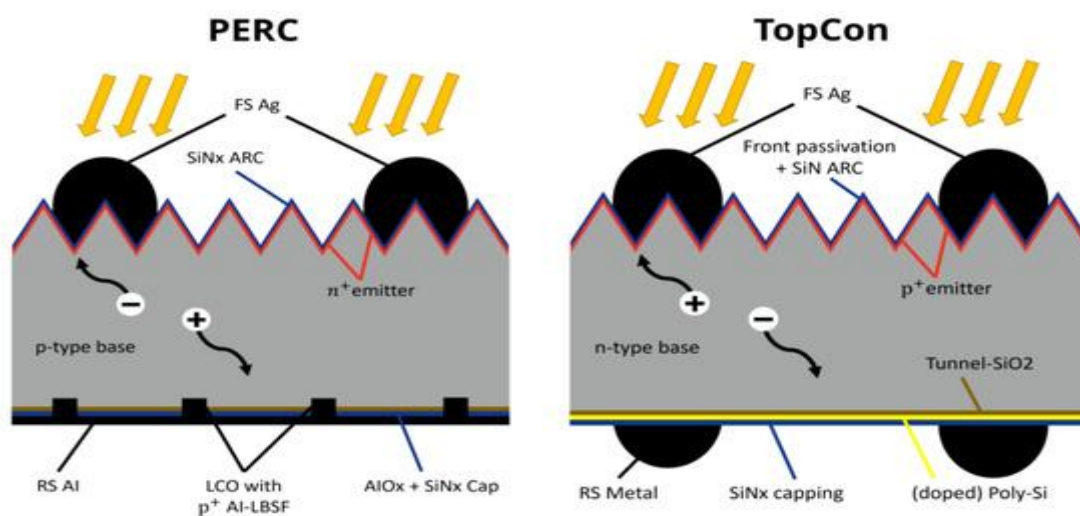


Figure 6. PERC (chapda) va TOPCon (o'ngda) elementlarining quyosh xujayrasi arxitekturasining sxematik ko'rinishi, tepada quyosh nuri yo'nalishi va zaryad tashuvchisi yo'nalishlari tasvirlangan. (<https://doi.org/10.3390/cryst14020167>)

Issiqlik va ikki tomonli ishlash: Odatda n -tipli waflarda bajariladigan TOPCon elementlarining temperatursizlantiruvchilari biroz kichikroq (PERC $\sim -0.35\text{--}-0.37\%/^{\circ}\text{C}$, n -TOPCon $\sim -0.30\text{--}-0.32\%/^{\circ}\text{C}$)[25]. Bu issiq kunlarda TOPCon kamroq samaradorlik yo'qotishini anglatadi. Bundan tashqari, TOPCon tabiatan ikki tomonli dizaynlarga mos keladi (orqa pasivatsiya qatlami shaffof yoki hech bo'lmaganda yorug'likni to'smasligi mumkin). PERCning ikki tomonli hosildorligi

odatda ~70% atrofida bo'lsa, TOPCon modullari 75–80% gacha chiqadi. Natijada, aks ettirilgan yorug'lik bo'lgan o'rnatishlarda TOPCon energiya hosildorligi jihatidan afzallikka ega bo'lishi mumkin.

Narx va murakkablik: Dastlab PERC an'anaviy ishlab chiqarish liniyalariga nisbatan kichik qo'shimchalar kiritish orqali arzonroq bo'lsa-da, TOPCon yangi bosilgan qavat (polikristalli kremniy) va boshqa orqa yuzalarga ishlov berish kabi qo'shimcha qadamlarni talab qiladi. Biroq sanoat tezda TOPConni optimallashtirib, narx farqlari kamaymoqda. Hozirgi hisob-kitoblarga ko'ra, 2024 yilda PERC element ishlab chiqarish xarajatlari TOPConga qaraganda ~10–15% kamroq edi[24]. Shunga qaramay, TOPConning yuqori samaradorligi modul darajasida watt boshiga tushumni kamaytirishi mumkin, bu element narxini kompensatsiya qiladi. Ijrochi hajm oshgani sayin TOPCon narxlari yanada tushishi kutilmoqda. Tahlilchilar TOPCon texnologiyasi samaradorlik va boshqariladigan narx o'sishining uyg'unlashuvi tufayli 2024–2025 yillarda PERCdan asosiy texnologiya sifatida o'tishini taxmin qilishmoqda[36].

Ishlashning umumiy xulosasi: Sifat jihatidan "TOPCon yuqori samaradorlik (ayniqsa yuqori haroratlarda quvvatni konvertatsiya qilishda) taklif etadi, PERC esa soddaligi va past narxi bilan ajralib turadi". Bu fikrlarning qisqa shakli shunday: "TOPCon quyosh elementlari PERCga tunnel oksid qatlami va pasivatsiyalangan kontakt qo'shib samaradorlikni oshiradi va rekombinatsiyani kamaytiradi. PERC arzonroq va keng tarqalgan bo'lsa-da, TOPCon ayniqsa quvvat konvertatsiya qilish va issiqlikka chidamlilik nuqtai nazaridan yuqori ko'rsatkichlar taqdim etadi." [1] Bu o'zaro savdolarni yaxshi aks ettiradi. Masalan, standart 156 mm elementda: PERC elementi taxminan 6.0 A tok va 0.68 V kuchlanishda (~9.5 A Isc, 0.68 V Voc, 80% FF) ~5.5 W quvvat beradi. Xuddi shu o'lchamdagi TOPCon elementi esa taxminan 6.3 A tok va 0.72 V kuchlanishda (~10 A Isc, 0.72 V Voc, 82% FF) ~6.0 W quvvat ishlab chiqaradi. Bu element darajasida ~9% quvvat o'sishini bildiradi (samaradorlik ~21% ga nisbatan ~23%). Modullarda ham bu farqlar saqlanadi.

Jadval 2. PERC va TOPCon xususiyatlari (hozirgi texnologiya uchun tipik qiymatlar)

Xususiyat	PERC (p-tipli)	TOPCon (n-tipli)
Laboratoriya element samaradorligi	~23–24% (eng yaxshi p-PERC)[24]	~26% (eng yaxshi n-TOPCon)[24]
Ommaviy ishlab chiqarish samaradorligi	~22–23% (tijorat mono-PERC)[11]	~24–25% (tijorat mono-TOPCon)[11]
Ochiq zanjir kuchlanishi (Voc)	~670 mV (p-tip, Al-BSF orqa)[1]	~710 mV (n-tip, pasivatsiyali orqa)
Qisqa tutashuv toki (Isc)	[Ma'lumot yo'q]	[Ma'lumot yo'q]
To'ldirish faktori (FF)	~80% (ishlab chiqarishda)	~82% (ishlab chiqarishda)
Issiqlik koeffitsienti (P quvvat)	~–0.35...–0.37%/°C	~–0.30...–0.32%/°C
Ikki tomonli samaradorlik	~70% (orqa/old nisbati)	75–80%

TOPConning asosiy foydalari yuqori samaradorlik va n-tip wafer afzalliklarida, PERCning esa soddalik va allaqachon katta ishlab chiqarish hajmiga ega bo'lishidadir. Shuni ta'kidlash joizki, Heterojuftlik (HJT) elementlari ham yanada balandroq samaradorlik potensialiga (~26–27%) va hattoki pastroq harorat koeffitsientlariga ega, biroq ularning ishlab chiqarish xarajatlari yuqoriroq[24][11]. TOPCon va HJT o'rtasidagi raqobat davom etmoqda, lekin ikkisi ham n-tip wafer asosida bo'lib, PERCni ortda qoldirishni maqsad qilgan. Shu vaqt ichida ikki tomonli PERC va yaxshilangan PERC (yaxshiroq tasma materiallari va hokazo yordamida) vaqtincha farqni qisqartirishga intilmoqda.

Amaliy sharoitda, bir xil nomi nominalga ega TOPCon moduli PERC moduliga qaraganda taxminan 3–4% ko'p energiya yetkazib berishi mumkin, asosan yuqori harorat va ikki tomonli hosildorlik afzalligi tufayli[28]. Biroq PERC panellari ishonchli va bankable (moliyalashtirilishi oson) ekanligi, hamda ularning narxi keskin pasaygani sababli, har ikkala texnologiya yaqin yillarda birga mavjud bo'lib, TOPCon yuqori samaradorlik segmentiga, PERC esa standart ilovalarga xizmat qilaveradi[28]. Haqiqatan ham sanoat yo'riqnomalarida (masalan, ITRPV) PERC asta-sekin TOPCon va boshqa n-tip texnologiyalarga e'tirof etilishini taxmin qilinmoqda[28], xulosa qilib aytganda, TOPCon PERC asoslarini yangilab ("PERC 2.0") ko'proq ideal kontakt sxemasida yuqori samaradorlikka erishadi, biroq biroz murakkab jarayonlarni talab qiladi[1].

PERC Bilan Organik va Tandem Qo'llanmalar

(Foydalanuvchi so'rovda "organik quyosh elementlari haqida oson tushunarli" deyilgan bo'lsa-da, PERC texnologiyasi kremniy asosidagi elementlar uchun mo'ljallangan bo'lib, to'g'ridan-to'g'ri organik fotoelementlarga aloqador emas.

Ehtimol, bu ifoda faqat umumiy tushunishni osonlashtirish uchun ishlatilgan. Shu sababli, biz ushbu bo‘limda aynan PERC asosidagi tandem kombinatsiyalarga e’tibor qaratamiz.)

Tandem Quyosh Elementlarida PERC:

Tandem quyosh elementi ikki yoki undan ortiq kichik elementlarni (sub-elementlarni) turli energiya band oralig‘ida (bandgap) ustma-ust joylashtirish orqali quyosh spektrining ko‘proq qismini yutib, yagona bo‘g‘inli (single-junction) elementlarning samaradorlik chegarasidan (kremniy uchun taxminan 29%) yuqori natijaga erishadi. Kremniy asosidagi PERC elementlari sanoatda keng qo‘llanilishi tufayli, ularni ayniqsa perovskit elementlari bilan birgalikda tandem tizimlarida pastki (quyi) element sifatida ishlatish bo‘yicha izlanishlar olib borilgan.

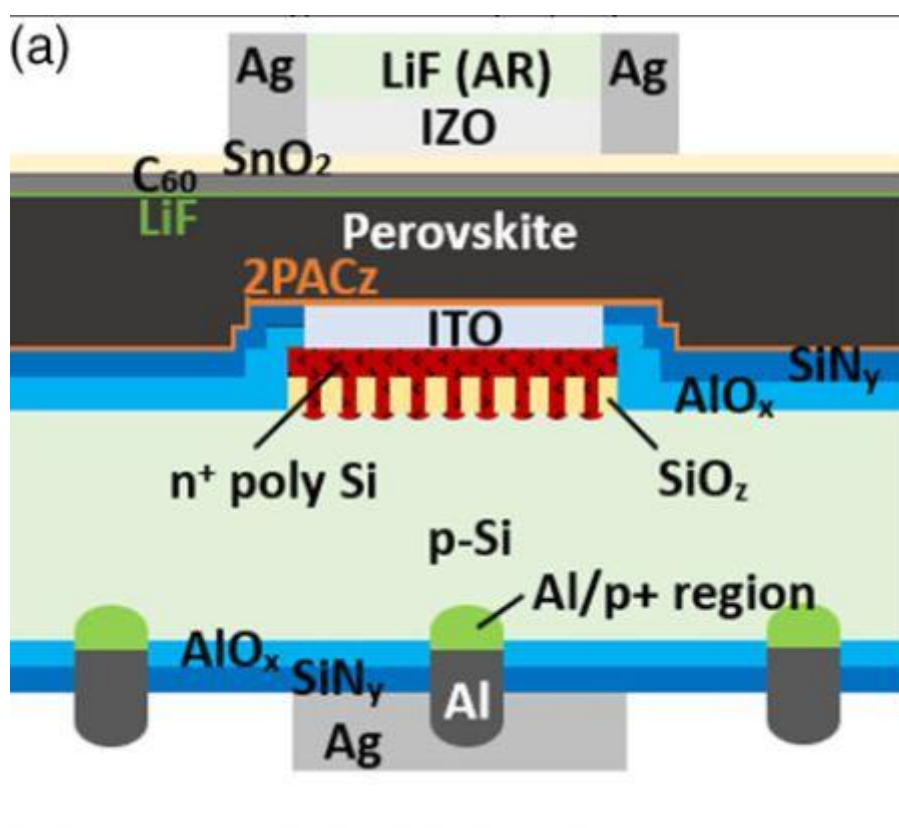


Figure 7. Perovskit-POLO-PERC tandem quyosh elementining sxemasi

7-rasm: Monolit ikki terminalli tandem elementning sxematik kesimi — yuqori qismida perovskit (p–i–n struktura), pastki qismida esa PERC/POLO texnologiyasiga asoslangan kremniy elementi joylashgan (10). Kremniy pastki elementi bu yerda p-tipi PERC element bo‘lib, old yuzasida polikremniy (POLO) tutashuvi, orqa tomonida esa odatdagi passivatsiyalangan kontakt ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ + lokal Al) mavjud. Bunday tandem elementlar dastlab ~21–23% samaradorlikka erishgan bo‘lsa, kelajakda bu ko‘rsatkich ~30% ga yetishi kutilmoqda. (Rasm manbasi: HZB/RRL Solar, CC BY 4.0 <https://bit.ly/358rI9p>).

Bunday tandemda yuqori band oralig‘iga ega perovskit (~1.7–1.8 eV) ko‘rinadigan yorug‘likni yutadi, kremniy (taqiqlangan zona oralig‘i ≈ 1.1 eV) esa

perovskit orqali o'tgan infraqizil va qizil yorug'likni yutadi. PERC elementlari kremniy pastki bo'limi uchun narxi arzon va texnologik jihatdan allaqachon optimallashtirilgan platforma sifatida xizmat qiladi (13). Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, mavjud PERC elementini ozgina modifikatsiya qilish orqali ham yuqori samarali tandem tizim hosil qilish mumkin (26).

2022 yilda Germaniyaning HZB va ISFH tashkilotlari tomonidan p-tipli PERC platformasida monolit perovskit/kremniy tandem qurilmasi ishlab chiqildi. Ular 21.3% samaradorlikka erishishdi (10). Bu dizaynda PERC elementining oldingi yuzasida POLO (polikremniy-oksidi tuzilmasi) ishlatilgan bo'lib, bu diffuziya emitteri o'rnini bosgan – perovskit qatlamga zarar yetkazmaslik uchun. Ushbu dizayn “perovskit-POLO-PERC tandem” deb ataladi va unda standart PERC orqa struktura (Al_2O_3 passivatsiya qatlami va boshqalar) saqlangan (10).

Natija istiqbolli bo'lib, keyingi optimallashtirishlar bilan ushbu struktura 29.5% gacha samaradorlikka yetishi mumkinligi taxmin qilindi (10). 7-rasmda ushbu tandem qurilmaning sxematik kesimi ko'rsatilgan: unda pastki element to'liq PERC tuzilmasini o'z ichiga oladi (orqa tomonda $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ va lokal alyuminiy kontaktlar), yuqori element esa shaffof kontaktlarga ega bo'lgan yupqa qatlamli perovskit elementidir.

2023–2025-yillarga kelib sezilarli taraqqiyot kuzatildi: Janubiy Koreyalik Park va hamkorlari sanoatga tayyor p-tipli PERC element asosida qurilgan monolit perovskit/kremniy tandem elementda 30.05% samaradorlikka erishganini xabar qildi (13). Ular interfeysni yaxshilash uchun o'z-o'zidan yig'iluvchi monoqatlam (self-assembled monolayer) ishlatgan va tandem elementning V_{oc} qiymatini 1.8 V dan oshirishga muvaffaq bo'lishgan (ya'ni perovskit yuqori elementi ~1.1 V, PERC pastki elementi esa ~0.7 V ta'minlaydi). Bu natija muhim, chunki u 30% samaradorlik chegarasidan o'tgan bo'lib, iqtisodiy jihatdan qulay PERC elementlar ham yuqori samaradorlikka erishishga hissa qo'sha olishini ko'rsatadi (13).

PERC ni tanlashning asosiy sababi – arzonlik. PERC elementlar arzon va ommaviy ishlab chiqariladi, shuning uchun agar ishonchlilik masalalari hal qilinsa, tandemli PERC modullar iqtisodiy jihatdan jozibador bo'lishi mumkin.

Texnik Kamchiliklar:

1. Tok mosligi: PERC elementi aslida yagona bo'g'inli (single-junction) ishlashga optimallashtirilgan. Tandemda esa ikkala kichik elementdan o'tuvchi tok bir-biriga teng bo'lishi lozim (seriya ulanma). PERC odatda yuqori tok ishlab chiqaradi va bu yuqori band oralig'iga ega perovskit bilan uyg'unlashmay qolishi mumkin. **Yechimlar:** Perovskit qatlami yupqalashtiriladi (ko'proq yorug'lik kremniyga o'tishi uchun) yoki kremniyning old yuzasi unchalik teksturalanmaydi (yorug'likni qaytarib perovskitga yuborish uchun).

2. Old kontaktlarning shaffofligi: PERC elementlari odatda old yuzasida metall panjaralar (Ag grid) bilan ishlanadi. Bular tandem strukturalarda perovskitga soya tushirishi mumkin. 2022-yilda ishlab chiqilgan tandem dizaynda PERC elementining old metall qatlami butunlay olib tashlangan va uning o'rniga shaffof

o'tkazuvchan oksid (ITO) va POLO kontakt ishlatilgan (10). Shu orqali PERC old tuzilmasi tandemga moslashtirilgan.

3. Spektral foydalanish: PERC elementlari orqa reflektor tufayli infraqizil (IR) sohada juda yaxshi ishlaydi. Tandemda bu foydali bo'ladi, chunki IR nurlanishi kremniyda qayta yutiladi. Biroq PERC old ARC (SiN_x) qatlami moviy yorug'likka unchalik shaffof emas – bu yagona bo'g'inli elementlar uchun mos, ammo tandemda moviy nurni perovskit yutadi. Shuning uchun, ARC qatlami biroz optimallashtirilishi mumkin.

Xulosa:

PERC texnologiyasi tandem quyosh elementlari bilan mos ishlay oladi — ayniqsa arzon narxli pastki element sifatida. Bu esa yagona bo'g'inli kremniy texnologiyasining samaradorlik chegarasidan oshishga yo'l ochadi. Kelajakda 30%+ samaradorlikka ega tijoriy tandem panellar aynan yangilangan PERC (masalan, galliy bilan qo'shilgan p-tipli, passivatsiyalangan kontaktli) asosida ishlab chiqarilishi mumkin. Bunday natijalarga PERC yoki TOPCon texnologiyasi yakka holda erisha olmaydi. Hozirda kompaniyalar shunday “gibrid” yondashuvlarni o'rganmoqda: masalan, PERC/TopCon aralash tuzilmalari yoki PERC ustiga perovskit qatlami qo'shish.

Organik Quyosh Elementlari va PERC Taqqoslanishi:

Garchi foydalanuvchi “organik quyosh elementlari haqida oson tushunarli izoh” so'ragan bo'lsa-da, PERC texnologiyasi kristall kremniy asosiga ega bo'lib, organik PV bilan sezilarli farq qiladi. Shunga qaramay, PERC tamoyillari (passivatsiya va yorug'likni boshqarish) boshqa texnologiyalarda ham qo'llaniladi. Organik elementlar butunlay boshqa materiallardan (polimerlar, kichik molekulalar) iborat bo'lib, kremniydek klassik p–n tutashuvga ega emas. Akademik uslubda aytganda: PERC elementlari noorganik silikon PV texnologiyalarining ilg'or namunasi bo'lsa, organik quyosh elementlari “uchinchi avlod” texnologiyalariga kiradi — ular asosan past xarajat va egiluvchanlikni maqsad qiladi, biroq samaradorligi ancha past (~10–15%) va barqarorlik muammolari bor. Har ikkisi quyosh energiyasidan elektr hosil qilishga qaratilgan, lekin materialshunoslik yondashuvlari tamomila boshqacha.

Ishlash Xususiyatlari

Yuqorida bayon qilingan dizayn tufayli, PERC elementlari odatda Al-BSF elementlariga nisbatan ochiq kontakt kuchlanishi (V_{oc}) va to'ldirish koeffitsienti (FF) bo'yicha yuqori ko'rsatkichlarga ega bo'ladi, shuningdek, spektrning yaqin infraqizil (IR) qismida qisqa tutashuv toki (J_{sc}) biroz ortadi. Misol uchun, oddiy monokristalli kremniy (mono-Si) elementda $V_{oc} \approx 0.63 \text{ V}$ bo'lishi mumkin bo'lsa, unga ekvivalent PERC elementda $V_{oc} \approx 0.67\text{--}0.70 \text{ V}$ ga yetadi, bu past rekombinatsiya tufayli yuzaga keladi.

PERC elementlarda ichki kvant samaradorligi (IQE) uzoq to'liq uzunliklarida sezilarli darajada yuqori bo'ladi va bu ko'plab holatlarda J_{sc} ni $\sim 1 \text{ mA/cm}^2$ ga oshiradi (18) (19). Bu yaxshilanishlar monokristalli kremniy uchun **1%–1.5%** absolyut samaradorlik ortishini ta'minlaydi (masalan, 20% dan 21.5% gacha), bu esa fotovoltaika (PV) sanoatida juda muhim natija hisoblanadi (1).

Biroq, PERC elementlari ayrim yangi texnologik e'tiborlarni ham talab qiladi:

- Orqa passivatsiya qatlami yuqori sifatli va uzoq muddatli barqaror bo'lishi kerak.
- Lazer orqali kontakt ochish jarayoni ehtiyotkorlik bilan optimallashtirilishi lozim — bu jarayon plastinkani shikastlamasligi va qisqa tutashuvlar (shuntlar) hosil qilmasligi zarur.

PERC texnologiyasi keng ommaviy ishlab chiqarishga kirgan dastlabki yillarda, **yorug'lik ta'sirida degradasiya (LID)** va **potensial ta'sirida degradasiya (PID)** muammolari nisbatan ko'proq kuzatilgan. Bu holat asosan p-tipli kremniydagi yuqori miqdordagi qo'shimcha aralashmalar va passivatsiya qatlamlarining xususiyatlari bilan bog'liq bo'lgan.

Ishlab chiqaruvchilar bu muammolarni quyidagi tarzda bartaraf etishgan:

- **LID** muammosiga qarshi galliy bilan doplangan kremniydan foydalanish yoki regeneratsiya jarayonlarini qo'llash orqali (4).
- **PID** ga qarshi esa yaxshilangan modul kapsullash materiallari va yangilangan element dizaynlari joriy qilingan (1).

Zamonaviy PERC modullari hozirda yuqori barqarorlikka ega bo'lib, ko'pincha **~30 yillik kafolatli xizmat muddati** bilan taklif qilinadi va boshqa element turlariga nisbatan qo'shimcha degradasiya juda kam bo'ladi.

Xulosa qilib aytganda, PERC strukturasini kremniy quyosh elementlarining tabiiy evolyutsiyasi sifatida baholash mumkin: bu dizayn orqali elementning old (emitter) va orqa sirtlari passivatsiya qilinadi hamda selektiv kontaktlardan foydalaniladi. Natijada, kremniy asosli texnologiyani to'liq o'zgartirmasdan, uning nazariy samaradorlik chegaralariga yaqinlashiladi. PERC'ning aynan shu sodda, ammo samarali dizayni uni sanoat miqyosida PV samaradorlikning tub burilish nuqtasiga aylantirdi.

PERC Elementlarining I-V Xarakteristikasi va Samaradorlik Hisoblash

Har qanday quyosh elementi kabi, PERC elementining ishlash ko'rsatkichi ham yoritish ostida o'lchanadigan tok–kuchlanish (I–V) egri chizig'i bilan tavsiflanadi. Quyosh elementi uchun I–V egri chizig'ining asosiy tenglamasi (fototokli diod uchun) quyidagicha bo'ladi:

$$I(V) = I_{ph} - I_0(e^{qV/nkT} - 1) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

bu yerda:

- I_{ph} — fototok,
- I_0 — diodning to‘yinganlik toki,
- R_s — ketma-ket qarshilik,
- R_{sh} — parallel (shunt) qarshilik,
- n — idealik faktori.

Yuqori sifatli PERC elementi past I_0 (yuqori passivatsiya tufayli), 1 ga yaqin n (diffuziya bilan boshqariladigan tok uchun), past R_s (yaxshi o‘tkazuvchanlik va kontaktlar) va yuqori R_{sh} (kam oqish) qiymatlari bilan ajralib turadi.

Asosiy Parametrlar (I–V egri chizig‘idan olinadigan):

- **Qisqa tutashuv toki (I_{sc}):** Kuchlanish 0 bo‘lgandagi tok. Oddiy o‘lchamdagi ($\sim 244 \text{ cm}^2$) PERC elementi 1 quyosh nuri ostida 9–10 A tok berishi mumkin (yuqori samarali mono-PERC uchun $J_{sc} \approx 39\text{--}40 \text{ mA/cm}^2$). PERC’ning yorug‘likni yaxshiroq ushlashi BSF elementlariga nisbatan J_{sc} ni $\sim 0.5\text{--}1 \text{ mA/cm}^2$ ga oshiradi (1).
- **Ochiq kontakt kuchlanishi (V_{oc}):** Tok 0 bo‘lgandagi kuchlanish. PERC elementlarda V_{oc} odatda 0.66–0.71 V atrofida bo‘ladi. Bu ko‘rsatkich Al-BSF elementlarida 0.62–0.65 V bo‘lganiga nisbatan yuqori, chunki yuzadagi rekombinatsiya ancha kamaygan. V_{oc} ni quyidagi formula bilan baholash mumkin:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_0} + 1$$

PERC’dagi passivatsiya I_{zxASGx} ni kamaytirib, V_{oc} ni oshiradi.

- **To‘ldirish koeffitsienti (FF):** $FF = P_{max}/V_{oc} \cdot I_{sc}$, ya’ni I–V egri chizig‘ining “to‘rtburchaklik” darajasi. PERC elementlarda FF odatda 79–81% atrofida, laboratoriya sharoitida metallizatsiyasi optimallashtirilgan hollarda 82–83% gacha yetadi. Yaxshi FF quyidagilarni talab qiladi:
past R_s — qalin kontakt chiziqlari va yaxshi o‘tkazuvchanlik,
yuqori R_{sh} — sezilarli oqishlarning yo‘qligi.

Dielektrik qatlamning qo‘shilishi ba’zan R_s ni biroz oshirishi mumkin, lekin lazerli ochilgan kontaktlar bu yo‘qotishni minimallashtirishga yordam beradi. So‘nggi yillarda ko‘p shinalik (multi-busbar) va yarim elementli modullar yordamida PERC elementlarining FF ko‘rsatkichi ancha oshirildi.

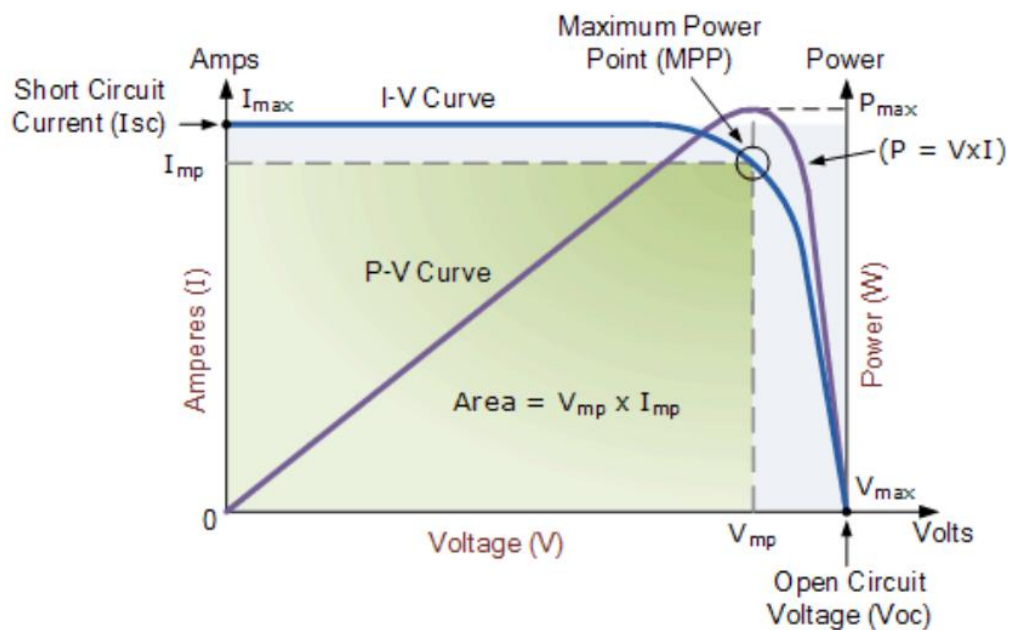


Figure 8. Quyosh elementing I - V egrilik chizig'i ([115])

Samaradorlik (η) Hisoblash:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{(1000 \text{ W/m}^2 \times A_{\text{cell}})}$$

bu yerda P_{in} — tushayotgan quyosh quvvati (1 quyosh uchun $\approx 100 \text{ mW/cm}^2$), A_{cell} — element yuzasi. Quydagicha yozish mumkin, $\eta \approx \frac{V_{OC} \times I_{SC} \times FF}{P_{\text{in}}}$, bu yerda P_{in} tushayotgan quyosh quvvati ($\sim 100 \text{ mW/cm}^2$ at 1 sun).

Misol uchun, mono-Si PERC element uchun qareydigan bo'lsak:

$I_{SC} = 9.5 \text{ A}$, $V_{OC} = 0.68 \text{ V}$, and $FF = 80\%$, to'liq 156 mm kvazi-kvadrat ($\approx 243.4 \text{ cm}^2$). Keyin $P_{\max} \approx 0.68 \times 9.5 \times 0.80 = 5.17 \text{ W}$, va

$$\eta = \frac{5.17 \text{ W}}{24.34 \text{ W}} \approx 21.3\%$$

Bu odatiy samadorlik qiymatiga to'g'ri keladi. Agar element TOPCon gacha yaxshilansa, aytaylik, 10 A, 0.72 V, 82% FF,

$$P_{\max} = 0.72 \times 10 \times 0.82 = 5.90 \text{ W}, \eta = 24.2\%$$

Bu parametrlardagi har bir o'sish samadorlikni qanday oshirishini miqdoriy jihatdan ko'rsatadi.

Quyosh Elementining I - V Egri Chizig'i Shakli: Quyosh elementining I - V egri chizig'i to'g'ri to'rtburchak shakliga yaqin bo'lib, ($V = 0$, $I = I_{SC}$) nuqtadan boshlanib, ($V = V_{OC}$, $I = 0$) nuqtada tugaydi. PERC elementining I - V egri chizig'i

Al-BSF elementiga nisbatan asosan yuqoriroq V_{OC} qiymatiga ega bo'lishi (egri chiziqni o'ngga suradi) va biroz tikroq "tizzasi" egilishga (ya'ni yuqoriroq to'ldirish koeffitsienti – FF) ega bo'lishi bilan farqlanadi. 8-rasmda kremniy asosidagi fotoelektrik (PV) qurilmaning tipik I–V egri chizig'i va quvvat egri chizig'i ko'rsatilgan. Maksimal quvvat nuqtasi (MPP – Maximum Power Point) odatda V_{OC} ning 75–80% atrofida kuchlanishda (V_{mp}) va I_{SC} ning 95% ga yaqin tokda (I_{mp}) yuz beradi (27). Misol uchun, agar PERC elementida $V_{OC} = 680$ mV bo'lsa, V_{mp} taxminan 540–600 mV bo'lishi mumkin. Agar $I_{SC} = 9.5$ A bo'lsa, $I_{mp} \approx 9.0$ A bo'ladi. Shunday qilib, $V_{mp} \times I_{mp} = P_{max}$ hisoblanadi.

To'ldirish koeffitsienti (FF) I–V egri chizig'ining "to'rtburchaklik darajasi" ni ifodalaydi. PERC elementining yuqori FF ko'rsatkichi uning egri chizig'i deyarli to'g'ri to'rtburchak shaklda ekanligini bildiradi. Bu natija past rekombinatsiya (yaxshi diod sifati) va yaxshi elektr o'tkazuvchanlik bilan bog'liq. Yomon kontaktlar yoki kuchli rekombinatsiya egri chiziq "tizzasi" ni yumaloqlashtiradi va FF ni kamaytiradi.

To'liqroq bo'lishi uchun, kuchlanish va tok element harorati va yoritilish darajasiga bog'liq: Harorat oshgani sayin V_{OC} kamayadi (kremniy elementlar uchun ≈ -2.2 mV/°C atrofida) va I_{SC} biroz ortadi ($\approx 0.06\%/^{\circ}C$). Natijada, harorat oshganda umumiy samaradorlik kamayadi (bu yuqorida tilga olingan harorat koeffitsienti bilan bog'liq). PERC elementlari passivatsiya tufayli biroz yuqoriroq tasirli turg'un holat kuchlanishiga ega bo'lishi mumkin va natijada haroratga nisbatan biroz yaxshi chidamlilik ko'rsatadi, ammo bu ko'proq p-tur yoki n-tur kremniyga bog'liq bo'ladi.

Misol I–V Egri Chizig'lari (Amaliy Mashg'ulot): Agar PERC va eski BSF elementlarining I–V egri chiziqlarini bir xil sharoitda (masalan, 25 °C) ustma-ust qo'ysak, PERC elementi bir xil tok qiymatida yuqoriroq kuchlanishga ega bo'lishini ko'ramiz. Bundan tashqari, PERC elementlari past yoritilish sharoitida ham yuqoriroq samaradorlikni saqlaydi. Ko'plab modul texnik pasportlarida PERC panellari uchun "past yoritilishda ishlashning yaxshilanganligi" ta'kidlanadi – bu asosan modul ichki sxemasi bilan bog'liq bo'lsa-da, PERC elementlarining past diod to'yinganlik toki bu sharoitda nisbatan kam rekombinatsiya tufayli yuqoriroq nisbiy samaradorlik berishi mumkin.

Xulosa qilib aytganda, PERC elementining I–V egri chizig'ini tahlil qilish bu texnologiyaning ustunliklarini isbotlaydi: mukammal passivatsiya tufayli yuqori V_{OC} , yorug'likni samarali tutish tufayli kuchli I_{SC} , va yaxshi kontakt dizayni tufayli yuqori FF — bularning barchasi yuqori konversiya samaradorligiga olib keladi. Bu yutuqlarni miqdoriy tahlil qilish ilmiy tadqiqotlar va sanoat sifat nazoratida muhim ahamiyatga ega bo'lib, PERC texnologiyasining kremniy fotovoltaikasida samaradorlik bo'yicha yangi standartlarni belgilaganini ko'rsatadi.

Adabiyotlar:

1. **Blakers et al., 1989** – A. W. Blakers, A. Wang, A. M. Milne, J. Zhao, M. A. Green, “22.8% efficient silicon solar cell,” *Applied Physics Letters*, **55**(13), 1363–1365 (1989).
2. **Zhao et al., 2000** – J. Zhao, A. Wang, M. A. Green, “High efficiency PERT cells on SEH p-type Si and PERT cells on SHE n-type Si,” *Proceedings of 28th IEEE PVSC*, 2000. (Achieved ~24.5% on p-Si, ~24.7% on n-Si)
3. **Green, 2015** – M. A. Green, “The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From conception to mass production,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **143**, 190–197 (2015). (Historical review of PERC development)
4. **Millennium Prize (Green, 2022)** – Technology Academy Finland, *Millennium Technology Prize 2022* – Citation for Martin Green and PERC innovation (1983 concept to 90% market share by 2022).
5. **Di Sabatino et al., 2024** – M. Di Sabatino, R. Hendawi, A. S. Garcia, “Silicon Solar Cells: Trends, Manufacturing Challenges, and AI Perspectives,” *Crystals*, **14**(2):167 (2024). (Includes Fig.1 schematic of PERC vs TOPCon).
6. **Sinovoltaics (Niclas, 2019)** – “PERC, PERL, PERT cells – Difference Explained,” *Sinovoltaics Blog*, 11 Sep 2019. (Definitions of PERL and PERT, etc.).
7. **SolarNPlus (2024)** – “TOPCon vs PERC Solar Cells: Differences, Pros and Cons,” *Solar N Plus* blog, 19 Aug 2024. (Industry perspective on efficiency: TOPCon ~26.1% vs PERC ~22.5%).
8. **PowerOutage FAQ (2025)** – D. Straughan, *PowerOutage.us* Solar Tech Guide, “What is the difference between TOPCon and PERC?” (TOPCon adds tunnel oxide + poly contact, higher efficiency; PERC more affordable).
9. **PV Magazine (Bellini, 2022)** – E. Bellini, “First attempt to build tandem perovskite-PERC/POLO solar cells achieves 21.3%,” *pv magazine*, Feb 25, 2022. (Describes tandem with PERC bottom, potential >29%).
10. **Park et al., 2025** – S. J. Park *et al.*, “Tailored self-assembled monolayer for perovskite/PERC tandem >30%,” *Energy & Environmental Science*, **18**, 9105 (2025). (Reported 30.05% tandem using cost-effective PERC bottom).
11. **United PV (2023)** – “PERC cell technology explained,” *United Energy Co.* Blog, Mar 06, 2023. (Historical info and challenges like LID/PID for PERC).
12. **Klinovitskaya et al., 2022** – I. A. Klinovitskaya *et al.*, “Modification of a standard Al-BSF line into PERC using PECVD,” *Technical Physics*, **67**(4), 496–501 (2022). (Detailed PERC process steps and Fig.4 schematic).
13. **FuturaSun (2023)** – “The Evolution of Solar Cell Technologies: A compass,” Apr 24, 2023. (Historical market trends: PERC rise in 2015, shift to n-type).
14. **Green et al., 2024** – M. A. Green *et al.*, “Solar cell efficiency tables (Version 64),” *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **32**(4), 262–276 (2024). (Latest confirmed efficiencies for various cell types).
15. **PowerOutage.us (2025)** – D. Straughan, “PERC solar cell technology guide: Benefits and drawbacks,” June 2, 2025. (General audience explanation of PERC cells and manufacturers list)[123][124].

- [1] PERC solar cell technology guide: Benefits and drawbacks
<https://poweroutage.us/solar/solar-technology/perc-solar-cell>
- [2] Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) - Millennium Technology Prize
<https://millenniumprize.org/winners/passivated-emitter-and-rear-cell-perc/>
- [3] Silicon Solar Cells: Trends, Manufacturing Challenges, and AI Perspectives
<https://www.mdpi.com/2073-4352/14/2/167>
- [4] PERC cell technology explained
<https://www.unitedpvsolar.com/perc-cell-technology-explained>
- [5] PERC PERL PERT cells
<https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/perc-perl-pert-cells/>
- [6] Fig. 1. Forecasted market share of different solar cell technologies...
https://www.researchgate.net/figure/Forecasted-market-share-of-different-solar-cell-technologies-according-to-the-ITRPV-as_fig7_304024736
- [7] The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) - ScienceDirect.com
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024815003244>
- [8] The Evolution of Solar cell Technologies: A compass - FuturaSun - High Performance PV Modules
<https://www.futurasun.com/en/the-evolution-of-solar-cell-technologies-a-compass/>
- [9] The Rise of China's Solar Industry in 40 Years- EnergyTrend
<https://www.energytrend.com/news/20240520-47063.html>
- [10] First attempt to build tandem perovskite-PERC/POLO solar cells achieves 21.3% efficiency – pv magazine International
<https://www.pv-magazine.com/2022/02/25/first-attempt-to-build-tandem-perovskite-perc-polo-solar-cells-achieves-21-3-efficiency/>
- [11] Best 2 Difference Between TOPCon vs PERC Solar Cells: Guide
<https://www.soleosenergy.com/difference-topcon-vs-perc-solar-cells-guide/>
- [12] The difference between TOPCon and PERC Technology - LESSO
<https://www.lessosolar.com/news/the-difference-between-topcon-and-perc-technology/>
- [13] Tailored self-assembled monolayer molecules for perovskite/PERC tandem solar cells with efficiencies over 30% - Energy & Environmental Science (RSC Publishing)
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/ee/d5ee02650d>
- [14] [PDF] PERC Solar Cell Technology
https://images.assettype.com/taiyangnews/2024-06/99601e52-4221-462b-90b4-a4974dce0e16/TaiyangNews_Report_PERC_2018_EN_final_download_.pdf
- [15] full-tp04.dvi
<https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/53606>
- [16] PVI22_Paper_12_FraunhoferISE_V4.indd
<https://www.pv-tech.org/wp-content/uploads/legacy-publication-pdfs/1b2a6c8702-technologies-for-mass-production-of-perc-and-mwt-solar-cells.pdf>
- [17] Cell structure of a conventional a) Al BSF cell and b) PERC cell. | Download Scientific Diagram

https://www.researchgate.net/figure/Cell-structure-of-a-conventional-a-Al-BSF-cell-and-b-PERC-cell_fig4_341701780

[18] Field studies of PERC and Al-BSF PV module performance loss ...
<https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2023.1127775/full>

[19] Comparative study of commercial crystalline solar cells - ScienceDirect
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666950123000317>

[20] PERC Solar Cells | Laser Manufacturing - RAYLASE GmbH
<https://www.raylase.de/en/applications/laser-structuring/SOLAR.html>

[21] [PDF] Plating for passivated-contact solar cells | PV Tech
<https://www.pv-tech.org/wp-content/uploads/legacy-publication-pdfs/2c6e1fb996-plating-for-passivated-contact-solar-cells.pdf>

[22] PERC Cell Technology | Boviet Solar
<https://bovietsolar.com/technology/perc-cell-technology>

[23] [PDF] Development and Reliability of Screen-Printable Fire-Through Cu ...
<https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/88662.pdf>

[24] TOPCon vs PERC Solar Cells: Differences, Pros and Cons - Solar N Plus
<https://www.solarnplus.com/topcon-vs-perc-solar-cells-differences-pros-and-cons/>

[25] Ultimate Guide to PERC, TOPCon, and HJT Modules for 2025
https://www.anernstore.com/blogs/diy-solar-guides/perc-topcon-hjt-guide-2025?srsltid=AfmBOoqY2e8d4I18NR5THWjLT-kp_MrPY3XE1HoD-_qZ2YQ5P7DIjl0s

[26] Atomic layer deposition of NiO applied in a monolithic perovskite ...
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024823003197>

[27] Solar Cell I-V Characteristic Curves of a PV Panel
<https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html>

[28] Passivated emitter and rear cell—Devices, technology, and modeling
<https://pubs.aip.org/aip/apr/article/7/4/041315/1059392/Passivated-emitter-and-rear-cell-Devices>

2.1. GETEROO'TISHLI (HJT) QUYOSH ELEMENTLARI

Kirish

Geteroo'tishli (HJT) quyosh elementlari – shuningdek kremniy geterokontakt (SHJ) yoki intrensek yupqa qatlamli geterotuzulmali (HIT) elementlari deb ataladigan – kristal kremniyni yupqa amorf kremniy qatlamlari bilan birlashtirgan ilg'or fotovoltaiq qurilmalardir, ular quyosh elementining p-n bog'lanishini hosil qiladi. Odatiy HJT elementida kristal kremniy plastinkasi (odatda n-tipli) asosiy yorug'likni yutuvchi substrat bo'lib xizmat qiladi, va plastinkaning old yoki ikkala tomonida emitter va orqa sirt maydoni (BSF) qatlamlarini hosil qiluvchi ultrayupqa amorf kremniy (a-Si:H) qatlamlari joylanadi; qatlamlar orasidagi intrensek (dozalashtirilmagan) a-Si:H qatlami esa sirtni pasivlashtirish uchun mo'ljallangan. Bu geterokontaktli yondashuv kremniyning ikki turli shaklining – kristal va amorf – o'ziga xos bir-birini to'ldiruvchi xususiyatlaridan foydalanadi. Kristal kremniy a'lo darajada zaryad tashishni ta'minlaydi va infraqizil diapazonda yorug'likni yuqori darajada yutadi, amorf kremniy esa yuzadagi nuqsonlarni pasivlashtirib, rekombinatsiya yo'qotishlarini kamaytiruvchi yuqori tokchali “shisha” qatlam sifatida ishlaydi. Natijada juda yuqori samaradorlikka, past harorat ko'effitsiyentlariga ega va an'anaviy homokontaktli kremniy elementlarga nisbatan yaxshilangan ishlashga ega quyosh elementlari dizayni paydo bo'ladi.

Nazariy nuqtai nazardan, HJT elementlari an'anaviy kremniy quyosh elementlaridagi asosiy yo'qotish mexanizmlaridan biri – sirtning rekombinatsiyasini – kamaytiradi. Interfeysga yupqa intrensek amorf kremniy qatlami kiritilishi bilan HJT elementlari kremniy yuzasidagi erkin bog'lanish va nuqsonlar zichligini sezilarli darajada pasaytiradi, bu esa o'z navbatida ochiq zanjir kuchlanishini (VOC) va umumiy samaradorlikni oshiradi. Bundan tashqari, HJT elementlari odatda past haroratda (200 °C dan past) ishlab chiqarilishi mumkin bo'lgani uchun an'anaviy elementlardagi yuqori haroratli diffuziya bosqichlarini o'tkazib yuboradi va yorug'lik ta'sirida kelib chiquvchi degradatsiya juda kam bo'ladi. Bu afzalliklar HJT texnologiyasini kremniy quyosh elementlari samaradorligini nazariy limitga (kremniy uchun ~29.4%, ideal yagona bo'g'lam uchun ~33.7%) yaqinlashtirish yo'nalishidagi istiqbolli yo'lga aylantiradi. Keyingi bo'limlarda biz HJT quyosh elementlarining rivojlanish tarixini, tuzilishini va ishlash printsiplarini, ishlab chiqarish usullarini, samaradorlik xususiyatlarini va so'nggi yutuqlarini ko'rib chiqamiz, shuningdek ularning samaradorligini boshqa asosiy quyosh elementlari texnologiyalari bilan taqqoslaymiz.

HJT quyosh elementlarining rivojlanish tarixi

Geterokontaktlardan foydalanish g'oyasi 1970–1980-yillarga borib taqaladi. Boshlang'ich tadqiqotchilar, masalan Fuhs va boshq. (1974), amorf va kristal kremniy o'rtasidagi geterokontaktlarni namoyish etgan, Yablonovitch va boshq. (1985) esa keng tokchali yarimo'tkazgichlar orasiga joylashtirilgan ikki qavatli geterostruktura elementida ochiq zanjir kuchlanishini 720 mV dan oshirgan natijani qayd etgan – o'sha davr uchun nihoyatda yuqori VOC edi. Ushbu tadqiqotlar

an'anaviy diffuziyalangan elementlarga nisbatan geterokontaktli dizaynlarning yuqori ishlash potentsialini ko'rsatdi.

Ammo HJT (heterojunction with intrinsic thin-layer) elementlari deb hozir atalmish texnologiyaning amaliy rivojlanishi 1990-yillar boshida boshlandi. Yaponiya kompaniyasi Sanyo Electric Co. birinchi marta ishchi HJT elementini yaratdi va ushbu texnologiya uchun "HIT" atamasini qo'lladi. 1992 yilda M. Tanaka va boshqalar n-tipli kremniy plastinkasida p-tipli amorf kremniy qatlami bilan heterojunction elementini ishlab chiqdi va taxminan 12% samaradorlikka erishganini e'lon qildi. Keyinchalik Sanyo tadqiqotchilari ingichka intrensek a-Si:H qatlami kiritish bilan uchrashuv interfeysidagi yuzadagi nuqsonlarni pasivlashtirish mumkinligini aniqladi. Rekombinatsiya kamayishi natijasida bu V_{OC} , I_{SC} va FF kabi barcha asosiy parametrlarni oshirib, dastlabki elementlarda samaradorlikni ~12.3% dan ~14.8% gacha oshirishga olib keldi (optimum intrensek qatlam qalinligi ~6–7 nm bo'lganda). Bu yangilik HIT elementiga nomini berdi va HJT rivojlanishidagi birinchi katta bosqich bo'ldi.

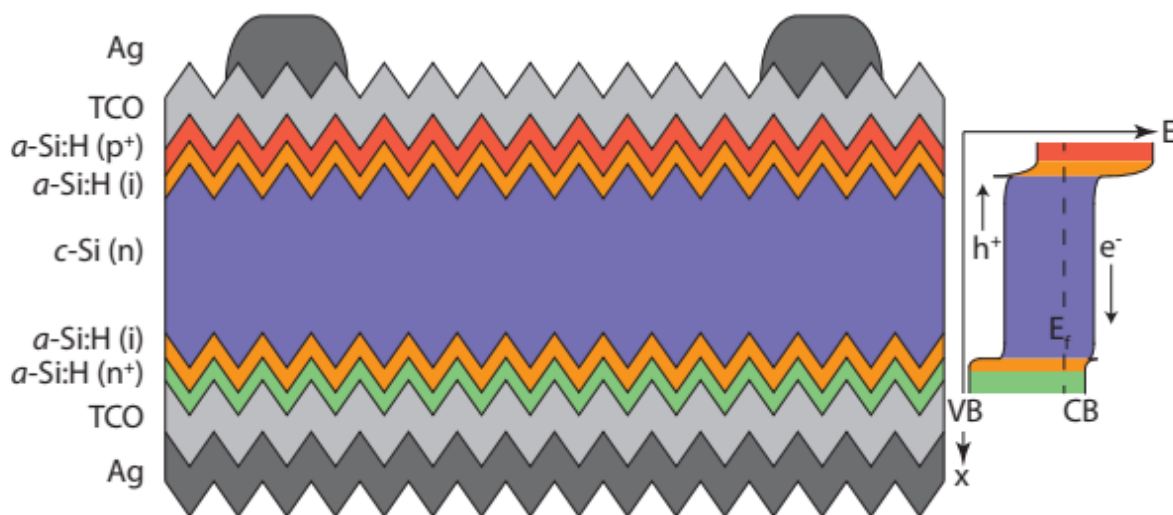
1990-yillar oxiri va 2000-yillarda Sanyo HIT element texnologiyasini takomillashtirishda davom etdi va uni tijorat ishlab chiqarishga olib kirdi. Kremniy plastinkasining sirtini teksturlash (yorug'likni tutish uchun piramidal struktura hosil qilish) va amorf kremniy hamda shaffof o'tkazuvchan oksid (TCO) qatlamlarining sifatini yaxshilash orqali Sanyo samaradorlikni barqaror oshirdi. 2003 yilda Sanyo HIT elementida 21% dan oshgan samaradorlikni e'lon qildi – o'sha paytda dunyoda yetakchi natija. 2009 yilda Tsunomura va boshq. ~22% samaradorlikka erishdi, Sanyo esa o'sha yili 23% samaradorlikka ega namuna elementni e'lon qildi. Ushbu yutuqlar sirtini pasivizatsiyalash, yorug'likni ushlab qolish va qarshilik yo'qotishlarni kamaytirish bilan bog'liq edi.

2010 yilda Panasonic korporatsiyasi Sanyo'ni sotib oldi va HJT texnologiyasini yana rivojlantirdi. Panasonicning HIT elementlari 2010-yillar boshida bir nechta samaradorlik rekordlarini yangiladi. 2014 yilda Panasonic tadqiqotchilari (Masuko va boshq.) 25.6% samaradorlikni qayd etib, laboratoriya kremniy elementlariga xos 25% chegarasini buzdi. Bu rekord to'liq o'lchamli n-tipli kremniy plastinkada amalga oshirildi va HJT dizaynining katta potentsialini namoyish etdi.

2017 yilda Kaneka korporatsiyasidan Yoshikawa va boshq. orqa kontaktli HJT elementida 26.7% samaradorlikka erishdi. Ular HJT texnologiyasini orqa kontaktli struktura (HBC – heterojunction back-contact) bilan birlashtirdi, shunda old panjara soyasi yo'qolib, tok yig'ish yanada samarali bo'ldi. Ushbu element ~42.7 mA/cm² ga yaqin JSC qiymatini ko'rsatdi – kremniy elementlar uchun juda yuqori. Kaneka natijasi HJTni ilg'or texnikalar bilan birlashtirish orqali yanada yuqori samaradorlikka erishish mumkinligini isbotladi.

2020-yillarda: dastlabki HIT texnologiyasi patentlari muddati o'tganidan keyin butun dunyo bo'ylab ko'plab kompaniyalar va tadqiqot institutlari HJT ga sarmoya kiritishni boshladi. Xitoy va Yevropada ishlab chiqaruvchilar HJT ishlab chiqarish liniyalarini ishga tushirdi va uni keng tarqalgan PERC texnologiyasining davlatchisi sifatida qabul qildi. Bu sanoatda tezkor samaradorlik ortishiga olib keldi. Misol uchun, 2023 yil dekabrda Xitoy kompaniyasi LONGi 27.09% samaradorlikka

erishgan orqa kontaktli HJT elementini e'lon qildi, bu avvalgi ~26.8% rekordini yangiladi. Shu bilan birga, kremniy geterokontakt pastki element sifatida yuqori tokchali yuqori qavat bilan tandem qilinsa, yagona bog'lam limitidan yuqori samaradorlikka erishish mumkinligini ko'rsatdi – 2023 yilda LONGi kremniy-perovskit tandemida ~33.9% samaradorlik qayd etdi. Quyidagi 1-rasm zamonaviy HJT elementining asosiy tuzilishini ko'rsatadi; u dastlabki Sanyo dizaynlaridan hozirgi yuqori samaradorlikli qurilmalargacha rivojlangan.



1-rasm. Yaponiyaning Sanyo kompaniyasi tomonidan birinchi bo'lib ishlab chiqilgan SHJ (shuningdek, HJT – Heterojunction) quyosh elementining chizmasi va unga tegishli energiya tarmoqlari diagrammasi. Plastinka (wafer) n-tipli. Tuzilma nisbatda emas (masshtabsiz) chizilgan.

1-rasm: Tipik kremniy asosidagi heterotuzilmali quyosh elementi (HJT) strukturasi bo'yicha ko'ndalang kesim diagrammasi. Ushbu dizaynda n-tipli kristalli kremniy plastinka (ko'k rangda) yupqa amorf kremniy qatlamlari bilan qoplangan: ichki passivatsiyalovchi a-Si:H (och ko'k) va p+/n+ doplangan a-Si:H qatlamlari (to'q ko'k va to'q sariq), mos ravishda emittor va orqa sath maydonini hosil qiladi. Amorf kremniy qatlamlari ustiga yotqizilgan shaffof o'tkazuvchi oksid (kulrang; masalan, indiy qalay oksidi, ITO) ham yoritish aksini kamaytiruvchi qoplama, ham elektroda vazifasini bajaradi. Metall kontaktlar (to'q kulrang yostiqchalar/busbarlar) elektr tokini yig'adi. Plastinkaning sathlari yorug'likni samarali ushlash uchun piramidasimon tekstura bilan ishlov berilgan (zikzak naqsh). Ushbu materiallar va tuzilmaning kombinatsiyasi sathlardagi rekombinatsiyani kamaytirish va heterotuzilmalar orqali zaryad tashuvchilarni selektiv yig'ish orqali yuqori samaradorlikni ta'minlaydi.

Tuzilishi va ishlash printsipli

Geterotuzilmali (heterojunction) Quyosh elementining yana bir strukturaviy turi hisoblanadi. Bu ikki texnologiyaning kombinatsiyasidan iborat: kristalli polikremniydan iborat asosiy qatlam ikki qatlamli amorf polikremniy orasiga

joylashtirilgan. Ushbu tuzilma quyosh nurlanishidan ko‘proq energiyani yig‘ishga imkon beradi. Natijada, ushbu turdagi elementlar yuqori samaradorlikka ega bo‘ladi. Bundan tashqari, u past harorat koeffitsiyentiga ega bo‘lib, yuqori haroratlarda ham yaxshiroq ishlash imkonini beradi. Bundan tashqari, geterotuzilmali quyosh elementlari ikki tomonla (bifasial) bo‘lib, quyosh nurini old va orqa tomonidan qabul qila oladi.

HJT (heterojunction with intrinsic thin-layer) quyosh elementi an‘anaviy kremniy p–n o‘tishli quyosh elementi bilan bir xil fotovoltaik tamoyil asosida ishlaydi – ya‘ni quyosh nurini elektr tokiga aylantiradi. Ammo, geterotuzilmali dizayni uni o‘ziga xos xususiyatlar bilan ta‘minlaydi. Oddiy konfiguratsiyada, HJT elementi yorug‘likni yutuvchi asos sifatida n-tipli monokristalli kremniy plastinkadan foydalanadi (yorug‘lik asosan shu qatlamda yutiladi va elektron–kovak juftliklari hosil bo‘ladi). Plastinkaning quyoshga qaragan tomonida juda yupqa (taxminan 5–10 nm) intrinsik (kirishma kiritilmagan) amorf kremniy (a-Si:H) qatlami joylashtiriladi, uning ustiga esa yupqa p-tipli a-Si:H qatlami yotqiziladi. Ushbu amorf qatlamlar birgalikda emittor vazifasini bajaradi va n-tipli kristalli kremniy bilan geterotuzilmani hosil qiladi. Xuddi shunday, plastinkaning orqa tomoniga ham intrinsik a-Si:H va keyin n-tipli a-Si:H qatlami qo‘llaniladi – bu orqa sath maydoni (BSF) va g‘ovaklar uchun kollektorga aylanadi. Intrinsik a-Si:H qatlamlari kremniy sathini passivatsiyalash uchun yetarli bo‘lgan, ammo o‘zidan ortiqcha nuqson kiritmaydigan qalinlikda (5–10 nm atrofida) bo‘ladi. Kirishma kiritilgan a-Si:H qatlamlar ham juda yupqa bo‘ladi (p ~10 nm, n ~20 nm).

Bu kremniy qatlamlar ustidan taxminan 75–100 nm qalinlikdagi shaffof o‘tkazuvchi oksid (masalan, ITO – indiy qalay oksidi yoki indiy-rux oksidi) yotqiziladi, bu yorug‘lik o‘tishiga imkon beruvchi past qarshilikli kontakt qatlamidir. Nihoyat, old va orqa tomonlarga (odatda kumush yoki misdan iborat) nozik metal kontaktlari hosil qilinadi. Mazkur metal kontaktlar hosil bo‘lgan elektr tokini yig‘ish uchun xizmat qiladi.

Geterotuzulma – bu kristal kremniy(c-Si) va amorf kremniy(a-Si) qatlamlari o‘rtasidagi interfeysdir. Amorf kremniyning tokchasi (~1.7 eV) kristal kremniynikidan (~1.12 eV) yuqoriroq bo‘lgani uchun p-a-Si:H/n-c-Si bog‘lanishi oddiy homokontaktdan farq qiladi. Taqiqlangan zona diagrammasida interfeysda o‘tkazuvchanlik va valentlik zonalarida uzilishlar paydo bo‘ladi. kesishgan a-Si:H qatlami bu zonalarlar o‘rtasidagi o‘tkazuvchanlikni yupqalash orqali ularni moslab, nuqson holatlarini kamaytiradi. Quyosh nuri elementga kirganda, c-Si plastinka aksariyat fotonlarni (ayniqsa uzoq to‘lqinli qismini) yutadi va elektron-g‘ovak juftlarini hosil qiladi. Hetero-birikmaning hosil qilgan elektr maydoni (tushish hududi asosan interfeys yaqinidagi c-Si-da hosil bo‘ladi) elektronlarni n-tip tomonga va g‘ovaklarni p-tip tomonga yo‘naltiradi. Orqa qoplamadagi n-tipli a-Si:H qatlam esa elektronlarga selektiv bo‘lib, nisbatan yuqori tok beradi. Shu bilan birga, interfeysning har ikkala tomonidagi intrinsik a-Si:H qatlamlari c-Si yuzasidagi bog‘lanishlarni vodorod bilan bog‘lab pasivizatsiya qiladi va sirt rekombinatsiyasini keskin kamaytiradi[3]. Ana shu pasivizatsiya HJT elementlariga juda yuqori ochiq zanjir kuchlanishlarini (~0.73–0.75 V, an‘anaviy elementlarda ~0.65 V) berish imkonini yaratadi.

Yana bir afzallik: amorf kremniy qatlamlari yuqori haroratdagi jarayonsiz ham yaxshi emitter vazifasini bajarishi mumkin. An'anaviy elementlarda p-n bog'lamini hosil qilish uchun 800 °C dan yuqori harorat kerak bo'ladi (masalan, n-tipli plastinkada p-tipli diffuziya qatlamini yaratish). HJT esa p-tipli a-Si:H qatlamini (~200 °C) pasativ usulda tushiradi, ya'ni kam haroratda bog'lam hosil qiladi; bu plastinkaga yumshoqroq muomala bo'lib, harorat shikastini yo'q qiladi. Bundan tashqari, HJTda odatda n-tipli kremniy plastinkalari ishlatiladi, shuning uchun p-tipli elementlarga xos bor-kislorod komplekslari tufayli keladigan yorug'likni buzish LID (light-induced degradation) muammasi bo'lmaydi. N-tipli plastinka va yuqori darajadagi pasivizatsiya HJT elementlariga vaqt o'tishi va yorug'lik ostida yuqori barqarorlikni ta'minlaydi.

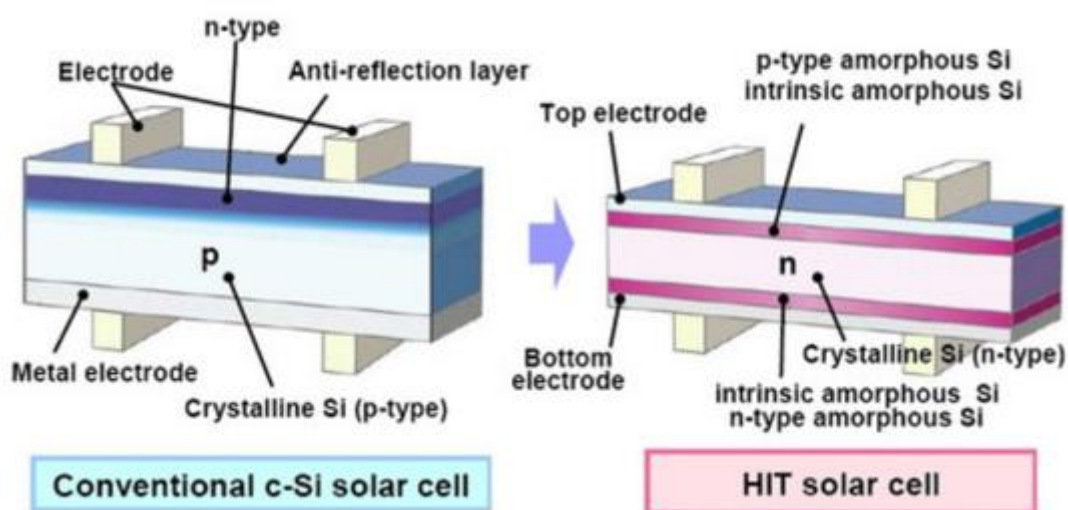


Figure 2. Getero'tishli quyosh elementlarining sihlash prinsipi.

(https://portal.synapsun.com/?_locale=en)

Ikki tomonli ishlash imkoniyatlari

HJT elementlari ko'pincha **ikki tomonlama** qilib loyihalangan – bu ularning old va orqa yuzalaridan kelgan yorug'likni ham qabul qilishi mumkinligini anglatadi. Elementning ikkala tomoni simmetrik tuzilishga ega bo'lgani sababli (kremniy plastinka amorf Si qatlamlari va shaffof o'tkazuvchan qoplama bilan), HJT elementi tabiiy ravishda orqa tomondagi yorug'likdan ham tok hosil qiladi (masalan, yer yuzidan aks etgan yorug'likdan). HJT elementining dizayni oddiy qilib aytganda simmetrik: old va orqa tomonida bir xil tuzilmalar bor, shuning uchun ular orqadan tushgan yorug'likni ham samarali yig'a oladi. HJT elementlari orqa tomonda ~95% samaradorlikka erisha oladi, bu umumiy energiya ishlab chiqarishni sezilarli darajada oshiradi. Ularning shaffof ikki qavatli shisha dizayni yorug'likni ichiqqacha o'tkazadi, shu bilan orqa tomondagi ishlab chiqarishni kuchaytiradi va panellar ikki tomonlama nur olayotgan joylarda (masalan, o'rmonda, avtomobillar uchun boshpanada, to'siqlarda) samarador bo'ladi.

PERC va TopCon texnologiyalari bilan solishtirganda, HJT Quyosh elementlari 30% dan ko'proq energiya ishlab chiqarishi mumkin, bu ularni panelning

ikkala tomoni ham quyosh nuri ishlaydigan oladigani uchun juda samarali bo'lib, mazkur yutuqlarni ularni keng ko'lamda foydalanish imkonini yaratadi.

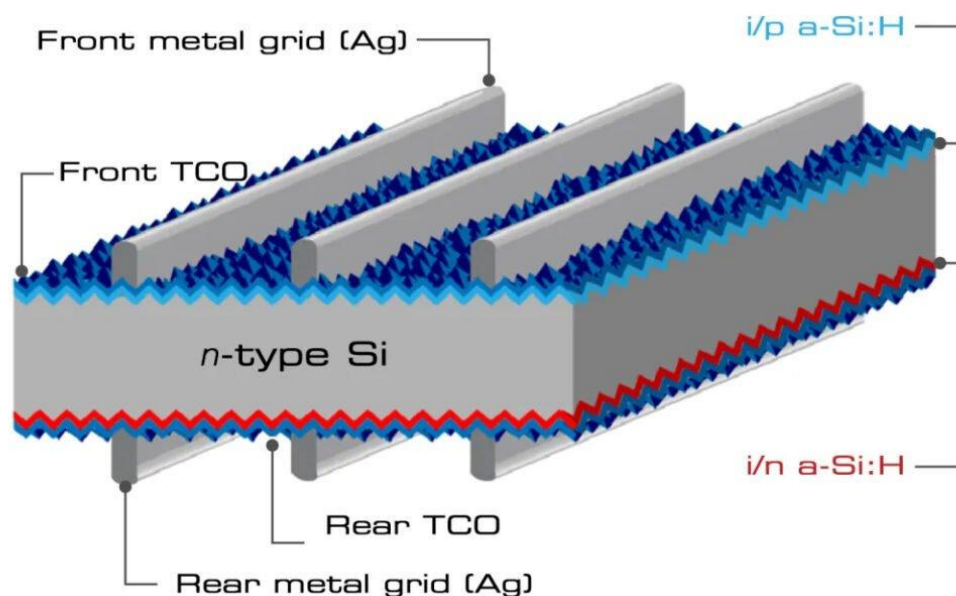


Figure 3. Typical bifacial HJT solar cells scheme in front junction configuration. ([10.13140/RG.2.2.29803.25124](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29803.25124))

Shunday qilib, ikki tomonli HJT modullari qo'shimcha energiya ishlab chiqaradi. HJT elementlarining ikki tomonlilik ko'effitsiyenti odatda ~90% atrofida, ya'ni agar orqa tomonga ham teng yorug'lik tushsa, orqa tomondagi tok old tomondagi tokning ~90% ini beradi. Bu ko'rsatkich bifacial(ikki tomonli) PERC elementlarida (~70%) qaraganda ancha yuqori. Umuman olganda, HJT elementining tuzilishi bir nechta dizayn yangiliklarini birlashtiradi: yuqori sifatli n-tipli kremniy yutiluvchi plastinka, pasivizatsiya va zaryad selektivligi uchun intrinsek va dozgallangan ultrayupqa amorf kremniy qatlamlari, shuningdek yorug'likni olish va tokni yig'ish uchun shaffof o'tkazuvchan qoplama qatlamlari. Bular birgalikda fotonlar orqali hosil bo'lgan zaryad tashuvchilarni maksimal yig'ishni ta'minlaydi va rekombinatsiya yo'qotishlarini minimallashtiradi va buning natijasida yuqori samaradorlikka erishiladi.

Xulosa qilib aytganda, HJT quyosh elementlarining tuzilishi bir nechta dizayn innovatsiyalarini birlashtiradi: yuqori sifatli n-tipli kremniy absorber, passivatsiya va zaryad selektivligi uchun ultra yupqa ichki va kirishma kiritilgan amorf kremniy qatlamlari va yorug'lik ulash va tokni yig'ish uchun shaffof o'tkazuvchan qoplamalar. Birgalikda ular rekombinatsiya yo'qotishlarini minimallashtirish va

fotogeneratsiyalangan tashuvchilarni to'plashni maksimal darajada oshirish orqali yuqori samaradorlikni ta'minlaydi. Keyingi bo'limda bu elementlar amalda qanday ishlab chiqarilganligi muhokama qilinadi.

HJT quyosh elementlarini ishlab chiqarish usullari

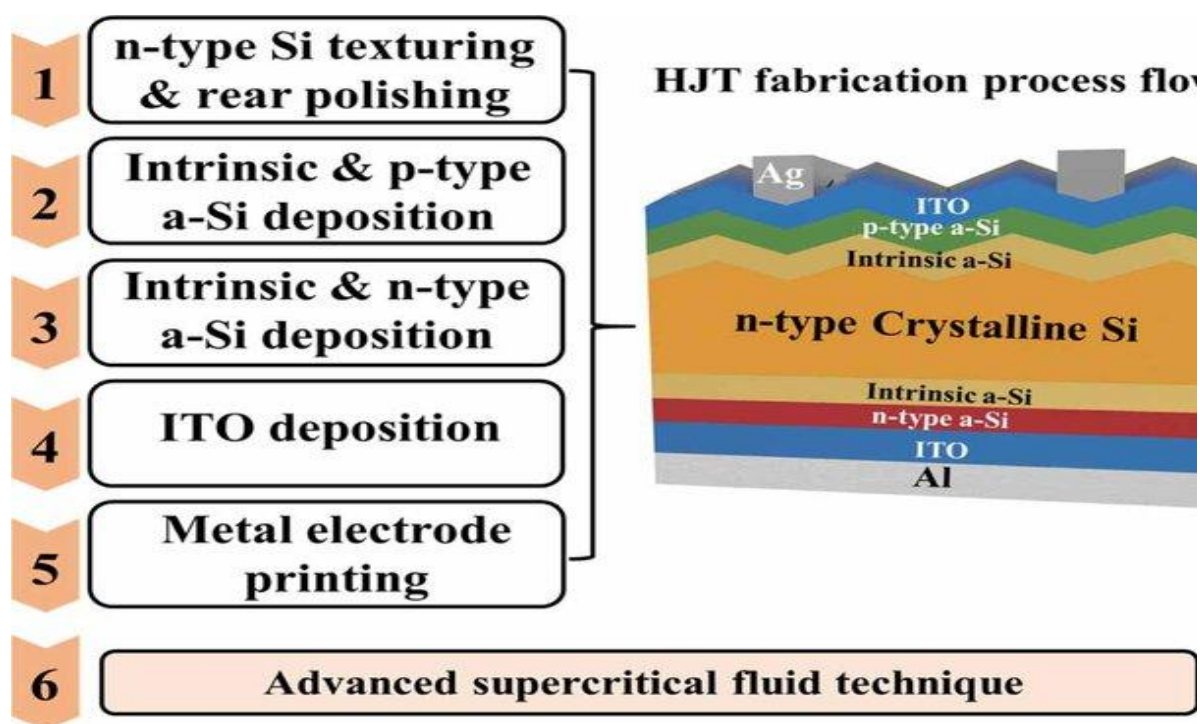
Plastinkani tayyorlash (teksturalash va tozalash): Jarayon n-tipli monokristal kremniy plastinkalaridan (odatda Czochralski usulda olingan) boshlanadi. Plastinka sirtiga harakatli piramida naqshini hosil qiluvchi kimyoviy teksturlash orqali yorug'likni ushlab qolish maydoni yaratiladi. Bu ko'pincha potassiyum gidroksid (KOH) kabi yumshoq ishqor eritmasida kremniyni anisotropik eritish bilan amalga oshiriladi, natijada mikropiramidalar hosil bo'ladi. Teksturlashdan keyin qat'iy tozalash ketma-ketligi bajariladi, chunki HJT elementlari yuzaning ifloslanishiga juda sezgir. Standart RCA usullari bo'yicha organik qoldiqlar va metall izlarini olib tashlash uchun turli kimyoviy yuvishlar qo'llanadi, shunda kremniy sirtini atom darajasida toza va gidrofob holatda saqlash ta'minlanadi. Olingan sirt oksidi esa amorf kremniy qatlami tushirilishidan avval eng so'nggi daqiqada yo'q qilinadi, bu elektr kontakti sifatini yaxshilash uchun zarur.

Amorf kremniy tushirish (PECVD): Plastinka keyin PECVD (plazma yordamida kimyoviy bug') tizimiga qo'yiladi va unda vodorodli amorf kremniy qatlamlari tushiriladi. Dastlab, ikkala tomonga ingichka intrensek a-Si:H qatlami tushiriladi. Keyin yorug'likka qarshi yuzga p-tipli a-Si:H qatlami, orqa tomonga esa n-tipli a-Si:H qatlami hosil qilinadi. Bu jarayonda harorat taxminan 180–200 °C atrofida bo'ladi. Bu HJTning afzalliklaridan biri, chunki past haroratda ishlash orqali yuqori haroratli difuziyani o'tkazmaslik va amorf kremniydagi vodorodni saqlash mumkin. PECVD parametrlarini – gaz aralashmalari, RF quvvati, bosim – diqqat bilan tanlash orqali kam nuqsonli, kerakli qalinlikdagi amorf kremniy plyonkalar olinadi.

Shaffof o'tkazuvchan oksid (TCO) bilan qoplash: Amorf qatlamlar tayyorlangach, ikkala tomonga shaffof o'tkazuvchan oksid qatlami qo'shiladi. Odatda, yuqori shaffoflik va o'tkazuvchanlik tufayli indiy-kumush oksidi (ITO) ishlatiladi. TCO qatlami sputtering (past haroratli fizik bug' tushirish) orqali tushiriladi. Bu qatlam antirefleks qoplama vazifasini bajaradi (yorug'likni oynadan o'tkazishni yaxshilaydi), amorf qatlamlardan tok yig'ish uchun yonalish bo'yicha o'tkazuvchanlikni ta'minlaydi, shuningdek to'q soya effektidan kelib chiqadigan elektronlarni inkubatsiya qilish bilan pasivizatsiyaga hissa qo'shadi. Yaqinda indiy ishtirokisiz TCO (masalan, rux oksidi bilan dozalangan yoki indiy-rux oksidi) ishlatish va orqa kontaktli dizaynlarda juda ingichka TCO qatlamlarini qo'llash bo'yicha tadqiqotlar olib borilmoqda. TCO old qavatda odatda ~75–100 nm qalinlikda bo'lib, 600–800 nm diapazonda antirefleks qilish uchun optimallashtirilgan; orqa tomonda esa ikki tomonlama bo'lsa, o'xshash qalinlikda qo'yiladi.

Metallizatsiya (elektrod panjaralari): Oxirgi qadam – hosil bo'lgan tokni elementdan chiqarib olish uchun metal kontaktlarni hosil qilish. An'anaviy ekranli bosish usuli bilan kumush pasta qo'llanilishi mumkin, lekin standart yuqori haroratli

kumush pastalari (masalan, 750 °C da pechda pishirish) HJT uchun mos emas, chunki bu amorf kremniy qatlamlarini yoq qilishi mumkin. Buning o'rniga past haroratli kumush pastalar yoki boshqa metallizatsiya usullari qo'llanadi. Masalan, maxsus formulali kumush pastani taxminan 200 °C da qizdirib mustahkamlash mumkin. Yoki elektroplatoning yo'li bor: avval mayda metall urug'i (masalan, nanopartikulli inkjet siyoh yoki yorug'lik bilan yordamida platada) qo'yiladi, keyin mis yoki kumush qalinroq qatlami elektroplat bilan platada galvanizatsiya orqali o'sadi. Bu usul kumush sarfini sezilarli kamaytiradi (simlarning katta qismini mis bilan almashtirish mumkin). Ba'zi kompaniyalar akl-robi *Smart Wire* texnologiyasini qo'llaydi, bunda elementga bir nechta ingichka simlar yopishtiriladi va an'anaviy busbarlar bekor qilinadi. Natijada, old panjara chiziqlari juda nozik (soya yo'qotishni kamaytirish uchun), ko'p busbarli yoki hattoki simli panjarasiz (busbar-siz) dizaynlarda ishlatiladi. Ikki tomonli HJT elementning orqa tomonida ham metall panjara bo'ladi (odatda alyuminiy yoki kumushdan), ammo orqa soyalanishi kamroq ahamiyatga ega bo'lgani uchun u kamida ko'proq maydonni qoplaydi. Metallizatsiyadan so'ng element deyarli tayyor bo'lib, sinovdan o'tkazishga va modulga yig'ishga tayyor holga keladi.



4-rasm. Heterounction (HJT) quyosh elementini ishlab chiqarish jarayoni ketma ketligi va qurilma tuzilishi.

Ishlab chiqarish davomida past termal byudjetni saqlash muhim: butun HJT jarayonida harorat odatda 250 °C dan oshmaydi. Bunday past harorat n-tipli kremniy plastinkasining elektron sifatini (issiqlikdan keladigan degradatsiya va iflos modda difuziyasi yo'qligi) saqlab qoladi va amorf kremniydagi vodorodni pasivizatsiya uchun ushlab turadi. Bu shuningdek, HJT liniyalariga ingichka plastinkalardan (taxminan 100 µm yoki undan ingichkasi) foydalanish imkonini beradi, chunki

yuqori harorat bu plastinkalarni egmasdan ushlab turishga ruxsat bermaydi (HJT elementlari taxminan $100\text{ }\mu\text{m}$ qalinlikdagi plastinkalarda ham ishlashi mumkin, an'anaviy elementlar esa $160\text{--}180\text{ }\mu\text{m}$ qalin bo'ladi). Biroq, yangi uskuna (PECVD, sputterlash, past haroratli metallizatsiya) va qimmat materiallardan (ITO uchun indiy, ko'proq kumush) foydalanish HJT ishlab chiqarishini dastlab PERCga nisbatan biroz qimmatroq qildi. Masalan, 2018-yilda HJT modullarini PERCga nisbatan bir necha sentga qimmatroq ishlab chiqarish aniqlandi, ammo o'lcham iqtisodiyoti va texnologik takomillashuvlar bilan bu farq kamayib bormoqda. Misol uchun, kumush pasta va plating texnikasidagi yutuqlar kumush ishlatilishini kamaytirmoqda, 2020-yilgacha yangi yuqori oqimli uskuna HJT fabrikalariga ketadigan kapital xarajatlarni sezilarli darajada kamaytirdi. Umuman olganda, HJT ishlab chiqarish kremniy plastinka qayta ishlash va yupqa plyonka tushirish usullarini uyg'unlashtiradi. Jarayon nisbatan qisqa (difuziya va yuqori haroratli vaqt o'tkazishlarni talab etmasdan) bo'lsa-da, juda yuqori aniqlik va tozalikni talab qiladi. Natijada olingan element kristal va yupqa plyonka fotovoltaiklarining kuchli tomonlarini o'zida mujassam etgan ko'p qatlamli tuzilma (c-Si/a-Si/TCO/metallar) bo'ladi.

HJT elementlarining samaradorligi va xususiyatlari

Geterokontaktli quyosh elementlari fotovoltaika sohasida yuqori ko'rsatkichga ega elementlar qatoriga kiradi. Ular o'zida yuqori samaradorlik, a'lo harorat ko'rsatkichlari va barqaror ishlashni mujassam etadi. Samaradorlikka erishish V_{OC} , I_{SC} va FF kabi parametrlarning umumiy natijasidir. HJT elementlari ayniqsa yuqori V_{OC} ($0.73\text{--}0.75\text{ V}$ atrofida) va past rekombinatsiya yo'qotishlari bilan ajralib turadi, bu ularni oddiy elementlarga nisbatan yuqori samarador va haroratga chidamli qiladi. Masalan, Panasonicning 25.6% samaradorlikka ega HJT elementida $V_{OC} \sim 0.745\text{ V}$, $I_{SC} \sim 41\text{ mA/cm}^2$ va FF ~ 0.85 bo'lgan. Rekord 26.7% HBC elementida esa $V_{OC} \approx 0.750\text{ V}$, $I_{SC} \approx 42.7\text{ mA/cm}^2$ va FF ~ 0.89 ga yetdi – a'lo darajada "kvadrat" I - V chizig'iga ega. Bu ko'rsatkichlar normal PERC elementlaridan (odatda $V_{OC} \sim 0.68\text{ V}$, $I_{SC} \sim 38\text{ mA/cm}^2$, $\sim 22\%$ samaradorlik) ancha yuqoridir.

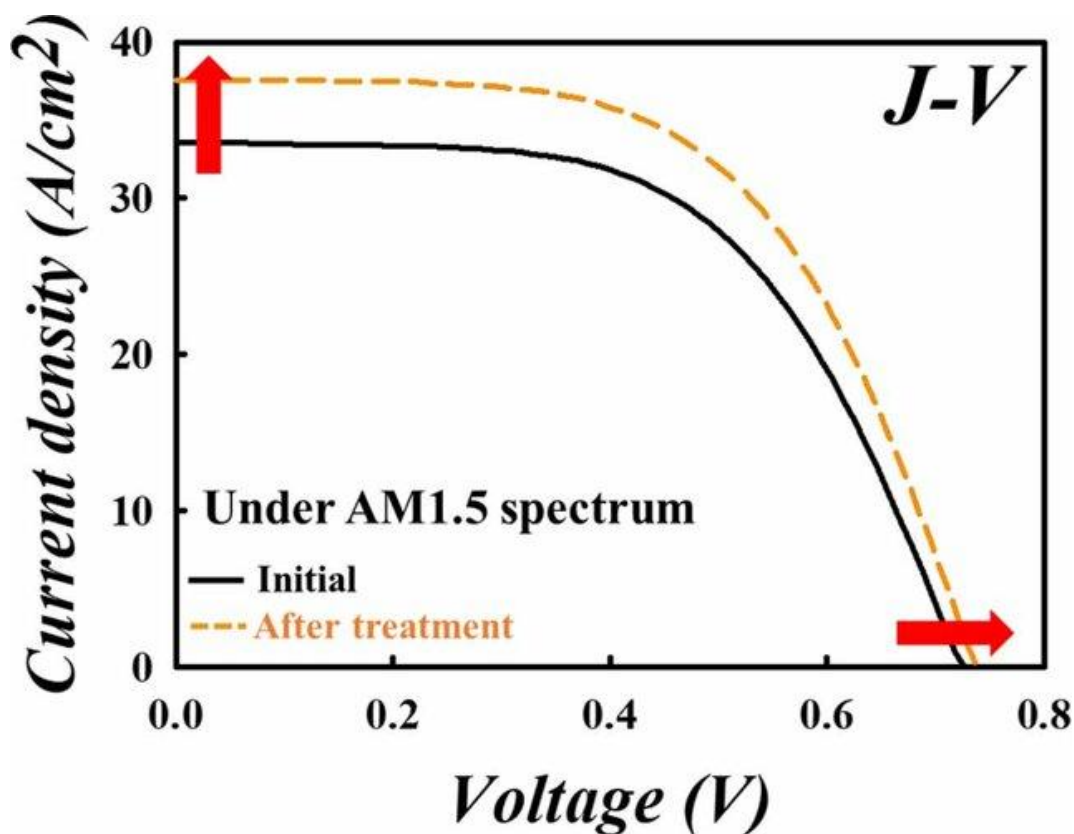


Figure 5. J-V characteristic of HJT

Harorat koefitsiyenti: Quyosh elementlari odatda yuqori haroratda kamroq quvvat ishlab chiqaradi. HJT elementlari uchun harorat koefitsiyenti juda past, taxminan $-0.20\%/^{\circ}C$ dan $-0.25\%/^{\circ}C$ gacha. Bu PERC kabi standart elementlarnikiga nisbatan ancha yaxshiroq (PERCda ~ -0.35 dan $-0.40\%/^{\circ}C$) natijani beradi. Buning sababi amorf qatlamlarning yuqori tokchasi va yuqori darajadagi sirt pasivizatsiyasidir, bu esa V_{OC} ni harorat o'zgarishiga kamroq sezgir qiladi. Amalda bu HJT modullari issiq kunlarda ham quvvatining katta qismini saqlab qoladi.

I-V xususiyatlari: HJT elementining tok-voltaj egri chizig'i yorug'lik ostida diodga xos bo'ladi, ammo yuqori V_{OC} ga ega. Ularning juda kam rekombinatsiya va past seriya qarshiligi tufayli I-V egri chizig'i juda steyp tortiladi va to'rtburchakga yaqin bo'ladi. To'yinganlik faktori (FF) odatda yuqori $-0.80-0.85$ oralig'ida bo'ladi. Bu qiymatlar HJT elementlarini deyarli ideal diod xususiyatiga ega ekanini ko'rsatadi. Elementning maksimal quvvati $V_{mp} \cdot I_{mp}$ da olinadi va samaradorlik $\eta = (V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF) / (P_{in} \cdot A)$ formula bo'yicha hisoblanadi. Misol uchun, $V_{OC}=0.74$ V, $I_{SC}=38$ mA/cm², FF=85% bo'lgan 1 cm² elementni oling; $P_{in}=0.10$ W/cm² (STSh). Unda $\eta \approx (0.74 \cdot 0.038 \cdot 0.85) / 0.10 \approx 0.237$, ya'ni $\sim 23.7\%$ ga teng bo'ladi. Agar $I_{SC}=40$ mA/cm² va FF=88% bo'lsa, $\sim 26-27\%$ ga erishish mumkin, bu rekord HJT elementlari bilan mos keladi. HJT amaliyotda yuqori V_{OC} va FF tufayli boshqa texnologiyalarga nisbatan yuqori samaradorlikka ega bo'ladi.

Ikki tomonlama va past yorug'likdagi ishlash: Kam rekombinatsiya tufayli HJT elementlari past yorug'likda ham yaxshi ishlaydi (ular yuqori kuchlanishni

saqlaydi va TCO panjarasi tufayli past seriya qarshiligiga ega). Bundan tashqari, ikki tomonlama qilib ishlatilganda ular orqa tomondan aks etgan yorug'likni ham ishlata oladi. Ikki tomonlilik darajasi atigi 5–20% qo'shimcha energiya hosil bo'lishini ta'minlashi mumkin, o'rnatishga bog'liq holda. HJT elementining taxminiy ikki tomonlilik ko'effitsiyenti ~90% ga teng (ya'ni teng yorug'likda orqa tok old tomon tokining ~90% ini beradi), bu PERCning ~70% ga nisbatan ancha yuqori. Element samardorligi ham yuqori vaqtda saqlanadi.

Barqarorlik va degradatsiya: HJT elementlari juda barqaror bo'ladi. Ular n-tipli kremniy plastinkadan yasalganligi tufayli bor-oksijen nuqsonlari bilan bog'liq yorug'lik ta'siridagi degradatsiyadan (LID) qutuladi. Zamonaviy HJT modullarida potentsial induksiyalangan degradatsiya (PID) deyarli bo'lmaydi, chunki samarali qadoqlash va poroz qoplamalar mavjud emas. A-Si:H qatlamlarining uzoq muddatli barqarorligi haqida ba'zi xavotirlar bo'lishiga qaramay, amalda HJT modullari kam degradatsiya darajasini ko'rsatadi (masalan, yiliga <0.25% quvvat yo'qotishi), bu eng yaxshi kremniy texnologiyalari bilan bir xil darajadadir. Ishlab chiqaruvchilar ko'pincha dastlabki quvvatning 90% ni 25–30 yilgacha saqlashni kafolatlaydi. Bu qisman dizayn tufayli, qisman esa n-tipli kremniy plastinkadan foydalanilgani uchun (u bor-oksijen muammosiz va zarralarga nisbatan chidamli) amalga oshiriladi.

1-jadval: Kremniy Quyosh Batareyasi Texnologiyalarining Taqqoslanishi (laboratoriya samaradorligi va odatiy xususiyatlari) (34).

Batareya texnologiyasi	Eng yuqori laboratoriya samaradorligi (% PCE)	Harorat ko'effitsiyenti (%/°C)	Ikki tomonlama (bifasial) ko'effitsient (%)	Bozor ulushi (yil)
PERC (Al-BSF p-turi)	~24.5% [7]	–0.35 dan –0.40 gacha	~70%	~75% (2021)
TOPCon (n-turi)	~26.1% [7]	~–0.30	~85%	~8% (2020)
HJT (n-turi)	~26.5% [7]	~–0.21	~92%	~2.5% (2021)

Izohlar (1-jadval):

PERC – *Passivlashtirilgan emitter orqa kontaktli elementi* (hozirgi sanoat standartiga aylangan p-tur kremniy asosida);

TOPCon – *Tunnel oksidli passiv kontakt* (yuqori samarali n-turli batareya, diffuzor emitter va polikremniy bilan passivlangan orqa qismi mavjud);

HJT – *Ichki yupqa qatlamli geterotuzilmali quyosh elementi*.

Ushbu ma'lumotlar 2020–2021 yillardagi eng yuqori natijalarni aks ettiradi. Ulardan HJT eng yuqori laboratoriya samaradorligi va eng yaxshi harorat barqarorligiga ega bo'lgan texnologiya hisoblanadi, biroq 2021 yilda uning bozordagi ulushi kichik edi. (Manbalar: *Solar Magazine* va sanoat hisobotlari(7))

Shuni ta'kidlash joizki, 2021–2022 yillardan beri TOPCon va HJT texnologiyalari sezilarli darajada rivojlandi. 2023 yilga kelib, har ikkala texnologiya ishlab chiqarish prototiplari uchun 26% samaradorlikdan oshib ketdi. Ishlab chiqaruvchilar hozirgi PERC texnologiyasidan ushbu yangi avlod batareyalariga bosqichma-bosqich o'tmoqda. Ayniqsa, HJT texnologiyasi yuqori bifasiallik va soddaroq ishlab chiqarish jarayoni tufayli (garchi hozircha material xarajati yuqori bo'lsa-da) tez o'sish uchun qulay imkoniyatlarga ega.

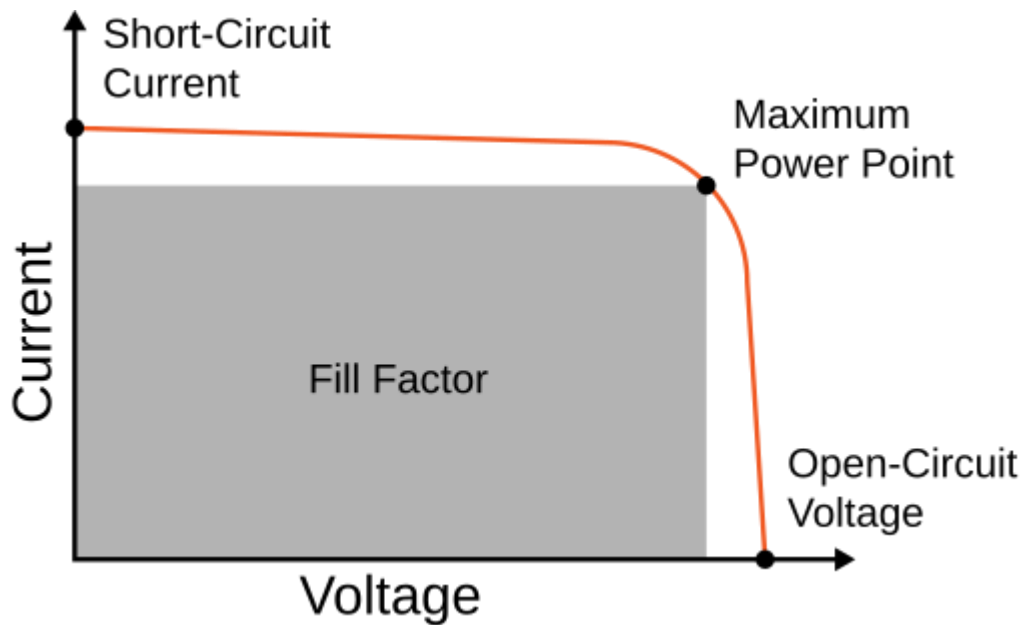
Keyingi bo'limda quyosh batareyasining samaradorligini qanday hisoblash va I–V xarakteristikasini qanday tahlil qilish haqida batafsil ma'lumot beriladi. Bu ko'rsatkichlarning mazmunini chuqurroq tushunishda muhim ahamiyatga ega.

Samaradorlik va I–V xarakteristikalarini hisoblash

Quyosh elementining samaradorligi uning I–V xususiyatlariga bog'liq. Elementni STSh (1000 W/m^2 , 25°C) sharoitida sinashda I–V egri chizig'i olinadi. Ochiq zanjir kuchlanishi (V_{OC}) va qisqa tutashuv oqimi (I_{SC}) o'lchanadi, maksimal quvvat nuqtasi (V_{mp} va I_{mp}) aniqlanadi. Egri chiziqning shakli yorug'lik hosil bo'lgan oqim bilan birikmaning diodli tenglamasi bilan boshqariladi. Ideal element uchun I-V munosabati quyidagicha yozilishi mumkin:

$$I(V) = I_L - I_0(e^{qV/nkT} - 1)$$

Bu erda I_L yorug'likdan hosil bo'lgan oqim ($V=0$ da I_{SC} ga teng), I_0 - diodning to'yingan qorong'u oqimi, q - elektron zaryadi, n - ideallik omili, kT - termal kuchlanish. Natijada I_{SC} (maksimal oqim $V=0$) da boshlanadigan va V_{OC} (oqim nolga tushadigan kuchlanish) da tugaydigan egri chiziq hosil bo'ladi. To'ldirish omili (FF) I-V egri chizig'ining qanchalik "kvadrat" ekanligini ko'rsatadigan o'lchovdir - u maksimal quvvatning ($V_{mp} \cdot I_{mp}$) $V_{OC} \cdot I_{SC}$ mahsulotiga nisbati sifatida aniqlanadi. Yuqori FF element V_{OC} ga yaqin bo'lgunga qadar yuqori oqimni saqlab turishini anglatadi (ko'proq to'rtburchaklar I-V shakli). HJT xujayralari ko'pincha 0,80-0,85 oralig'ida FFga ega, bu past qarshilik yo'qotishlari bilan juda yaxshi diodni ko'rsatadi.



6-rasm. Yoritilgan quyosh elementlarining sxematik I - V egri chizig'i

6-rasm: Yoritilgan quyosh batareyasining sxematik I - V egri chizig'i. Asosiy parametrlar ko'rsatilgan: I_{SC} - qisqa tutashuv oqimi (y-kesish, $V=0$ da), V_{OC} - ochiq tutashuv kuchlanishi (x-kesishma, $I=0$ da). Soyali kulrang maydon balandligi va kengligi maksimal quvvat nuqtasida (MPP) oqim (I_{mp}) va kuchlanish (V_{mp}) ga to'g'ri keladigan egri chiziq ostidagi maksimal to'rtburchaklar maydonini ifodalaydi. To'ldirish omili (FF) bu maydonning $I_{SC} \cdot V_{OC}$ mahsulotiga nisbati bo'lib, egri chiziqning "kvadratligi" ni ko'rsatadi. Yuqori FF (1 ga yaqinroq) elementi nazariy maksimal quvvatning yuqori qismini yetkazib berishini bildiradi.[8]

I - V egri chizig'idan foydalanib, Quyosh elementinig samaradorligini (η) hisoblash mumkin. Samaradorlik maksimal chiqish quvvatining tushayotgan yorug'lik quvvatiga bo'linishi sifatida aniqlanadi. Agar PIN elementdagi tushayotgan yorug'lik quvvati bo'lsa (standart sinov sharoitlari uchun $P_{in} = 1000 \text{ Wt/m}^2$ yoki 100 mWt/sm^2) va elementning maksimal quvvat nuqtasi V_{mp} kuchlanish va oqim I_{mp} ga ega bo'lsa:

$$\eta = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{P_{in} \times A} \times 100\%$$

bu yerda A - quvvat manbai (shuning uchun $I_{mp} \cdot V_{mp}$ - va maydonga bo'lish maydon birligiga quvvat beradi). Ko'pincha bu formula V_{OC} , I_{SC} va FF orqali osonlashtiriladi, chunki $V_{mp} \cdot I_{mp} = FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}$. shunday qilib:

$$\eta = \frac{V_{OC} \times I_{SC} \times FF}{P_{in} \times A} \times 100\%$$

Masalan, $V_{OC} = 0,74 \text{ V}$, $I_{SC} = 38 \text{ mA/sm}^2$ (bu $0,038 \text{ A/sm}^2$) va $FF = 85\%$ bo'lgan yuqori samarali HJT elementini ko'rib chiqamiz. Agar element maydoni 1 sm^2 (oddiylik uchun) va $P_{IN} = 0,10 \text{ Wt/sm}^2$ bo'lsa, unda samaradorlik quydagicha bo'ladi:

$$\eta = \frac{0.74 \times 0.038 \times 0.85}{0.10} \times 100\% \approx 23.9\%$$

Ushbu taxminiy hisob-kitob $\sim 24\%$ samaradorlikka erishish uchun parametrlar qanchalik yaqin bo'lishi kerakligini ko'rsatadi. Agar I_{SC} 40 mA/sm^2 va FF 88% gacha oshirilsa, biz rekord HJT elementlari bilan mos keladigan $\sim 26\text{-}27\%$ oralig'iga kiramiz. Shockley-Queisser chegarasi bitta ulanish uchun ($33,7\%$) va aniqlangan Si chegarasi $\sim 29,4\%$ [2] asosan yuqori maqsadni belgilab beradi - HJT elementlari endi bu shiftning bir necha foiz punktlarida joylashgan, shuning uchun keyingi yutuqlar qiyin bo'ladi va odatda yechim sifatida tandem konfiguratsiyasini talab qiladi.

Volt-amper (V-A) xarakteristikalarini turli xil quyosh batareyasi texnologiyalarida V_{OC} , I_{SC} va FF qiymatlaridagi farqlar bilan ajralib turadi. Aynan shu parametrlardagi tafovut tufayli ba'zi texnologiyalar boshqalariga qaraganda yuqoriroq samaradorlikka ega bo'ladi. HJT texnologiyasining yuqori V_{OC} qiymati muhim ustunlik hisoblanadi — bu, asosan, sirtning mukammal passivatsiyasi natijasida qayta kombinatsiyalanuvchi tok (I_0) juda kichik bo'lishi bilan izohlanadi. TOPCon elementlari ham yuqori V_{OC} ko'rsatkichiga ega (deyarli HJT darajasida), biroq kontaktlarda biroz yuqoriroq rekombinatsiya ehtimoli mavjud. PERC texnologiyasida esa, odatda, V_{OC} qiymati pastroq bo'ladi, bu metall kontaktlar va hajmda (ayniqsa bor bilan legirlangan p-turli kremniyda) sodir bo'ladigan rekombinatsiyalarning ko'pligi bilan bog'liq.

PERC elementsining I–V egri chizig'i odatda yuqoriroq I_{SC} bilan boshlanadi (chunki old tomonda a-Si:H qatlami yo'q va bu ko'k nurni so'rishga halaqit qilmaydi), biroq uning V_{OC} qiymati pastroq ($\sim 0.67 \text{ V}$ atrofiga), FF esa biroz past ($\sim 80\%$) bo'ladi. Natijada egri chiziq ostidagi maydon — ya'ni umumiy samaradorlik — HJT elementga nisbatan kichikroq bo'ladi.

Amaliyotda quyosh batareyasining samaradorligini aniqlash uchun uning I–V xarakteristikasi standart sinov sharoitlarida (STC) o'lchanadi: quyosh nurlanishi 1000 W/m^2 , element harorati 25°C , AM1.5 spektr. I_{SC} (nol kuchlanishda o'lchangan tok) bevosita o'lchanadi, V_{OC} (ochiq zanjirda o'lchangan kuchlanish) aniqlanadi, va butun I–V egri chizig'i yozib olinadi. Maksimal quvvat nuqtasi (MPP) hisob-kitob orqali yoki kuzatuvchi elektron sxema yordamida aniqlanadi. Zamonaviy quyosh simulyatorlari va IV test qurilmalari ushbu jarayonni avtomatik bajaradi hamda FF va samaradorlikni hisoblab beradi. HJT kabi istalgan quyosh batareyasining ushbu asosiy parametrlarini standart sharoitda o'lchash texnologiyalarni adolatli taqqoslash imkonini beradi.

Xulosa qilib aytganda: quyosh batareyasining samaradorligi V_{OC} , I_{SC} va FF ko'paytmasining kiruvchi quvvatga nisbati orqali aniqlanadi. Geterotuzilmali elementlar aynan yuqori V_{OC} va FF ko'rsatkichlari orqali yuqori samaradorlikka erishadi, shu bilan birga I_{SC} qiymatlarini ham raqobatbardosh darajada saqlaydi. HJT texnologiyasining I–V egri chizig'i deyarli ideal shaklga ega bo'lib, V_{OC} yaqinida keskin tushuvchi qism past rekombinatsiya va rezistiv yo'qotishlarni ko'rsatadi — bu esa yuqori sifatli, yaxshi passivatsiyalangan p-n o'tish zonasining belgisi hisoblanadi.

Element samaradorligi $\eta = (V_{mp} \cdot I_{mp}) / (P_{in} \cdot A)$ yoki $\eta = (V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF) / (P_{in} \cdot A)$ orqali hisoblanadi, bu yerda A – element maydoni. HJT elementlari yuqori V_{OC} va FF tufayli yuqori η ga ega. Ularning I–V chizig'i V_{OC} ga yaqin keskin tortilib tushadi, bu passivatsiya mukammalligi va past rekombinatsiyani ko'rsatadi.

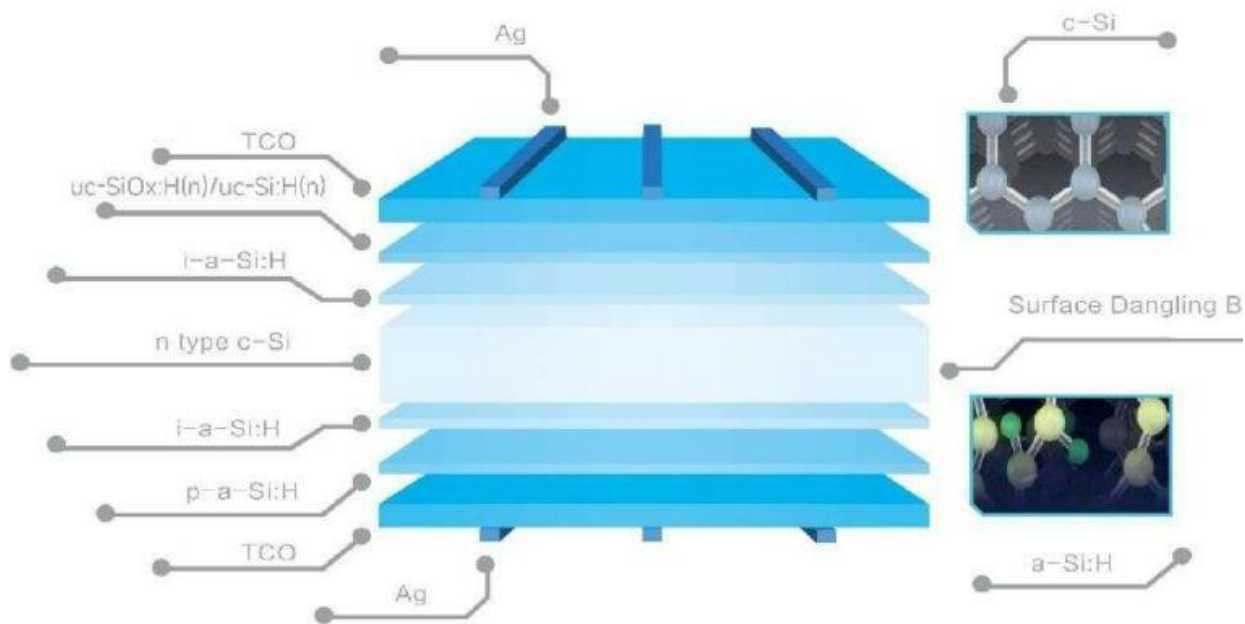
Masalan, HJTda V_{OC} yuqori, I_0 (teskari oqim) juda kichik bo‘ladi, bu V_{OC} ni oshiradi. PERC elementlaridagi V_{OC} pastroq, shuningdek old yuzada to‘q qatlamlar bilan bog‘liq yo‘qotishlar ko‘proq bo‘ladi. I–V egri ostidagi maydon – maksimal quvvat – HJTda katta bo‘ladi.

HJT texnologiyasidagi so‘nggi yutuqlar va rivojlanish yo‘nalishlari

Geterokontaktli elementlar rivojlanishda davom etmoqda va bir qator yangi yo‘nalishlar paydo bo‘ldi:

Orqa kontaktli HJT (HBC) elementlar:

HJTni orqa kontaktli dizayn bilan birlashtirib, old kontakt va emitterni olib tashlagan HBC elementlari ishlab chiqildi. Barcha kontaktlar orqa tomonda bo‘ladi. Masalan, Kaneka 26.7% HBC elementini namoyish etdi; bu dizayn old panjara soyasini yo‘q qildi va yorug‘likni to‘liq qabul qilish imkonini berdi. Shu bilan birga, LONGi va boshqalar HBC ishlab chiqarishni yengillashtirish uchun lazer bilan naqshlash usullarini ishlab chiqdi. 2023 yil dekabrda LONGi barcha lazer jarayoni bilan tayyorlangan HBC elementida 27.09% rekordga erishdi. HBC dizayni antirefleks qatlamlarini soddalashtiradi va ayniqsa orqa tomondan natijalarning yanada yaxshilanishiga olib keladi.



Rasm 7. Orqa kontaktli (HBC) elementlar bilan heterotuzulma

Biroq, HBC dizayni murakkab orqa tomonni naqshlashni talab qiladi (n va p kontakt zonalarini navbatma-navbat yaratish), bu ilgari fotolitografiyani talab qilardi. LONGi kabi kompaniyalar esa ushbu ishlab chiqarish jarayonini soddalashtirish uchun lazerli naqshlash texnikalarini ishlab chiqdilar. 2023-yil

dekabr oyida LONGi kompaniyasining 27,09% samaradorlikka ega rekordi aynan lazer bilan naqshlangan HBC HJT batareyasiga tegishli bo'lgan. HBC dizaynlari shuningdek TCO (shaffof o'tkazuvchi oksid) qatlamlari sarfini kamaytiradi (faqat old tomonga to'liq TCO zarur, orqa kontaktlar esa lokal bo'ladi). LONGi o'zining rekord batareyasida bifacial elementga nisbatan indiy miqdorini 5 baravar kamaytirganini ma'lum qilgan.

Kelajakda HBC HJT texnologiyasi yuqori samaradorlik talab qilinadigan yoki bitta tomon ochiq bo'lmagan (masalan, orqa tomon yopiq bino integratsiyalangan PV tizimlarida) ilovalarda keng qo'llanilishi kutilmoqda.

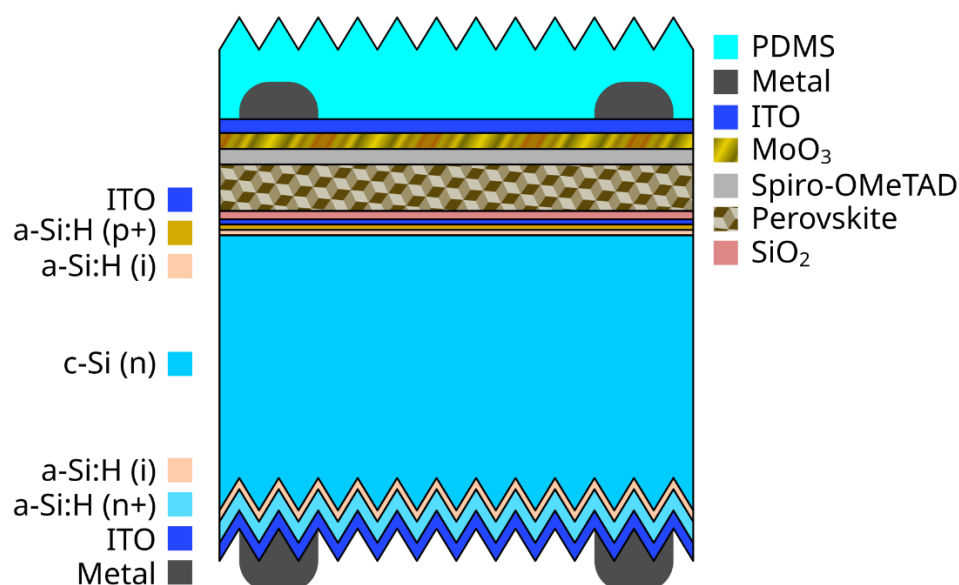
Tandem (ko'p bo'g'lamli) elementlar: Eng qiziqarli yutuqlardan biri – HJTni tandem element sifatida ishlatib, yagona bo'g'lam limitini oshirish. Kremniy geterokontakti ideal pastki element bo'lib, uning yuqori V_{OC} va allaqachon shaffof TCO paleida yuqori qavat qo'shishga imkon beradi. Eng ko'p tarqalgan variant – yuqori qavat sifatida perovskit qo'shish. Masalan, bir nechta guruhlar perovskit/HJT tandemida 30% dan oshiq samaradorlikni ko'rsatdi. 2023 yilda LONGi 33.9% perovskit/HJT tandemni e'lon qildi. Tandem dizayn ko'p qatlamli funktsiya bo'lib, yuqori tokcha spektrini perovskit, quyi spektrini kremniy yutadi, bu esa yuqori samaradorlik beradi. Tandem elementlarda perovskit va kremniy interfeysini optimallashtirish, shuningdek yuqori haroratli jarayonlarni talab qilmaslik muammolari yechim izlanmoqda. Ammo texnologiya tez rivojlanmoqda va ko'plab ekspertlar agar perovskitlar barqaror bo'lsa, yaqin yillarda tijorat tandem modullar paydo bo'ladi deb hisoblaydi.

Tandem Quyosh Batareyalari (Perovskit/Kremniy Geterotuzilmasi) (8-rasm):

Eng istiqbolli yutuqlardan biri bu HJT elementlarini tandem arxitekturasida quyi element sifatida ishlatishdir. Bu yondashuv bir birlikli p–n o'tish samaradorligi chegarasidan oshish imkonini beradi.

Kremniy HJT yuqori V_{OC} ga ega va uning yuqori qatlami (TCO) allaqachon shaffof bo'lganligi sababli, ustiga yuqori tarmoqli kenglikka ega perovskit elementsini joylashtirish mumkin. Eng keng tarqalgan kombinatsiya — yuqorida perovskit (~1.7–1.8 eV) va pastda kremniy (~1.12 eV) joylashgan tandem elementlardir.

Ikki uchi birlashtirilgan monolit tandemda, perovskit element tayyor HJT ustiga to'g'ridan-to'g'ri yotqiziladi. So'nggi yillarda 30% dan yuqori samaradorlikka ega perovskit/HJT tandemlari yaratilgan. Masalan, LONGi kompaniyasi 2023 yilda 33.9% samaradorlikka erishdi. Oxford PV va HZB Berlin kabi laboratoriyalar ham ~32–33% samaradorlikka ega tandem elementlarni e'lon qilishgan.



8-rasm. Geterotuzulma–Perovskite tandem quyosh elementi sxemasi([doi:10.1039/D2EE04007G](https://doi.org/10.1039/D2EE04007G))

8-rasm: Perovskit va kremniy heterotuzilmali tandem quyosh elementsining ko‘ndalang kesim sxemasi. Unda yuqorida yuqori tarmoqli kenglikka ega perovskit elementi (jigarrang/oltin qatlamlar), pastda esa HJT kremniy elementi (ko‘k qatlamlar) joylashgan. Perovskit yuqori energiyali (kaltato‘lqinli) yorug‘likni yutadi, kremniy esa perovskit orqali o‘tgan past energiyali (uzunto‘lqinli) nurni yutadi.

Bu orqali spektr ikki qismga bo‘linadi va umumiy samaradorlik bir birlikli p-n o‘tish chegarasidan oshadi. SHJ quyi elementi n-turli kremniy asosiy qatlami (ko‘k) va p/i hamda n/i amorf qatlamlardan tashkil topgan. Ustidagi perovskit elementi esa shaffof elektrod, elektron tashuvchi qatlam, perovskit yutuvchi qatlam (oltin), teshik tashuvchi qatlam va yuqori kontakt qatlamdan iborat bo‘ladi.

Tandem HJT elementlari uchun muhim muammo — ikkita quyi element orasidagi interfeysni optimallashtirish (optik yo‘qotishlar va rekombinatsiyani kamaytirish). Odatda ular orasiga rekombinatsiya qatlam yoki tunnel o‘tish joylashtiriladi. Boshqa muammo — perovskit qatlamini HJT ustiga yotqizishda yuqori haroratli jarayonlar taqiqlangan (aks holda a-Si:H buziladi). Shunga qaramay, taraqqiyot tez kechmoqda va agar perovskitlar barqarorligi va keng ko‘lamda ishlab chiqarilishi hal qilinsa, yaqin yillarda tijorat tandem HJT-perovskit modullari paydo bo‘lishi kutilmoqda.

Qo‘shimcha ravishda, boshqa yuqori element materiallari bilan ham izlanishlar olib borilmoqda — III–V yarim o‘tkazgichlar (masalan GaInP/GaAs) yordamida 32–35% samaradorlikka ega tandemlar yaratilgan, lekin ularning narxi yuqori. Shuningdek, to‘liq kremniyga asoslangan tandemlar (keng tarmoqli kremniy birikmalari) ham sinovdan o‘tkazilmoqda.

Organik–anorganik gibridd elementlar:

Bu gibridd elementlar yorug‘likni yutuvchi organik donor va anorganik qabul qiluvchi qatlamlarning birlashmasidan tashkil topadi. Organik komponent fotonlarni yutib, eksiton hosil qiladi, so‘ngra organik–anorganik interfeysda elektron va holalarga ajraladi: elektronlar anorganik fazaga, holalar esa organik fazada yig‘iladi. Bu arxitektura organik moddalarning ishlab chiqarish qobiliyati va past xarajatlari hamda anorganik komponentlarning yuqori elektron o‘tkazuvchanligini birlashtiradi. Masalan, anorganik qatlam barqarorlikni oshiradi, organik qatlam esa egiluvchanlik va past narx beradi. Gibridd elementlar moslanadigan optoelektron xususiyatlarga ega, arzon narxli yechim bo‘lib, katta maydonda ishlab chiqarishga yo‘naltirilgan, lekin hozircha ularning samaradorligi hali PERC yoki HJT darajasiga yetmagan.

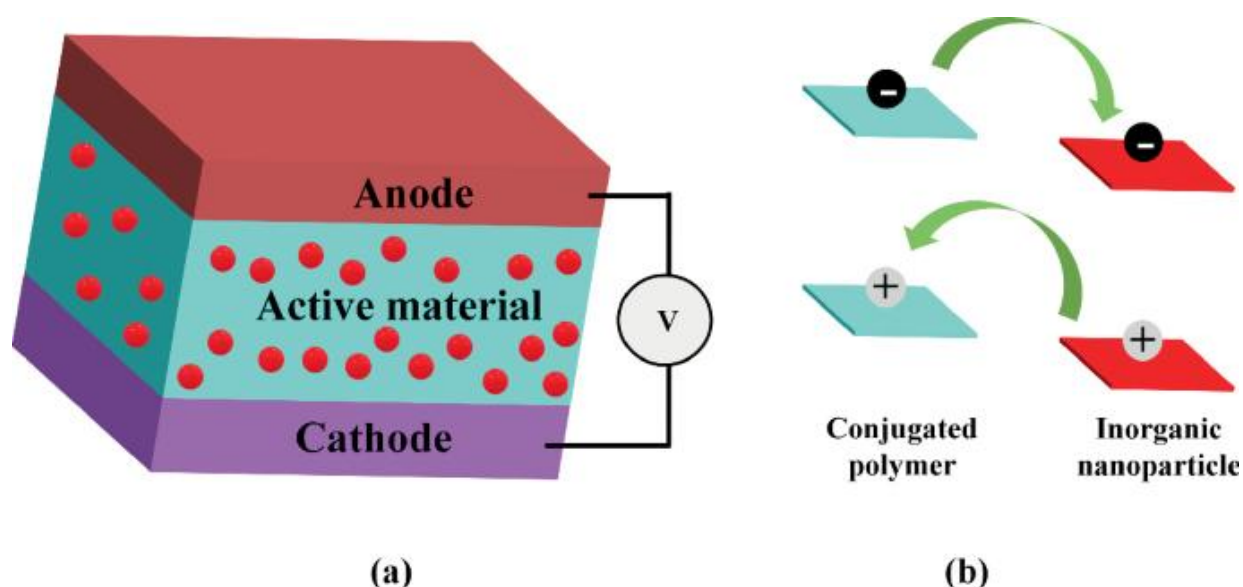


Figure 9. Organik-noorganik gibridd quyosh elementi (https://doi.org/10.1007/978-981-99-7333-0_6)

- **Muqobil kontaktlar:** An'anaviy a-Si:H qatlamlariga alternativ sifatida tadqiqotchilar boshqa materiallarni o'rganmoqda. Masalan, teshiklarga sezgir kontaktlar uchun nozik kremniy oksid yoki molibden oksid (MoO_x) qatlamlari qo'llanilyapti, ba'zi hollarda thin-doped kremniy (TOPCon) usuliga o'xshash tutqichlar qo'shilyapti. Qisman poly-Si/SiO₂ va a-Si kombinatsiyalarini sinab ko'rayotgan gibridd dizaynlar ham mavjud. C-Si/MoO_x geterokontaktlar ham ko'rsatilgan, ammo samaradorlik bo'yicha rekordlar hanuzgacha an'anaviy a-Si:H usullari bilan saqlanib qolmoqda.
- **Metallizatsiya va modul integratsiyasi:** HJTda oldindan kamchilik bo'lgan metallizatsiyani yanada samaraliroq qilish bo'yicha ham yutuqlar mavjud. Kumush toklar simlar bilan qoplanishi orqali kumush sarfini sezilarli kamaytirildi. Smart Wire texnologiyasi element yuzasiga ingichka kumush yoki simlarni yopishtirib, keng busbarlardan voz kechishga imkon berdi. Bu

nafaqat elektr yo‘qotishlarini va soyani kamaytiradi, balki past sifatli (arzon) kumush pasta ishlatilishiga ruxsat beradi. Bundan tashqari, yaxshi pasivizatsiya tufayli 100 μm yoki undan ingichka plastinkalar ishlatilishi mumkin, bu esa kremniy xarajatlarini qisqartiradi. Bu kabi o‘zgarishlar HJTni modullar uchun yanada raqobatbardosh qiladi.

- **PERC/TOPCon bilan kombinatsiyasi(10-Rasm):** Ba’zi ishlab chiqaruvchilar PERC liniyasini avval TOPCon, keyin HJTga bosqichma-bosqich o‘tkazishni o‘ylamoqda. Masalan, mavjud PERC liniyasida orqa tomoniga a-Si:H qatlamini qo‘shish orqali vaqtinchalik HJTga o‘xshash element ishlab chiqarish sinab ko‘rilmoqda. Biroq, bunday kombinatsiyalar (ba’zida HIPER yoki boshqa qisqartmalar bilan ataladi) keng tarqalmagan; odatda, HJT texnologiyasi to‘liq mustaqil texnologik yechim sifatida joriy etiladi, chunki uning ishlab chiqarish jarayoni an’anaviy texnologiyalardan tubdan farq qiladi. Biroq bunday hibrid dizaynlar keng tarqalmadi; odatda HJT o‘ziga xos jarayonlar to‘plamiga ega bo‘lgan to‘liq yangi texnologiya sifatida joriy etiladi. Tandem elementlarda esa HJT ostki element sifatida ishlatiladi, yuqori element esa masalan perovskit bo‘ladi (old kontakt HJTda shisha va soya muammosi yo‘qligi sababli).

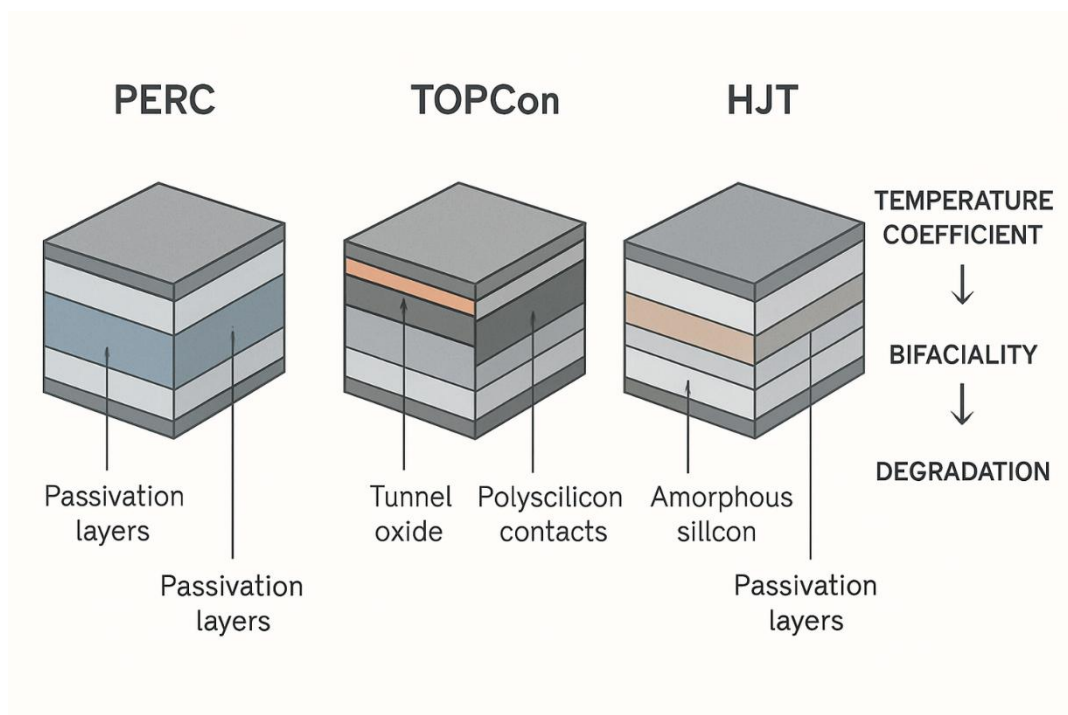


Figure 10. PERC, TOPCon, HJT(<https://www.anernstore.com/blogs/diy-solar-guides/perc-topcon-hjt-guide-2025?srltid=AfmBOopHfe20NyELi8Shwg5Bafo5C0uv430-IpqbsyT3cHK7mojG50TO>)

Kelajakka qareydigan bo‘lsak, HJT texnologiyasi kremniy fotovoltaiklarini (tandem bilan) 30% samaradorlik chegarasiga yaqinlashtirish va ularning maydonda barqaror

ishlashini ta'minlashda muhim rol o'ynaydi. U an'anaviy kremniy elementlar va yupqa plyonka texnologiyasining kuchli tomonlarini birlashtirib, noyob pozitsiyaga ega. Ishlab chiqarishdagi qiyinchiliklar (material narxлари, uskunalар) bosqichma-bosqich bartaraf etilayotgan chog'da, ko'pchilik HJT va uning variantlari bozor ulishini sezilarli darajada oshirishi kutilmoqda. Ma'nan HJT nazariy samaradorlik(FIK) limitiga yaqinlashsa, amalda yuqori samaradorlik va ikki tomonlama energiya hosil qilish natijasida kiritilgan quvvat hajmi kamayishi mumkin.

Xulosa

Geterokontakt (HJT) quyosh elementlari 1990-yillarning boshidagi yangicha g'oyadan boshlangan bo'lsa-da, bugungi kunda yuqori samaradorlikka ega etakchi quyosh element texnologiyalaridan biriga aylangan. Kristal kremniyni yupqa amorf kremniy qatlamlari bilan birlashtirish orqali HJT elementlari ikkala materialning kuchli tomonlaridan foydalanadi: kristal Si yuqori yorug'lik yutilish va zaryad tashishni ta'minlasa, amorf Si esa a'lo sirt pasivizatsiyasi va selektiv kontakt xususiyatini beradi. Biz HJT elementlarining birinchi 12% darajasidagi Sanyo namunalaridan tortib 20%+, 25% va hozirgi ~26–27% rekordlargacha bo'lgan rivojlanishini ko'rib chiqdik. Intrensek yupqa qatlamlar va orqa kontaktli arxitekturalar kabi asosiy yangiliklar ta'kidlandi. HJT ishlab chiqarishiga kam haroratli PECVD va maxsus metallizatsiya zarurligi kiradi, bu esa murakkablik va qiymat jihatidan qanday o'zgarishlarga olib kelishini ko'rsatadi.

Amalda, HJT elementlari yuqori ochiq zanjir kuchlanishlariga (0.73–0.75 V), past rekombinatsiya yo'qotishlariga va barqaror issiqqa chidamlilikka ega. Bu ularni an'anaviy PERC, TOPCon kabi elementlardan samaradorlik va amaliy qulaylik bo'yicha o'zib ketadi. Biz I–V chizig'i bo'yicha element samaradorligini qanday hisoblash mumkinligini ko'rsatib o'tdik va boshqa texnologiyalar bilan taqqosladik. Rasmlar yordamida HJT strukturasini, uning I–V chizig'ini va perovskitli tandemdosh konfiguratsiyasini namoyish etdik.

Nazariya va amaliyotda HJT elementlari qattiq hol fizikasi innovatsiyasi va barqaror muhandislikning uyg'unligi bo'lib, qayta tiklanadigan energiya sohasiga xizmat qiladi. HJT elementlari yarimo'tkazgich geterokontakti fizikasi, materialshunoslik (ingichka plyonka tushirish, sirt pasivizatsiyasi) va qurilma muhandisligi (quyosh elementi dizayni va xarakterizatsiyasi) tushunchalarini o'zida mujassam etadi. Shu bilan birga, ular real dunyo fotovoltaik ishlab chiqarishi va tatbiqidagi muhim loyihalarni namoyish etmoqda – sanoatda HJTni keng qo'llash va rekord tadbirlarni o'rnatishda uning o'rnini ko'rsatadi.

Quyosh energetikasi milliardli darajaga yetib borishi bilan, yuqori samaradorlik va yanada ko'p energiya hosil qilish imkonini beruvchi HJT kabi texnologiyalar har vatt energetik narxini va joy talabini sezilarli kamaytiradi. Ishlab chiqarish jarayonlarini yanada takomillashtirish va tandem texnologiyalarini rivojlantirish davomida, kelajak fotovoltaik modullarda (bir bo'g'lamli yoki ko'p bo'g'lamli) HJT asosidagi elementlar markaziy o'rin tutadi deb kutish mumkin. HJT 12% dan deyarli 30% samaradorlikka erishish yo'lida katta yutuqlarga erishdi, bu

quyosh elementi tadqiqotining ajoyib taraqqiyotini namoyish etadi va kelajakda yana qaysi yangi yutuqlar yuzaga kelishini ko'rsatadi.

Foydalanilgan Adabiyotlar:

1. Tanaka, M., et al. (1992). "Development of new a-Si/c-Si heterojunction solar cells – ACJ-HIT (Artificially Constructed Junction-Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31(11), 3518–3522. (Sanyo tomonidan amalga oshirilgan birinchi HIT elementlari, samaradorlik ~12%.)
2. Tsunomura, Y., et al. (2009). "Twenty-two percent efficiency HIT solar cell", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 93(6-7), 670–673. (Sanyo kompaniyasi 22% samaradorlikka ega HIT elementini taqdim etdi.)
3. Masuko, K., et al. (2014). "Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell", *IEEE J. Photovolt.*, 4(6), 1433–1435. (Panasonicning 25.6% samaradorlikka erishgan HJT elementi.)
4. Yoshikawa, K., et al. (2017). "Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%", *Nature Energy*, 2, 17032. (Kaneka kompaniyasining 26.7% samaradorlikka ega orqa kontaktli HJT elementi.)
5. Green, M. A., et al. (2015). "Solar cell efficiency tables (Version 45)", *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 23(1), 1–9. (Quyosh elementlari rekordlari jadvali – shu jumladan HIT elementlari.)
- Shockley, W. & Queisser, H. J. (1961). "Detailed Balance Limit of Efficiency of p–n Junction Solar Cells", *J. Appl. Phys.*, 32(3), 510–519. (Yagona bog‘lamli elementlar samaradorligining nazariy maksimumi ~33.7%.)
6. Richter, A., et al. (2013). "Re-assessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells", *IEEE J. Photovolt.*, 3(4), 1184–1191. (Yagona bog‘lamli kremniy elementlar uchun yangilangan limit ~29.4%.)
7. LONGi Green Energy (2023). "LONGi Sets a New World Record of 27.09% for the Efficiency of Silicon Heterojunction Back-Contact (HBC) Solar Cells", Press Release, Dec. 18, 2023. (27.09% samaradorlikka erishgan HBC HJT elementi haqida.)
8. LONGi Green Energy (2023). "LONGi announced a world record 33.9% efficiency of crystalline silicon-perovskite tandem solar cells", 19th CSPV Conference, Nov. 3, 2023. (Kremniy-perovskit tandem elementi bo‘yicha 33.9% rekord samaradorlik.)

[1] Development of HJT Technology – Key Directions - [hjpgv.com 0BB](https://hjpgv.com/development-of-hjt-technology-key-directions/), HBC HJT
<https://hjpgv.com/development-of-hjt-technology-key-directions/>

[2] Development of Hetero-Junction Silicon Solar Cells with Intrinsic Thin Layer: A Review
<https://www.mdpi.com/2079-6412/13/4/796>

[3] File:Bifacial Silicon heterojunction solar cell cross-section schematic.svg - Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bifacial_Silicon_heterojunction_solar_cell_cross-section_schematic.svg

- [4] Heterojunction solar cell – Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Heterojunction_solar_cell
- [5] Heterojunction Technology: the future of solar? - RatedPower
<https://ratedpower.com/blog/heterojunction-technology/>
- [6] LONGi Sets a New World Record of 27.09% for the Efficiency of Silicon Heterojunction Back-Contact (HBC) Solar Cells -LONGi
<https://www.longi.com/en/news/heterojunction-back-contact-battery/>
- [7] TOPCon Solar Cells: The New PV Module Technology in the Solar Industry
<https://solarmagazine.com/solar-panels/topcon-solar-cells/>
- [8] File:Solar Cell I-V Curve Schematic.svg - Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Cell_I-V_Curve_Schematic.svg
- [9] A, Schematic structure of a perovskite silicon tandem solar cell. A... | Download Scientific Diagram https://www.researchgate.net/figure/A-Schematic-structure-of-a-perovskite-silicon-tandem-solar-cell-A-heterojunction_fig1_337105123
- (10) en.wikipedia.orgen.wikipedia.org
- (11) researchgate.netresearchgate.net
- (12) en.wikipedia.orgresearchgate.net
- (13) researchgate.netresearchgate.net
- (14) researchgate.neten.wikipedia.org

III Bob

1. KO‘P O‘TISHLI QUYOSH ELEMENTLARI

Ko‘p o‘tishli (MJ) quyosh elementlari ikki yoki undan ortiq, taqiyilangan zona (taqiyilangan zona) energiyasi har xil bo‘lgan yarimo‘tkazgich p–n o‘tishlarini bir-birining ustiga o‘rnatiladi(o‘stiriladi) va shu tariqa Quyosh spektrining ketma-ket qismlarini yutadi[1][2]. Yuqori energiyali fotonlarni keng **taqiyilangan zonali** yuqori elementda ushlab qolib, pastroq energiyali fotonlarni esa torroq **taqiyilangan zonali** quyi elementlarga o‘tkazish orqali MJ qurilmalar yakka o‘tishli elementlar uchun **Shockley–Queisser chegarasi** (~33%)dan yuqori samaradorlikka erisha oladi[1]. Ko‘p o‘tishli fotovoltaika bo‘yicha dastlabki ishlar 1970-yillarda boshlangan: Bedair va boshq. (1979) birinchi monolitik ikki o‘tishli AlGaAs/GaAs elementini namoyish etdilar[3]. 1980-yillarning o‘rtalariga kelib Olsen va hamkorlari ikki o‘tishli GaInP/GaAs elementini ishlab chiqdilar va taxminan 2000-yilda birinchi kosmik qo‘llashga yaroqli GaInP/GaAs/Ge uch o‘tishli qurilmasi uchirildi[3][4]. Boeing tarkibiga kirgan yapon Spectrolab kompaniyasi ko‘plab yutuqlarga boshchilik qildi: masalan, ularning 2006-yilda yaratilgan III–V MJ elementi samaradorligi 40%dan oshdi[3]. 2022-yilga kelib Fraunhofer ISE 665 marta kuchaytirilgan yoritilish ostida 47,6% samaradorlikka erishgan 4J GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs elementini e‘lon qildi[5]. Bunday laboratoriya rekordlari o‘rganish jarayonining keskinligini ko‘rsatadi: 1990-yillardagi ~21,5% samarali ikki o‘tishli kosmik elementlardan bugungi >45% samarali MJ elementlargacha rivojlanish amalga oshdi[4].

Tarix

1979-yilda Bedair va hamkorlari birinchi ikki o‘tishli AlGaAs/GaAs elementini qurdilar[3]. 1980–90-yillarda GaInP/GaAs juft elementlari (21%+) ishlab chiqarilib, koinotga uchirildi[3]. 2000-yilda birinchi GaInP/GaAs/Ge uch o‘tishli (3J) elementlari kosmosda sinovdan o‘tkazildi[4]. 2006-yilda Spectrolab birinchi 40%dan yuqori samarali MJ elementni xabar qildi[3]. 2022-yilga kelib Fraunhofer 47,6% ko‘rsatkichga (4J) erishdi[5]. Shu bilan bir vaqtda, ingichka plyonkali tandemlar ham paydo bo‘ldi: 2011-yilga kelib polimer/organik tandem 10,6% samaradorlikka erishdi[6], 2025-yilga kelib esa perovskit–kremniy tandemlari 34,9% ko‘rsatkichni zabt etdi[7].

Ko‘p o‘tishli quyosh elementlari nima?

Yakka p–n o‘tishli quyosh fotovoltaiik (PV) elementlari o‘zlarining taqiyilangan zona energiya chegarasigacha bo‘lgan to‘lqin uzunliklarni yutib, quyosh nurini elektr energiyasiga aylantiradi. Natijada, Quyosh spektrining faqat bir qismi samarali ravishda energiyaga aylantiriladi. Quyosh spektridan to‘liqroq foydalanish maqsadida ko‘p o‘tishli quyosh elementlari konsepsiyasi paydo bo‘ldi, bu **1-rasmda** tasvirlangan.

Ko‘p o‘tishli quyosh elementlari kiruvchi quyosh nurlarining turli to‘lqin uzunliklarini har bir qatlam orqali yutishga qodir (1-rasm), shuning uchun ular

yorug'likni elektrga aylantirishda bir o'tishli elementlarga qaraganda samaraliroq hisoblanadi. Har bir qatlam yorug'lik spektrining ma'lum bir diapazonini yutishga moslashtirilgan bo'lib, elementga yorug'lik energiyasining kengroq spektrini yutish va umumiy samaradorlikni oshirish imkonini beradi.

- **Yuqori element** — Galliy Indiy Fosfid (GaInP)dan yasalgan bo'lib, ko'k va ultrabinafsha nurlarni yutadi.
- **O'rta element** — Galliy Arsenid (GaAs)dan iborat bo'lib, yashil yorug'likni yutadi.
- **Quyi element** — odatda Germaniy (Ge)dan tashkil topib, infraqizil nur so'rilishini ta'minlaydi.

Har bir p–n o'tish alohida quyosh elementi kabi ishlaydi, va ushbu qatlamlarning birikmasi Quyosh spektrining turli qismlaridan ko'proq fotonlarni tutib qolishni ta'minlaydi, natijada umumiy energiya aylantirish samaradorligi oshadi.

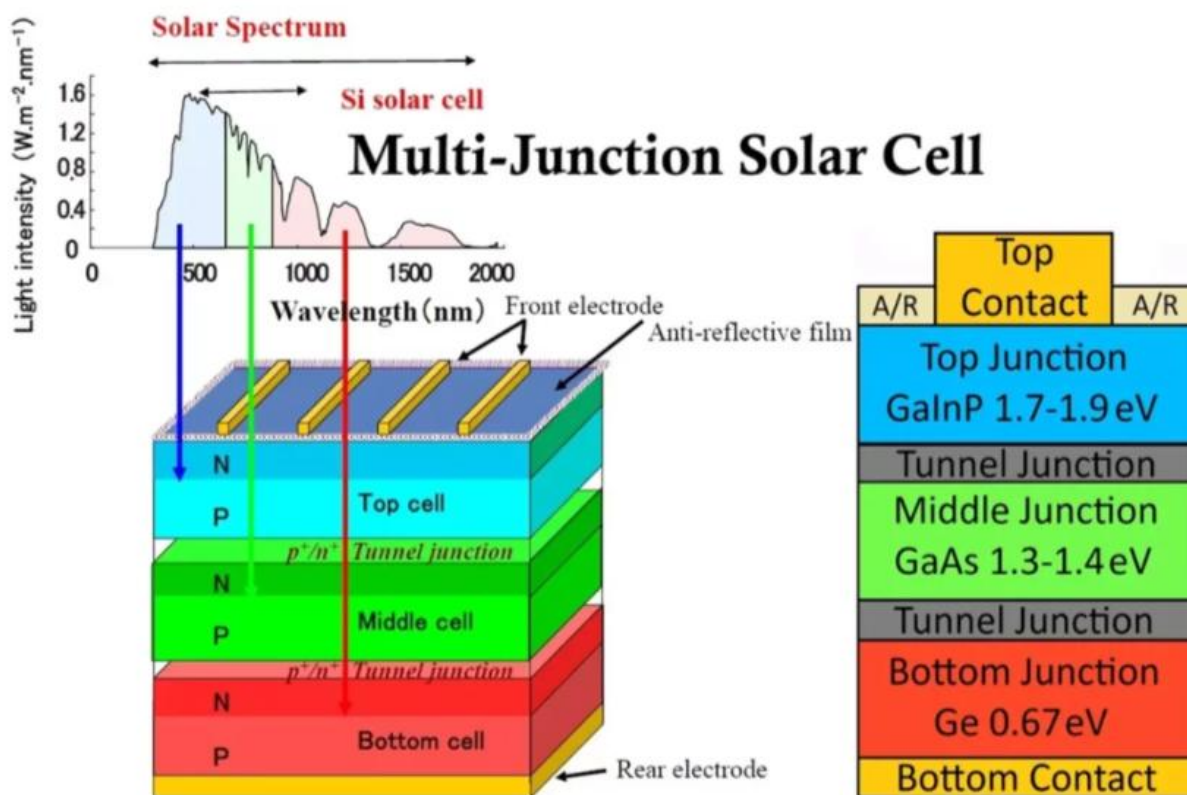


Figure 1. Ko'p o'tishli quyosh elementi tuzilishi.

<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/weisse2/>

Bunga qarama-qarshi ravishda, an'anaviy bir o'tishli quyosh elementlari faqat bitta material qatlamiga ega bo'lib, nisbatan tor diapazondagi yorug'likni yuta oladi. Garchi nazariy jihatdan bunday elementlar bir nechta spektr qismlarini qamrab olib, an'anaviy bir o'tishli elementlarga qaraganda bir necha barobar yuqori samaradorlikka erishishi mumkin bo'lsa-da, ishlab chiqarish tannarxining balandligi va doimiy ilmiy-tadqiqot ishlari tufayli hozircha ko'p o'tishli elementlar tijorat uchun keng joriy etilmagan yoki amaliy jihatdan hali o'zini oqlamaydi.

Ko'p o'tishli quyosh elementlari tandem quyosh elementlarining bir ko'rinishi bo'lib, ular turli chastotadagi quyosh nurlarini yutishga ixtisoslashgan bir nechta qavat materiallar yig'indisidan tashkil topgan.

Ko'p o'tishli quyosh elementlarining asoslari: ular qanday ishlaydi?

Ko'p o'tishli quyosh elementlarining ishlash prinsipi **taqiqlangan zona energiyasi** tushunchasiga asoslanadi. Taqiqlangan zona energiyasi — elektronni o'z orbitasidan ajratib, material ichida erkin harakatlanishiga imkon beruvchi minimal energiya miqdori. Turli materiallarning taqiqlangan zona energiyasi turlicha bo'ladi, va turli yorug'lik to'lqin uzunliklari turli energiya miqdorlariga to'g'ri keladi (2a-rasm).

Ko'p o'tishli quyosh elementlari turli taqiqlangan zona energiyasiga ega bir nechta material qatlamlaridan iborat. Yorug'lik elementga tushganda, u eng yuqori taqiqlangan zona energiyasiga ega yuqori qatlam tomonidan yutiladi (2b-rasm). Yutilgan energiya materialdan elektronlarni chiqarib yuboradi va ular erkin ravishda keyingi, taqiqlangan zona energiyasi pastroq bo'lgan qatlamga oqib o'tadi. Bu jarayon barcha elektronlar eng quyi qatlamga yetib borguncha davom etadi, so'ng elektr zaryadlar yig'ilib, foydali elektr quvvatiga aylantiriladi.

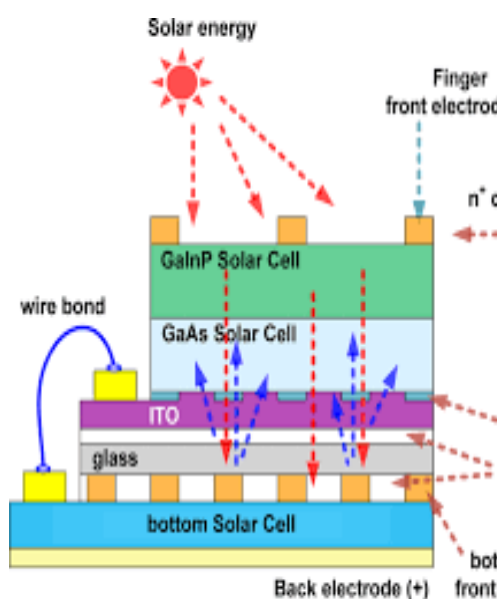


Figure 2a. Yorug'likning aks etish yo'li ish mexanizm
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-40727-y>

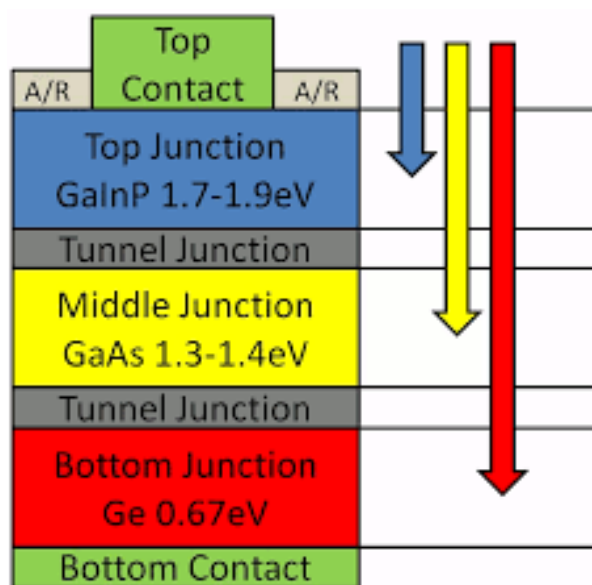


Figure 2b. 40% samaradorlikka ega ko'p o'tishli quyosh elementining sxematik tasviri
<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/weisse2/>

Quyosh elementlari odatda yarimo'tkazgich materiallardan (kristall quyosh elementlarida odatda kremniydan) tayyorlanadi[25]. An'anaviy bir quyosh elementi ikkita qatlamdan iborat bo'lib: elektronlarga boy **n-tip** qatlam va nisbatan kam elektronga ega **p-tip** qatlamdan tuzilgan. Quyosh nuri n-tip qatlamga tushganda, elektronlar o'sha qismdan p-tip qatlamga oqib o'tadi va elektr toki hosil bo'ladi; bu

tokni maxsus kontaktlar yordamida yig'ib, quvvat manbai sifatida foydalanish mumkin. Bunday turdagi quyosh elementi bitta n-tip va p-tip qatlamlar chegarasiga ega bo'lgani sababli bir o'tishli (yakka p–n o'tishli) quyosh elementi deb ataladi.

Ishlab chiqarish usullari

Ko'p qavatli (multi-junction, MJ) yuqori samaradorlikka ega quyosh elementlarining aksariyati murakkab yarim o'tkazgichlar asosida epitaksial o'stirish (MOCVD yoki MBE usuli) orqali ishlab chiqariladi. Masalan, panjaraga moslashtirilgan GaInP/GaAs/Ge elementlar germaniy (Ge) substratlarida o'stiriladi va so'ng mexanik tarzda qayta ishlanadi (10). Yangi avlod usullaridan biri — teskari metamorfik o'stirish bo'lib, bunda subelementlar teskari tartibda o'stiriladi va keyin plastinka ajratilib, flip-chip usulida bog'lanadi; bu esa panjaraga mos kelmaydigan substratlarga (masalan, GaAs ustiga InGaAs) pastki elementlarni joylashtirish imkonini beradi (10).

Yana bir yondashuv — bevosita plastinka-bog'lash(**wafer-bonding**) bo'lib, unda ikki alohida o'stirilgan subelementlar to'plami shaffof oksid yoki bevosita birikma orqali birlashtiriladi va ko'p qavatli (multi-junction) element hosil qilinadi (10). Masalan, Niemeyer va hammualliflar GaAs asosidagi tandemni InP asosidagi tandemga bog'lab, to'rt o'tishli element yaratishgan (10). Plastinka-bog'lash qalin metamorfik oraliq qatlamlarga ehtiyojni yo'q qiladi va har xil materiallarni (masalan, GaSb bilan III–V birikmalar) birlashtirish imkonini beradi (10).

Yangi paydo bo'layotgan tandem quyosh elementlari eritma yoki bug' orqali qoplama usullaridan foydalanadi. **Perovskit asosidagi yuqori yoki pastki elementlar** odatda kremniy yoki shisha substratlar ustiga spin-qoplama (spin-coating) yoki bug'lantirish orqali tayyorlanadi (7). **Organik tandem elementlar** esa polimer qatlamlarini bosma yoki roll-to-roll texnologiyasi bilan yotqizish orqali ishlab chiqariladi (11).

Materiallar tizimi	O'tishlar tuzilma	va Erishilgan samaradorlik (AM1.5, $\approx 25^{\circ}\text{C}$)	Manbalar
III–V (GaInP/GaAs on Ge)	3J (GaInP/GaInAs/Ge)	$\sim 28,3\%$ (AM0, kosmos, 2006)[20]; 39–41% (AM1.5 kons.))[7]	NASA (2006)[20] / Spectrolab (2006)[7]
III–V (bonded GaInP/AlGaAs//GaInAsP/GaInAs)	4J 4J inverted-wafer-bonded	47,6% (AM1.5D, 665 $\times$)[8]	Fraunhofer ISE (2022)[8]
IMM multijunction	6J (teskari metamorfik)**	>50% (nazariy, kons.))[12]	Geisz et al.

Materiallar tizimi	O'tishlar tuzilma	va Erishilgan samaradorlik (AM1.5, $\approx 25^{\circ}\text{C}$)	Manbalar
			(2018)[12]
Perovskite/Silicon tandem	2J (perovskit yuqori/Si quyi)	34,9% (sertifikatlangan, 2025)[11]	Huang & Mao (2025)[11]
Perovskite/Perovskite/Si	3J (2 ta perovskit + Si)	27,1% (1 sm^2 , 2025)[2]	Zheng et al. (2025)[2]
Perovskite/Organic tandem	2J (perovskit/organik polimer)	26,4% (1 sm^2 , 2025)[19]	Hou et al. (SERIS, 2025)[19]
To'liq organik tandem	2J (polimer/polimer)	21,2% (sertifikatlangan, 2025)[21]	Wang et al. (2025)[21]

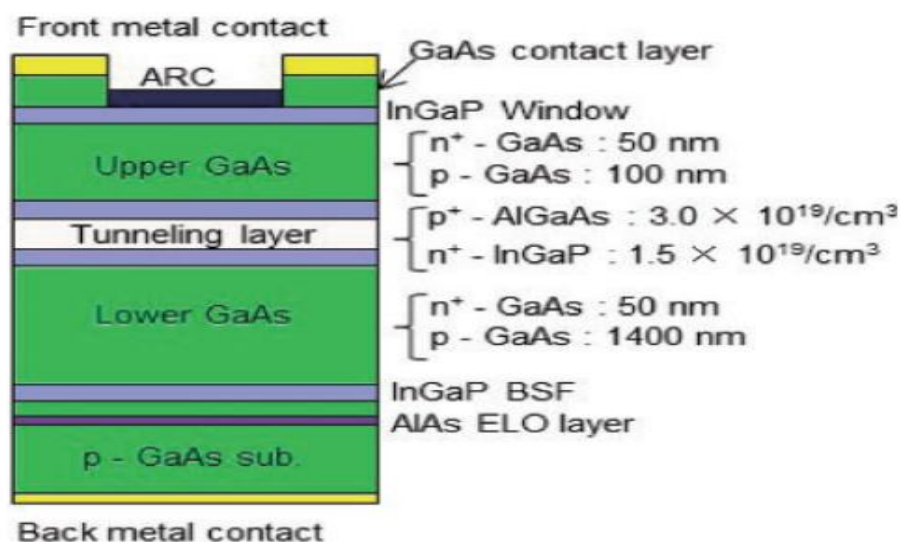
Jadval 1. Yuqori samaradorlikka ega ko'p o'tishli/tandem quyosh elementlarining vakil namunalari. IMM = *Inverted Metamorphic Multijunction* dizayni. (III–V elementlari uchun imkon qadar kosmik AM0 sharoitidagi samaradorliklar keltirilgan; **kons.** esa konsentrator ostidagi natijalarni bildiradi.) Manbalar: o'ng ustundagi ko'rsatilgan adabiyotlar.

Ikki o'tishli (2J) elementlar

Eng sodda ko'p-qavatli (multi-junction, MJ) element — bu ikki o'tishli (2-junction) element bo'lib, ko'pincha “tandem” deb ataladi. Bunga misol sifatida GaInP/GaAs elementining Ge substratda o'stirilgan shakli keltiriladi; u kosmik AM0 sharoitida $\sim 21,5\%$ samaradorlikka erishgan (BOL, 1997) (4). Yer yuzidagi qo'llanmalarda, tandem elementlar odatda yuqori energiya to'sig'iga ega yuqori qatlamli elementni pastroq to'siq element (masalan, Si) bilan juftlashtiradi: masalan, perovskit ($\approx 1.7\text{--}1.8\text{ eV}$) + kremniy (1.12 eV) kombinatsiyasi so'nggi yillarda tez rivojlandi. 2015-yildagi ilk namoyishdan so'ng, perovskit/Si tandemplari hozirda 34% dan oshgan samaradorlikka erishmoqda (7). Shunga o'xshab, perovskit/CIGS (mis-indiy-galliy-selenid) tandemplari ham o'rganilgan, lekin ularning samaradorligi pastroq bo'lgan. Ingichka plyonkali tandemplar (masalan, a-Si/a-Si, CuInSe₂/Si) 1990–2000 yillarda 20–25% atrofida samaradorlik ko'rsatgan. Yaqinda qayd etilgan muhim 2-junction natijalarga perovskit/organik polimer tandemi (26.4% samaradorlik bilan) (11) hamda to'liq polimer tandemplari ($\sim 21\%$ gacha) (12) kiradi. Organik quyosh elementlari hozircha III–V guruhli yarim o'tkazgichlardan ortda qolmoqda, ammo tor to'siqli ilg'or polimerlar tufayli polimer/polimer tandemplari dastlab 2011 yilda

10% dan oshgan (6) va hozirda 20% dan yuqori samaradorlikka erishmoqda (12). Bu yutuqlar shuni ko'rsatadiki, ketma-ket ulangan turli to'siqli qatlamlar orqali quyosh nurlarining kengroq spektrini yig'ish mumkin: yuqori to'siq energiyasidan yuqori bo'lgan fotonlar yuqori qatlamda, pastroq energiyali fotonlar esa pastki qatlamda yutiladi.

MBE (molekulyar nur epitaksiyasi) jarayonida ancha yuqori tashuvchilar konsentratsiyasini hosil qilish uchun past harorat muhim ahamiyatga ega. n^+ -InGaP va p^+ -AlGaAs qatlamlaridagi tashuvchilar zichligi mos ravishda 1.5×10^{19} va $3 \times 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan. O'stirish jarayonida As_2 va P bosimlari mos ravishda 5.0×10^{-6} va $1.2 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ bo'lgan. GaAs va $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ materiallari o'sish tezligi $1 \mu\text{m}/\text{soat}$ bo'lgan. $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ oynasiga n^+ -GaAs qatlam elektrod sifatida o'stirilgan. O'stirishdan so'ng, old elektrod fotolitografiya va lift-off texnikasi yordamida hosil qilingan. Old va orqa elektrodlar uchun mos ravishda AuGe/Ni/Au va Ti/Au ishlatilgan. p^+ -GaAs kontakt qatlami kimyoviy gravirovka bilan, old elektrod niqobi sifatida qo'llanib olib tashlangan. Element o'lchami $5 \times 5 \text{ mm}^2$ bo'lgan. Antirefleksiv qoplama sifatida $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ qatlami ishlatilgan.



3-rasm. Ikki o'tishli GaAs quyosh elementining qatlamli tuzilish sxemasi. (Takeyoshi Sugaya et al 2018 Appl. Phys. Express 11 052301)

Uch o'tishli (Triple-Junction, 3J) Quyosh Elementlari

Uch o'tishli quyosh elementlari — ayniqsa kosmik quvvat manbalari va konsentratsiyalangan fotovoltaika (CPV) tizimlarida eng ko'p qo'llaniladigan texnologiyalardan biridir. Klassik III–V guruhli 3J elementlarda GaInP (1.9 eV), GaInAs ($\approx 1.4 \text{ eV}$) va Ge (0.67 eV) qatlamlari ketma-ket joylashgan bo'ladi. Germaniy (Ge) ham substrat, ham pastki element vazifasini bajaradi. AM0 spektrida bu strukturalar orbitada taxminan 28.3% samaradorlik ko'rsatgan (4). Yer yuzida (AM1.5D spektrida) konsentratsiya ostida GaInP/GaInAs/Ge 3J elementlari $\sim 41.6\%$ samaradorlikka erishgan (3). Quyidagi rasmda (4-rasm) GaInP/GaAs/Ge uch o'tishli elementining ichki qatlamlari ko'rsatilgan bo'lib, har bir subelement quyosh

spektrining har xil qismiga moslashtirilganligi bu strukturaning vertikal (stacked) tuzilishini aks ettiradi (4).

Invers variantlar (ya'ni, pastdan yuqoriga o'sish) va panjarali o'sish (lattice grading) orqali muqobil materiallar (masalan, InGaAsP) ishlatilgan holda energetik to'siq kengliklari (bandgap) moslashtirilib, samaradorlik oshirilmoqda. III–V guruhidan tashqari, boshqa 3J kombinatsiyalarga perovskit–perovskit–kremniy (masalan, Sidneydagi tadqiqotlar) yoki kosmik dasturlar uchun kremniy–III–V tandemi (masalan, GaAs/GaInP ustida Si) kiradi. Muhim jihat — **tok mosligi** (current matching): har bir subelement yoritilish ostida deyarli bir xil tok ishlab chiqarishi lozim. Toklar mos tushgan holatda 3J qurilmasi yagona I–V xarakteristikasiga ega bo'ladi; bu xarita eng past tok ishlab chiqaruvchi subelement darajasida to'xtaydi, ammo barcha uch o'tish zonasining kuchlanmalari yig'iladi. Shunday qilib, 3J strukturaning ochiq kontakt kuchlanmasi $V_{oc} > 2 V$ (har bir element uchun taxminan 0.6–0.8 V) bo'lishi mumkin (8).

Bundan tashqari, Takeyoshi Sugaya va hamkorlari (2018, *Appl. Phys. Express*, 11 052301) aqlli ko'p-qavatli (*Smart stacked*) quyosh elementlari uchun InGaP/GaAs/GaAs uch o'tishli yuqori elementni yetishtirganlar (4-rasmga qarang). Hozirgi holda yutiluvchi qatlamlarning qalinliklari mos ravishda 150, 200 va 1800 nm edi. Birinchi InGaP element InAlP asosiy orqa maydon (BSF) va deraza qatlamlarini o'z ichiga olgan. Ikkinchi va uchinchi GaAs elementlarning strukturalari 3-rasmdagi bilan bir xil edi. Aqlli qavatli yig'ma uchun p⁺-AlAs epitaksial ajratma (ELO) qatlam yuqori element o'sishidan oldin yetishtirilgan. Keyinchalik, InGaP/GaAs/GaAs yuqori elementi selektiv kimyoviy gravirovka (ELO texnikasi) yordamida GaAs substratidan ajratib olingan.

Bu yuqori element 4-rasmda ko'rsatilgandek, Pd nanohissachalar massivlari orqali kristall kremniy (c-Si) pastki elementga ulanadi. Bu yerda pastki subelement sifatida an'anaviy Al-BSF turidagi c-Si element tanlangan, chunki uning ishlab chiqarish jarayoni boshqa ilg'or kremniy strukturalariga qaraganda ancha sodda. B-tipli (bor bilan legirlangan, o'tkazuvchanligi = 0.5–4 Ω·sm²) Si (100) plastinkasi (400 μm qalinlikda) ustida n⁺ old qatlam va p⁺ BSF orqa qatlam POCl₃ termal diffuziyasi va Al pastasi yordamida ekranga chop etish/fiksatsiya qilish orqali hosil qilingan.

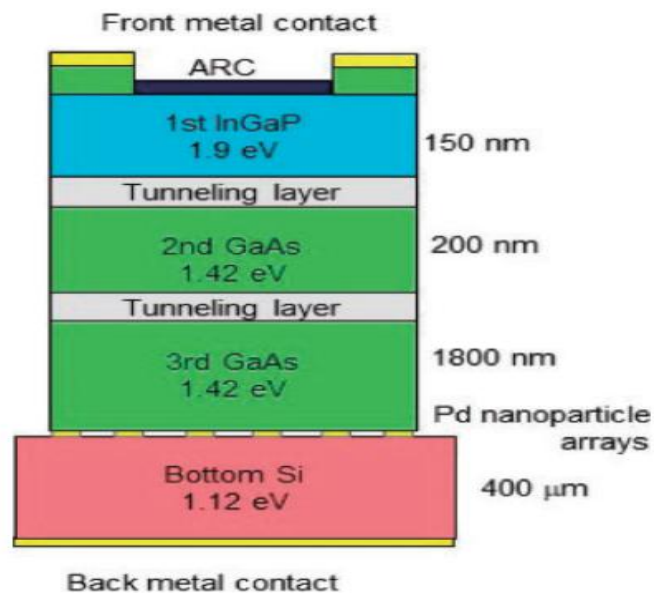


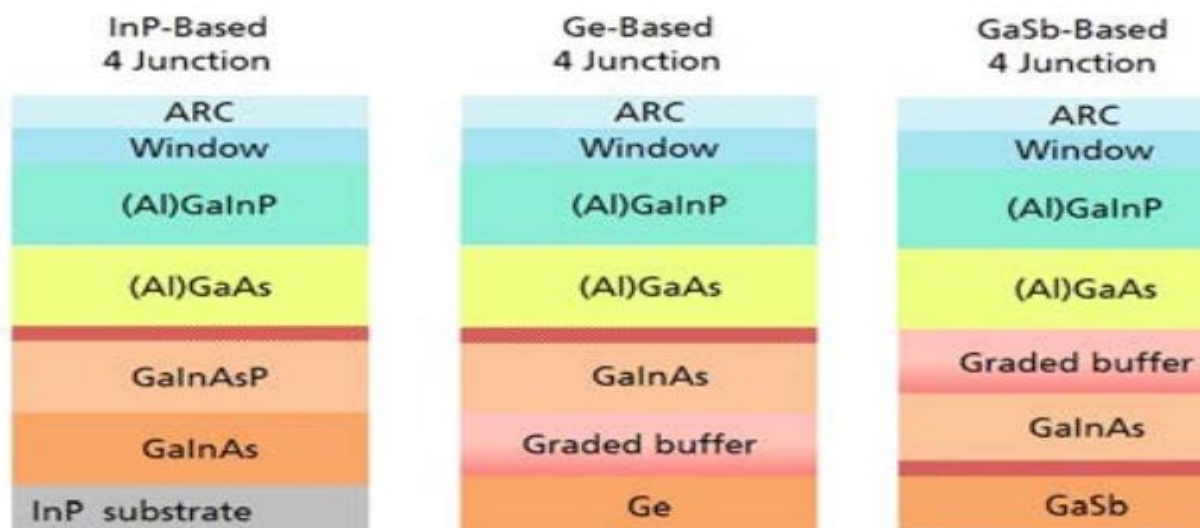
Figure 4. *Smart stacked InGaP/GaAs/GaAs//Si* uch o'tishli quyosh elementining qatlamli tuzilish sxemasi. (Takeyoshi Sugaya et al 2018 Appl. Phys. Express 11 052301)

To'rt va besh o'tishli (4J, 5J) elementlar

To'rt-O'tishli (4J) Quyosh Elementlari

To'rt o'tishli quyosh elementlari yana bir energetik to'siq kengligi (bandgap) darajasini qo'shadi. Eng ilg'or 4J qurilmalari (odatda plastinkalarni bog'lash – wafer bonding – orqali yetishtiriladi) yuqori qismida GaInP/AlGaAs juftligini, pastki qismida esa InGaAs asosidagi ikkita past to'sikli o'tish zonasini birlashtiradi. Masalan, Fraunhofer institutining 4J dizayni AlGaInP/AlGaAs yuqori juftligini InGaAsP/InGaAs asosidagi tandemyarim element bilan bog'langan holatda tashkil etadi (5). Bu konstruktsiya 665 marta kontsentratsiya ostida 47.6% samaradorlikka erishgan bo'lib, bu 2022-yil holatiga ko'ra istalgan turdagi quyosh elementi uchun jahon rekordi hisoblanadi (5).

Wafer-bond texnologiyasi asosida ishlab chiqilgan 4J elementlari ko'pincha qimmat InP substratini almashtirib, GaInP/GaAs (GaAs substratida) ni InGaAsP/InGaAs (InP substratida) bilan bog'laydi (10).



5-Rasm. **Bevosita plastinka-bog'lash(wafer-bonding)** (Gofret) bilan bog'langan 4-birikmali quyosh xujayralari uchun turli xil element arxitekturalari. Bog'lanish har doim qizil chiziq bilan ko'rsatilgan. Chapda: InP-ga asoslangan kontseptsiya. Markaz: Ge niyga asoslangan kontseptsiya. O'ngda: GaSb-ga asoslangan kontseptsiya. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2017.2778567

Besh-O'tishli (5J) Quyosh Elementlari

Laboratoriya sharoitida besh o'tishli quyosh elementlari ham sinovdan o'tkazilgan bo'lib, ularning pastki qismida ~ 0.7 eV ga teng bo'lgan GaSb yoki InGaAsSb o'tish zonasi joylashtirilgan. Bu turdagi elementlar $\approx 46\%$ samaradorlikka erishgan (13). Ammo ular murakkab panjaraviy moslashtirish (lattice grading) yoki bog'lash texnologiyalarini talab qilgani bois hozircha faqat ilmiy tadqiqotlarda qo'llanilgan, tijorat mahsulotlarida uchramaydi.

Bunday 5J elementlar beshta yarimo'tkazgich qatlamdan tashkil topgan bo'lib, ularning har biri quyosh spektrining ma'lum bir sohasini yutadi. Qatlamlar orasidagi elektr ulanishlar juda yupqa tunnel o'tish zonalari orqali ta'minlanadi va bu yo'qotishlarni kamaytiradi.

Metamorfik (buferli) 5J Quyosh Elementlari (6-rasmga qarang): Masalan, QuintUMM loyihasi doirasida germaniy asosida qurilgan metamorfik 5 o'tishli quyosh elementlari ishlab chiqilgan. Ular 800 marta quyosh nurlanishi konsentratsiyasida 42.7% gacha samaradorlikka erishgan.

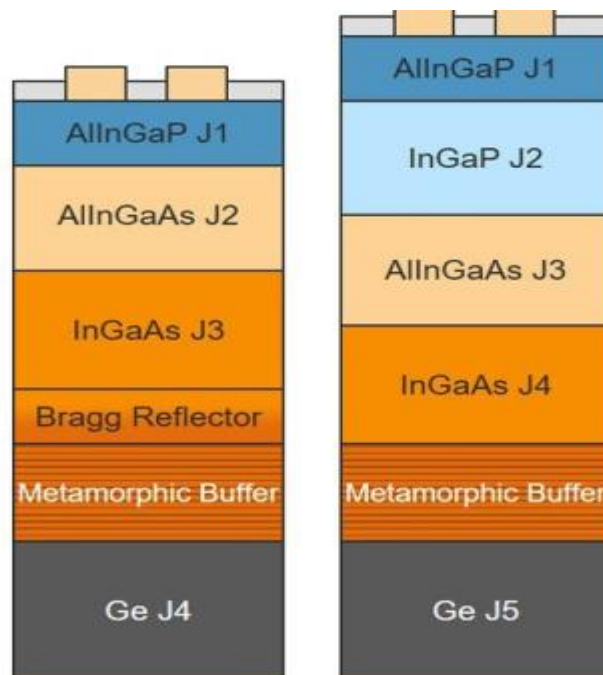


Figure 6. The schematic structure of a five-junction solar cell (b) and a four-junction solar cell, space applications (a). Besh o'tishli quyosh elementlari (b) va to'rt o'tishli quyosh elementlarining sxematik tuzilishi, kosmik ilovalar (a). (https://www.energieforschung.de/en/home/project-insights/2020/module-with-five-junction-solar-cell-achieves-efficiency-of-32-percent?utm_source=chatgpt.com).

Muhandislar ko'p o'tishli quyosh elementlarining yarimo'tkazgich qatlamlarini yetishtirish uchun maxsus metod — **Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy (MOVPE)** texnologiyasidan foydalanadilar. Bu jarayonda turli yarimo'tkazgich materiallarining molekullari gaz fazasidan qizdirilgan substrat — germaniy plastinkasiga ketma-ket cho'ktiriladi. Bu texnik jarayon **epitaksial qatlam o'sishi** deb ataladi. U ishlab chiqarish reaktorida amalga oshiriladi, bu reaktorda bir vaqtning o'zida bir nechta germaniy plastinkasiga turli yarimo'tkazgichlar cho'ktiriladi.

Tadqiqot doirasida olimlar yangi besh qavatli element strukturasi uchun ushbu metodni moslashtirganlar. Ular qo'shimcha ravishda uchlamchi va to'rtlamchi yarimo'tkazgich materiallar — InGaAs, AlInGaAs, InGaP va AlInGaP — ni maxsus tarkibiy formulalarda ishlatganlar.

To'g'ridan-To'g'ri Bog'langan 5J Kosmik Elementlar

Direct bonded (SBT) texnologiyasida qurilgan ilg'or 5 o'tishli elementlar bir quyosh (AM0, kosmik spektr) ostida 35% dan ortiq samaradorlik ko'rsatgan va nazariy jihatdan 36–37% darajagacha ko'tarilishi mumkin.

SBT quyosh elementlarini ishlab chiqarish (7-rasmda ko'rsatilganidek) quyidagi bosqichlardan iborat: subelementlar panjaraga mos ravishda (lattice-matched) epitaksial tarzda mos substratlarda (odatda GaAs va InP) yetishtiriladi.

Yuqori elementlar esa teskari tartibda (inverted) o'sdiriladi, substrat bilan faol qatlamlar orasida esa kimyoviy yoki qurbonlik (sacrificial) qatlam qo'yiladi. Shundan so'ng, plastinkalar to'g'ridan-to'g'ri yarimo'tkazgich bilan bog'lanadi. Bitta tomondagi substrat olib tashlanganidan keyin, butun struktura III–V guruhli yarimo'tkazgich quyosh elementlari standart protseduralari asosida qayta ishlanadi.

Bu yondashuvning asosiy ustunligi — barcha o'tish zonalari panjaraga mos ravishda yetishtirilgani tufayli epitaksial sifat juda yuqori bo'ladi va bu yuqori samaradorlikni ta'minlaydi. Bundan tashqari, bog'lash jarayoni 4 dyuym yoki undan katta plastinkalarga moslashishga imkon beradi, bu esa sanoat darajasidagi ishlab chiqarishga yo'l ochadi.

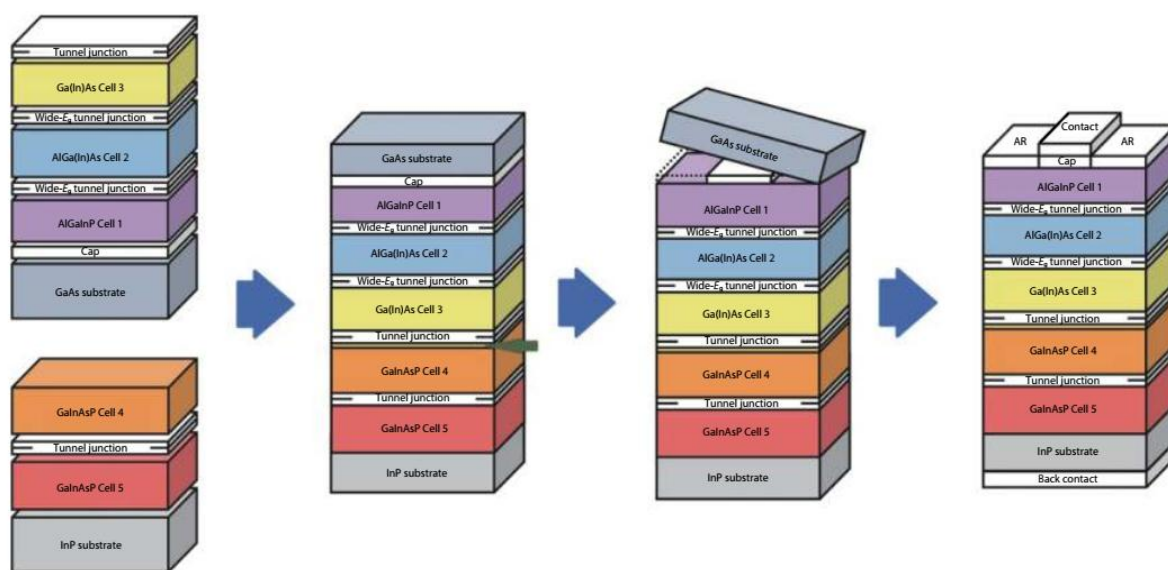


Fig. 7. Fabrication scheme of SBT 5J cells. The arrow indicates the bonding interface. SBT 5J elementlarini ishlab chiqarish sxemasi. Ko'rsatkich ulanish interfeysini ko'rsatadi. X Y Li, G Li, H B Lu, and W Zhang, >35% 5-junction space solar cells based on the direct bonding technique[J]. *J. Semicond.*, 2021, 42(12). <https://doi.org/10.1088/1674-4926/42/12/122701>

Olti-O'tishli elementlar va Undan yuqori (6J+)

Bugungi kunda tadqiqotchilar olti va undan ortiq o'tishli (6J va 7J+) quyosh elementlarini ishlab chiqishni o'rganmoqdalar. Geisz va hammualliflar (2018) tomonidan taklif etilgan amaliy 6-o'tishli element (invert qilingan metamorfik qatlamlar: AlGaInP, AlGaAs, GaAs va uchta InGaAs o'tish zonasidan iborat) 50% dan yuqori samaradorlikka erishish salohiyatiga ega bo'lgan dizayndir (8). Ular ishlab chiqargan prototip 6J elementi bitta quyosh yoritilishida 5.15 V ochiq kontakt kuchlanishini (Voc) bergan bo'lib, bu oltita diodning ketma-ket integratsiyasini isbotlaydi (12).

Nazariy jihatdan, o'tishlar sonining oshirilishi (masalan, 7 yoki 8 gacha) quyosh elementining maksimal teorik samaradorligiga yaqinlashishga olib keladi.

Biroq, amaliy yutuqlar asta-sekin kamayib boradi. Shunga qaramay, yangi turdagi o'tish zonalarini (masalan, ultrabinafsha uchun GaInN yoki yangi past to'siqli materiallar) kiritish imkoniyati mavjud.

50% dan ortiq samaradorlikka ega amaliy 6J elementlarini ishlab chiqish strategiyalari taklif etilgan (8-rasm). Ushbu dizaynlar uchun zarur bo'lgan alohida o'tish zonalarini ilgari eksperimental jihatdan namoyon etilgan va ularning sifati **ERE (External Radiative Efficiency)** orqali baholangan. Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, oxirgi to'rtta o'tish orasiga uchta metamorfik (panjara-moslashtiruvchi) qatlam kiritilgan dizayn eng istiqbolli hisoblanadi, chunki InGaAs metamorfik o'tish zonalarining sifati yuqori bo'lgan.

Ushbu yondashuv asosida 5J va 6J qurilmalarning muvaffaqiyatli integratsiyasi namoyish etilgan. Yangi ishlab chiqilgan **shaffof tunnel o'tish zonalarini (TJ)** va metamorfik qatlamlar yordamida 6J strukturasi **8.5 mA/cm² dan yuqori tok muvozanatini** ta'minlash mumkinligi ko'rsatildi. Biroq, faqat bitta metamorfik o'tish zonasiga asoslangan dizayn hali ham yuqori sifatli o'tishlarni ta'minlash uchun qo'shimcha ishlanmalarni talab qiladi.

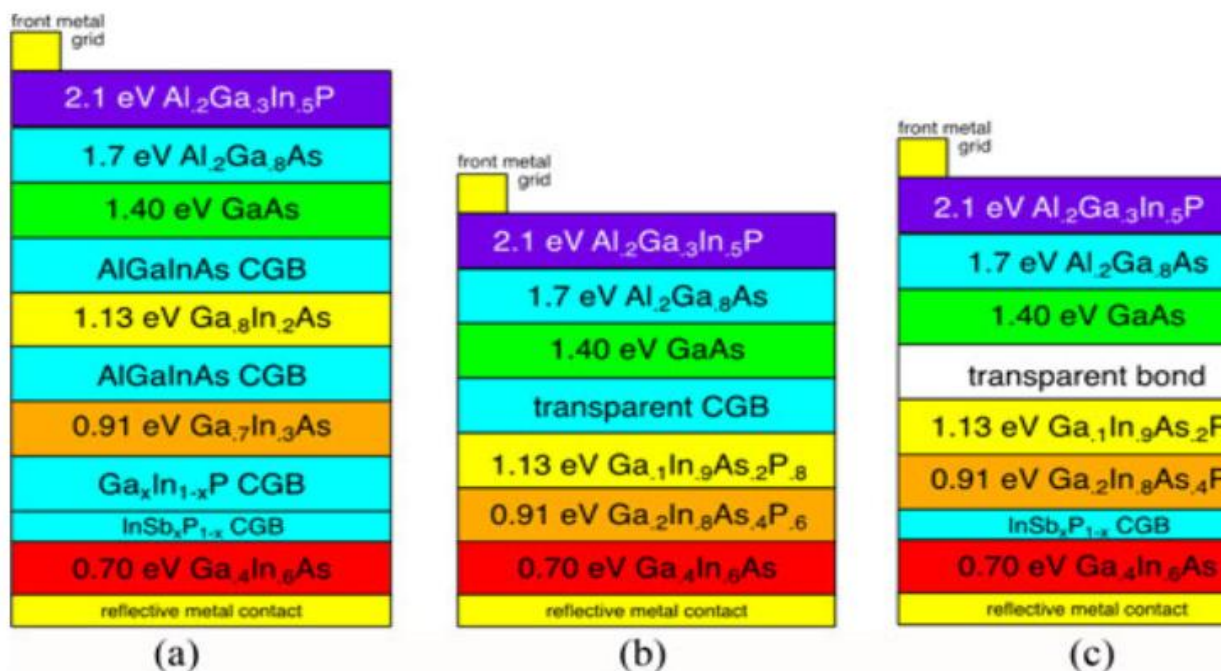


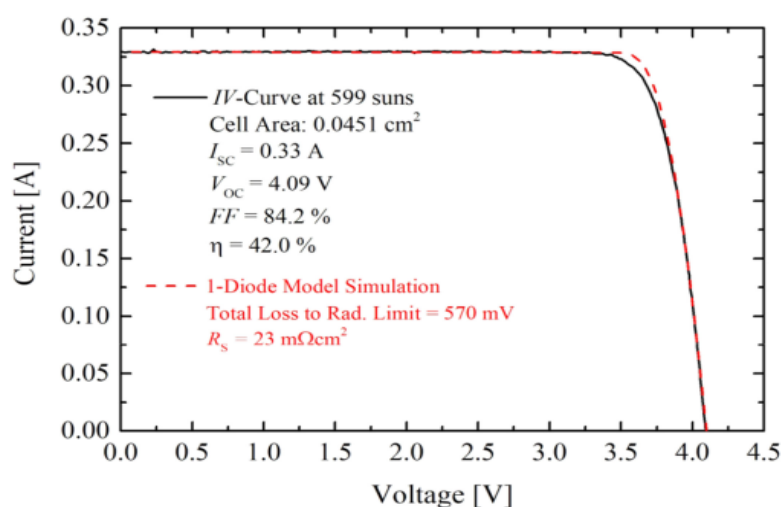
Fig. 8. 6J dizayn strategiyalari uchun sxema. Ushbu konstruksiyalarning har qandayidagi ikkinchi birikma ham 1,7 eV to'rtlamchi Ga_{0.7}In_{0.3}As_{0.3}P_{0.7} dan iborat bo'lishi mumkin.

Dastlabki 6J **invert metamorfik (IMM)** qurilmasi **1 quyosh yoritilishida (AM1.5)** juda yaxshi samaradorlikni ko'rsatdi. Biroq **past ketma-ket qarshilik (series resistance)** ga erishish hozirgi kunda 50% samaradorlikka erishish yo'lidagi asosiy muammo bo'lib qolmoqda. Keyingi epitaksial o'sish bosqichlarida yuzaga keladigan **termal yuklamalar natijasida hosil bo'ladigan qarshilik to'siqlari** hal qilinishi kerak.

Shuningdek, yuqori kontsentratsiyali yoritish sharoitida minimal kuchlanish yo‘qotishlari bilan yetarli fototok va qatlam qarshiligini ta’minlash uchun **yuqori qatlam va kontakt panjarasining dizaynida muvozanatli yechimlar** zarur. Bu parametrlar optimal tarzda muvofiqlashtirilgan taqdirda, 6J elementlar real sanoat ishlab chiqarishda ham 50% va undan yuqori samaradorlikka erishishi mumkin.

I–V xususiyatlari

Ko‘p o‘tishli (MJ) quyosh elementlarining I–V xarakteristikasi sifat jihatidan yagona diodga o‘xshash egri chiziqqa ega, biroq u baland ochiq kontakt kuchlanishlariga olib keladi (ya’ni, har bir pastki elementning V_{oc} qiymatlari yig‘indisi) va oqim eng zaif pastki element bilan cheklanadi.



9-Rasm. I-V xarakteristikasi Sb-ga asoslangan to'rt o'tishli quyosh batareyasi 599 ta quyoshda, shu jumladan ketma-ket to'rtta 1-diodli modelga asoslangan modellashtirish. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2019.2957663

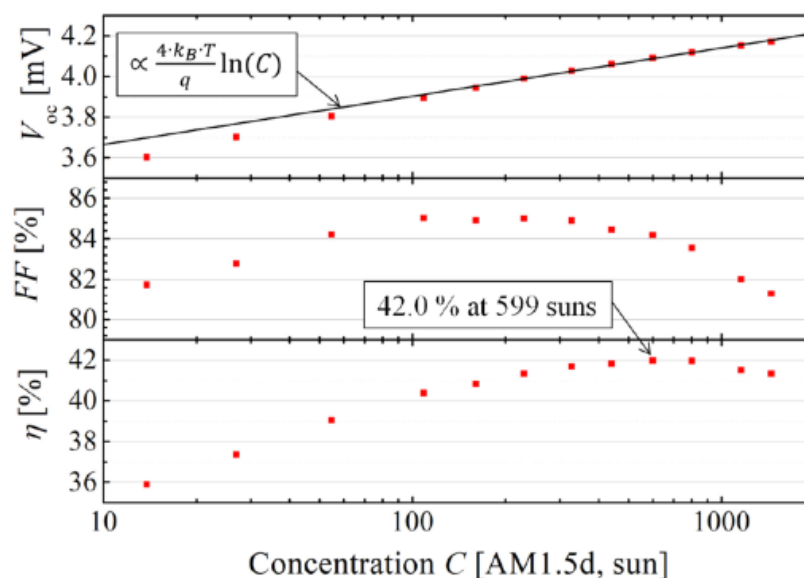
Quyidagi tenglama yordamida buni ifodalash mumkin:

$$I = I_{ph,i} - I_{0,i} \left(e^{\left(\frac{V_i}{n_i V_T} \right)} - 1 \right) \quad (1)$$

bu yerda har bir pastki element i o‘zining diod tenglamasiga bo‘ysunadi, va umumiy kuchlanish $V = \sum V_i$ bo‘ladi.

Amaliyotda, ko‘pincha butun tizim uchun yagona diod modeli qo‘llaniladi, bunda umumiy V_{oc} va moslashtirilgan I_{sc} asosida hisoblash amalga oshiriladi. Agar barcha pastki elementlar yuqori sifatli bo‘lsa, to‘ldirish koeffitsienti (FF) va egri chiziq shakli yuqori darajada saqlanadi (masalan, GaAs elementlarida $FF \approx 0.9$). Ammo, parazit qarshiliklar yoki ideal bo‘lmagan o‘tish zonalari bu egri chiziqda "egilishlar" yoki ko‘p diodli xatti-harakatlarni keltirib chiqarishi mumkin. Yaxshi

ishlab chiqilgan MJ elementlar bu muammolarni minimallashtirib, idealga yaqin I–V xarakteristikani saqlab qoladi.



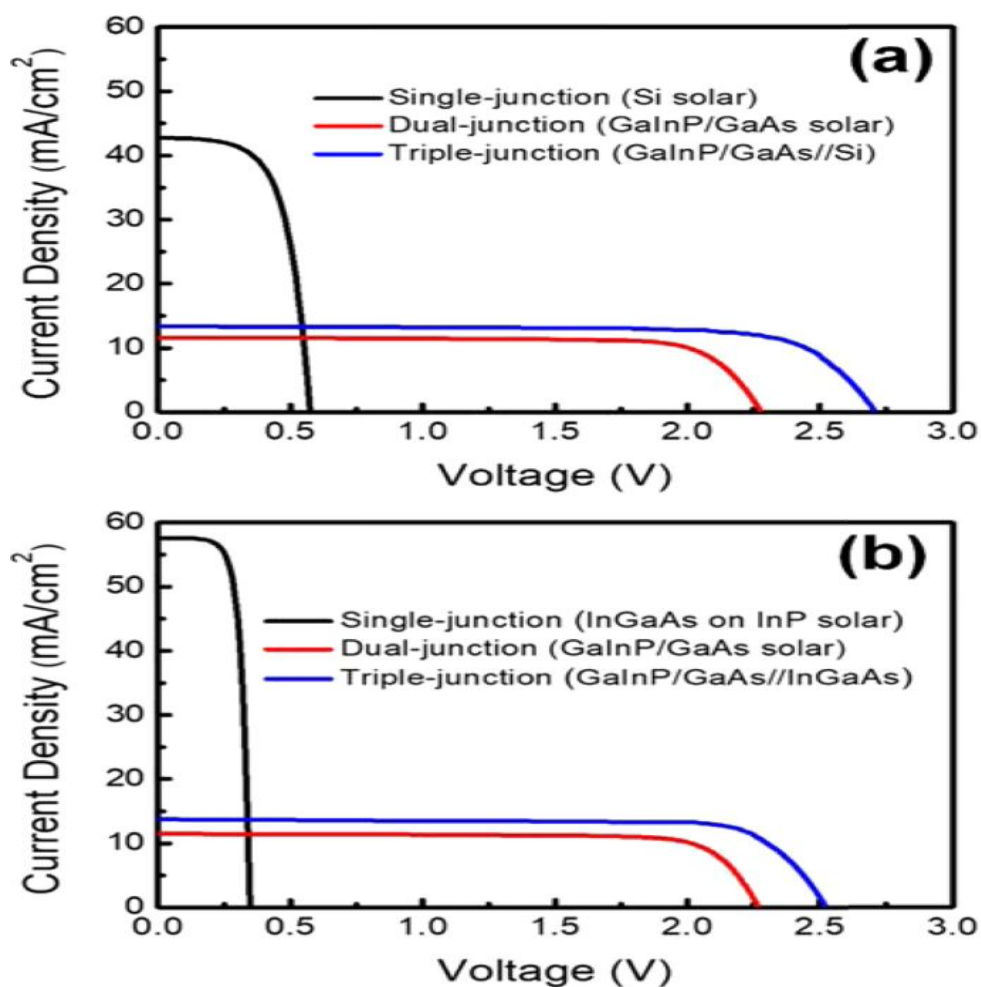
10-rasm. Konsentratsiyaga bog'liq bo'lgan I-V xarakteristikasi bilan aniqlangan Sb-ga asoslangan to'rt o'tkazgichli elementning ochiq zanjirli kuchlanish V_{OC} , FF va samaradorligi ning qisqacha mazmuni. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2019.2957663

Konsentratsiya ostidagi I–V xarakteristikalar 10-rasmda keltirilgan. Nazariy jihatdan, ochiq kontakt kuchlanishining (V_{OC}) konsentratsiya C ga bog'liqligi (tenglama (1)ning oxirgi hadida, idealitet ko'effitsienti $n_{id} = 1$) grafika kiritilgan. Bu grafikda “4” faktori to'rt o'tishli quyosh elementi uchun o'tishlar sonini bildiradi. Ushbu maxsus energetik to'siq kombinatsiyasi uchun radiatsion chegaraga nisbatan grafikda 570 mV doimiy siljish mavjud — bu quyida muhokama qilinadi.

11-rasmda Si, InGaAs va GaInP/GaAs ikki-o'tishli (DJ) hamda uch-o'tishli (TJ) quyosh elementlarining AM1.5G sharoitidagi bitta quyosh yoritilishida o'lchangan J–V xarakteristikalari ko'rsatilgan. Bu TJ elementlar ikkita struktura asosida ishlab chiqilgan:

- **GaInP/GaAs//Si** (11a-rasm)
- **GaInP/GaAs//InGaAs** (11b-rasm)

Ushbu ko'p o'tishli quyosh elementlari **mexanik staklash** usuli orqali yig'ilgan.



11-rasm. Bir quyoshli AM1.5G yorug'lik manbai yordamida o'lchangan (a) GaInP/GaAs//Si va (b) GaInP/GaAs// InGaAs 3J quyosh elemnetlarining J-V xarakteristikalari. Ular alohida-alohida ishlab chiqarilgan ikkita, bitta va stacked birikmalar ostida o'lchandi. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40727-y>

Si turi	Voc(V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Yagona o'tishli Si quyosh elementi	0.57	42.78	63.63	15.50
Ikki o'tishli quyosh elementi	2.28	11.59	77.98	20.60
Uchtalik o'tishli quyosh elementi	2.71	13.37	75.40	27.31

TABLE I

“EMPIRIK POTENSIAL” EHTIMOLI UCHUN TO‘RT, BESH VA OLTI – O‘TISHGA EGA BO‘LGAN QO‘YISH ELEMENTLARI UCHUN OPTIMAL TAQIQLANGAN ZONA (BANDGAP) KOMBINASIYALARI VA SAMARADORLIGI VA SB-ASOSLI TO‘RT-O‘TISHLI UCHUN MAVJUD REAL DUNYO SAMARADORLIGI.

DOI: 10.1109/JPHOTOV.2019.2957663

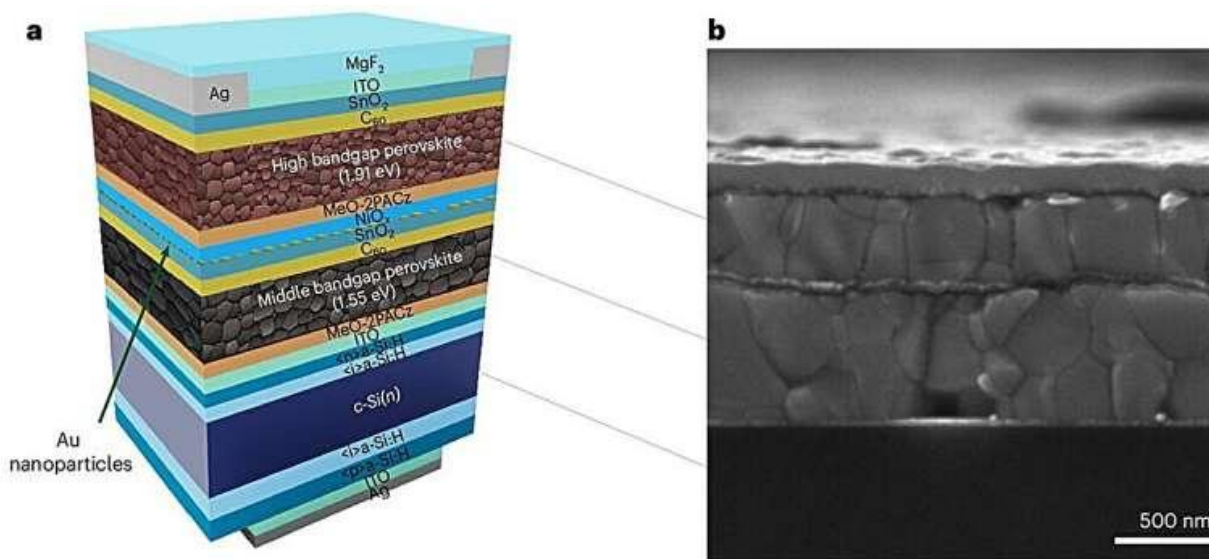
Device Concept & bandgap combination [eV]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [V]	FF [%]	η [%]
4-Junction, Empiric Potential 1.92/1.43/1.03/0.69	15.54	4.27	88.8	58.9
5-Junction, Empiric Potential 2.06/1.60/1.25/0.98/0.69	12.43	5.53	89.2	61.2
6-Junction, Empiric Potential 2.17/1.73/1.43/1.17/0.94/0.69	10.34	6.84	89.4	63.2
Sb-based 4-Junction Real-world Efficiency Target 1.89/1.42/1.05/0.68	14.03	4.21	86.1	50.8

Note: The values are calculated for a concentration of 500x (AM1.5d spectrum, 1000 W/m²) at 25 °C.

Materiallar va bir necha o‘tishni o‘zaro ulanishga namunalari

III–V yarim o‘tkazgich materiallari (GaAs, GaInP, InGaAs, GaSb va boshqalar) yuqori samarali ko‘p o‘tishli (MJ) quyosh elementlarida ustunlik qiladi [1][10]. Ushbu materiallar istalgan tarmoqli kengliklarini hosil qilish uchun panjaraviy muvofiqlashtirish (lattice engineering) asosida ishlab chiqiladi: masalan, GaInP ($E_g \approx 1,85$ eV), GaAs (1,42 eV), InGaAsP ($\sim 1,2$ – $1,0$ eV), GaInAs (0,7–1,1 eV), GaSb (0,67 eV) [14][12]. Qotishma tarkibini o‘zgartirish orqali amalga oshiriladigan tarmoqli kenglik muvofiqlashtirish va kam nuqsonli metamorfik oraliq qatlamlar yordamida ushbu materiallar bitta asosda (substratda) (odatda GaAs yoki Ge) qatlamma-qatlam joylashtiriladi [14].

Perovskitlar (masalan, qo‘rg‘oshin-galogendli birikmalar) sozlanadigan tarmoqli kenglik va arzon ishlab chiqarish imkonini beradi. Yuqori tarmoqli kenglikka ega perovskit ustki elementlar ($>1,7$ eV) va kremniy asosidagi pastki elementlar (1,12 eV) bilan juftlashtirilganda 34–35% samaradorlikka erishiladi [7]. Perovskitlar eritma asosida ishlab chiqarilishi mumkin (spin-coating, bug‘lantirish usullari orqali) va allaqachon yagona o‘tishli quyosh elementi uchun GaAs MJ (ko‘p o‘tishli) samaradorlik rekordini takrorlagan (25,7% yagona o‘tishli PSC) [12].



12-rasm. Fotoelementning ishlashi va uch o'tishli perovskit-perovskit-kremniy tandemining barqarorligi. Qurilma strukturasi sxemasi (a), kesma SEM tasviri (b)
Credit: *Nature Nanotechnology* (2025). DOI: 10.1038/s41565-025-02015-x

12-rasm: (a) Uch o'tishli perovskit–perovskit–kremniy quyosh elementining sxematik ko'rinishi va (b) uning kesim bo'yicha SEM tasviri [2]. Har xil tarmoqli kenglikka ega bo'lgan uchta qatlamli yutuvchi materiallar rekombinatsiya qatlamlari orqali o'zaro bog'langan. Sertifikatlangan 1 sm² o'lchamdagi element 27,06% samaradorlikka erishgan [2]. (Tasvir manbasi: Zheng va boshq., *Nat. Nanotech.*, 2025)

Organik (polimer asosli) quyosh fotoelementlari materiallari taxminan 1,3–1,8 eV oralig'ida sozlanishi mumkin. Eng yaxshi yakka o'tishli OPV (organik fotovoltaiik) samaradorligi taxminan 19–20% ni tashkil etadi. Yuqori tarmoqli kenglikka ega old polimer va past tarmoqli kenglikka ega orqa polimerni birlashtirgan tandem tuzilmalar 21,5% samaradorlikka erishgan [21]. Odatda bular rulonli eritma asosidagi texnologiyalar yoki bug' yordamida cho'ktirish orqali ishlab chiqariladi.

Gibrid tandemlar (masalan, perovskit/organik, perovskit/CIGS va boshqalar) spektrni to'liqroq yutib olish uchun bir-birini to'ldiruvchi materiallardan foydalanadi. Masalan, yaqinda ishlab chiqilgan keng tarmoqli perovskit va tor tarmoqli organik materialdan tashkil topgan perovskit/organik tandem elementi 26,4% samaradorlikka erishdi [19] — bu natija laboratoriya sharoitida sof III–V guruhli tandemlar bilan raqobatlasha oladi.

Kosmik va yer yuzidagi qo'llanmalar

Kosmik fotovoltaiik (FV) tizimlarda uzoq vaqtdan beri ko'p o'tishli (MJ) elementlar qo'llaniladi, chunki bu yerda samaradorlik va yengil vazn narxdan ustun turadi. Kosmik MJ elementlari odatda AM0 (Yer atmosferasidan tashqaridagi Quyosh spektri) sharoitida ishlashga va radiatsiyaga chidamlilikka moslab

optimallashtirilgan bo‘ladi. GaInP/GaAs/Ge uch o‘tishli elementi (28% AMO samaradorlikka ega) sun‘iy yo‘ldoshlar uchun sanoat standarti hisoblanadi (4). So‘nggi yillarda to‘rt va besh o‘tishli elementlar keyingi avlod kosmik missiyalar uchun ishlab chiqilmoqda. Kosmik MJ elementlarini Spectrolab, Azur va Emcore kabi ishlab chiqaruvchilar epitaksial texnologiyalar orqali tayyorlaydi. Yuqori quvvat/vazn nisbati juda muhim; masalan, GaAs asosidagi MJ elementlari kremniy (Si) modullariga nisbatan taxminan 10 barobar yuqori xususiy quvvatga ega.

Yer yuzidagi FV tizimlarida MJ texnologiyasi asosan konsentratsiyalangan fotovoltaika (CPV) va maxsus tandem tizimlarida qo‘llaniladi. Substratlar narxi va texnologiyaning murakkabligi sababli konsentratsiya (ya‘ni, linzalar yoki Quyosh kuzatuvchilari yordamida nur yig‘ish) zarur bo‘ladi. 500–1000 karra Quyosh yorug‘ligi ostida MJ CPV tizimlari >40% tizim samaradorligiga erisha oladi. Masalan, Fraunhofer 47,6% samaradorlik rekordi 665× konsentratsiya ostida o‘rnatilgan (8). Bunday tizimlar uchun ikki o‘qli kuzatuv tizimlari va Frenel linzalari qo‘llaniladi.

MJ texnologiyasi bifasiyal (ikki tomonlama) arxitekturalar bilan ham birlashtirilishi mumkin: masalan, tandem moduli shaffof substratda ishlab chiqilib, pastki tomon orqali qaytgan (albedo) yorug‘likni ham yig‘ishi mumkin — bu qo‘shimcha tok hosil bo‘lishiga olib keladi, ammo bu asosan nazariy kontsept sifatida ko‘rib chiqilmoqda.

Yangi paydo bo‘layotgan qo‘llanmalar sirasiga binoga integratsiyalangan yoki portativ FV tizimlar kiradi: yengil, moslashuvchan perovskit va organik tandem elementlar IoT qurilmalari va transport vositalarini quvvatlantirish uchun ishlatilmoqda.

Samaradorlikni Hisoblash va Ishlash Ko‘rsatkichlari

Ko‘p o‘tishli (MJ) elementlar samaradorligini hisoblash asosiy jihatdan bir o‘tishli elementlarnikiga o‘xshash formulaga asoslanadi, biroq har bir pastki elementning tarmoqli kengligi (bandgap) hisobga olinadi va u qamrab olgan spektr sohasiga mos ravishda tahlil qilinadi. Odatda, har bir qatlam uchun detallashtirilgan muvozanat samaradorligi hisoblab chiqiladi va jami quvvat chiqishini maksimal darajaga yetkazish uchun optimal tarmoqli kengliklar tanlanadi (1). Haqiqiy I–V egri chizig‘i ketma-ket ulanishli zanjirni yechish orqali aniqlanadi:

$$I = I_{sc} - I_{0,i} \left(e^{\left(\frac{V_i}{n_i V_T} \right)} - 1 \right)$$

bu yerda I_{sc} – ketma-ket ulanishdagi eng kichik fotooqim (bu butun element to‘plami uchun cheklovchi oqim), I_0 esa umumlashtirilgan tunda to‘yinish oqimi hisoblanadi. Amaliyotda har bir qatlamning tok hosil qilishi moslashtiriladi (masalan, qatlam qalinligini yoki optik filtrlarni sozlab), shunda **Isc≈approx Isc** har bir qatlamning Isc qiymatiga teng bo‘ladi. Chiqish quvvati $P=IV$ bo‘lib, u maksimal nuqtada (I_{mp} , V_{mp}) erishiladi. Samaradorlik quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{P_{in}}$$

Tajriba jihatdan, yaxshi ishlab chiqarilgan MJ elementlari yuqori fill faktor ($FF > 0.85$) ko'rsatadi. Shuning uchun, samaradorlikdagi farqlar asosan ochiq kontakt kuchlanishi (V_{oc} – har bir elementning tarmoqli kengliklari yig'indisi) va fotooqim (I_{sc} – spektrni qamrab olish bilan cheklangan) dan kelib chiqadi.

Misol uchun, Zheng va boshq. (2025) tomonidan taqdim etilgan uch o'tishli perovskit/kremniy elementini olaylik (2). Har uchta pastki element shaffof tunnel o'tish joylari orqali ulanadi. Bu zanjir bo'ylab o'tuvchi tok 13 mA/cm^2 ni tashkil qilgan (bu eng kichik foto-oqim bilan cheklangan), umumiy V_{oc} taxminan 2.0 V bo'lgan.

Chiqish quvvati $I_{mp} \times V_{mp}$ orqali hisoblab, ushbu 1 cm^2 o'lchamdagi element 27.06% quvvat aylantirish samaradorligiga erishgan (2).

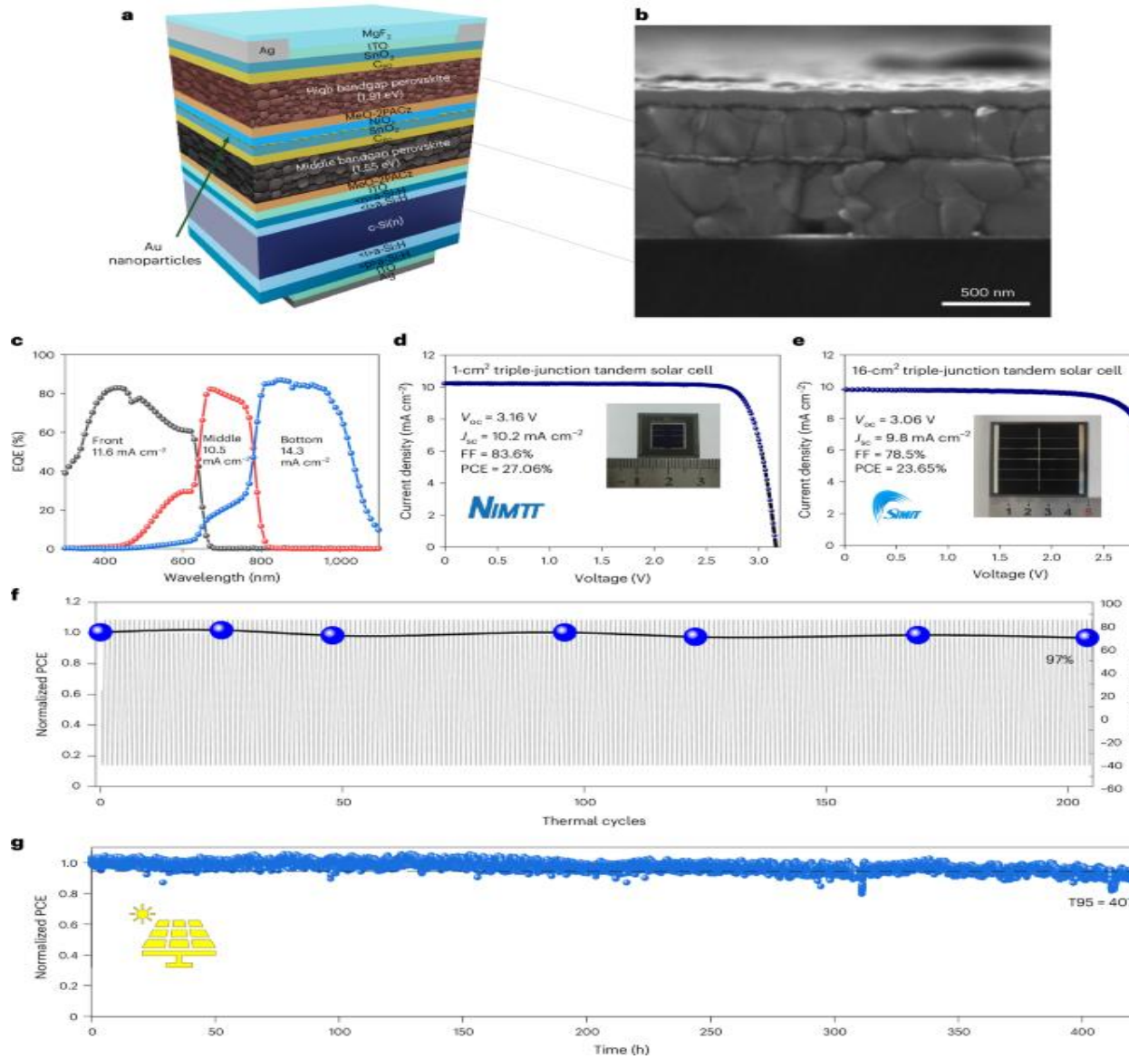


Fig. 13: Photovoltaic performance and stability of the triple-junction perovskite–perovskite–silicon tandem.

13-rasm: a–c — Qurilma tuzilmasining sxematik ko‘rinishi (a), SEM bo‘yicha ko‘ndalang kesim tasviri (b) va EQE egri chiziqlari (c) (qora — keng tarmoqli perovskit, qizil — o‘rta tarmoqli perovskit, ko‘k — tor tarmoqli kremniy) vakil bo‘lgan uch o‘tishli tandem quyosh elementiga tegishli. d, e — Uchinchi tomon tomonidan o‘lchangan eng yaxshi uch o‘tishli elementlarning teskari skanerlashdagi J–V egri chiziqlari: 1 sm² (d) va 16 sm² (e). f, g — 1 sm² encapsulyatsiyalangan uch o‘tishli quyosh elementining harorat sikli (–40 °C dan ~85 °C gacha) (f) va MPPT sinovi (g) paytidagi ishlashi (25 °C da, atmosfera sharoitida). T₉₅ — quvvat chiqishi dastlabki qiymatining 95% gacha kamayishi uchun ketadigan vaqt.

Ko‘p o‘tishli (MJ) elementlar to‘plamidagi har bir pastki element o‘zining alohida tok–kuchlanish (I–V) xarakteristikalariga ega. Ketma-ket ulangan MJ elementlarda bitta fototok barcha o‘tish joylaridan oqadi, shuning uchun qurilmaning umumiy toki eng past qisqa tutashuv toki (I_{SC}) hosil qilayotgan pastki element bilan cheklanadi. Shu bilan birga, umumiy ochiq kontakt kuchlanishi (V_{OC}) barcha pastki elementlarning V_{OC} yig‘indisiga teng bo‘ladi (2), (8).

Amaliyotda, dizaynerlar har bir pastki element nishon spektrda mos tok hosil qilishi uchun ularning materiallarini ehtiyotkorlik bilan tanlaydi. **Umumiy samaradorlik** quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{P_{in}}$$

bu yerda I_{mp} va V_{mp} — maksimal quvvat nuqtasidagi tok va kuchlanish, P_{in} esa tushayotgan quyosh nurlanishining quvvatidir. Odatda, yaxshi loyihalangan ko‘p qavatli tuzilmalar uchun I_{mp} va I_{sc} ko‘rsatkichlari alohida qayd etiladi. Har bir pastki elementning I–V xatti-harakati quyidagi diod tenglamasi bilan modellashtiriladi:

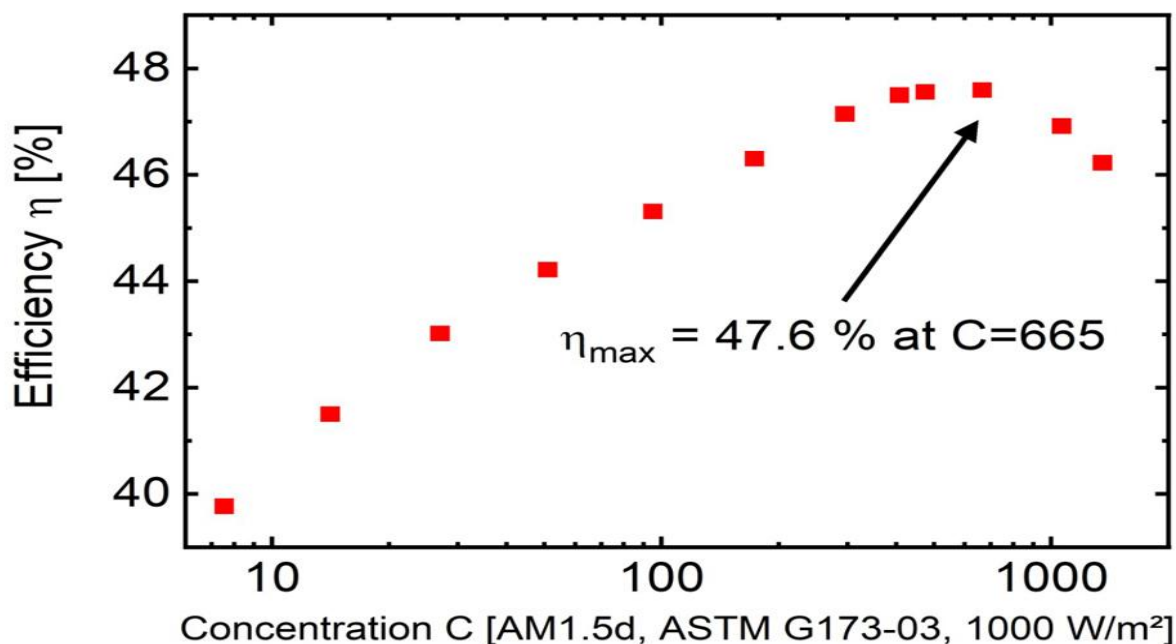
$$I = I_0 \left(e^{\left(\frac{V_i}{n_i V_T} \right)} - 1 \right)$$

lekin ketma-ket ulanma holatida umumiy kuchlanish:

$$V = \sum V_i$$

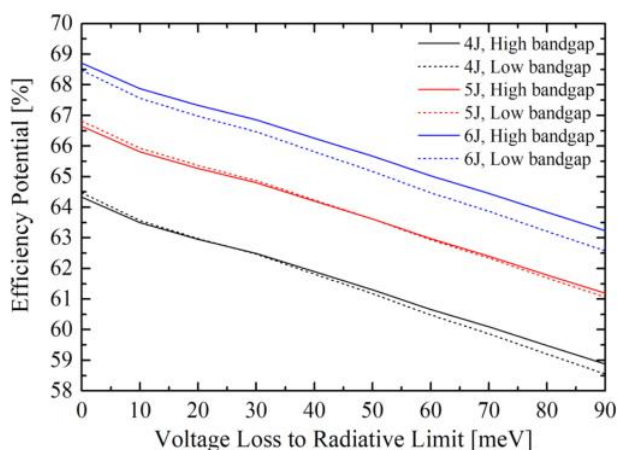
bo‘ladi. Qurilma bir nechta diodlardan tashkil topganligi sababli, ko‘p-o‘tishli (MJ) elementining I–V egri chizig‘i hanuzda **bitta tizzali shaklga** ega bo‘ladi, lekin bu holatda kuchlanish yuqoriroq va tok esa **eng zaif (kam ishlab chiqaruvchi) qavat** tomonidan belgilanadi.

Rasm:



14-rasm. Yuqori samarali 4J* konsentratorli quyosh elementlarining samaradorligi yorug'lik konsentratsiyasiga nisbatan (AM1.5D spektri)

14-rasm: Yuqori samaradorlikka ega 4-o'tishli (4J) konsentratsiyalangan quyosh elementi samaradorligining yorug'lik konsentratsiyasi bo'yicha o'zgarishi (AM1.5D spektrida) [8]. GaInP/AlGaAs//GaInAsP/GaInAs qurilmasi taxminan 665 baravar kuchaytirilgan quyosh nuri ostida 47.6% samaradorlikka erishadi (bu Fraunhofer ISE tomonidan o'rnatilgan rekordni anglatadi [5]). Grafikda samaradorlik tasvirlangan bo'lib, u konsentratsiyaning afzalligini ko'rsatadi.



15-rasm. 500x AM1.5d da to'rt, besh va olti o'tish (J) quyosh elementlari uchun samaradorlik potentsiallari, har bir o'tish uchun radiatsiya chegarasiga taxmin qilingan kuchlanishning yo'qolishi funktsiyasi sifatida chizilgan. "Past tarmoqli oralig'i" $\sim 0,51$ dan $\sim 0,56$ eV gacha bo'lgan pastki element diapazonidagi maksimal samaradorlikni va 0,69 eVdagi maksimal uchun "yuqori tarmoqli oralig'ini" anglatadi. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2019.2957663

Quyosh fotelementlarining nazariy samaradorligi, bir-o'tishli (ya'ni yagona p-n o'tishli) element uchun, quyosh nurining 1x intensivligi (bir quyosh) sharoitida taxminan **33.5%** ni tashkil etadi (Shockley–Queisser chegarasi) [1]. Seriyali ko'p-

o'tishli (multi-junction, MJ) elementlar sonining ortishi samaradorlik chegarasini oshiradi:

- Ikki p-n-o'tishli bilan ~42–45%,
- Uchta p-n-o'tishli bilan ~51–55%,
- Cheksiz p-n-o'tishli bilan ideal holatda ~86% gacha (yuqori konsentratsiya sharoitida) erishish mumkin [9][1].

Amalda, yer yuzida bir quyosh sharoitida 3 dan ortiq p-n-o'tishli qo'shish katta samarani bermaydi. Ammo kuchli konsentratsiya yoki keng spektrli (masalan, AM0 yoki ultrabinafsha boy kosmik nurlanish) sharoitida qo'shimcha p-n-o'tishli elementlar o'zini oqlaydi [9][1].

Tandem va Ikki-tomonlama (Bifacial) Kombinatsiyalar

Ko'p-o'tishli elementlarini boshqa ilg'or modul konsepsiyalari bilan birlashtirish mumkin. **Tandem** odatda ikki xil to'liq elementning vertikal qo'shilishidir – aynan MJ ham shunday. Amalda esa, "tandem" ko'pincha har xil texnologiyalarning kombinatsiyasini anglatadi (masalan, perovskit/silikon, perovskit/CIGS, organik/silikon).

Misol: **perovskit–silikon tandem** (2J) bu – yarim shaffof perovskit qatlami silikon element ustida joylashgan, ikki tomonlama (bifacial) “integratsiyalashgan tandem”. Shuningdek, **bifacial MJ** ham mumkin: shaffof orqa qoplamali MJ element orqali ikkala tomondan tushgan nurni yig'ish mumkin (yerning reflektivligi – albedo – bilan).

So'nggi yillarda **bifacial perovskit/perovskit tandemlar** 29% gacha samaradorlikni ko'rsatdi (30% orqa nurlanishda) [14].

Mexanik yopishtirish (stacking) orqali klassik MJ elementni Si ostki element bilan birlashtirib, 4-terminal tandem (GaAs MJ + Si) hosil qilish mumkin.

Konsentratsiyali PV (CPV) tizimlarida, ikki o'qli kuzatuvchilar bifacial foyda olish imkonini beradi.

Umuman, har qanday samarador bitta yoki tandem elementni **bifacial** qilish mumkin – shaffof kontaktlar va shaffof substratlar orqali. Samaradorlikdagi yutuq orqa tarafdin tushgan yorug'lik miqdori va element dizayniga bog'liq bo'ladi. Tadqiqotlar (masalan, Shaner va boshqalar) bifacial tandemlar panellar orasidagi yig'ilmay qolgan nur yo'qotilishini kamaytirishini ko'rsatmoqda [15].

Kommersiyalashtirish hali boshlang'ich bosqichda, ammo MJ + bifacial kombinatsiyasi maksimal quyosh hosilini olish uchun istiqbolli yo'nalish bo'lib qolmoqda.

Narx va Kelajak Trendlar

MJ elementlar tan narxi yuqori bo'lib qolmoqda – bunga sabab III–V materiallarining qimmatligi va murakkab ishlab chiqarishdir [1]. Hozirda ular quyidagi sohalarda ishlatiladi:

- Sun'iy yo'ldoshlar, fazoviy qurilmalar,
- Quyosh nuri boy mintaqalarda kontsentratsiyali PV,
- Maxsus yer usti ilovalari.

Ammo **kam xarajatli tandemlar** MJ elementlarini kengroq qo'llashga imkon berishi mumkin.

Masalan:

- **Oxford PV** kompaniyasi 30%+ samaradorlikka ega perovskit/silikon tandemlarni tijoratlashtirish yo'lida.
- **Seris/NUS**'ning moslashuvchan perovskit–organik modullari (2025 yilda 26.4%) IoT va kiyiladigan qurilmalar uchun mo'ljallangan [11].

Kelajak yo'nalishlari:

- **Yuqori samaradorlik:** 6–8 p-n-o'tishli MJ'lar bilan 50%+ samaradorlikka erishish mumkin (nazariy jihatdan) [8].
- **Yangi materiallar:**
 - GaInN – ultrabinafsha diapazonni ochadi,
 - GaSb va seyreltirilgan nitridlar – infraqizil uchun,
 - barqaror, qo'rg'oshinsiz perovskitlar – uzoq umr uchun.
- **Narxni tushirish:**
 - epitaksial ajratish (lift-off),
 - ommaviy III–V ishlab chiqarish texnologiyalari,
 - alternativ asoslar (substratlar) (masalan, Si ustida Ge).
- **Integratsiya:**
 - Monolit tandemlar (2-terminal) oddiylik uchun qulay,
 - ammo ko'p terminalli (3T, 4T) tandemlar quyi elementlarni mustaqil boshqarishga imkon beradi.
- **Tijoratlashuv:**
 - 2-p-n-o'tishli tandem PV (perovskit/Si, CIGS/Si) tez orada bozorda paydo bo'lishi mumkin.
 - CPV'larda MJ'lar yana ko'plab loyihalarda qayta ko'rilmoqda.
- **Kosmik dasturlar:**
 - NASA'ning Space Solar Cell dasturida yangi avlod MJ'lar yuqori samarali elektr manbai sifatida ishlatilmoqda.
- **Energiya qaytarilishi:**
 - Samaradorligi yuqori va engil MJ modullar o'z narxini tezroq qoplaydi va maxsus sohalarda o'zini oqlaydi.

Xulosa qilib aytganda, ko'p-o'tishli (MJ) quyosh elementlari quyosh energiyasidan foydalanish samaradorligi bo'yicha zamonaviy cho'qqini tashkil qiladi.

Bu texnologiya:

- yarimo'tkazgich fizikasi,

- ilg'or ishlab chiqarish,
- va innovatsion materiallar uyg'unligining mahsulidir.

20-asr oxiridagi dastlabki 2-o'tishli qurilmalaridan tortib, bugungi yuqori samarador III–V va perovskit tandemlargacha, bu soha sezilarli darajada rivojlandi [3][7]. Nazariya (detal balansi modellari, termodinamika) va amaliyot (epitaksial o'stirish, bog'lash, yangi materiallar) hamon oldinga intilmoqda. Fazoviy va kontsentratsiyali yer usti energiyasi uchun III–V MJ'lar muhim bo'lib qoladi. Ommaviy bozorda esa MJ'ning kontseptsiyalari arzon tandemlar (perovskit/silikon, organik/perovskit va boshqalar) orqali kirib kelishi asosiy tendentsiyadir [7][12].

O'rganilgan ma'lumotlar:

Bu bob MJ elementlarning evolyutsiyasi, ishlab chiqarilishi va ishlash ko'rsatkichlarini, eng so'nggi rekordlardan tortib, ilmiy izlanishlar ufqlarigacha yoritib berdi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Jones, R.K. va boshq. "Evolution of Multijunction Solar Cell Technology for Concentrating Photovoltaics", *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**(10), 10ND01 (2012) [3].
2. Fetzer, C.M. va boshq. "Multijunction Solar Cell Development and Production at Spectrolab," 19th Space Photovoltaic Research and Technology Conf. (2007) [4].
3. Niemeyer, M. va boshq. "Next generation of wafer-bonded multi-junction solar cells," *EPJ Photovolt.* **4**:4 (2014) [10].
4. Fraunhofer ISE, "Solar cell efficiency record raised from 46.1% to 47.6%," *Semiconductor Today*, 30 May 2022 [5].
5. Willis, B. "SERIS claims record 26.4% with perovskite-organic tandem," *PV Tech*, 26 June 2025 [11].
6. Harley, S. "Global efficiency record for large triple-junction perovskite cell," *TechXplore*, 7 Oct 2025 [2].
7. Huang, J. & Mao, L. "Review on Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: Status and Challenges," *Energies* **18**(16), 4327 (2025) [7].
8. U.S. DOE Solar Energy Office, "Multijunction III–V Photovoltaics Research," (online) 2022 [1].
9. Geisz, J.F. va boshq. "Building a Six-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Solar Cell," *IEEE J. Photovolt.* **8**(2), 626–632 (2018) [8].
10. Wong Kromhout, W. "Tandem polymer solar cells set new record," *UCLA News*, 13 Feb 2012 [6].
11. Wang, J. va boshq. "Tandem Organic Solar Cells with 21.5% Efficiency," *Adv. Mater.* (2025) [12].

[1] Multijunction III-V Photovoltaics Research | Department of Energy

<https://www.energy.gov/eere/solar/multijunction-iii-v-photovoltaics-research>

[2] Global efficiency record set for large, triple-junction perovskite solar cell

<https://techxplore.com/news/2025-10-global-efficiency-large-triple-junction.html>

[3] spectrolab.com

https://www.spectrolab.com/pv/support/Evolution_of_Multijunction_Solar_Cell_Technology_for_Concentrating_Photovoltaics.pdf

[4] Microsoft Word - E-15786 Piszczor TOC.doc

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20090022292/downloads/20090022292.pdf>

[5] Fraunhofer ISE raises solar cell efficiency record from 46.1% to 47.6%

https://www.semiconductor-today.com/news_items/2022/may/fhg-ise-300522.shtml

[6] UCLA Engineers Create Tandem Polymer Solar Cells that set Record for Energy-Conversion | UCLA Samueli School Of Engineering

<https://samueli.ucla.edu/ucla-engineers-create-tandem-polymer-solar-cells-that-set-record-for-energy-conversion/>

[7] A Review on Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: Current Status and Future Challenges

<https://www.mdpi.com/1996-1073/18/16/4327>

[8] Building a Six-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Solar Cell - National Renewable Energy Laboratory

<https://research-hub.nrel.gov/en/publications/building-a-six-junction-inverted-metamorphic-concentrator-solar-c-4>

[9] Multi-junction solar cell - Wikipedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-junction_solar_cell

[10] NEXT GENERATION OF WAFER-BONDED MULTI-JUNCTION SOLAR CELLS

https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/29-eupvsec-2014/Niemeyer_4BO102.pdf

[11] SERIS claims record 26.4% efficiency with perovskite-organic tandem solar cell - PV Tech

<https://www.pv-tech.org/seris-claims-record-26-4-efficiency-with-perovskite-organic-tandem-solar-cell/>

[12] Tandem Organic Solar Cells with 21.5% Efficiency - PubMed

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40781751/>

[13] [PDF] Fraunhofer ISE – Annual Report 2021/2022

https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/annual_reports/fraunhofer-ise-annual-report-2021-2022.pdf

[14] Bifacial all-perovskite tandem solar cells | Science Advances

<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.add0377>

[15] A Markov Chain Approach for Defining the Fundamental Efficiency ...

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/arXiv:1606.01176>

IV Bob

2. IKKI TOMONLI QUYOSH ELEMENTLARI

Kirish. Ikki tomonli quyosh elementlari old va orqa yuzalariga tushadigan yorug'likni yig'ish uchun mo'ljallangan fotoelektr (PV) qurilmalardir; buning natijasida ular qaytgan (**albedo**) yoki tarqoq yorug'likni ham qo'shimcha elektr energiyasiga aylantira oladi. Bunga qarama-qarshi o'laroq, bir tomonlama quyosh elementlari faqat old yuzasiga fotonlar tushgandagina elektr energiyasi ishlab chiqaradi. Ikki tomonli elementlar esa sathlardan (masalan, tomlardan) ko'p miqdorda aks etadigan **albedo** nurlanishini ham o'zlashtira oladi, bu bunday yuzalar mavjud bo'lgan ilovalarda foydalidir. Ushbu g'oya quyosh elementlarida energiya ishlab chiqarishni oshirish usuli sifatida taklif etilgan edi. Bu konsepsiya ilk bor 1960-yilda yapon olimi Hiroshi Mori tomonidan patentlanib, 1970-yillarda tajribalarda amalga oshirildi. Dastlabki kosmosda o'tkazilgan tajribalar (masalan, Sovet Ittifoqida Bordina va hammualliflar tomonidan) sezilarli samaradorlik oshirishini ko'rsatdi: yer yuzasidan yoki Yerning o'zidan qaytgan yorug'likka duchor qilingan ikki tomonli elementlar odatiy (bir tomonlama) elementlarga qaraganda 17–45% ko'proq quvvat ishlab chiqardi[1][2]. Amaliy sharoitda, zamonaviy yer usti ikki tomonli modullar xuddi shunday monofacial modullarga nisbatan energiya hosilini taxminan 10–30% ga oshirishi mumkin (hatto qor qoplagan yer kabi yuqori albedo muhitlarda ~34% gacha)[1][2]. Natijada, ikki tomonli modullar tobora ommalashmoqda; bugungi kunda ular yangi o'rnatilayotgan PV quvvatlarning taxminan 20% ini tashkil etadi, va bashoratlarga ko'ra 2030-yillar boshlariga kelib yirik sanoat miqyosidagi modullarning 70–85% i ikki tomonli bo'ladi[1][2]. Yirik ishlab chiqaruvchilar (masalan, Jinko, LONGi, Trina) hozirda ilg'or element turlarining (PERC, PERT, PERL, HJT, IBC va hokazo)[2] ikki tomonli variantlarini taklif qilmoqda, bu yuqori samarali PV sohasida ikki tomonli arxitekturalarning keng qo'llanilayotganidan dalolat beradi. Rasmda odatiy kremniyli geteroo'tish (HJT) quyosh elementining qatlamlar tuzilishi ko'rsatilgan bo'lib, u tabiatan ikki tomonlama dizayni bilan zamonaviy ikki tomonli texnologiyaga misol bo'la oladi.

Rivojlanish Tarixi

1960–1970-yillar: Ikki tomonlama yoritish g'oyasi dastlab 1960-yilda yapon ixtirochisi Hiroshi Mori patentida bayon qilingan. 1970-yillar o'rtalarida tajribaviy ikki tomonli elementlar yaratilgan (masalan, SSSRda Bordina va boshqalar tomonidan) va yer sathidan qaytgan orqa yoritish chiqishni sezilarli oshirishi mumkinligi ko'rsatib berilgan. Masalan, Sovetlarning **Salyut** kosmik stansiyalarida o'tkazilgan sinovlar ikki tomonli panellar monofacial panellarga nisbatan quvvatni ~34% ga oshirishini aniqlagan[2].

1980–2000-yillar: Tadqiqot darajasidagi ishlar (masalan, Yaponiya va Ispaniyada) davom etdi. Biroq, tijorat joriy etish yuqori tannarx va talabning yo'qligi sababli cheklangan edi. Faqat 2000-yillar oxiri – 2010-yillar boshlarida, PV bozori portlash darajasida kengayganda, ikki tomonli modullar tez sur'atlarda rivojlana boshladi. Masalan, 2012-yilda Panasonic kompaniyasi Yingli korporatsiyasiga ikki tomonli

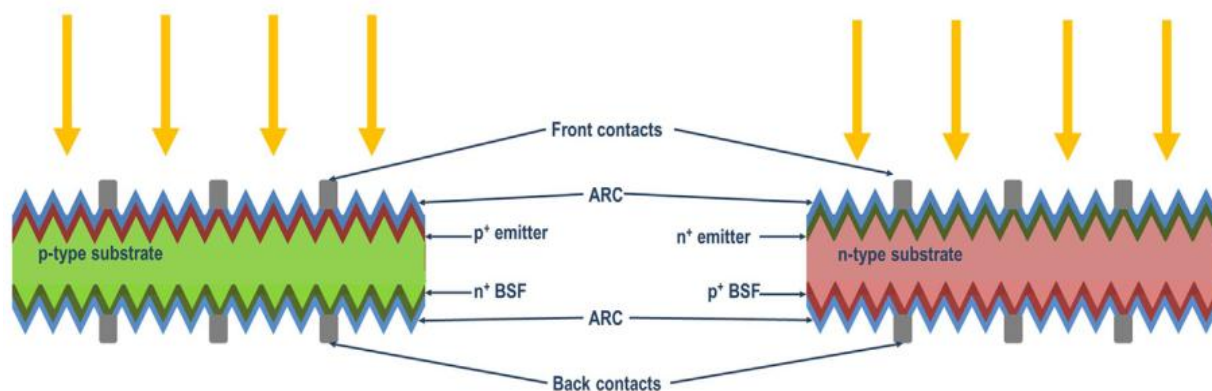
Hitachi quyosh elementlarini (n-turi geteroo'tish) litsenziya asosida ishlab chiqarish huquqini berdi[7]. 2020-yilga kelib ikki tomonli mahsulotlarning bozor ulushi ~15–20% ga yetdi.

2010–2020-yillar: Sanoatda katta burilish yuz berdi — tabiatan ikki tomonlama dizaynga mos **n-turi** element texnologiyalari ommaviy ishlab chiqarishga joriy etildi. Bugungi kunda deyarli barcha yetakchi ishlab chiqaruvchilar PERC, PERT, PERL, geteroo'tish (HJT/HIT), TOPCon va IBC elementlarining ikki tomonlama variantlarini ishlab chiqarmoqda. Tahlilchilar 2030-yilga borib o'rnatiladigan modullarning ko'pchiligi ikki tomonli bo'lishini bashorat qilmoqda[2].

Xulosa qilganda, ikki tomonli PV dastlab tor bir ilmiy qiziqish sifatida boshlangan bo'lsa-da, hozirgi kunda diqqatga sazovor texnologiyaga aylandi. Bunga element dizaynining takomillashuvi, optik yechimlar (masalan, har ikki yuzaga aks ettirishga qarshi qoplamalar qo'llash) va yuqori albedo muhitlarda keng tatbiq etilishi kabilar turtki bo'ldi. Dastlab 30–40% energiya yutug'i haqida bildirilgan umidlar[2] amaliy sharoitlarda 10–30% ko'rstagichga ega bu hudud sharoitlariga (qor, qum, yorug' tom yuzalari va hokazo) bog'liq[1] odatiy texnologiyaga aylandi,. Zamonaviy ikki tomonli modullar uzoq muddatli ishonchlilikni oshirish maqsadida ko'pincha ikki tomonlama shisha romli (old va orqa tomoni shisha) konstruktsiyadan foydalanadi[8].

Ikki tomonli quyosh elementlarining afzalliklari

Ikki tomonli quyosh elementlarining yana bir **afzalligi** shundaki, orqa tomonda alyuminiy metall qoplamaning yo'qligi tufayli infraqizil nurlanishning so'rilishi kamayadi. Natijada elementning ish harorati pasayib, maksimal quvvat chiqishi ortadi [16–18]. Biroq, odatiy polimer orqa qoplama o'rniga orqa taraf shishadan yasalgan modullarda orqa tomonda issiqlik izolyatsiyasi biroz oshadi. Ish haroratining pasayishi tufayli ikki tomonli PV modullar bir tomonlama modullarga qaraganda pastroq haroratda ishlaydi va natijada maksimal quvvat chiqishi oshadi.



1-rasm. Standart n-turi va p-turi ikki tomonli kristalli kremniy quyosh elementlarining kesim ko'rinishi.

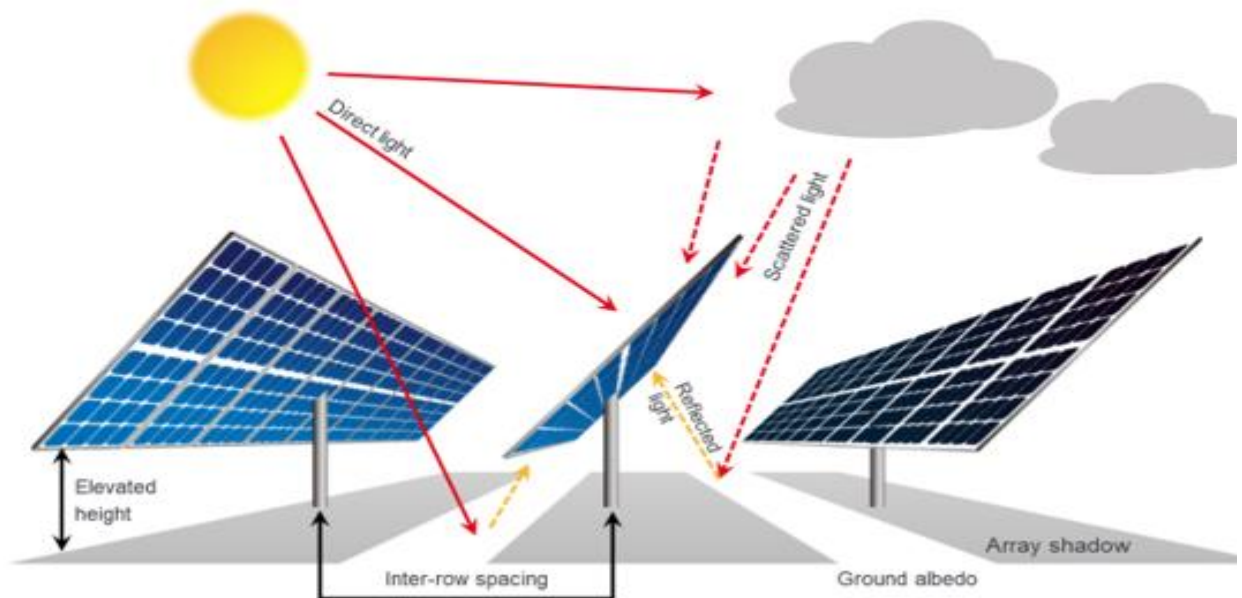
1-rasmda eng keng tarqalgan ikki tomonli quyosh elementlarining — standart ikki tomonlama kristalli kremniy quyosh elementlarining — kesimi

tasvirlangan. Har ikki tomonda ochiq metall panjara shaklidagi elektrod bosma usulda hosil etilgan bo'lib, u panelga har ikki tomonidan tushayotgan yoritqichni ham qabul qila oladi. n-tur elementlarda emitter p+ diffuziyalangan qatlam bo'lib, n+ qatlam orqa sirt maydoni (BSF) vazifasini bajaradi; p-tur elementlarda esa aksincha, n+ diffuziya old yuzadagi emitterni, p+ qatlam esa orqa BSFni hosil qiladi. Sanoat miqyosida ochiq panjarali orqa elektrodga erishish uchun teksturali kremniy plastinalari va passivlovchi, yorug'lik qaytmas qoplamalar (ARC) qisman ekran pechatlash (**screen printing**) usulida bosilgan metall kontaktlar bilan birlashtiriladi [16].

Ishlash tamoyili

Ikki tomonli quyosh elementlari old tarafga tushayotgan to'g'ridan-to'g'ri quyosh nuri va orqa tarafga tushadigan aks etgan (**albedo**) nurlar hisobidan elektr tokini generatsiya qiladi. Panelning old tomoni odatiy quyosh paneli kabi to'g'ridan-to'g'ri tushayotgan quyosh nurini yutib, elektr energiyasiga aylantiradi. Panelning orqa tomoni esa yer yuzasi yoki pastdagi boshqa sathlardan aks etib qaytgan yorug'likni to'playdi va uni qo'shimcha elektr energiyasiga aylantiradi – natijada umumiy energiya hosili oshadi.

- **Old tomonning nurni yutishi:** Panelning old tarafi odatiy quyosh paneli kabi to'g'ridan-to'g'ri tushayotgan quyosh nurlarini yutib, elektr energiyasini hosil qiladi.
- **Orqa tomonning nurni yutishi:** Old tomonda yutilmagan nur paneldan o'tib, orqa tomonga tushishi mumkin. Shuningdek, qor, qum, och rangli tom yoki suv kabi yuzalardan aks etib, panelning orqa yuzasiga qaytgan yorug'lik ham orqa elementlar tomonidan qabul qilinadi.
- **"Ikki tomonlama yutuk" (bifacial gain):** Panelning orqa tarafidagi quyosh elementlari ushbu aks etgan yorug'likni ham yutib elektrga aylantiradi va qo'shimcha mustaqil quvvat manbai hosil qiladi.
- **Samaradorlikning oshishi:** Har ikki tomondan yorug'likni yig'ish tufayli ikki tomonli panellar odatdagi bir tomonlama panellarga nisbatan sezilarli darajada ko'proq quvvat ishlab chiqarishi mumkin, ayniqsa panellar ostida yorug'lik qaytishi uchun bo'shliq qoldirib o'rnatilganda.



2-rasm – ikki tomonlama quyosh elementining ishlash prinsipi (old va orqa yoritish).

Ikki tomonli elementlar uchun asos material (substrat) tanlovining ahamiyati

Asos material (Substrat) quyosh elementida mexanik tayanch, optik xususiyatlar (**shaffoflik/aks ettirish**), elektr chegara sharoitlari (orqa kontakt turi), issiqlik kengayishining mosligi, texnologik yaroqlilik kabi jihatlarni belgilaydi va – eng muhimi – elementning orqa tomondan yorug‘lik qabul qilish qobiliyatini belgilab beradi. Ikki tomonlama ishlash uchun substrat odatda hech bo‘lmasa qisman shaffof (optik yoki elektr o‘tkazuvchan) bo‘lishi yoki qaytgan yorug‘lik elementni yutuvchi qismiga yetib borishi uchun shaffof orqa qoplama/shisha + TCO bilan birga qo‘llanilishi lozim (TCO – **Transparent Conductive Oxide**, ya’ni shaffof o‘tkazuvchan oksid).

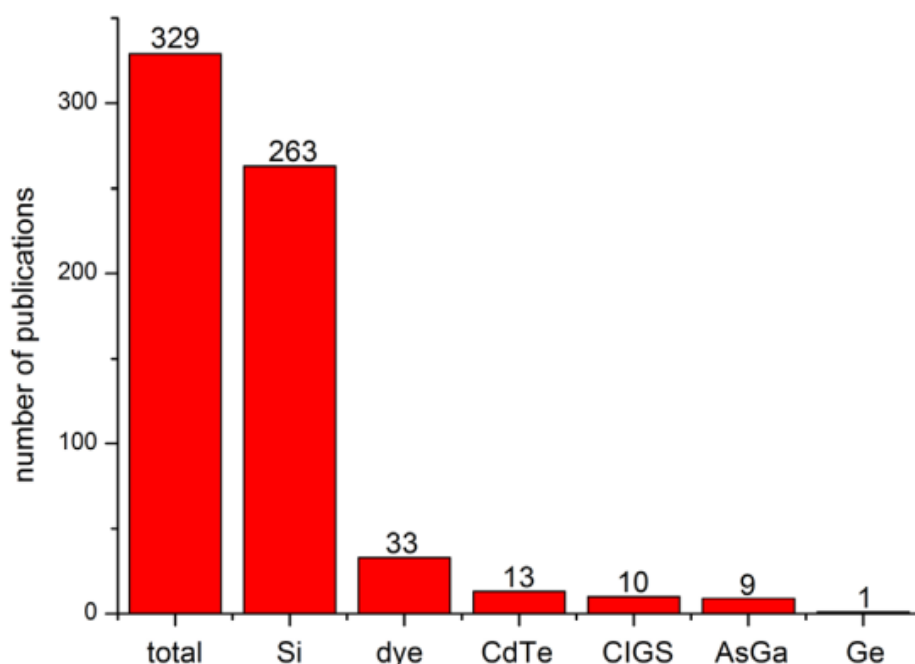
Ikki tomonli elementlar uchun substrat tanlashda muhim omillar:

- **Optik shaffoflik** (yoki shaffof orqa qoplama/shisha + TCO ishlatish).
- **Elektr o‘tkazuvchanlik** (TCO qatlami qarshiligi va metall panjara).
- **Mexanik qalinlik va mustahkamlik** (ishlab chiqarishda plastinalarni sinmasdan ushlab turish, modullarda shamol/qor bosimiga chidam).
- **Issiqlik va kimyoviy barqarorlik** (enkapsulyatsiya, kavjarlash (paykalash) jarayonlari, namlikka ta’sirchanlik).
- **Narx va mavjudlik** (bugungi kunda asosan kremniy substratlari ustun).

Ikki tomonli quyosh elementlari uchun ilk substratlar bundan 40 yil avval **monokristalli kremniy**dan tayyorlangan edi [19]. Polikristalli kremniy substratlari ham ushbu texnologiyada keng qo‘llaniladi [20]. Bundan tashqari, shisha va shaffof elektr o‘tkazuvchan oksidlar (TCO) yoki muqobil metall kontaktlar kremniyli yupqa parda [21], GaAs yupqa parda [22], CdTe [23,24], CIGS [25] va bo‘yoqqa sezuvcha

quyosh elementlarida (DSSC) va kabilar asos material (substrat) sifatida ko‘rib chiqiladi [26]. Biroq, kremniy substratiga asoslangan ikki tomonlama texnologiyaga bag‘ishlangan ilmiy maqolalar soni boshqa muqobil substratlarga qaraganda sezilarli darajada ko‘proqdir (3-rasm) [27]. Bu holat, shuningdek, PV bozorida kremniyning ustun mavqei bilan birga, yaqin va o‘rta muddatda ikki tomonlama texnologiyaning asosiy substrati sifatida kremniy yetakchi o‘rinda qolishini anglatadi.

Substratning eng muhim parametri – bu uning qalinligi, chunki qalinlik bevosita material sarfi va tannarxni belgilaydi.



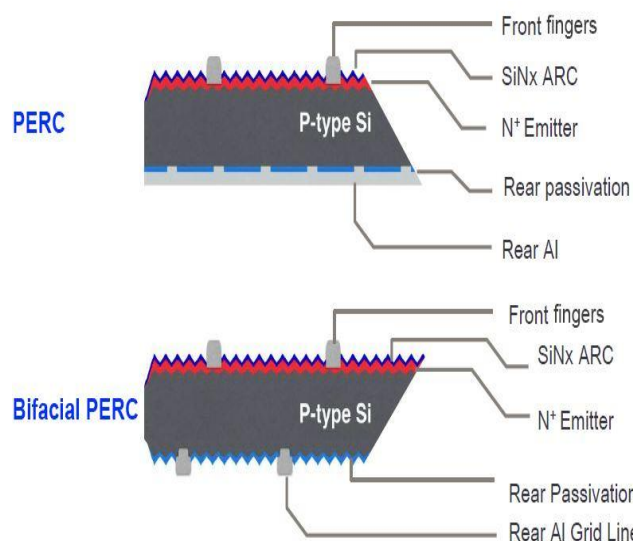
3-rasm. 1979-yildan 2015-yil mayigacha turli bifacial PV element substratlariga bag‘ishlangan ilmiy nashrlar soni [27].

Turli kremniy substrat qalinliklarining fotoelektrik aylantirish samaradorligiga ta’siri to‘g‘ridan-to‘g‘ri sinovlar [28] va/yoki modellashirish va simulyatsiya [29] orqali baholangan. 140 μm va 240 μm qalinlikdagi kremniy substratlar bilan o‘tkazilgan eksperimentlar shuni ko‘rsatadiki, qalinlikni kamaytirish natijasida hajmiy va orqa rekombinatsiya ta’sirining pasayishi hamda yorug‘likni yaxshiroq tutib qolish hisobiga samaradorlik oshadi (monofacial elementlarga nisbatan) [28], biroq bu yo‘nalishda qo‘shimcha tadqiqotlar talab etiladi. Simulyatsiyalar esa kremniy substrat qalinligini 200 μm dan 58 μm gacha kamaytirish fotoelektr samaradorlikni atigi 0,6 foiz punktga pasaytirishini, shu bilan birga ishlab chiqarish tannarxini kamaytirishini va bir vaqtning o‘zida ingichka plastinalar bilan ishlash qiyinlashishini ko‘rsatgan [29]. Ikki tomonli elementlar uchun kremniy sarfini kamaytirish maqsadida planar (tekis) strukturalarga muqobil yondashuvlar ham taklif qilingan; masalan, **Slivers** konsepsiyasida mikrofrezerlangan 60 μm qalinlikdagi quyosh elementlari (kesish chiqindilari bilan birga) kremniy sarfini 12 baravargacha kamaytiradi [30]. (*Manba: "Bifacial solar photovoltaics – A technology review"*)

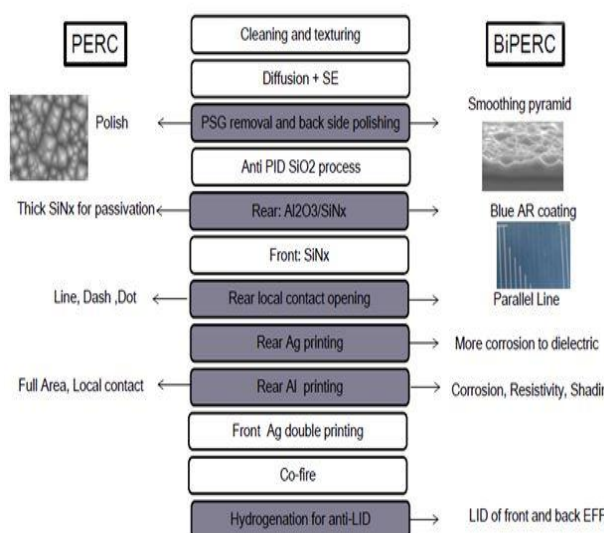
Monokristalli kremniy (c-Si)

- **Umumiy qo'llanilish sohalari:** plastina (wafer) asosidagi ikki tomonli PERC, TOPCon, geteroo'tish, n-turi va p-turi arxitekturalari.
- **Material va tuzilma:** yagona kristalli Si plastina (ingotdan kesma) – Czochralski (CZ) yoki float-zone (FZ) usulida olingan. Tipik tijorat plastinalari qalinligi tarixan ~180–200 μm ; hozirgi jahon bozoridagi modullar ko'pincha 140–160 μm plastinalardan foydalanadi; tadqiqot va ultra-yupqa namunalarda <100 μm gacha boriladi (plastina yupqalashgan sari uni tashish va jismoniy mustahkamlik muammolari oshadi).
- **Ikki tomonli xususiyatlari:** orqa taraf monofacial PERC elementlaridagi kabi passivatsiyalanadi (BPR – **bifacial passivated rear**, ikki tomonli passivlangan orqa) va joyli (lokal) kontaktlar yoki to'liq maydonli shaffof passivatsiya qatlam + metall panjara qo'llanadi. Orqa tarafga yoritish berilishi (albedo va qurilma maketiga qarab) energiya hosilini oshiradi (ikki tomonlama yutuk).
- **Ingichkalashtirish:** plastina yupqalashganda, ishlab chiqarish jarayonida uni qo'llash uchun vaqtinchalik tayanchlar, shisha qo'llovchi panellar yoki plastinalarni bir-biriga yopishtirib ishlov berish usullari qo'llaniladi.
- **Afzalliklari:** juda yuqori material sifati → yuqori ochiq zanjir kuchlanishi va samaradorlik; pishgan ishlab chiqarish va keng ta'minot zanjiri; orqa passivatsiya va kontakt sxemalari uchun ko'plab texnologik usullar mavjud.
- **Cheklovlari:** plastina tannarxi polikremniy substratlariga qaraganda yuqori; haddan ziyod yupqalash mo'rtlik va ishlab chiqarish qiyinchiliklarini oshiradi.
- **Amaliy qalinlik diapazoni:** 80–220 μm (ishlab chiqarishda ko'p hollarda 120–180 μm).
- **Ishlab chiqarish eslatmalari:** plastinalarni an'anaviy arralashda har bir plastinada 100–200 μm kremniy **kerf** chiqindisi hosil bo'ladi; kerfsiz usullar (epitaksial o'stirish, sim bilan arralash yoki plazma bilan o'yib ingichkalash) chiqindini kamaytiradi, biroq jarayon murakkabligini oshiradi.

Diagramma – monokristalli plastina asosidagi ikki tomonli element (kesimi).



4a-rasm. Mono PERC quyosh elementi va ikki tomonli PERC quyosh elementi.



4b-rasm. Monokristalli plastina asosidagi ikki tomonli elementni tayyorlash bosqichlari (sxema).

Ikki tomonli monokristalli quyosh elementining har bir qatlamining vazifasi:

Qatlam	Vazifasi / Maqsadi
Old oynali qoplama / enkapsulant	Muhit ta'siridan himoya qiladi; minimal yo'qotish bilan yorug'likni yaxshi o'tkazadi.
Aks ettirishga qarshi qoplama (ARC) + old passivatsiya	Tushayotgan nurning qaytishini kamaytiradi; passivatsiya yuzadagi rekombinatsiyani pasaytiradi.
Old metall panjara	Tokni to'playdi; soya yo'qotishi va qarshilik orasidagi muvozanatni ta'minlaydi.
Emitter (old yuzadagi n-yoki p-turi qatlamlar)	p-n o'tishni hosil qiladi; qaysi turdagi dopant old tomonda ekanini belgilaydi.
Si plastina substrati (monokristalli)	Asosiy yutuvchi; uning qalinligi tannarx, optik yutilish va mexanik mustahkamlik o'rtasidagi muvozanatni belgilaydi.
Orqa passivatsiya dielektrigi	Orqa sirt rekombinatsiyasini oldini oladi; misol uchun SiOx, AlOx kabi dielektrik qatlam bo'lishi mumkin.
Orqa shaffof kontakt	Qaytgan yorug'likni absorberga o'tkazadi; shuningdek tokni yig'adi.
Orqa shisha / enkapsulant / orqa qoplama	Mexanik himoya beradi; agar shaffof bo'lsa, orqa yoritishni o'tkazadi.

Quyosh elementlari sanoatida **“polikremniy”** atamasi ko'pincha ikki turdagi tushunchani anglatadi:

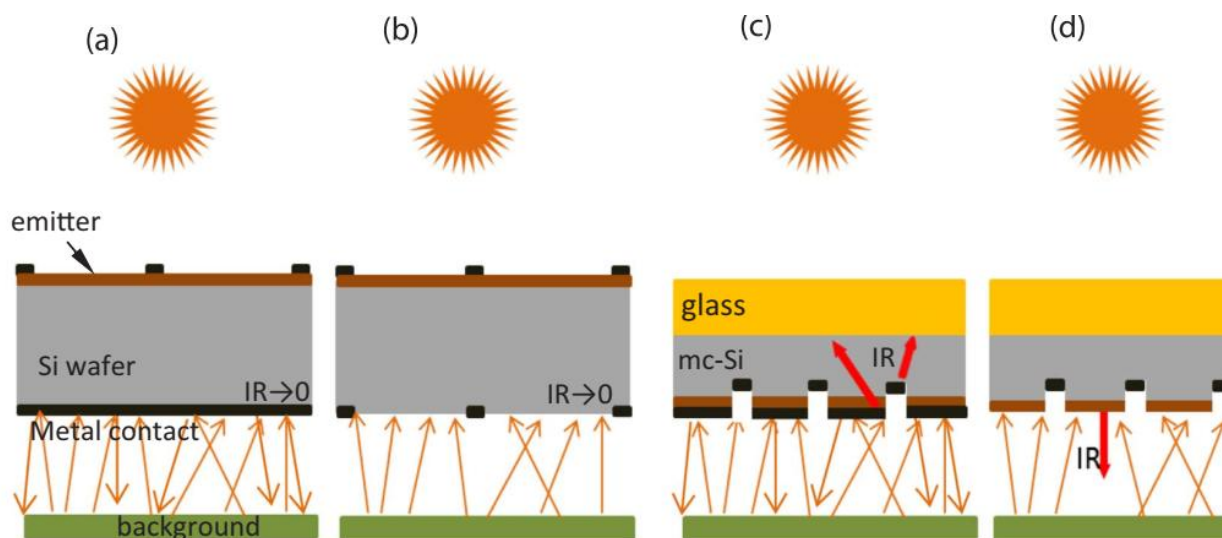
- **Polikristalli kremniy material** (ya'ni ko'p kristalli kremniy substrati) — ko'plab kristalli donlardan tashkil topgan kremniy.
- **Polikremniy qatlami** — passivatsiyalovchi(yorug'likni element yuzasidan qaytarishni kamaytiruvchi va yorug'likni yutulishini oshiruvchi qo'shimcha qatlam, odatda passivatsiyalovchi qatlam sifatida SiO_x ishlatiladi) kontakt qatlami (masalan, TOPCon tipidagi elementlarda SiO_x ustiga yotqizilgan poly-Si), ya'ni butun substrat emas, balki substrat yuzasidagi qatlam sifatida.

Polikristalli (ko'p kristalli) kremniy (mc-Si)

Polikristalli (ko'p kristalli) kremniy (**mc-Si**) asosidagi ikki tomonli quyosh elementi old va orqa tomonlardan tushayotgan yorug'likdan elektr energiyasi ishlab chiqara oladigan qurilmadir. Bu elementlar aks etgan va sochilgan yorug'likni ham ushlashi bilan mashhur bo'lib, natijada umumiy quvvat ishlab chiqarish hajmi oshadi – ayniqsa, aks ettiruvchi yuzalarga o'rnatilganda. Ularning foydali ish koeffitsienti monokristalli ikki tomonli elementlarga nisbatan pastroq bo'lib, bunga kristallar chegara yuzalarida elektron harakatining to'siqlanishi sabab bo'ladi. Biroq, ishlab chiqarish tannarxi ancha arzonroq.

- **Material va tuzilma:** ko'p sonli kremniy kristall donlardan iborat; yo'naltirilgan qotish usuli bilan ingot quyilib, undan plastinalar kesib olinadi. Kristall donlarining chegaralari rekombinatsiya markazlarini hosil qiladi.
- **Ikki tomonli xususiyatlari:** mc-Si asosidagi ikki tomonli elementlar orqa tarafda c-Si elementlaridagi bilan bir xil passivatsiya/qoplama usullaridan foydalanadi, ammo umumiy element samaradorligi don chegaralaridagi rekombinatsiya tufayli pastroq. Ikki tomonlama yutuk nisbiy foizlarda c-Si elementlarnikiga yaqin bo'lsa-da, mutlaq quvvat pastroq – chunki old tarafning o'zi monokristallikdan pastroq samaradorlikka ega.
- **Ko'p kristalli kremniy (mc-Si):** bu materialdan tayyorlangan elementlar bir-biriga nisbatan turli yo'nalishdagi ko'plab kremniy kristallaridan iborat bo'lib, tashqi ko'rinishi donador va bir oz ko'kimtir tusda bo'ladi.
- **Muayyan sharoitlarda orttirilgan samaradorlik:** oq zamin kabi yuqori aks ettiruvchi yuzalar ustiga o'rnatilgan ikki tomonli elementlar qaytgan yorug'likni qo'shimcha ravishda yutib, odatiy bir tomonlama elementlarning quvvat chiqishidan osha oladi.
- **Ishlab chiqarish jarayoni:** mc-Si maxsus yo'naltirilgan qotish (solidifikatsiya) jarayonida olinadi – eritilgan kremniy nazoratli sovutilib, bir nechta kristallarning hosil bo'lishiga imkon beriladi.

Monokristallga nisbatan pastroq samaradorlik: Ko'p kristalli tuzilmaning don chegaralari elektronlarning harakatini qiyinlashtiradi, bu esa yagona kristalli elementlarga qaraganda pastroq samaradorlikka olib keladi. Biroq, ikki tomonlama dizayn ushbu kamchilikni qisman qoplashga yordam beradi.



5-rasm. Bir tomonlama plastina elementi (a), ikki tomonli plastina elementi (b), bir tomonlama mc-Si yupqa plyonkali quyosh elementi (c) va ikki tomonli mc-Si yupqa plyonkali quyosh elementi (d).

(<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.04.004>)

- **Afzalliklari:** material tannarxining pastligi; ishlab chiqarish texnologiyasi yaxshi yoʻlga qoʻyilgan.
- **Cheklovlari:** tashuvchilar yashash mudatining va ochiq zanjir kuchlanishining qisqarishi; mexanik xossalardagi biroz koʻproq oʻzgaruvchanlik; plastina mustahkamligi sababli haddan ziyod yupqalashning imkonsizligi.
- **Amaliy qalinlik diapazoni:** 120–220 μm (ishlab chiqarishda odatda 150–200 μm).

Polikremniy qatlami

Polikremniy substrati — koʻplab kremniy kristallaridan tashkil topgan yarimoʻtkazgich material boʻlib, ayrim ikki tomonli quyosh elementlarida, xususan passivatsiyalovchi kontakt qatlami sifatida yoki tandem elementlar bazasi sifatida qoʻllaniladi. Ikki tomonli elementlarda yuqori sifatli polikremniydan foydalanish va **passivatsiyalovchi kontaktlar** kabi maxsus texnologik usullarni qoʻllash lozim; buning natijasida har ikkala – old va orqa – yuzadagi passivatsiya yaxshilanib, rekombinatsiya yoʻqotishlari kamayadi va umumiy samaradorlik oshadi.

- Ikki tomonli kremniy elementlari boʻyicha adabiyotlarda **polikremniy substrati** termini koʻpincha yuqoridagi ikkinchi maʼnoni anglatadi: yupqa polikremniy qatlami tanlab olingan yoki toʻliq maydonli kontakt sifatida kremniy plastina (substrat) ustiga qoʻllanadi. Masalan, plastinaning orqa yuzasida “poly-Si/SiO_x passivatsiyalovchi kontakt” qoʻllanilishi odatiy hol.

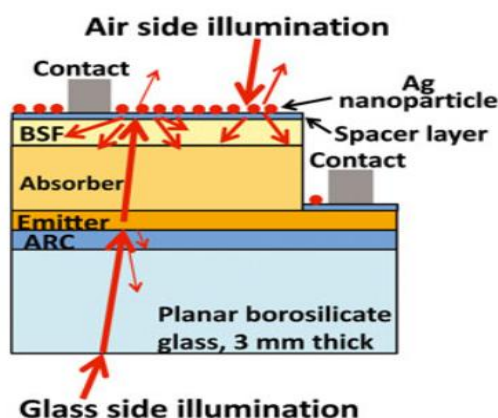
- Shunday qilib, ikki tomonli elementlar uchun “polikremniy substrati” deyilganda odatda butun substratning to‘laligicha polikremniydan iboratligi nazarda tutilmaydi. Aksincha, bu monokristalli yoki polikristalli kremniy plastinasi yuzasida orqa yoki old kontakt/passivatsiya vazifasini bajaruvchi polikremniy qatlami shakllantirilganini bildiradi.

Shisha + shaffof o‘tkazuvchan oksid (TCO) yoki metallik shaffof kontaktlar (yupqa parda tizimlari)

- **Umumiy qo‘llanilishi:** kremniyli yupqa parda (amorf yoki mikrokristalli Si), CdTe, CIGS, GaAs yupqa parda elementlarida (agar ular shisha + buffer/qo‘shimcha qatlamlar ustida o‘stirilgan bo‘lsa), shuningdek DSSC elementlarida substrat sifatida. Shisha mexanik tayanch vazifasini bajaradi, TCO esa old/orqa elektr kontaktini va optik shaffoflikni ta‘minlaydi.

Ikki tomonli kremniyli yupqa parda quyosh elementlarida odatda TCO (**indiy-qalay oksidi** – ITO yoki **ftorli qo‘shimchali qalay oksidi** – FTO) bilan qoplangan shisha substratlar yoki muqobil shaffof metall kontaktlar qo‘llanilib, yorug‘likning har ikki tomondan absorberga yetib kelishi ta‘minlanadi. Bunday substratlar yupqa kremniy qatlamlarini (odatda 1–5 μm) yotqizishga imkon beradi va material sarfini kamaytiradi, orqa tarafdin yoritishga sharoit yaratadi.

Tadqiqot maqolasidan olingan diagramma (Ouyang va boshq., 2011[13]): Ushbu maqoladagi 6-rasm yupqa qatlamli kremniy (silicon) quyosh elementi tuzilmasining kesim ko‘rinishi tasvirlangan. Diagrammada quyidagi qatlamlar ko‘rsatilgan: old tomonda shisha/TCO (shaffof o‘tkazuvchi oksid) substrati, 2 mkm qalinlikdagi amorf kremniy i-qatlami p- va n-tip kirishma kiritilgan (doplangan) qatlamlar orasida joylashgan, orqa tomonda esa ZnO:Al (alyuminiy bilan doplangan rux oksidi) kontakt qatlamiga o‘rtacha diametri 100 nm bo‘lgan kumush (Ag) nanobirikmalar joylashtirilgan.



6-rasm. Bug‘latib yotqizilgan (evaporatsion) quyosh elementining kesim sxemasi (nisbiy o‘lchamlarsiz). Ag nanozarralari Si yuzasiga yoki Si ustidagi dielektrik qavat ustiga tatbiq etilgan. Nanozarralar nurlarni Si ichiga sochib tarqatadi. Ikki tomonlama konfiguratsiya tufayli tushayotgan nurlar ham shisha, ham atmosfera tomonidan elementga kirishi mumkin. **BSF** – orqa sirt maydoni. (Manba: DOI: 10.1002/pip.1135)

Ushbu nanobirikmalar plazmonik sochish (scattering) uchun xizmat qiladi. Diagrammada nurlarning yo'lini aniqlash (ray-tracing) simulyatsiyasi ham keltirilgan bo'lib, unda kiruvchi yorug'lik nurlari shisha substrat orqali sinib o'tadi, orqadagi nanobirikmalardan qaytgan nurlar esa yutuvchi qatlam (absorber) ichida "qamaladi". Bu optik yo'llar qizil rangda ajratib ko'rsatilgan bo'lib, kuchaytirilgan yorug'lik so'rilishini aks ettiradi.

Tipik materiallar: oddiy soda-ohakli oynalar (2–3 mm) yoki yuqori haroratli jarayonlar uchun borosilikat oynalar. TCO misollar: ITO (indiy-qalay oksidi), AZO (alyuminiy qo'shilgan ZnO), FTO (ftor qo'shilgan SnO₂), va doplangan SnO₂. *Diagramma – shisha asosidagi yupqa parda (ikki tomonlama shaffof orqa kontakt bilan).*

Asosiy parametrlar:

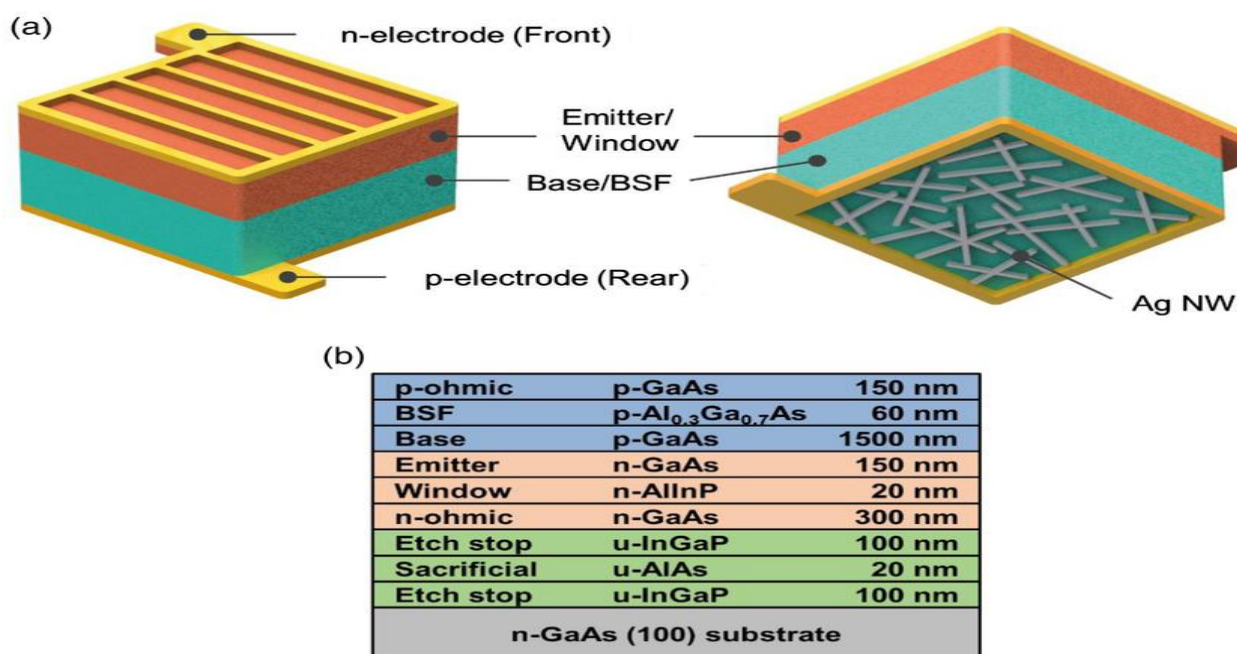
- **TCO qatlami varaq qarshiligi (R_{sh}):** optik shaffoflik va elektr o'tkazuvchanlik o'rtasidagi muvozanat ko'rsatkichi; odatiy R_{sh} qiymatlari qalinlik va materialga qarab 5–50 Ω/kv oralig'ida.
- **TCO qatlami qalinligi:** odatda 100–500 nm (optik va elektr xossalari o'rtasidagi muvozanatga mos ravishda tanlanadi).
- **Ikki tomonli xususiyatlari:** har ikkala tomonida shisha + TCO qatlamlari qo'llangan holatda yupqa parda fotoelementlari tabiatan ikki tomonlama bo'ladi, chunki yorug'lik absorberga orqa tomondan ham yetib boradi.
- **Metall substratlarda (egiluvchan po'lat yoki polimer):** old tomonda shaffof yuqori TCO, orqa tomonda esa TCO yoki yupqa metall panjara qo'llanib, ikki tomonlama ishlash ta'minlanadi.
- **Afzalliklari:** mustahkam mexanik tayanch; shisha materialining qo'shimcha qiymati past (yuza birligi uchun arzon); keng maydonli jarayonlarga mos (masalan, egiluvchan substratlar uchun **roll-to-roll** texnologiyasi).
- **Cheklovlari:** TCO materiallarining o'tkazuvchanligi metall kontaktlarga qaraganda pastroq (shu bois qo'shimcha metall panjaralar talab etiladi); TCOlar agressiv kimyoviy yoki termal jarayonlarda degradatsiyaga uchrashi mumkin; issiqlik kengayish koeffitsientlarining mos emasligi stresslarga olib kelishi mumkin.
- **Tipik qalinliklar:** shisha plitalar 1,8–3,2 mm; TCO qatlamlari 0,1–0,5 μm .

GaAs yupqa parda

- **Umumiy qo'llanilishi:** yuqori samarali elementlar (kosmik va konsentrator PV); GaAs yupqa parda elementlari odatda **MOCVD** yoki **MBE** usullari bilan kristall moslashtirilgan substratlar (GaAs, Ge) ustiga o'stiriladi.
- **Ikki tomonli xususiyatlari:** GaAs absorber qatlami juda yupqa (bir necha mikrometr), shuning uchun shaffof orqa kontakt (TCO) yoki epitaksial qatlamni ajratib olib shaffof tayanchga o'tkazish orqali ikki tomonli elementlar yaratish mumkin.

- **Epitaksial ajratish (ELO):** qimmat substratlarni qayta ishlatish va o‘stirilgan yarimo‘tkazgich qatlamini shaffof tayanchga ko‘chirish orqali ikki tomonlama ishlashga sharoit yaratadi.
- **Afzalliklari:** juda yuqori samaradorlik (bir necha mikrometr qalinlikda ham); a’lo material sifati va radiatsiyaga chidamlilik (kosmik qo‘llanmalarda).
- **Cheklovlari:** epitaksial o‘stirish va substratlar tannarxining yuqoriligi; murakkab ishlab chiqarish jarayoni; hozirda katta maydonlarda iqtisodiy samarali ishlab chiqarish cheklangan.
- **Tipik qalinliklar:** aktiv GaAs absorber $< 5 \mu\text{m}$; qo‘shimcha buffer va kontakt qatlamlari bir necha μm ga teng bo‘lishi mumkin.

Diagramma – shaffof shisha asosidagi GaAs yupqa parda elementi (ikki tomonli).



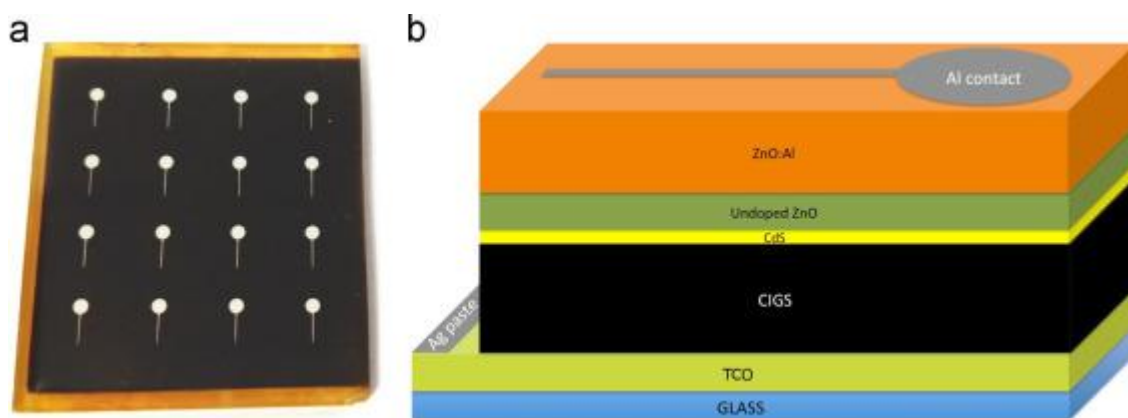
7-rasm. a) GaAs ikki tomonli yupqa parda quyosh elementi sxemasi. Orqa tomonda tartibsiz joylashgan Ag nanotrubbkalar va metall shina p-elektroдни hosil qiladi, old tomonda esa muntazam panjara shaklidagi old elektrod mavjud. b) MOCVD usulida o‘stirilgan batafsil geterotuzilma tasviri. Nosimmetrik p–n o‘tish – n-GaAs emitter va p-GaAs asos qatlamdan iborat bo‘lib, butun struktura rangsiz poliamid plyonkaga ko‘chirilgach teskari o‘girilishi hisobga olingan holda **invert** tartibda o‘stirilgan. (DOI: [10.1002/adpr.202100297](https://doi.org/10.1002/adpr.202100297))

CIGS (Cu(In,Ga)Se₂)

- **Umumiy qo‘llanilishi:** yupqa parda egiluvchan va qattiq modullar (shisha, metall folga, polimerlar).

- **Bifacial CIGS** atamasi shisha substrat ustida ishlab chiqarilgan, old va orqa tomonlardan yorug'lik yuta oladigan mis-indiy-galliy selenid (CIGS) quyosh elementlarini anglatadi. Bu texnologiya qiziqarlidir, chunki u to'g'ridan-to'g'ri quyosh nuri, qaytgan yorug'lik (albedo) va tarqalgan yorug'likni qo'shimcha ravishda yig'ib, umumiy energiya ishlab chiqarishni oshirishi mumkin. Asosiy qiyinchiliklar shaffof orqa kontaktni ishlab chiqish va CIGS qatlami bilan shaffof orqa kontakt oralig'ida hosil bo'luvchi GaOx qatlamini minimallashtirishdir.
- **Ikki tomonli xususiyatlari:** CIGS qatlamini shaffof shisha + old TCO qatlami ustiga o'stirib, orqa yoritish (shisha/TCO orqa tomonidan yoki shaffof polimer orqa qoplama orqali) ham quvvatga qo'shilishi mumkin. Egiluvchan metall folga substratlarda esa orqa tomonga shaffof TCO qatlami va metall panjara qo'shib, ikki tomonlama ishlashga erishiladi.
- **Afzalliklari:** bant oralig'ini moslash mumkinligi, yuqori so'ruvchanlik ko'effitsienti, egiluvchan substratlar bilan mosligi.
- **Cheklovlari:** element tarkibidagi indiy va galliy kamyoqligi; ishlab chiqarishda CdTe va Si texnologiyalariga nisbatan takrorlanuvchanlik va keng ko'lamga chiqarish qiyinligi.
- **Tipik qalinliklar:** CIGS absorber qatlami 1–2 μm ; buffer (CdS) ~50 nm; shisha substrat 1,8–3,2 mm.

Diagramma – shisha asosidagi ikki tomonli CIGS elementi.



8-rasm. a) Standart sinov namunasi mexanik chizish orqali 16 ta 0,05 sm² elementga ajratilgan; b) Quyosh elementlari arxitekturasini sxematik tasviri.

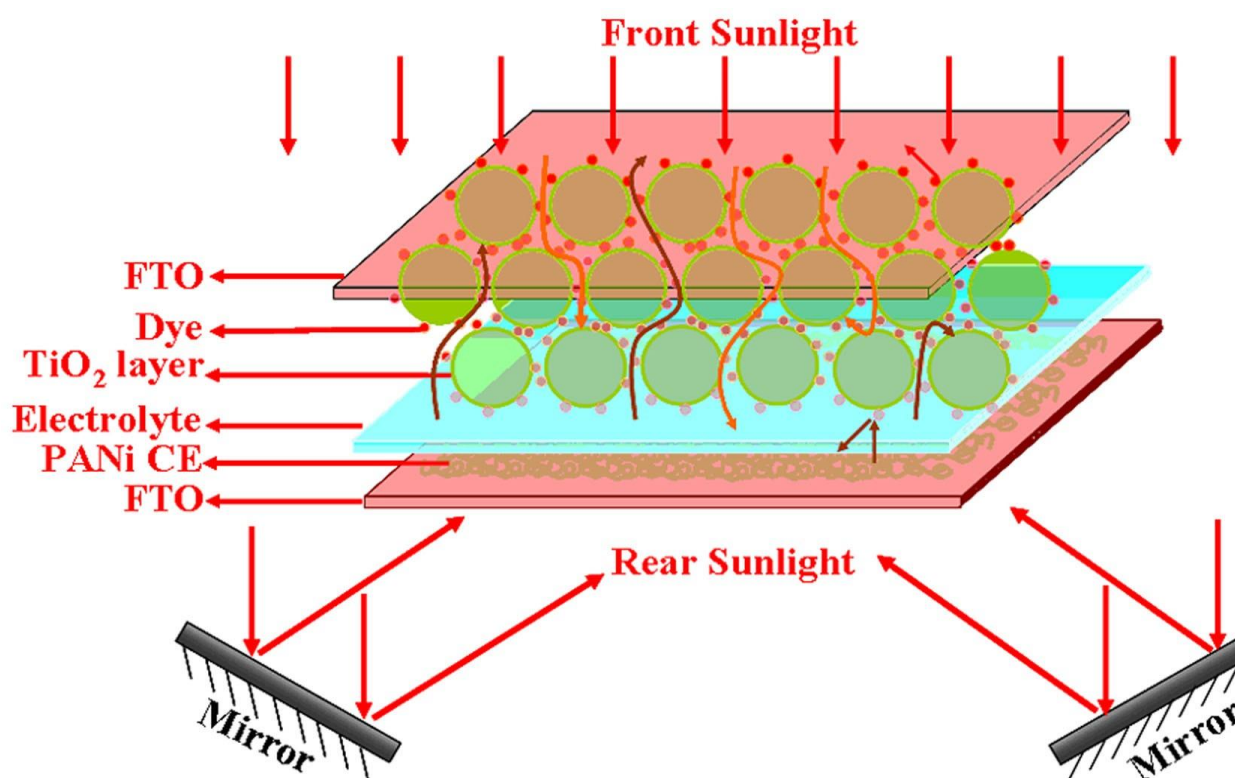
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.10.048>

Bo'yoq bilan sezgirlangan quyosh elementlari (DSSC)

- **Umumiy qo'llanilishi:** yarim shaffof binoga integratsiyalangan PV, agrifotovoltaika, zaif yorug'lik sharoitlari.
- Ikki tomonlama **DSSC** lar old va orqa tomonlardan yorug'likni yutish uchun mo'ljallangan bo'lib, aks etgan yorug'likdan foydalanish orqali umumiy fotoelektrik aylantirish samaradorligini oshiradi. Asosiy rivojlanishlar qatoriga shaffof qarshi (qarama-qarshi) elektrodni qo'llash, fotonod

tuzilmasini sochuvchi qatlamlar bilan optimallashtirish, ham old, ham orqa yoritishda samarali ishlaydigan elektrolitlar va bo'yoqlarni takomillashtirish kiradi. Bu elementlar binoga integratsiyalashgan PV (BIPV) tizimlari va ichki muhitlar kabi qo'llanilishlar uchun istiqbolli hisoblanadi.

- **Tuzilish va materiallar:** shisha substrat + TCO qoplama, bo'yoq bilan sezgirlangan TiO_2 nanozarrachali plyonka (10–20 μm), elektrolit (suyuq yoki yarim qattiq), va qarshi elektrod (TCO shisha ustiga platina yoki grafit qoplama).
- **Ikki tomonli xususiyatlari:** DSSC konstruksiyasi tabiatan ikki tomonlama rejimga juda mos – elementning har ikkala tomoni shaffof bo'lishi mumkin va u yorug'likni istalgan yo'nalishdan qabul qila oladi. Agar qarshi elektrod va orqa TCO qatlami shaffof bo'lsa, orqa yoritishdan olinadigan chiqish old tomonnikiga juda yaqin bo'ladi.
- **Shaffof qarshi elektrodlar:** tadqiqotlar orqa tomondan yorug'likning fotonodga o'tishiga imkon beradigan shaffof yoki yarim shaffof qarshi elektrodlar (CE) yaratishga qaratilgan – masalan, polianilin, uglerod nanotubalar yoki metall selenidli qotishmalar asosida.
- **Optimallashtirilgan fotonodlar:** fotonod tuzilmasini asosiy TiO_2 qatlamiga qo'shimcha sochuvchi qatlam qo'shib yaratish yorug'lik yig'ilimini oshiradi. Sochuvchi qatlam nurning yo'lini uzaytirib, yutilish hajmini ko'paytiradi, ayniqsa orqa tarafdin tushayotgan nurlar uchun.
- *Takomillashgan elektrolitlar:* old va orqa yoritish sharoitida barqaror va yuqori samarali elektrolitlarni topish ustida tadqiqotlar davom etmoqda. Kobalt asosidagi elektrolitlar o'rganilmoqda; elektrolitning o'zi yorug'likni yutishini kamaytirish orqali orqa taraf ish samaradorligini oshirishga e'tibor qaratilmoqda.
- **Afzalliklari:** kam yorug'lik sharoitida yaxshi ishlash, kerakli shaffoflik darajasini ta'minlash imkoni (estetik), past haroratli texnologik jarayon.
- **Cheklovlari:** uzoq muddat barqaror emas (suyuq elektrolitlar tufayli); eng yuqori samaradorligi pastroq (odatda <15%); elementlarni germetik muhrlash qiyin.
- **Tipik o'lchamlar:** TiO_2 plyonkasi qalinligi 5–20 μm ; elektrolit qatlami ~25–100 μm ; shisha qatlami bir necha mm.



9-rasm. Shaffof PANi qarshi elektrod va odatiy TiO₂ fotonod kombinatsiyasidan tashkil topgan ikki tomonli DSSC (DOI: 10.1038/srep04028)

Asos material (Substrat) → ikki tomonli foydalanish xususiyatlari bo'yicha qisqacha jadval:

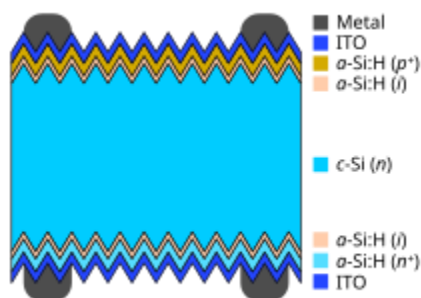
Asos material	Yutuvchi qatlam qalinligi	Ikki tomonlama imkon beruvchi element	Afzalliklari	Kamchiliklari
Monokristalli Si	80–220 μm (plastina)	Orqa passivatsiya + selektiv kontaktlar	Yuqori samaradorlik, texnologiya pishgan	Narxi yuqori, juda yupqa bo'lganda mo'rt
Polikristalli Si	120–220 μm	c-Si bilan bir xil	Tannarxi pastroq	Samaradorligi past, don rekomb.
Shisha + TCO (yupqa parda)	Shisha 1,8–3,2 mm; TCO 0,1–0,5 μm	Har ikki tomonda shaffof kontaktlar	Katta maydonli ishlab chiqarish, shaffof	TCO o'tkazuvchanligi past, degradatsiya muammosi
GaAs yupqa parda	< 5 μm	Epitaksial ajratib olish	Juda yuqori samara, juda yupqa	Juda qimmat, murakkab

<i>Asos material</i>	Yutuvchi qatlam qalinligi	Ikki tomonlama imkon beruvchi element		Afzalliklari	Kamchiliklari
		orqali shaffof tayanch			
CdTe	~2 μm	Shaffof kontakt shisha	orqa /	Yutuvchi qatlam ingichka, arzon	Cd toksik, Te kamyob
CIGS	1–2 μm	Shaffof kontakt shisha folga	orqa / yoki	Egiluvchan, taqiqlangan zona oralig'i sozlanadi	In/Ga kamyob, keng ko'lamda qiyin
DSSC	TiO ₂ 5–20 μm ; elektrolit 25–100 μm	Har tomonda shaffof TCO	ikki	Boshdan ikki tomonli, kam yorug'likda samarali	Samaradorligi past, barqarorlik muammosi

Kremniy element arxitekturalarining ikki tomonli shakllari

Barcha asosiy kremniy quyosh elementi arxitekturalarining ikki tomonlama talqinlari mavjud. Asosiy texnologiyalar qatoriga quyidagilar kiradi:

Geteroo'tish (HJT/HIT) elementlar: Bu elementlar monokristalli kremniy plastinasini har ikkala yuzasidagi juda yupqa amorf silikon qatlamlari va shaffof o'tkazgich oksid (TCO) qatlami bilan birlashtiradi. HJT elementlari tabiatan orqa tomondan ham yorug'lik o'tkazadi (orqa TCO qatlami orqali), natijada ikki tomonlama ko'rsatkichlari juda yuqori (ko'pincha >90%) bo'ladi. HJT bugungi kunda kremniy elementlari orasida laboratoriya va tijorat samaradorligi bo'yicha eng yuqori ko'rsatkichlarni namoyish etmoqda, bu a'lo darajadagi yuzaviy passivatsiya hisobiga erishilmoqda. Masalan, 2023-yilda tijorat HJT elementlarining o'rtacha samaradorligi ~25,0% ni tashkil etdi (solishtirish uchun, p-turi PERC elementlarida ~23,3%). HJT elementlari rekombinatsiya yo'qotishlarining pastligi tufayli odatda >700 mV dan yuqori **Voc** (ochiq zanjir kuchlanishi) va yuqori **FF** (to'ldirish koeffitsienti) qiymatlariga ega. Ikki tomonlama ishlatishda HJT simmetrik tuzilishi (ikkala yuzada amorf Si qatlamlari mavjud) tufayli ~90–95% dan yuqori ikki tomonlama ko'rsatkichga erishadi, ya'ni orqa tomondan samaradorligi old tomondagiga deyarli teng bo'ladi. Amaliy tajribalarda, old va orqa yuzasi shishadan iborat HJT modullari tandem/perovskit uyg'unligida laboratoriya sharoitida 30% dan oshiq samaradorlikka erishmoqda.



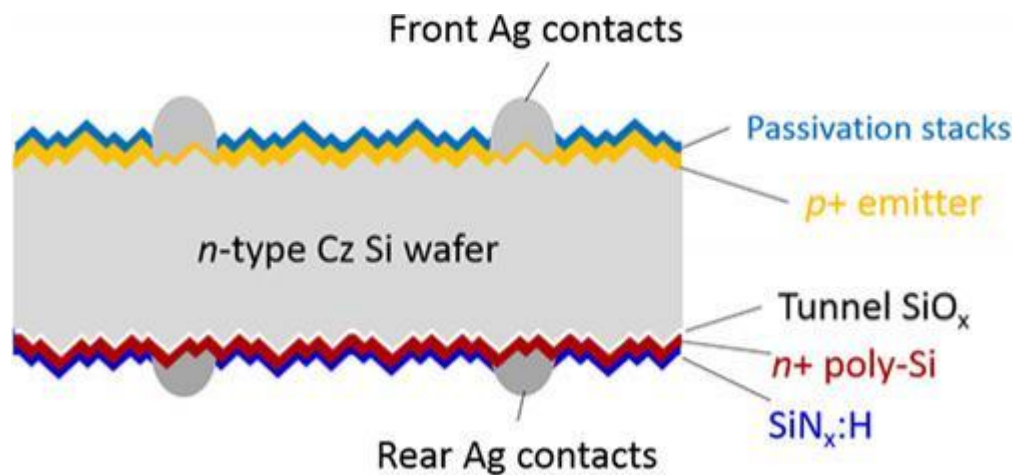
10-rasm. Ikki yuzli kremniyning geteroo'tishli quyosh elementi qatlamlarining ko'ndalang kesimi sxemasi

10-rasm: Kremniyning hetero-birikmasi (SHJ) quyosh elementi sxemasi. n-tipli kristalli Si plastinasi old va orqa amorf-Si passivatsiya qatlamlari, TCO va panjara chiziqlari bilan qoplangan. Ushbu nosimmetrik dizayn juda yuqori ikki tomonli quyosh elementini ta'minlaydi (ko'pincha >90%)[3]

Passivlangan emiter va orqa kontakt (PERC): PERC — keng tarqalgan yuqori samarali p-turi element arxitekturasi bo'lib, u old tomon emiteriga qo'shimcha ravishda orqa tomonda dielektrik passivatsiya qatlami va qisman alyuminiyli orqa qoplamani (BSF) o'z ichiga oladi. Standart PERC elementida orqa tomonda uzluksiz Al qoplama bo'lib, bu dizaynni monofacial (bir tomonlama) qiladi. Ammo PERCni ikki tomonlama shaklga o'tkazish nisbatan sodda: orqa tomondagi uzluksiz Al qoplamani naqshli holda qo'llash yoki butunlay olib tashlash orqali yorug'likning kremniyga o'tishiga yo'l beriladi (odatda Al faqat ma'lum nuqtalarda yoki panjara shaklida qoldirilib, qolgan qismi ochiq bo'ladi). Boshqacha aytganda, ikki tomonli PERCda monofacial PERCning metallizatsiyagacha bo'lgan barcha jarayonlari bir xil, faqat orqa elektrod naqshida o'zgarish kiritilib, orqa tarafdin yorug'lik yutilishi ta'minlanadi[5]. Natijada, ikki tomonli PERC elementlari odatda old tomonda ~19,4–21,2% samaradorlikka (masalan, 19,4–21,2%[14]), orqa tomonda ~16,7–18,1% samaradorlikka ega bo'ladi. Ikki tomonlama ko'rsatkich ~70–80% atrofida (chunki orqa tomon kamroq yorug'lik oladi va qolgan metall qisman soyalanishga sabab bo'ladi). Shunga qaramay, ikki tomonli PERC modullari (masalan, Trina, LONGi, JA Solar kabi kompaniyalarning 5-10 shinali dizaynlari) juda keng tarqalgan va tejamli. Ular PERCning pishgan texnologik jarayonidan (arzon, yuqori unumli) deyarli to'liq foydalanadi, ikki tomonlama bo'lish uchun faqat mayda o'zgartirishlar talab etiladi[5]. Zamonaviy ikki tomonli PERC modullari ham 22–23% atrofida modul samaradorligiga erisha olmoqda. **4a-rasmda** ikki tomonli PERC elementining kesim ko'rinishi misol tariqasida ko'rsatilgan bo'lib, orqa metall qoplama naqshli usulda qo'llangani tasvirlangan.

Tunnel oksidli passivlangan kontakt (TOPCon): TOPCon — ilg'or n-turi element arxitekturasi bo'lib, unda ultrayupqa kremniy(IV) oksidi qatlam ustiga doplangan polikremniy qatlami yotqizilib, "tunnel oksidli passivlangan" orqa kontakt hosil qilinadi. Bunday tuzilma (old yuzada selektiv borli emitter va n-turi (fosforli) TOPCon orqa qatlam kombinatsiyasi) kontaktlardagi rekombinatsiyani

keskin kamaytiradi. TOPCon elementlari laboratoriyada doimiy ravishda 25% dan yuqori samaradorlik ko'rsatmoqda (p-turi TOPCon elementlari ishlab chiqarishda o'rtacha ~24,9% ga erishdi). N-turi bazaviy kremniy LID (yorug'likka induktsiyalangan degradatsiya) ga uchramaydi va TOPCon elementlarida harorat koeffitsienti p-turi elementlarga nisbatan yaxshiroqdir. Muhimi, ikki tomonlama foydalanish uchun TOPConni orqa tomonga ham TCO qatlami va metall panjara qo'llab tayyorlash mumkin. Natijada TOPCon elementlarining orqa tomon sezgirligi PERCga qaraganda yuqoriroq bo'ladi: dala o'lchovlari ikki tomonli TOPCon elementlari uchun ~75–76% ikki tomonlama ko'rsatkich (PERC uchun ~64%) qayd etdi[7]. Real sharoit sinovlarida ikki tomonli TOPCon modullari PERCga nisbatan yuqori hosil ko'rsatdi: bir sinovda TOPCon modulining hosili xuddi sharoitdagi PERCnikidan ~5,6% ortiq, va HJT modulining hosilidan ~2% kam bo'ldi[7]. TOPConning yuqori samaradorlik va yaxshi ikki tomonlama yutuk uyg'unligi uni yangi yuqori samarali ikki tomonli panellarda yetakchi tanlovga aylantirmoqda.



11-rasm. n-turi TOPCon quyosh elementi (industriyal) konsepsiyasi.

11-rasm. TOPCon quyosh elementining sxematik tuzilishi. n-turi Si plastinasining orqa tomonida yupqa tunnel oksidi (+ doplangan poly-Si) passivatsiya qatlami mavjud. Old va orqa yuzalarida tekstura hosil qilingan bo'lib, har ikkala tomonda p–n o'tish va metall kontaktlar mavjud – bu esa ikki tomonlama yorug'lik yig'ilishini ta'minlaydi.

Boshqa kremniy variantlari: Bir qator tor sohalardagi yoki yangi arxitekturalar ham ikki tomonlama modullarda qo'llanilmoqda. Bularga PERT (passivlangan emitter, orqasi to'liq diffuziyalangan – PERCning bir turi), PERL (mahalliy bor diffuziyali), va IBC (o'zaro birikkan orqa kontaktli) elementlar kiradi. Masalan, PERT elementlari old tomonda ~19,5–22,0% samaradorlikka (orqa tomonda ~17–19%) va ~80–90% ikki tomonlama ko'rsatkichga erishgan (manbalar [18][19]). PERL ~19,8% (old tomonda) va ~80–90% ikki tomonlama ko'rsatkichga erishganligi ma'lum[19]. IBC elementlarida old yuzada umuman metall panjara yo'qligi sababli nazariy jihatdan yuqori ikki tomonlama ko'rsatkichlar (~70–80%) mumkin, va laboratoriya IBC elementlari 23%+ samaradorlikka erishgan[2]. Biroq, bu arxitekturalarning murakkabligi va qimmatligi ularning bozor ulushini cheklaydi. Ushbu misollar ko'rsatmoqdaki, deyarli barcha zamonaviy element arxitekturalari

ikki tomonlama ishlashga moslashtirilishi mumkin – buning uchun har ikkala yuzada shaffof kontaktlar va passivatsiya qatlamlari ta'minlansa bas.

1-jadval. Turli kremniy element texnologiyalarining ikki tomonli talqinlaridagi odatiy samaradorlik va ikki tomonlama ko'rsatkichlari (manbalar kvadrat qavsda keltirilgan). "Ikki tomonlama ko'rsatkich" – orqa tomon samaradorligining old tomonnikiga nisbatan foiz ifodasidir.

Element turi	Old samaradorlik (%)	Orqa samaradorlik (%)	Ikki tomonlama koeffitsient (%)
PERC (p-turi)	19,4–21,2 [14]	16,7–18,1 [14]	70–80 [14]
PERT/PERL (p-turi)	19,5–22,0 [18]	17–19 [18]	80–90 [18][19]
IBC (n-turi)	~23,2 [20]	– (orqa kontaktlar)	70–80 [20]
HJT/HIT (n-turi)	~24,7 [9]	~24,7 (deyarli teng)	95–100 [10]
TOPCon (n-turi)	>25 (lab.)	~22–24 (odatda)	75–85 [16]

Elementni tayyorlash usullari

Umumiy ikki tomonli element ishlab chiqarish: Oddiy monofacial elementni ikki tomonlama qilish odatda yorug'likning har ikki tomondan yutilishini ta'minlaydigan qo'shimcha yoki modifikatsiyalangan bosqichlarni talab etadi. Asosiy o'zgarishlar qatoriga ikki yuzani doping qilish va metallizatsiya naqshini moslashtirish kiradi:

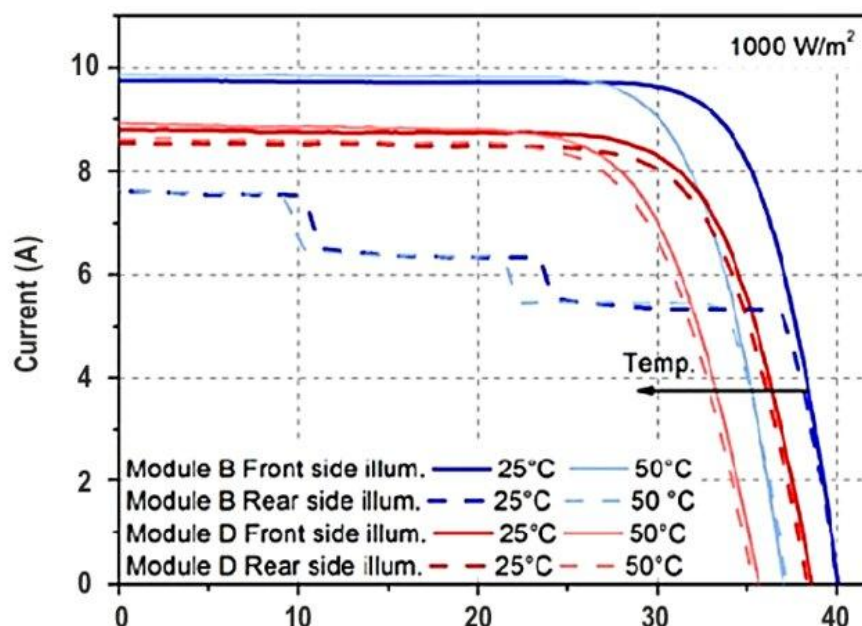
- **Ikki taraflama p–n o'tishlar:** Standart (bir tomonlama) p–n element faqat bitta yuzada p–n o'tish hosil qilishni talab qilsa (masalan, bir tarafda fosfor diffuziyasi va orqada to'liq Al qoplamasi), ikki tomonli element har ikkala yuzada turlicha doping qo'llashni talab qiladi. Masalan, bir usulda bir vaqtning o'zida bor (old yuzada p⁺ emitter hosil qilish uchun) va fosfor (orqa yuzada n⁺ emitter uchun) diffuziyasi amalga oshiriladi[2]. Yana bir yondashuv – ion implantatsiyasi bo'lib, u har ikki yuzani minimal termal yuklama bilan aniq doping qilish imkonini beradi. Har qanday holatda ham ikki tomonli elementlar odatda nosimmetrik doplashga ega: odatda old yuzada o'ta ingichka, yuqori dopingli emitter qatlami, orqa yuzada esa nisbatan kam dopingli qatlam bo'ladi – bu har ikkala tomondan optimal ishlash uchun tanlanadi.
- **Yuza passivatsiyasi va ARC:** Har ikkala yuzada yuqori sifatli passivatsiya (yuzadagi rekombinatsiyani minimallashtirish maqsadida) va aks ettirishga qarshi qoplamalar bo'lishi lozim. Masalan, TOPCon elementlarida old yuzada SiO₂/Al₂O₃/SiN_x staki, orqa yuzada SiO₂/poli-Si/SiN_x staki qo'llanadi[8]. HJT elementlari ikki tomonda ham intrinsic a-Si:H qavatlaridan foydalanadi. Har ikkala tarafga ilg'or AR qoplamalar (masalan, ikki qatlamli qoplama yoki mikrotekstura) qo'llanib, maksimal optik o'tkazuvchanlik ta'minlanadi. Xulosa qilish mumkinki, metallizatsiyaga qadar bo'lgan ishlab chiqarish

bosqichlari monofacial elementlarnikiga juda o'xshash; farqlar asosan orqa tomondagi jarayonlar va orqada qo'shimcha shaffof tuzilmalar qo'shilishidadir.

- **Orqa kontaktlar:** Orqa tarafdagi metall kontakt naqshi juda muhim. Ikki tomonli PERCda orqadagi alyuminiy endi uzluksiz qatlam bo'lib qolmaydi; uning o'rniga naqshli orqa kontakt ishlatiladi. Odatda orqa yuzaga lokal Al panjara bosma pastalar yordamida (past haroratli pishirish orqali) yoki elektropletirlash yo'li bilan hosil qilinadi, kontaktlar orasida esa ochiq kremniy maydonlari yorug'lik o'tishi uchun qoldiriladi[5]. Bu usul aniq **screen-printing** yoki fotolitografiyani talab qiladi, natijada tok o'tkazuvchanligi va optik ochiqlik muvozanatini ta'minlaydigan bir tekis panjara naqshi hosil qilinadi. HJT va TOPCon ikki tomonli elementlarida orqa yuzada yupqa o'tkazuvchan oksid (TCO) qatlami tatbiq etiladi, so'ng nozik metall panjaralar qo'llanadi; bu yerda kumush pastasini tejash maqsadida mis qoplama (elektrokaplama) texnikasi tobora keng qo'llanmoqda – bunda o'yib hosil qilingan asos qatlamlarga mis elektropletirlab, yuqori o'tkazuvchanlikka erishiladi.
- **Harorat rejimi va uskunalari:** E'tiborga loyiq jihati, n-turi HJT va TOPCon ishlab chiqarish liniyalari juda yuqori haroratli bosqichlarni o'z ichiga olmaydi (masalan, yuqori haroratli diffuziyalar yoki metallizatsiya qotirish pechlari yo'q). HJT odatda $<250\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratlarda PECVD va sputtering jarayonlaridan foydalanadi[4], bu termik stress va energiya sarfini kamaytiradi. TOPCon texnologiyasi ingichka oksid qatlami hosil qilish ($\sim 10\text{ nm SiO}_2$, $\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ atrofida) va uning ustiga polikremniy yotqizishni o'z ichiga oladi, ammo bu bosqichlar ham PERC diffuziyalaridagi $\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ga nisbatan mo'tadil haroratlarda bajariladi. Taqqoslash uchun, p-turi PERC elementlari yuqori haroratli fosfor diffuziyasi va alyuminiy pishirish pechini talab etadi. Xulosa qilib aytganda, ikki tomonli variantlar monofacial analoglariga nisbatan bor-yo'g'i bir-ikkita qo'shimcha maska/yoki jarayon bosqichlarini qo'shishni talab etadi – bu esa ko'plab zavod liniyalarini katta investitsiyalarsiz ikki tomonlama ishlab chiqarishga moslashtirishga imkon beradi.

Ishlash ko'rsatkichlari va I–V xususiyatlari

Har qanday quyosh elementining (ikki tomonli yoki bir tomonlama) ishlash samaradorligi uning tok-kuchlanish (I–V) xarakteristikasi yordamida aniqlanadi. Quyida **12-rasmda** kremniy elementining odatiy I–V egri chizig'i tasvirlangan.



12-rasm. Ikki tomonli quyosh elementlari uchun I-V egrilik chizig'i (doi: <https://doi.org/10.1109/jphotov.2018.2834625>)

12-rasmda odatiy I–V va tegishli P–V (quvvat-kuchlanish) egri chiziqlari ko'rsatilgan. Ochiq zanjir nuqtasi (V_{oc} , $I = 0$), qisqa tutashuv nuqtasi (I_{sc} , $V = 0$) va maksimal quvvat nuqtasi (V_{mp} , I_{mp}) belgilangan. Samaradorlik P_{max}/P_{in} ga teng, to'ldirish koeffitsienti esa $(V_{mp} \cdot I_{mp})/(V_{oc} \cdot I_{sc})$ formula orqali topiladi[24]. (Paralel ulangan elementlar yoki modullarda bu kattaliklar mos ravishda ortadi.)

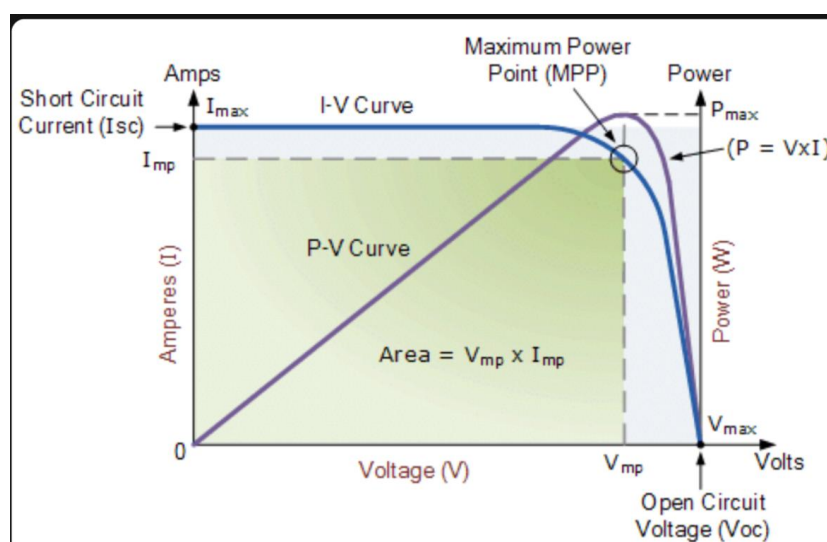
Ushbu egri chiziqdan aniqlanuvchi asosiy parametrlar:

- **Qisqa tutashuv toki (I_{sc}):** tashqi zanjir qisqa tutash bo'lgandagi tok ($V = 0$ dagi tok). Bu kattalik element tomonidan yutilgan yorug'lik miqdoriga proporsionaldir. Ikki tomonli elementlar faqat old taraf yoritilgandagiga qaraganda orqa yoki birga yoritilganda yuqoriroq I_{sc} ko'rsatadi.
- **Ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}):** chiqish ochiq bo'lgandagi kuchlanish ($I = 0$ dagi kuchlanish). Bu kattalik I_{sc} bilan va diodning to'yinish toki bilan logarifmik bog'liq; I_{sc} oshishi odatda V_{oc} ning bir oz oshishiga olib keladi.
- **Maksimal quvvat nuqtasi ($P_{max} = V_{mp} \times I_{mp}$):** I–V egri chiziqda elementdan olinadigan quvvatning maksimal bo'ladigan nuqtasi (tegishli V_{mp} va I_{mp} qiymatlari bilan).
- **To'ldirish koeffitsienti (FF):** P_{max} ning $(V_{oc} \cdot I_{sc})$ ga nisbatiga teng. Bu qiymat I–V egri chizig'ining "to'rtburchaklilik" darajasini o'lchaydi va yo'qotishlarni ifodalaydi; yaxshi kremniy elementlar uchun FF odatda 0,7–0,8 atrofida bo'ladi[24].
- **Foydali ish koeffitsienti (η yoki PCE):** elementning maksimal elektr quvvati (P_{max}) ning unga tushayotgan yorug'lik quvvati (P_{in} , odatda 1000 W/m^2) ga nisbatidir. Boshqacha aytganda, quvvatga aylantirish samaradorligi quyidagiga teng:

$$\eta = (V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF) / P_{in}$$

Odatiy ravishda, η foizlarda ifodalanadi.

Quyosh elementlari tavsifiga oid bir qo'llanmada V_{oc} , I_{sc} va FF kabi kattaliklar I–V egri chizig'idan olinishi qayd etilgan[9][10]. Ikki tomonli elementlar uchun esa odatda old taraf yoritilgandagi va orqa taraf yoritilgandagi I–V egri chiziqlarni alohida o'lchashadi. Ko'pincha umumlashtirilgan "ekvivalent samaradorlik" tushunchasi kiritilib, old va orqa yoritish hissalarini ularning nurlanish intensivliklari bo'yicha og'irliklanadi. (Amaliyotda, yerda o'rnatilgan ikki tomonli panellar uchun panellardan oqayotgan toklarni yig'indisini o'lchash yoki laboratoriyada bir vaqtda ikki tomondan yoritib sinov o'tkazish mumkin.) Bir nozik jihat shuki, **"ikki tomonlama ajratish darajasi"** deb ataluvchi effekt tufayli bir vaqtda yoritishdagi tok ba'zan alohida o'lchangan toklar yig'indisidan bir oz yuqori (yoki past) bo'lishi mumkin – bunga qurilma ichki qarshiliklari va V_{oc} dagi o'zgarishlar sabab bo'ladi[27].



13-rasm. Odatdagi kremniy elementining I-V egri chizig'i va mos keladigan P-V egri chizig'i

13-rasm. Kremniy elementining odatiy I–V egri chizig'i va mos keluvchi P–V chizig'i, unda I_{sc} , V_{oc} , maksimal quvvat nuqtasi va FF ko'rsatilgan[24]. (Paralel ulangan elementlar yoki modullar bu qiymatlarni oshiradi.)

Xulosa qilib aytganda, samaradorlik I–V parametrlaridan foydalanib hisoblab chiqiladi. Masalan, ikki tomonli PERC elementida $V = 0$ holatda $I_{sc} \approx 9,8$ A va $V_{oc} \approx 0,685$ V bo'lishi mumkin; agar $V_{mp} \approx 0,55$ V va $I_{mp} \approx 9,0$ A (156 mm o'lchamli element uchun) bo'lsa, $P_{max} \approx 4,95$ W ni tashkil etadi. 1000 W/m^2 yorug'lik tushirishda bu $(P_{max}/\text{maydon})/1000 \text{ W/m}^2 \approx 22,3\%$ samaradorlikka mos keladi.

Samadorliklarning taqqoslanishi va ikki tomonli quyosh elementlari yutuqlar

Ochiq maydonda o'tkazilgan va laboratoriya sinovlari PERC, HJT va TOPCon kabi ikki tomonli modullar o'rtasidagi farqlarni aniq ko'rsatadi:

Samaradorlik: HJT elementlari eng yuqori ichki samaradorlikka ega. Yuqorida qayd etilganidek, 2023-yilda tijorat HJT elementlari o'rtacha ~25% ga erishdi, n-turi TOPCon ~24,9%, p-turi PERC ~23,3% atrofida edi[3]. Laboratoriya natijalari bundan ham yuqori: masalan, HJT uchun yakka element samaradorligi 26,7% ga yaqinlashdi. Bundan tashqari, HJT qatlamlarini tandem (ikki qavatli) shaklda uyg'unlashtirib, ikki tomonlama yoritishda 30% dan oshiq natijalarga erishish mumkin. PERC elementlari tuzilishi sodda bo'lgani uchun ~22–23% atrofida maksimal ishlab chiqarish samaradorligiga ega. TOPCon (n-turi) elementlari esa bu oraliqni qisqartirib, yaqinda >25% samaradorlikdan o'tgan namunalarini ko'rsatdi.

Ikki tomonlama ko'effitsient: HJT elementlari nihoyatda yuqori ikki tomonlama ko'rsatkichga ega. A'lo darajadagi passivatsiya va shaffof orqa emiter tufayli uning orqa samaradorligi old tomonnikining 95–100% ini tashkil qilishi mumkin[3]. Bunga qarama-qarshi, PERC elementining orqa tomoni (qisman metall soylanishi va kamroq yorug'lik tufayli) oldining ~70–80% i atrofida bo'ladi[3]. TOPCon oraliq natijani ko'rsatadi: bir dala sinovida HJT modullari ~83%, TOPCon ~76%, PERC ~64% ikki tomonlama ko'rsatkich qayd etilgan bo'lib, bu ularning hosildagi farqlariga hamohang[7].

Maydondagi energiya hosili: Real sharoitda samaradorlikni eng yaxshi solishtirish muddatli energiya ishlab chiqarish orqali amalga oshiriladi. 2022-yilda Xitoyning Xaynan shahrida ochiq havoda o'tkazilgan bir tadqiqot bir xil sharoitda TOPCon, HJT va PERC modullarini to'g'ridan-to'g'ri qiyoslagan. Natijada HJT modullari PERCga qaraganda ~8,8% ko'p energiya ishlab chiqargan, TOPCon ~5,6% ko'p energiya bergan[7]. Bu yutuqlar asosan HJT/TOPCon modullarining yuqori ikki tomonlama yig'im ko'rsatkichi va yaxshiroq harorat xususiyatlari bilan bog'liq. Masalan, HJTning harorat ko'effitsienti ($\approx -0,23\%/^{\circ}\text{C}$) PERCnikidan ($\approx -0,29\%/^{\circ}\text{C}$) yaxshiroq, ya'ni HJT issiq kunda samaradorligini kamroq yo'qotadi[3]. Tadqiqotchilar HJTning ustunligini asosan uning orqa tarafdin yuqori yig'imga ega ekani va barqarorligi bilan izohlashgan; TOPConning PERCdan ustunligi esa orqa passivatsiya tufayli kam yorug'lik sharoitlarida samaraliroq ishlashi bilan bog'liq[7].

Ishlash sharoitlari: Tarqoq yoki qisman soyali yorug'lik sharoitida ham ikki tomonli panellar elektr energiyasi ishlab chiqarishda davom etadi. Hatto bulutli kunda yoki tong/kechqurun paytida ham, agar er yuzasi yorug'likni aks ettirsa, orqa tarafdagi elementlar qo'shimcha tok hosil qila oladi. Ikki tomonli modullarning birgalikda yoritish ostidagi I–V egri chizig'i bir xil old yorug'lik ostidagi monofacial modulga qaraganda yuqoriroq Isc (va ozroq yuqoriroq Voc) bilan ajralib turadi. Biroq, qisman soylanish sharoitida kutilgan yutuq pasayishi mumkin; shuning uchun tizim dizaynerlari odatda bypass diodlarini mohirlik bilan qo'llashadi.

Atrof-muhit omillari: Yuqori albedo muhitlar ikki tomonli modullarning ustunligini kuchaytiradi. Qorli sharoitlarda yoki yorqin oq tomlarda ikki tomonlama yutuqlar 30% dan oshgani kuzatilgan[3]. Aksincha, quyuq tuproqli joylarda qo'shimcha hosil atigi 5–10% atrofida bo'lishi mumkin. Agrifotovoltaika o'rnatmalarida ko'pincha ikki tomonli panellardan foydalanilib, o'simliklar va yer yuzasidan aks etgan yorug'lik ham qo'lga kiritiladi. Umuman, ikki tomonli modullar bir xil maydonda o'rnatilgan monofacial modullarga qaraganda ko'proq energiya

ishlab chiqaradi – bu loyiha iqtisodiyotini yaxshilaydi (ya’ni bir xil maydondan investitsiyaga yuqori qaytish beradi).

Samaradorlikni hisoblash va I–V xususiyatlari

Quyosh elementi samaradorligi (η) uning maksimal elektr quvvati chiqishining unga tushayotgan yorug‘lik quvvatiga nisbatidir. Matematik tarzda:

$$\eta = (V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF) / P_{in}$$

bu yerda V_{oc} – ochiq zanjir kuchlanishi, I_{sc} – qisqa tutashuv toki, FF – to‘ldirish ko‘effitsienti, P_{in} – tushayotgan yorug‘lik quvvati (masalan, 1000 W/m^2). Amaliyotda, I_{sc} , V_{oc} va FF qiymatlari o‘lchangan I–V egri chizig‘idan aniqlanadi. To‘ldirish ko‘effitsienti quyidagicha aniqlanadi:

$$FF = (V_{mp} \cdot I_{mp}) / (V_{oc} \cdot I_{sc})$$

bu yerda V_{mp} va I_{mp} – maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanish va tok qiymatlari[9]. Kristalli kremniy elementlari uchun odatiy FF qiymatlari 0,7–0,8 oralig‘ida bo‘ladi[9]. Demak, o‘lchangan I–V ma’lumotlaridan samaradorlikni bevosita hisoblab topish mumkin.

Ikki tomonli modullar uchun ko‘pincha old va orqa yoritishni birlashtirgan **“ekvivalent samaradorlik”** kiritiladi. Bunda old va orqa I–V xususiyatlari ularning nurlanish intensivitetlari nisbatida og‘irlanadi. Agar $I_{sc,front}$ va $I_{sc,rear}$ – mos ravishda old va orqa yoritishdagi qisqa tutashuv toklar (tegishli $V_{oc,f}$ va $V_{oc,r}$ bilan) bo‘lsa, umumiy (ikki tomonlama) maksimal quvvatdagi tok ($I_{mp,total}$) ichki qarshilik va kuchlanish o‘zgarishlari tufayli $I_{mp,f} + I_{mp,r}$ yig‘indisiga aniq teng bo‘lmaydi. Ba’zan birgalikdagi tok alohida o‘lchoqlar yig‘indisidan ozroq yuqori bo‘lishi mumkin – ajratish darajasi formulasiga muvofiq[2]. Amaliy tizimlarda muhandislar odatda modulni real albedo sharoitlarida sinab ko‘rib yoki kompyuter modelida simulyatsiya qilib, haqiqiy PCE qiymatini aniqlaydilar.

Xulosa qilib aytganda, V–I egri chiziq va undan topilgan parametrlari elementni to‘liq tavsiflaydi. Ikki tomonli elementlar ham xuddi shu fizika qonunlariga bo‘ysunadi: har ikkala yoritilgan p–n o‘tishlar qo‘shimcha fototok hosil qiladi. Old va orqa yoritishdan keladigan maksimal quvvatni hisoblash oddiy: agar old va orqa yoritish mustaqil bo‘lsa, qo‘pol hisobda $V_{mp} \approx 0,9 \cdot V_{oc}$ va $I_{mp} \approx 0,9 \cdot (I_{sc,front} + I_{sc,rear})$ deb olish mumkin (materialga qarab 0,8–0,95 ko‘effitsientlar bilan aniqlashtiriladi). Masalan, agar bir ikki tomonli PERC elementida $I_{sc(front)} = 10 \text{ A}$ va $I_{sc(rear)} = 7 \text{ A}$ bo‘lsa va $V_{oc} \approx 0,69 \text{ V}$ bo‘lsa, unda $V_{mp} \approx 0,6 \text{ V}$, $I_{mp} \approx (0,9 \times 10 + 0,9 \times 7) = 15,3 \text{ A}$ (faraz qilamiz) bo‘ladi, va $P_{max} \approx 9,18 \text{ W}$ chiqadi. 1000 W/m^2 yoritishda bu qiymat $\sim 22\%$ samaradorlikka to‘g‘ri keladi – bu o‘lchangan natijalar bilan qiyoslanadi. (Albatta, haqiqiy o‘lchoqlarda ketma-ket qarshiliklar, spektral tafovutlar va boshqa omillar ham hisobga olinadi.)

Organik va boshqa kremniysiz ikki tomonli elementlar

Hozirgi kunda ikki tomonli modullar asosan kremniyga asoslanadi, biroq organik va perovskit asosidagi ikki tomonli elementlar bo'yicha izlanishlar ham jadallashmoqda:

- **Organik quyosh elementlari (OQE):** An'anaviy organik PV elementlari (polimer yoki kichik molekulali yarimo'tkazgichlarga asoslangan) juda yuqqa va yarim shaffof qilib tayyorlanishi mumkin. Tadqiqotchilar har ikkala yuzasi shaffof elektrodli ikki tomonli organik elementlarni yaratdilar. Masalan, Çokduygulular va boshq. (2024) PtB7 polimer yutuvchi qatlami va $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{WO}_3$ shaffof kontakti bo'lgan organik elementda $\sim 0,94$ ikki tomonlama ko'rsatkichga (ya'ni orqa samaradorlik oldnikining $\approx 94\%$ iga teng) erishdilar[11]. Ularning elementlari taxminan 47% vizual o'tkazuvchanlikka (AVT) va old/orqa yo'nalishda $\sim 3,9\%$ samaradorlikka ega edi. Aslida, organik materiallarni simmetrik tuzilishda joylashtirib, har ikki tomondan deyarli teng ishlaydigan elementlar yaratish mumkinligi ko'rsatilmoqda[31]. Yana bir e'tiborlisi, Ren va boshq. (2024) orqa albedo 0,2 sharoitida 20,4% samaradorlikka ega organik ikki tomonli element haqida xabar berdi[12]. Ular ultra yuqqa kumush elektrodlar va maxsus aks ettirishga qarshi nanostrukturalar yordamida optik yo'qotishlarni minimallashtirdilar. 0,2 albedo sharoitida ushbu element birgalikdagi yoritishda 20,4% samaradorlikka erishdi[12] – bu yuqori samarali organik elementlarning ham qaytgan yorug'likdan samarali foydalanishi mumkinligini namoyish etadi. Ushbu yutuqlar yengil va egiluvchan ikki tomonli organik modullar (masalan, oynavand PV, IoT qurilmalari)ni yaratish real ekanini ko'rsatmoqda.
- **Perovskit va tandemlar:** Metall-galogenli perovskit quyosh elementlari odatda yarim shaffof bo'lib, ayni paytda eng tez rivojlanayotgan PV texnologiyasidir. Tadqiqotchilar perovskitni kremniy yoki boshqa perovskit qatlami bilan uyg'unlashtirgan ikki tomonli tandem elementlarni ham o'rganishga kirishdilar. Masalan, to'rt-ulinishli (4-terminal) ikki tomonli perovskit/kremniy tandemlari yuqori spektr qismini (perovskit qatlamda) va quyi spektr hamda albedoni (kremniy qatlamda) birgalikda qo'lga kiritishi mumkin. Bir modellashtirish shuni topdiki, yuqori qavatida $\sim 1,44$ eV bo'shliq kengligiga ega perovskit bo'lgan tandem modul 30% albedo sharoitida monofacial tandemba qaraganda $\sim 13,4\%$ ortiq quvvat ishlab chiqaradi[13]. Juda yuqori albedo holatlarda (80%), to'rt-ulinishli tandemlarning quvvat zichligi 495 W/m^2 dan ham oshishi mumkin[13]. To'liq perovskit tandem elementlari ham ikki tomonlama shaklda yasaldi; yaqinda bir maqolada ikki tomonlama yoritishda ekvivalent $\sim 29,3\%$ samaradorlikka erishilgani xabar qilindi[14]. Bu tandem konsepsiyalari ko'rsatmoqdaki, ikki tomonlama rejimni ko'p o'tishli (multi-junction) dizaynlar bilan birlashtirish orqali, ayniqsa qorli yoki aks ettiruvchi muhitlarda, bir qatlamli elementlarning nazariy chegaralaridan ancha yuqori samaradorlikka erishish mumkin.

- **Organik/kremniy tandemi:** Dastlabki izlanishlarda organik yuqori qavatli, kremniy pastki qavatli tandem elementlar ham, nazariy jihatdan, ikki tomonlama variantda ko‘rib chiqilmoqda, ammo hozircha tijoratga yaqin namunalar yo‘q.
- **Yangi kombinatsiyalashgan strukturalar:** Nazariy jihatdan, yuqori qatlami yupqa bo‘lgan har qanday tandem elementning pastki qatlamlari orqa yoritilishni qo‘shimcha foydaga aylantirishi mumkin. Masalan, yupqa parda CIGS yoki organik elementlarni kremniy ustiga joylashtirib, barchasini bir ikkita tandemli ikki tomonlama modulda integratsiya qilish hosilni oshirishi mumkin. Tandem PVning jadal rivojlanishida tizimni optimallashtirish jarayonida ko‘pincha ikki tomonlama ishlash rejimi ham hisobga olinmoqda.

Umuman olganda, ikki tomonlama dizayn prinsiplari kremniydan tashqari yangi materiallarga ham tatbiq qilinmoqda. Organiklar va perovskitlar kabi yangi materiallar atrof-muhit yorug‘ligini har ikki tomondan yig‘ish uchun ikki tomonlama strukturalarda muhandislik asosida yaratilmoqda. Bu yangi ikki tomonli elementlar hozircha kremniyga nisbatan pastroq samaradorlikka ega, biroq ular orqa yoritish muhim bo‘lgan qo‘llanilishlar (masalan, shaffof oyna panellari, egrilikka ega sirtlar) uchun yangi imkoniyatlarni ochmoqda.

Tandem va kombinatsiyalashgan ikki tomonli arxitekturalar

Ikki tomonli modullar qo‘shimcha yorug‘likni qo‘lga kiritishi tufayli, ular ko‘p o‘tishli (**tandem**) elementlar bilan juftlikda samaradorlikni yanada oshirishga xizmat qiladi. Tandem elementlarda yuqori qavat orqa tarafdin tushayotgan qo‘shimcha yoritishni ham yuta oladi. Ba’zi misollar:

- **Perovskit/kremniy tandemi:** Perovskit yuqori qatlami odatda yarim shaffof bo‘ladi. Monofacial tandemda pastki kremniy qatlam faqat yuqori qavat orqali filtrlangan quyosh nurini ko‘radi. Ikki tomonlama tandemda esa pastki element (kremniy) yer yuzasidan qaytgan yoritqichni ham qo‘shimcha ravishda qabul qiladi. Tadqiqotlar ko‘rsatadiki, 2-ulinishli perovskit/kremniy tandem elementi $\sim 1,44$ eV bo‘shliq kengligiga ega perovskit yuqori qatlami bilan, 30% albedo sharoitida, faqat old yuzadan yoritiladigan xuddi shu tandemga nisbatan $\sim 13,4\%$ ko‘proq quvvat ishlab chiqaradi[33]. To‘rt-ulinishli tandemlar (ayrim chiqishli) bundan ham ustun bo‘lishi mumkin; hisob-kitoblar 80% albedo holatida quvvat zichligi 495 W/m^2 dan oshishini ko‘rsatgan[13]. Bu shuni anglatadiki, ikki tomonlama tandem modullar (ayniqsa qorli yoki juda aks ettiruvchi sharoitlarda) 35–40% li modul samaradorligiga yaqinlashishi yoki hatto oshishi mumkin.
- **To‘liq perovskit tandemi:** Yaqinda to‘liq perovskit qatlamlardan iborat tandem elementlar ham ikki tomonlama rejimda yaratildi. Masalan, to‘rt-ulinishli “to‘liq perovskit” tandemi ikki tomonlama yoritishda ekvivalent $\sim 29,3\%$ samaradorlikka erishdi[14]. Bu qurilmalar perovskitlarning keng spektrni qamrash xususiyatidan foydalanib, orqa absorbent qatlam orqali uzun to‘lqinli hamda tarqoq yorug‘likni yutadi. Perovskit qavatlarini yarim shaffof

qilish imkoniyati ikki tomonlama dizaynni soddalashtiradi (faqat ikkala tomonda shaffof elektrodlar qo'yish kifoya).

- **Organik/kremniy tandemi:** Dastlabki tadqiqotlar organik yuqori element va kremniy pastki element kombinatsiyasini, ikki tomonlama tarzda, o'rganmoqda, biroq bunday yechimlarning tijoratga tatbiqi hali uzoq.
- **Yangi kombinatsiyalar:** Nazariy jihatdan, yuqori qatlami ingichka har qanday tandemda pastki qatlamlarining orqa yoritilishi ham qo'shimcha hosilga aylanishi mumkin. Masalan, yupqa parda CIGS yoki organik elementlarni kremniy ustiga qo'shib, barchasini ikki tomonlama modulga integratsiya qilish orqali quvvat hosilini oshirish mumkin. Tandem PV sohasining jadal rivojlanishida real tizim optimallashtirishida ikki tomonlama ishlash rejimi ham ko'zda tutilmoqda.

Ikki tomonlama modullar laboratoriya qiziquvchanligidan (1960–1970-yillar) 2020-yillarga kelib asosiy tijorat texnologiyasiga aylangani kuzatildi. Bugungi kunda barcha yuqori samarali kremniy element dizaynlari (HJT, TOPCon, PERC variantlari, IBC) – amalda – ikki tomonlama ko'rinishda ishlab chiqarilmoqda yoki ishlab chiqarilishi mumkin. Ikki tomonli modullarning asosiy foydalari – yuqori energiya hosili (ayniqsa aks ettiruvchi muhitlarda) va pastroq ish harorati tufayli kuchaygan samaradorlik bo'lib, bular ishlab chiqarish tannarxiga nisbatan uncha katta qo'shimcha xarajat talab etmaydi. Yuqorida ko'rganimizdek, geteroo'tish (HJT) elementlari simmetrik amorf Si kontaktlari bilan eng yuqori ikki tomonlama ko'rsatkichga ($\approx 95\%$) erishadi; PERC elementlarini orqa metallni naqshli qilish orqali ikki tomonlama qilish mumkin; TOPCon elementlari esa har ikkala yondashuvning afzalliklarini birlashtirib, orqa tomonda TCO kontaktlarini qo'llaydi[7][3]. Samaradorlikni hisoblash va I–V ko'rsatkichlarini tahlil qilish monofacial elementlar bilan bir xil tamoyillarga asoslanadi – samaradorlik I_{sc} , V_{oc} va FF orqali aniqlanadi[9][10].

Amaliy jihatdan, dala sinovlari HJT modullari PERC modullaridan $\sim 8\text{--}9\%$ yuqori hosil berishini, TOPCon esa PERCdan $\sim 5\%$ ustunligini tasdiqlagan[7]. Organik va perovskit ikki tomonli elementlar hozircha samaradorlikda kremniydan ortda bo'lsa-da, ikki tomonlama konsepsiya kremniydan tashqarida ham ishlashini namoyish etmoqda. 2030-yillarga kelib, yangi yirik PV loyihalarining aksariyati maydon birligidan maksimal energiya olish maqsadida ikki tomonlama panellardan foydalanishi kutilmoqda[1][2].

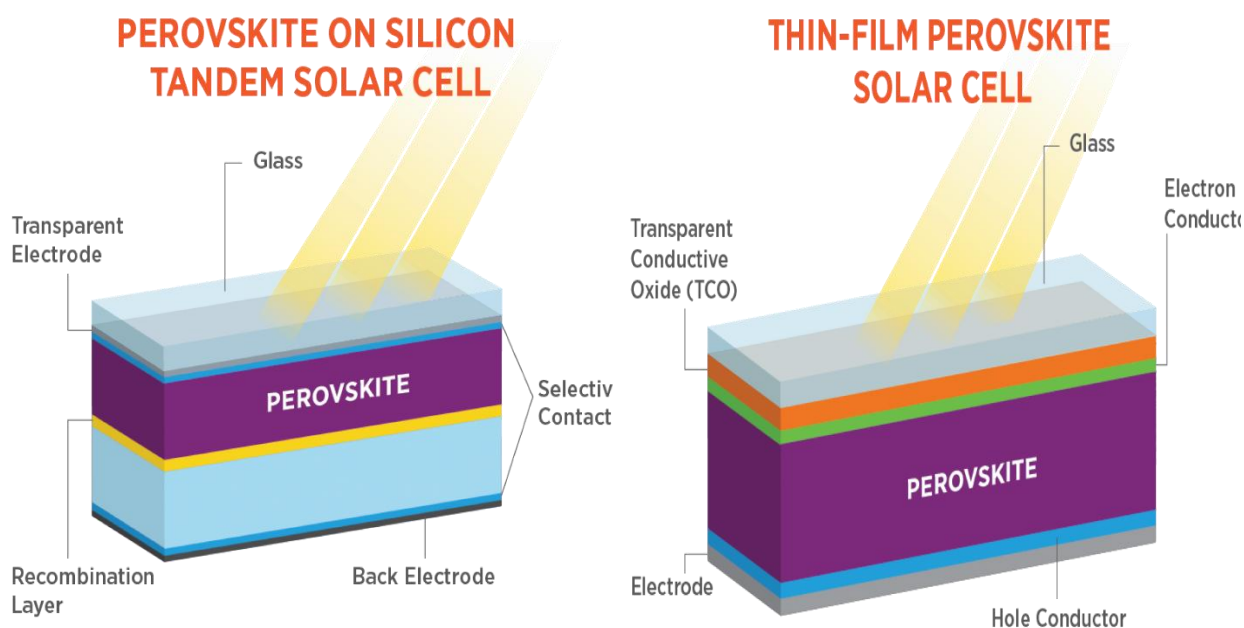
Foydalanilgan adabiyotlar:

- [1]] Bifacial Solar Panels Explained: All You Need to Know
<https://heavendesigns.in/bifacial-solar-panels/>
- [2] Bifacial solar cells
<https://www.oushangsolar.com/resources/bifacial-solar-cells.html>
- [3] Heterojunction solar cell - Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Heterojunction_solar_cell
- [4] Heterojunction (HJT) Solar Panels: How They Work & Benefits
<https://solarmagazine.com/solar-panels/heterojunction-solar-panels/>
- [5] China P Type Mono Bifacial PERC Solar Cell Suppliers & Manufacturers & Factory - Made in China - Dongshuo
<https://www.dsneg.com/solar-cells/p-type/p-type-mono-bifacial-solar-cell.html>
- [6] TOPCon Cell Technology: What is it and How it Works - Solar N Plus
<https://www.solarnplus.com/topcon-cell-technology-what-is-it-and-how-it-works/>
- [7] Energy yield analysis of different bifacial PV (photovoltaic) technologies: TOPCon, HJT, PERC in Hainan | Request PDF
https://www.researchgate.net/publication/360233545_Energy_yield_analysis_of_differnt_bifacial_PV_photovoltaic_technologies_TOPCon_HJT_PERC_in_Hainan
- [8] Schematic diagram of (a) HJT, (b) PERC, and (c) TOPCon cells and (d)... | Download Scientific Diagram
https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-HJT-b-PERC-and-c-TOPCon-cells-and-d-experimental-flow_fig1_373865716
- [9] Solar Cell I-V Characteristic Curves of a PV Panel
<https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html>
- [10] Solar Cell Efficiency Formula | Ossila
<https://www.ossila.com/pages/solar-cell-efficiency-formula>
- [11] Achieving bifacial photovoltaic performance in PTB7-based organic solar cell by integrating transparent contact for emerging semi-transparent applications | Scientific Reports
https://www.nature.com/articles/s41598-024-76366-1?error=cookies_not_supported&code=9845dd02-b750-4f21-8543-a5ddefb866b1
- [12] 20.4% Power conversion efficiency from albedo-collecting organic solar cells under 0.2 albedo - PubMed
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39485852/>
- [13] Power generation density boost of bifacial tandem solar cells revealed by high throughput optoelectrical modelling - Energy & Environmental Science (RSC Publishing)
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ee/d4ee01173b>
- [14] Bifacial all-perovskite tandem solar cells | Science Advances
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.add0377>
- [15] Crystalline Silicon Photovoltaics Research | Department of Energy
<https://www.energy.gov/eere/solar/crystalline-silicon-photovoltaics-research>

- [16] Yang L, Ye QH, Ebong A, Song WT, Zhang GJ, Wang JX, et al. High efficiency screen printed bifacial solar cells on monocrystalline CZ silicon. *Prog Photovolt: Res Appl* 2011;19:275–9.
- [17] Sugibuchi K, Ishikawa N, Obara S. Bifacial-PV power output gain in the field test using “EarthON” high bifaciality solar cells. In: *Proceedings of the 28th European photovoltaic solar energy conference*, Paris, France; 2013. p. 4312–17.
- [18] Huber A, Aberle AG, Hezel R. Temperature behavior of monofacial and bifacial silicon solar cells. In: *Proceedings of the 26th IEEE photovoltaics specialist conference*, Anaheim, USA; 1997. p. 323–6.
- [19] Luque A, Cuevas A, Ruiz JM. Double-sided n^+p-n^+ solar-cell for bifacial concentration. *Sol Cells* 1980;2:155–66.
- [20] Janßen L, Windgassen H, Bätzner DL, Bitnar B, Neuhaus H. Silicon nitride passivated bifacial Cz-silicon solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2009;93:1435–9.
- [21] Ouyang Z, Zhao X, Varlamov S, Tao Y, Wong J, Pillai S. Nanoparticle-enhanced light trapping in thin-film silicon solar cells. *Prog Photovolt: Res Appl* 2011;19:917–26.
- [22] Schermer JJ, Bauhuis GJ, Mulder P, Haverkamp EJ, van Deelen J. Photon confinement in high-efficiency, thin-film III–V solar cells obtained by epitaxial lift-off. *Thin Solid Films* 2006;511–512:645–53.
- [23] Desai D, Hegedus S, McCandless B, Birkmire R, Dobson K, Ryan D. How CdTe solar cells operate: determining collection using bifacial device characterization. In: *Proceedings of the IEEE 4th World conference on photovoltaic energy conversion*, Hawaii, USA; 2006. p. 368–71.
- [24] Romeo A, Khrypunov G, Galassini S, Zogg H, Tiwari AN. Bifacial configurations for CdTe solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2007;91:1388–91.
- [25] Pang JB, Cai YA, He Q, Wang H, Jiang WL, He JJ, et al. Preparation and characteristics of MoSe₂ interlayer in bifacial Cu(In,Ga)Se₂ solar cells. *Phys Procedia* 2012;32:372–8.
- [26] Chiang Y-F, Chen R-T, Burke A, Bach U, Chen P, Guo T-F. Non-color distortion for visible light transmitted tandem solid state dye-sensitized solar cells. *Renew Energy* 2013;59:136–40.
- [27] Scopus Citation Database. (www.scopus.com).
- [28] Pan AC, del Cañizo C, Luque A. Effect of thickness on bifacial silicon solar cells. In: *Proceedings of the Spanish conference on electron devices*, Madrid, Spain; 2007. p. 234–7.
- [29] Dwivedi N, Kumar S, Bisht A, Patel K, Sudhakar S. Simulation approach for optimization of device structure and thickness of HIT solar cells to achieve 27% efficiency. *Sol Energy* 2013;88:31–41.
- [30] Verlinden PJ, Blakers AW, Weber KJ, Babaei J, Everett V, Kerr MJ, et al. Slivers solar cells: a new thin-crystalline silicon photovoltaic technology. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2006;90:3422–30.

3. PEROVSKITE QUYOSH ELEMENTLARI

Kirish. Perovskite fotoelektr quyosh elementlari (PSC) tez sur'at bilan rivojlanayotgan fotoelektr texnologiya bo'lib, unda yorug'likni o'tkazib oluvchi qatlam sifatida perovskite kristall tuzilmani materiallar sinfi ishlatiladi. Ushbu materiallar, odatda, metall-galogenga asoslangan perovskite'lar bo'lib, kimyoviy formulasi ABX_3 (bu yerda A – metilammoniy yoki tseziy kabi kation, B – qo'rg'oshin yoki qalay kabi metall, X – yod yoki brom kabi galogen) ko'rinishida bo'ladi. "Perovskite" nomi XIX asrda kashf etilgan kalsiy titanati minerali nomidan olingan bo'lsa-da, uning quyosh elementlarida qo'llanilishi juda yaqin vaqtlarda boshlangan. Perovskite qoplama quyosh quvvati yalpi band oraliq bo'ylab kuchli so'rab olinishga, zaryad tashuvchilarning uzoq tarqalish masofasiga va taqiqlangan zona kengligining tanlab o'zgarishiga ega bo'ladi – va bularning barchasi arzon yechim vositasida tayyorlanishi mumkin[1]. Yuqori samaradorlik va past ishlab chiqarish xarajati imkoniyatini birlashtirgani sababli, PSC lar quyosh energiyasi sohasida eng qiziqarli yutuqlardan biriga aylandi.



1-rasm. Perovskite quyosh elementlari

Perovskite fotoelektr elementda ingichka polikristallik perovskite yarim o'tkazgich plyonkasi zaryadlarni ajratad oladigan kontakt qatlamlari orasiga joylashtiriladi (Figure 1). Quydagi bosqichlar bor: shisha substrat ustida shaffof o'tkazuvchan elektrod (ITO yoki FTO), undan keyin elektron tashuvchi qatlam (ETL) (masalan, TiO_2 yoki SnO_2), ustida yorug'likni so'rib oluvchi perovskite qavati, uning ustida esa g'ovak tashuvchi qatlam (HTL) hamda oxir-oqibat metall orqa elektrod (Ag, Al yoki oltin) joylashadi. Quyosh nurlari shisha/ITO tomonidan

kirganida, perovskite qavati elektron-g'ovak juftlarini hosil qiladi; ular elektron va g'ovak tashuvchi qatlamlarga o'tib, tashqi zanjir orqali elektr toki sifatida yig'iladi[1]. Kremniy elementlaridagi qimmat yuqori haroratdagi qayta ishlash talablarining o'rnini, PSC lar nisbatan past haroratda, mavjud asos materialar(substratlar)ga (hatto egiluvchan plastiklarga) bosib chiqarish yoki chop etish usullari bilan ishlab chiqarilishi mumkin. Bu perovskite'larni "uchinchi avlod" quyosh texnologiyasi maqomiga ko'tarib, yuqori samaradorlikni past ishlab chiqarish xarajati bilan uyg'unlashtirish istiqbolini beradi.

Darhaqiqat, 2009 yildagi ilk hisobotdan buyon perovskit quyosh elementlarining (PSC) quvvatni aylantirish samaradorligi yagona p-n-o'tishli elementli tarkibda 3% atrofidan boshlab 26%dan oshib ketdi, perovskitni kremniy bilan birlashtirgan tandem elementlar esa (1-rasm) 33%dan yuqori samaradorlikka erishib, eng yaxshi kremniy elementlarini qo'llab-quvvatlamoda va hatto yagona p-n-o'tishli element uchun belgilangan nazariy samaradorlik chegarasini ham yengib o'tdi[1][2]. Olimlar perovskit kimyosining ko'p tomonlama moslashuvchanligi bilan ham qiziqmoqdalar; material tarkibi bn shug'ullanuvchi muhandislar materialning taqiqlangan energetik zona (bandgap) va barqarorligini moslashtirish mumkin, bu esa rangli yoki shaffof quyosh elementlaridan tortib, tandem arxitekturalarigacha bo'lgan turli ilovalarni amalga oshirish imkonini beradi.

Ammo PSC lar keng tijoratlashtirishdan avval bir qator muammolarni hal qilishi kerak. Eng asosiysi – barqarorlik. Ilk perovskite elementlari namlik, issiqlik va ultrabinafsha nur ta'sirida bir necha daqiqa yoki soatlarda degradatsiyalanardi, vaholanki tijoratdagi quyosh paneli 20–25 yil xizmat qilishi zarur[3][4]. Mazkur yo'nalishda juda katta rivojlanish kuzatildi: masalan, 2D/3D gibrid perovskite elementlar yoki ikki turli qatlam muhandislik izlanmalar natijasida ba'zi so'nggi qurilmalar 5 yildan so'ng ham samaradorlikning ~80% ni saqlab qoldi[7][8]. Shuningdek, laboratoriya miqyosidagi yuqori samarador elementlar (~0.1 sm²)ni katta modullarga aylantirish ishlari olib borilmoqda, hajmni oshirgan holda samaradorlikni saqlab qolishga urinyapti[3][9]. Bu to'siqlarga qaramasdan, PSC larda innovatsiyalar tempi beqiyos, va yaqin kelajakda perovskite fotoelektr elementlari arzon va yuqori samarador PV texnologiyasiga aylanishi borasida katta umidlar mavjud.

Rivojlanish Tarixi va samaradorlikning o'sishi

Tadqiqotlar juda qisqa – bir necha yildan oshmaydigan – vaqt ichida boshlanishiga qaramay, PSClar samaradorligidagi o'zgarishlar fotoelektrik tarixida misli ko'rilmagan natijalarga ega bo'ldi. Quyida biz birinchi prototip elementlardan eng so'nggi rekordlargacha bo'lgan rivojlanishni ko'rib chiqamiz va asosiy bosqichlarni hamda samaradorlikning qanday bosqichma-bosqich yaxshilanganini yoritib beramiz.

2009 – Birinchi perovskit fotoelektr elementi:

2009-yilda Miyasaka va hamkasblari perovskit materialini quyosh elementida qo'llash g'oyasini birinchi marta tasdiqlashdi. Ular organo-metall galogen perovskit $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ni bo'yoqqa sezgir quyosh elementi (DSSC) arxitekturasida senzitor (sensitizator) sifatida ishlatib, PCE ~3.8% natijaga erishdilar[10]. Bu dizaynda perovskit nanozarralari TiO_2 mezoporoz tuyinmasi (pori bilan to'ldirilgan qattiqlik) qoplangan va DSSClarga o'xshash suyuq elektrolitlar bilan birgalikda ishlagan. Samaradorlik juda past (bir necha foizdan iborat) bo'lganiga qaramay, bu natija "o'sha paytdagi qiziqarli kashfiyot" bo'lgan (Kojima va hamkasblar, 2009)[5], chunki mazkur kashfiyot perovskitlarni ko'rinadigan yorug'likni samarali ravishda elektr energiyasiga aylantirishi mumkinligini ko'rsatdi. Jiddiy qiyinchilik(kamchiliklar) esa qurilma barqarorligi edi – suyuq elektrolit perovskitni eritib yuborardi, shuning uchun element bir necha daqiqadan ortiq ishlamasdi. Shunday bo'lsa-da, 2009-yildagi ushbu natija perovskit PVning tug'ilishi deb hisoblanadi.

2011 – Samaradorlik 6–7% gacha:

2011-yilda Park va hamkasblari DSSC uslubidagi arxitekturani takomillashtirish orqali perovskit element samaradorligini 6.5% gacha ko'tardi(Nam-Gyu Park *et al.*)[3]. Ular metilammoniy qo'rg'oshin yodid perovskitni TiO_2 mezopora qavati ustida qo'llab interfeysni yaxshilash orqali fotokuchlanish va tokni oshirishga erishdi (Im va hamkasblari, 2011). Bu 2009-yildagi natija tasodif emasligini va samaradorlik tez o'sishi mumkinligini ko'rsatdi, shu bn birga barqarorlik hali ham suyuq elektrolit sababli yaxshi bo'lmagan edi.

2012 – Qat'iy holatli perovskit elementlar (~10% PCE):

2012-yilda Oxforddagi tadqiqotchilar (Lee, Snaith va boshqalar) suyuq elektrolitni qat'iy g'ovak tashuvchi material (hole-transport material HTM) spiro-OMeTAD bilan almashtirishdi[13]. Ular shuningdek TiO_2 mezoporo qavatining doimiy emasligini aniqlashdi – inert tayanch yoki hatto tekis qavatlar ham to'g'ri elektron tashuvchi qatlam bo'lsa ishlashi mumkinligini ko'rsatdilar. Muqarrar mezoskopik konfiguratsiyada ular taxminan 9–10% samaradorlikka erishdilar va bu birinchi qat'iy holat perovskit quyosh elementi bo'ldi[3]. 2012-yil oxiriga kelib, perovskit elementlari 10%dan oshganligi xabar qilindi va fotoelektrika jamoasi jiddiy qiziqishini uyg'otdi. Muhimi, qat'iy holatli elementlar barqarorligi yaxshilandi (suyuqlik perovskitni eritmaydi), ammo barqarorlik hali ham tijorat talablaridan yarmigacha ham yetib bormagan.

2013 – 15% dan oshdi:

2013-yilda bir nechta guruhlar tayyorlash usullari va qurilma arxitekturalarini yaxshilash orqali samaradorlikni oshirishdi[3]. Masalan, Burschka va hamkasblari (EPFL) ikki bosqichli ketma-ket qoplash jarayonini qo'llab, TiO_2 mezoporo tuyunmasi bilan 15% samaradorlikka erishdilar[3]. Shuningdek, Malinkiewicz va

boshqalar bug‘latish usuli orqali plano (inverted p–i–n) qurilmada (~12% PCE) erishdi va Liu va hamkasblari plano n–i–p qurilmada ham 15% PCE ko‘rsatdi. Bu natijalar mezoporo mavjud bo‘lmagan teng patcha perovskit plyonka tizimlari ham yuqori samaradorlikka erishishi mumkinligini isbotladi. 2013-yil oxiriga kelib, ham mezoporo (sensitizatsiya qilingan) ham plano arxitekturalar 15% chegarasini zabt etishga erishdi.

2014 – 20% gacha yetib bordi:

2014-yilda innovatsiyalar shiddat bilan yana ham ortdi. Tadqiqotchilar interfeys muhandisligi va material tarkibni o‘zgartirish bo‘yicha ishlar olib borib, samaradorlikni yanada ko‘tarishga intilishdi. Masalan, UCLda Yang Yang guruhidan olingan planda element interfeyslarni optimallashtirish orqali ~19% PCE ko‘rsatdi (teskari skan) (Zhou *et al.*, 2014)[3]. Shu yillarda Koreyadagi Seok rahbarligidagi KRICT guruhi sertifikatlangan 20.1% (stabilsiz) rekordni o‘rnatdi[3]. Shu tarzda, perovskit quyosh elementlari bir necha yil ichida kremniyning ko‘p mikrokristalli rekordi darajasiga yetib oldi. Tadqiqotchilar, shuningdek, halidlarni (yod/bromid) va turli kationlarni (formamidiniy [FA] yoki tseziy [Cs]) aralashtirish orqali taqiqlangan zona kengligini va barqarorlikni yaxshilash mumkinligini aniqlashdi, bu keyingi yillarda samaradorlikni yanada oshirishga yordam berdi.

2015–2016 – Shiddatli rekordlar va 20% samaradorlik:

2015-yilga kelib perovskit tadqiqotlari cheksiz ochildi va samaradorlik rekordlari oyma-oy yangilandi. Bir necha jamoa yagona p-n-o‘tishli PSClar samaradorligini 20%dan oshirishdi. Ko‘p sonli rekordlarga intilishni muhim omili – material tarkibiga muhandislik yondashuv natijasi sifatida qaraladi: Jeon va boshqalar (2015) aralash kation/halogen perovskitlarini (masalan, $\text{FA}_{0.85}\text{MA}_{0.15}\text{Pb}(\text{I}_{0.85}\text{Br}_{0.15})_3$) taqdim etib, ~20–22% samaradorlik (issiqlikka barqarorligi yaxshilangan holda)ga erishdilar[3]. 2016-yil oxiriga kelib sertifikatsiyalangan samaradorliklar ~22% atrofida e‘lon qilindi, plyonka sifatini va zaryad tashishni boshqarishni takomillashtirish tufayli keyingi yaxshilanish sodir bo‘ldi.

2017–2019 – 25% gacha yetdi:

Samaradorlik 20% lardan oshib 20% o‘rtalariga chiqdi(24-25%). Tadqiqotchilar noradioaktiv rekombinatsiyani kamaytirish va to‘ldirish koeffitsiyentini yanada yaxshilashga urindi. Masalan, 2018–2019 yillarda g‘ovaklarni passivizatsiya qiluvchi molekulalarni qo‘shish orqali 23–24% PCE ko‘rsatilgan elementlar namoyish qilindi. Muhimi, $\text{Cs}^+(\text{FA}^+)/(\text{MA}^+)$ uch kationli aralash-halogen perovskit yuqori faza barqarorligi va samaradorligi sababli “champion” tarkibga aylandi – bu Yang va boshqalar (2017) kabi jamoalar ~22–23% samaradorlikka erishish uchun qo‘lladi. 2019-yilda Jeong va boshqalar (Seok guruhi) *Science* jurnalida interfeysni boshqarish va yod ionlar harakatini minimallashtirish orqali barqaror 25.2% elementni e‘lon qildi (Jeong va boshq., 2019). 2020-yilga kelib bir necha guruh (UNIST, Oxford va boshqalar) mustaqil

ravishda kichik hajmli elementlarda 25%+ samaradorliklarni sertifikatlashtirdi va PSCni yupqa plyonka PV texnologiyalari orasida samaradorlik bo'yicha liderga aylantirdi.

2020–2021 – 26%ga yetdi va tandemlarda yangi rekordlar:

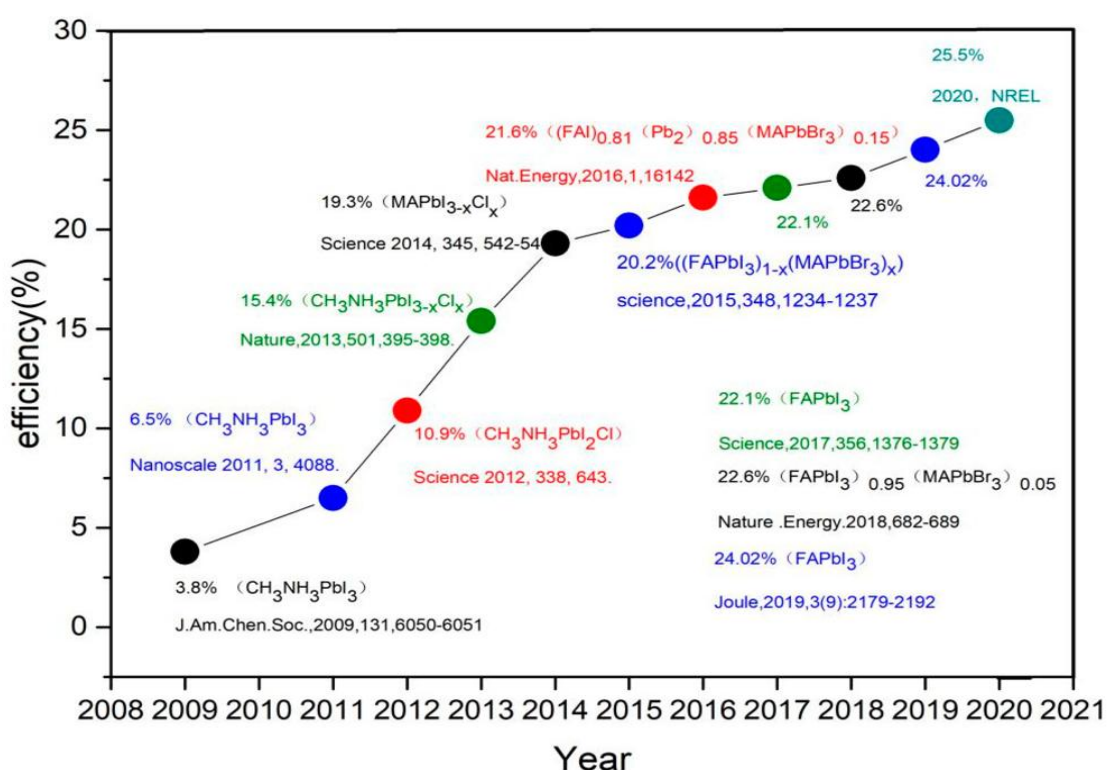
2020-yil boshlarida yagona p-n-otishli PSClar samaradorligi ~26% gacha oshdi. Masalan, 2021-yilda Koreyaning UNIST tadqiqotchilari sayti interfeys muhandisligini takomillashtirgan holda Min va boshqalar (2021) [21] 25.7% (sertifikatlangan) yangi rekord o'rnatishdi (Min *et al.*, 2021)[3]. Unga yaqin vaqtda perovskit/kremniy tandemlari kremniyning yagona p-n-otishli chegarasidan oshish bilan axborot maydonlarini zabt etdi. 2016-yildan buyon perovskit (kremniy ustidagi) tandem rekordi har doim yagona p-n-otishli PSC rekordidan oldin turadi[3]. Oxford PV va Berlin Helmholtz-Zentrum (HZB) bu kursni olib borishda yetakchi bo'lib, har biri 25%, 28% va so'ngra 29% o'tishga erishdi. 2020-yil oxirida HZB 29.15% sertifikatlangan tandemni (ikki terminalli perovskit/kremniy) e'lon qildi — bu kremniyning ~29% nazariy chegarasini aniq ravishda yenggan ilk quyosh qurilmasi bo'ldi[3]. 2021-yilga kelib HZB 29.8% gacha yetib oldi[3], Oxford PV esa orqada qolmadi. Shu tariqa, 2021-yilga kelib edi bitta elementda ~26% va tandemlarda ~30% natija bor edi.

2022–2023 – 30%dan oshdi (tandem) va 26% (yagona):

2022–2023 yillarda tandem elementlar samaradorligi katta o'sishlarni ko'rdi. 2022-yil oxirida Berlin Helmholtz tadqiqotchilari perovskit-kremniy tandemida 32.5% (Yevropa va AQSh laboratoriyalari tomonidan sertifikatlangan) natija qayd etdi[5]. Bu tez orada yangilandi: 2023-yil boshida KAUST guruhi (Alamri va boshqalar) 33.2% va undan keyin 33.7% (sertifikatlangan) natijalarni e'lon qildi – mutadilligi yaxshilangan yuqori taqiqlangan zona kenglikli perovskitni o'z ichiga olgan tandem edi[5]. Xitoy ishlab chiqaruvchisi LONGi ham bu jarayonga qo'shildi va 2023-yil o'rtalarida 33.5% ga erishdi[5]. Bu vaqtda yagona p-n-otishli perovskit elementlari ham bosqichma-bosqich 26–26.5% (masalan, 2022-yilda ~26.1% sertifikatlangan[6]) darajasida yaxshilandi.

2024–2025 – So‘ngi rekordlar:

2025-yilga kelib perovskit fotoelektr elementlari yangi bosqichlarga erishdi. Yagona p-n-otishli laboratoriya elementi uchun sertifikatlangan rekord hozirda 26.7% (Xitoy Ilmiy va Texnologiya Universiteti, 2025)ni tashkil etadi[7]. Tandem rekordi (perovskit ustida kremniy, ikki terminalli) esa ajoyib 34.85% ga yetdi, bu LONGi tomonidan 2025 yilda NREL tomonidan sertifikatlangan[3][8]. Bu natija, 2025 yil aprelida ma’lum qilingan, birinchi marta 34%ni zabt etib, hatto standart Shockley-Queisser yagona-p-n-otishli chegarasini (kremniy taqiqlangan zonasi uchun ~33%) ham yengib o‘tdi[8]. Qo‘shimcha, 2023 yilga qadar to‘liq perovskit tandem elementlari (turlicha taqiqlangan zona kenglikka ega ikkita perovskit qavati) 30% samaradorlikdan oshib keta boshladi[7], bu to‘liq yupqa plyonkali ko‘p-o‘tishli elementlar uchun kelajakda katta va‘da bildirmoqda.



2-Rasm. 2009 yildan 2020 yilgacha bo‘lgan davrda yagona-p-n-otishli perovskit fotoelektr elementlari erishgan eng yuqori samaradorliklar tarixi (ilmiy tasdiqlangan o‘lchovlar asosida) [9]

2-rasm: 2009 yildan 2020 yilgacha bo‘lgan davrda yagona-p-n-otishli perovskit fotoelektr elementlari erishgan eng yuqori samaradorliklar tarixi (ilmiy tasdiqlangan o‘lchovlar asosida) [9]. 2009 yildagi birinchi perovskit elementlari suyuq elektrolit va $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ sensizatorlari bilan TiO_2 mezoporo ustida ishga tushgan bo‘lib, samaradorlik ~3–4%ni tashkil etgan holos. 2013 yilga kelib turg‘un holatli qurilmalari organik g‘ovak tashuvchi moddalar va aralash-galogen perovskitlar bilan samaradorlikni 15%dan oshirdi. Ishlatiladigan material tarkibini muhandislik (mas., formaamidiniy yoki tseziy) va qaztlan materiallarni(interfeysni)

optimallashtirish kabi yutuqlar bilan samaradorlik 2015 yilga borib sertifikatlangan 20%dan oshdi va 2020 yilgacha ~25–25.5%ga yetdi. Manbalar: NREL va adabiyot ma'lumotlari bazasi.

Samaradorlikni oshirishning asosiy omillari:

Samaradorlikni shiddat bilan oshirishga bir necha ilmiy va muhandislik yutuqlari sabab bo'ldi. Ularning ichida:

1. **Material kimyosi:** avvalo MAPbI_3 dan FA va Cs qo'shilgan aralash kation tarkiblariga o'tish faza barqarorligini yaxshiladi va taqiqlangan zona moslashuvini yaxshilaydi, bu yuqori ochiq zanjir kuchlanishlarga olib keldi.
2. **Qavat sepish usullari:** takomillashtirilgan usullar (ketma-ket qoplash, antisolvent bilan tez sovutish, bug' bilan qoplash) perovskit plyonkasida katta donalarni hosil qilish, kam sonda g'ovakchalar paydo bo'lishi va nuqsonlarni kamayishiga olib keldi. Bu ishonchli fototok (J_{sc}) va teskari tok ko'effitsientini (FF) oshirdi.
3. **Interfeys muhandisligi:** yaxshiroq zaryad tashuvchi qatlamlar (masalan, TiO_2 sirtini ishlov berish, SnO_2 elektron qatlamlar, interfeys pasivatsiya molekulalari) ishlatilishi ochiq zanjir kuchlanishini (Voc) oshirishiga yordam berdi, chunki bu interfeyslarda rekombinatsiyani kamaytirdi.
4. **Tandem arxitekturalari:** katta taqiqlangan zona kenglikli yuqori qatlamda joshlashgan perovskit elementi bilan kremniy yoki kichik taqiqlangan zona kenglikli pastki qatlamda joylashgan perovskit elementi juftlashtirish orqali quyosh spektrini yanada to'liqroq foydalanishga imkon berdi va nazariy samaradorlik chegarasini 40%dan yuqoriga ko'tardi.

Shu rivojlanishlar tufayli, perovskit fotoelektr elementlari avvalgi barcha quyosh texnologiyalaridan tezroq rivojlandi – solishtirish uchun, kremniy elementlari 10%dan 25%ga o'tish uchun necha o'nlab yillarni sarflagan bo'lsa, PSClar aynan shu bir xil bosqichni atigi 10–12 yilda bosib o'tdi.

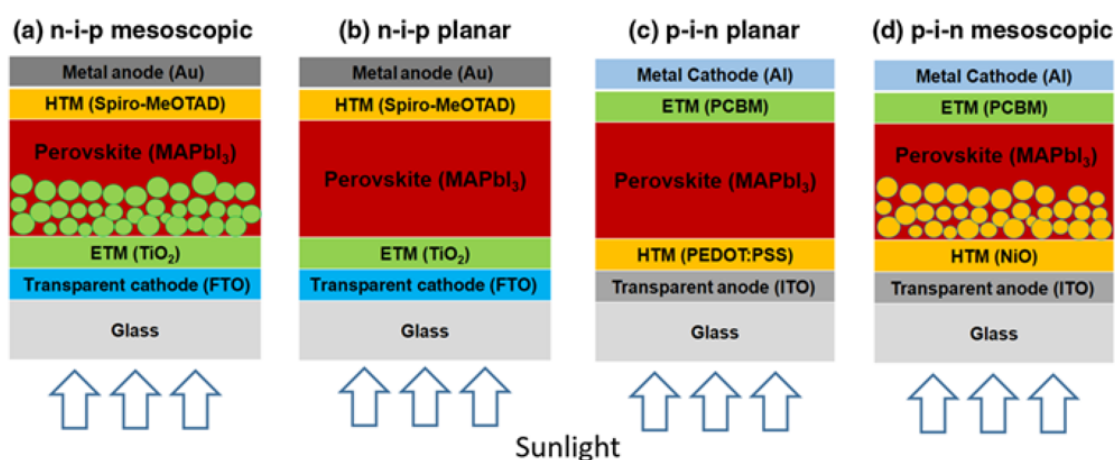
Perovskit quyosh elementlarining tuzilishi va ishlash printsipti

Uskuna arxitekturasini:

Har qanday PSC odatda yupqa plyonkali tuzilmaga ega bo'ladi. 3-rasmda oddiy planar perovskit element ($n-i-p$ konfiguratsiyasi) sxematik ko'rinishi tasvirlangan. Unda shisha substrat ustida shaffof o'tkazgich oksid (TCO, masalan, ITO) katodi, elektron tashish qatlami (ETL, masalan, TiO_2 yoki SnO_2), yorug'likni yutuvchi perovskit plyonkasi, g'ovak tashuvchi qatlam (HTL, masalan, Spiro-OMeTAD yoki PTAA) va metall orqa elektrod (masalan, oltin yoki kumush) bo'ladi. Qurilma tuzilishi qatlamlarning majmuasi 300–500 nm atrofidagi qalinlik

tashkil etadi, bu quyosh spektrdan samarali ko‘p miqdorda energiya olish imkonini beradi.

Mavzuning Kirish qismida tushuntirilganidek, foto elementga tushgan quyosh nurlarining energiyasi taqiqlangan zona kengligidan yuqori bo‘lgan fotonlar perovskit qatlamda elektron-g‘ovak juftlarini hosil qiladi. Elektronlar ETL va shaffof elektrod tomonga, g‘ovaklar esa HTL va metall elektrod tomonga o‘tadi. ETL elektronlarni yig‘ish va g‘ovaklarni bloklash, HTL esa g‘ovaklarni yig‘ish va elektronlarni bloklash vazifasini bajaradi. Bunday qatlamli tanlash bir yo‘nalishda jiddiy tok oqimini tashkil qiladi. Qurilmada fotovoltaiik effekt paydo bo‘ladi: ochiq zanjir kuchlanishi (Voc) kuzatiladi va zanjir yopilsa tok (Isc) oqadi.



3-rasm. Schematic structure of a typical planar perovskite solar cell (n–i–p configuration)

3-rasm: Oddiy planar perovskit quyosh elementsining sxematik tuzilishi (n–i–p konfiguratsiya). Qatlamlar (pastdan tepaga/oldingi qatlamdan yuqoriga/orqa qatlamgacha) quyidagilardan iborat: shisha substrat, shaffof o‘tkazuvchi oksid (TCO, masalan ITO) old elektrod, elektron tashuvchi qatlam (ETL, masalan TiO_2 yoki SnO_2), perovskit yorug‘lik yutuvchi qatlam (MAPbI_3 yoki uning biror varianti), g‘ovak tashuvchi qatlam (HTL, masalan Spiro-OMeTAD), va metall orqa elektrod[10]. Ushbu qatlamlar yig‘indisi, odatda bir necha yuz nanometr qalinlikdagi yupqa qavatli qurilmani tashkil etadi. (Illyustratsiya manbasi: AQSh Energetika Vazirligi)

Ikki asosiy joylashuv varianti mavjud: yuqorida tasvirlangan “normal” yoki **n–i–p** tuzilmasi va **teskari** yoki **p–i–n** konfiguratsiyasi. Teskari konfiguratsiya kontaktlar tartibini o‘zgartiradi – bu holda shaffof elektrod yoniga g‘ovak tashuvchi qatlam (g‘ovaklarni birinchi yig‘uvchi) joylashtiriladi, elektron tashuvchi qatlam esa yuqorida, metall orqa kontakt ostida bo‘ladi[3]. Teskari dizayn ko‘pincha PEDOT:PSS (o‘tkazuvchi polimer) kabi materiallarni pastki g‘ovak kontakti sifatida va fullerenga asoslangan elektron kontaktlarni yuqorida ishlatadi. Har ikkala arxitektura ham (~25% atrofida) yuqori samaradorlikka erisha oladi; tanlov ko‘pincha texnologik jarayon va barqarorlik afzalliklariga bog‘liq bo‘ladi. Teskari

elementlar (p–i–n) odatda tok-kuchlanish egri chizig'ida kamroq histerezisga ega bo'ladi va pastroq haroratda ishlab chiqarilishi mumkin (chunki ular yakunda sepilishi mumkin bo'lgan oksid kontaktlardan foydalanadi)[3].

Mesoskopik arxitektura yana bir tur hisoblanadi: u perovskit bilan to'ldirilgan mezog'ovak skelet (odatda TiO_2 yoki Al_2O_3)ni o'z ichiga oladi. Bu dizayn dastlabki elementlarda qo'llanilgan va ba'zida barqarorlikni yoki interfeys kontaktini yaxshilash uchun hanuz foydalaniladi, biroq hozirgi rekord natijalarga ega elementlarning aksariyati planar (ya'ni mezog'ovak qatlamsiz) tuzilmalardir.

Perovskit materialining xossalari

PSClarda faol qatlam metall-galogenga asoslangan perovskit yarimo'tkazgich bo'lib, odatda qo'rg'oshinli galogenid perovskitlardan iborat bo'ladi. Prototip birikma bu metilammoniy qo'rg'oshin iodid, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (qisqacha **MAPbI₃**) hisoblanadi (4-rasmga qarang). Bu material to'g'ridan-to'g'ri taqiqlangan zona kengligiga ega (taxminan 1.55–1.6 eV atrofida) bo'lib, bu yagona p-n-o'tishli quyosh elementlari uchun optimal hisoblanadi. Shuningdek, u ko'rinadigan yorug'likni kuchli yutadi (absorbsiya koeffitsienti $>10^5 \text{ cm}^{-1}$), bu esa bor-yo'g'i 300–600 nm qalinlikdagi plyonka yordamida quyosh nurlarini samarali yig'ishga imkon beradi.

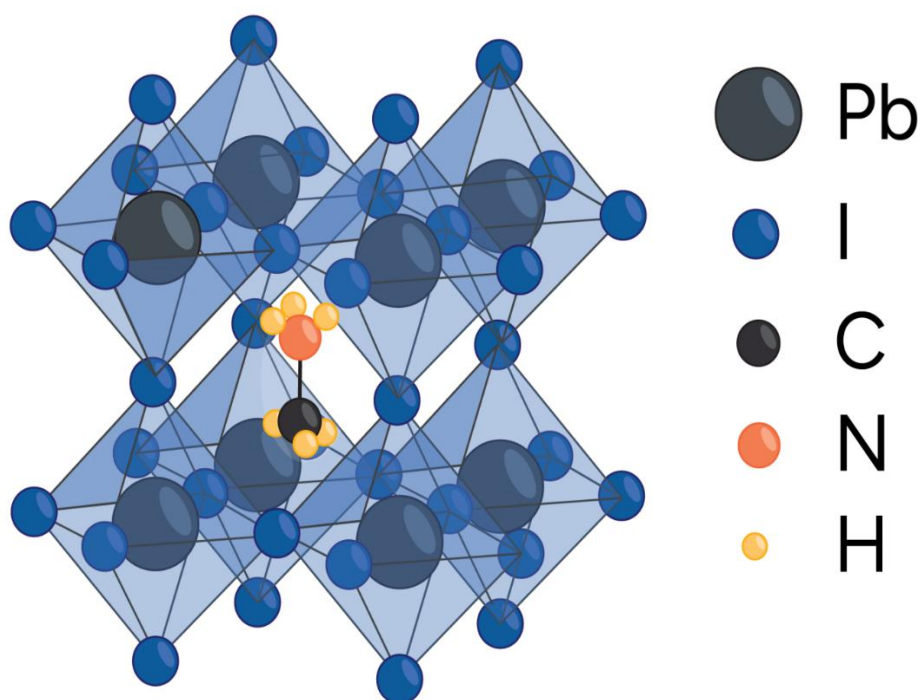
Perovskit kristall tuzilmasi ABX_3 shaklida bo'lib, unda turli almashinishlar amalga oshirilishi mumkin: masalan, A-pozitsiyada metilammoniy o'rniga formamidiniy (FA , $\text{HC}(\text{NH}_2)_2^+$) yoki seziy (Cs^+) joylashishi mumkin; B-pozitsiyadagi qo'rg'oshin (Pb^{2+}) ni qalay (Sn^{2+}) bilan almashtirish mumkin (garchi hozircha undan olingan samaradorlik past bo'lsa-da); X-pozitsiyadagi iodid o'rniga esa **bromid** yoki **xlorid** qisman qo'shilishi mumkin, bu esa taqiqlangan zona kengligini kengaytirishga xizmat qiladi.

Bunday sozlanish xususiyati juda katta ustunlik bo'lib, halogenlar aralashmasi yordamida taqiqlangan zona kengligini ~1.2 eV dan ~2.3 eV gacha o'zgartirish mumkin – bu esa tandem elementlar uchun foydalidir (masalan, 1.7–1.8 eV perovskit + 1.1 eV kremniy kombinatsiyasi).

Katyonlarni aralashtirish (FA , MA , Cs , Rb va boshqalar) esa perovskitning strukturaviy va termal barqarorligini oshiradi, yorug'likka nafaol fazalarning hosil bo'lish ehtimolini kamaytiradi(3).

Tadqiqotchilar 2D perovskitlar (qatlamli Ruddlesden–Popper fazalari) va kvazi-2D/3D aralashmalarini ham ishlab chiqqanlar. Bular namlikka chidamlilikni oshirish uchun ishlatiladi: bu turdagi materiallarda katta hajmli organik katyonlar himoya qatlamlarini hosil qiladi, bu esa namlikka qarshilikni sezilarli darajada oshiradi, biroq samaradorlikda biroz yo'qotishlar bo'lishi mumkin (4).

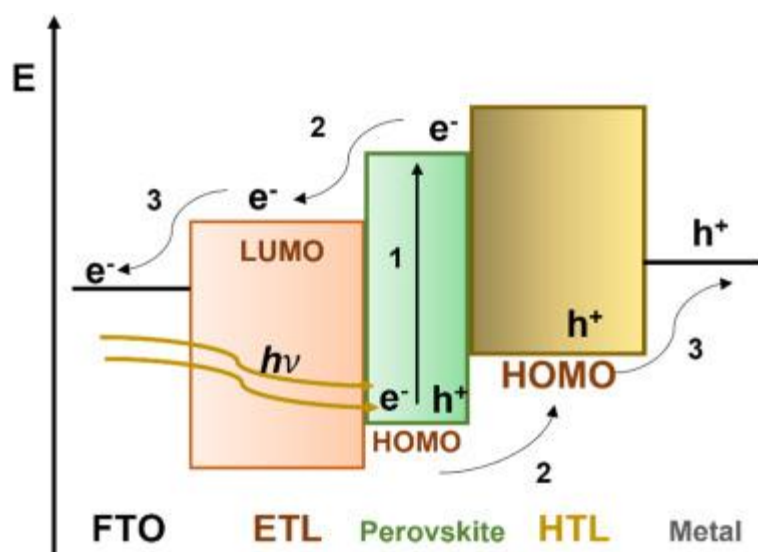
Umuman olganda, qo'rg'oshinli galogenid perovskitlarning “nuqsonga bardoshliligi” – ya'ni eritmadan olingan polikristall plyonkalarda ham yuqori natija berish qobiliyati – ushbu texnologiyaning murakkab va qimmat ishlab chiqarishlarsiz ham yuqori samaradorlikka erisha olishining asosiy sababi hisoblanadi.



4-rasm. **Metilammoniy qo'rg'oshin triiodid** yoki **MAPbI₃** perovskitlarning eng keng tarqalgan turlaridan biridir; biroq, tadqiqotchilar **barqarorlikni oshirish maqsadida** turli elementlar va tuzilmalar qo'llanish bo'yicha ilmiy ishlanishlar olib borishmoqda.

Ishlash prinsipi

Quyosh nuri perovskit quyosh elementi (PSC) tushganda, taqiqlangan zona kengligidan yuqori energiyaga ega fotonlar perovskit qatlamida yutiladi va bu elektron-g'ovak juftliklarini hosil qiladi (ko'pincha erkin tashuvchilar tarzida, chunki perovskitlarda eksiton bog'lanish energiyasi past bo'ladi). Qurilmaning ichki elektr maydoni va taqiqlangan zona kengligi strukturasi mosligi ta'sirida elektronlar ETL/TCO tomon, g'ovaklar esa HTL/metall tomon harakatlanadi (5-rasmga qarang).



ETL (n-tip qatlam, masalan, kompakt TiO_2 , SnO_2 yoki teskari elementlarda PCBM) elektron yig'ishni osonlashtiradi va g'ovaklarning kontaktda rekombinatsiyaga uchrashini oldini oladi. HTL (p-tip qatlam, masalan, Spiro-OMeTAD, PTAA yoki teskari elementlarda NiO) esa g'ovaklar uchun ayni funksiyani bajaradi. Ushbu selektiv kontaktlar strukturasi vazifasi – tokni tashqi zanjir orqali bir yo'nalishda oqishga majbur qilishdir(10).

Natijada fotovoltalik effekt yuzaga keladi: kontaktlar orasida ochiq zanjir kuchlanishi (V_{OC}) hosil bo'ladi va zanjir yopilganda fototok (I_{SC}) oqadi. Diqqatga sazovor jihat shuki, perovskitlar o'z taqiqlangan zona kengligiga nisbatan yuqori kuchlanish hosil qila oladi – masalan, 1.6 eV taqiqlangan zona kenglikka ega perovskit eng yaxshi holatlarda $\sim 1.1\text{--}1.2\text{ V}$ V_{OC} hosil qiladi, bu esa kam radiatsiyasiz rekombinatsiya yo'qotishlariga ishora qiladi.

Bu materialning muhim afzalliklaridan biridir; solishtirish uchun, kremniy (1.12 eV taqiqlangan zona kengligi) odatda faqat $\sim 0.7\text{ V}$ V_{OC} beradi. Perovskitlarning yuqori V_{OC} ko'rsatkichlari, mos darajadagi fototoklar ($\sim 20\text{--}25\text{ mA/cm}^2$) va 0.8 dan yuqori to'ldirish koeffitsientlari bilan birgalikda yuqori samaradorlik olish imkonini beradi.

Ta'kidlash joizki, perovskit quyosh elementlari ko'pincha tok-kuchlanish histerezi deb ataluvchi hodisani namoyon etadi – ya'ni I–V chizig'i o'lchov yo'nalishi yoki tezligiga qarab farq qilishi mumkin(3). Bunga sabab sifatida perovskit ichidagi harakatchan ion zaryadlari va yuzalararo sig'imli (kapasitiv) effektlar ko'rsatiladi.

Tarkib va kontaktlarni yaxshilash, shuningdek barqaror sharoitda o'lchash orqali histereziyani kamaytirish mumkin. Shu sababli, sertifikatlangan o'lchovlar odatda barqarorlashtirilgan samaradorlik ko'rsatkichlarini olishga qaratilgan maxsus usullarni qo'llaydi.

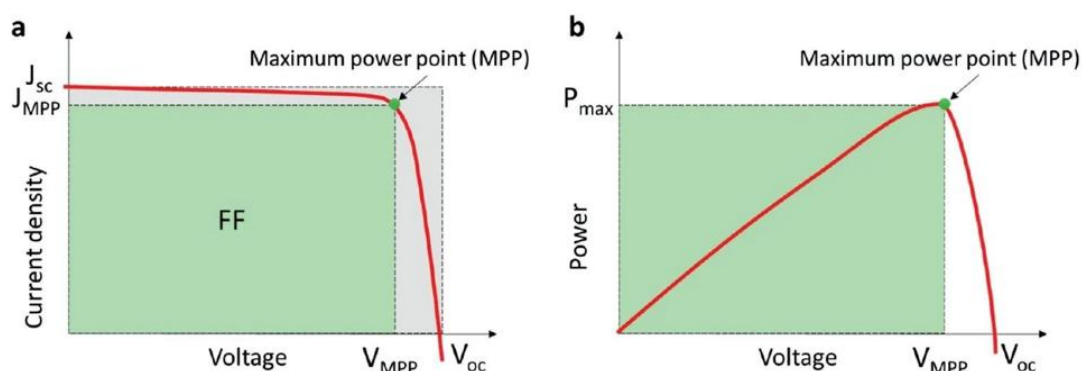


Figure 6. A typical current density–voltage (J–V) curve of a perovskite solar cell under 1-sun illumination

6-rasm: 1 quyosh nurlanishi sharoitida ishlayotgan perovskit quyosh elementi uchun odatiy tok zichligi–kuchlanish (J–V) egri chizig'i, u elementning asosiy ish faoliyati parametrlarini ko'rsatadi(2).

Qisqa tutashuv tok zichligi (J_{sc}) – nol kuchlanishda o‘lchanadigan tok bo‘lsa, ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}) – nol tokda o‘lchanadigan kuchlanishdir(3).

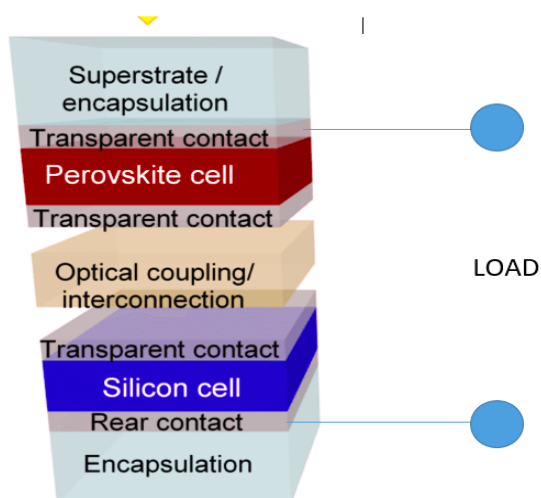
Eng yuqori quvvat nuqtasi (MPP) – J – V egri chizig‘ining buralgan joyi bo‘lib, u yerda $J \cdot V$ mahsuloti maksimal bo‘ladi (yashil nuqta).

To‘ldirish koeffitsienti (FF) esa egri chiziqning “kvadratiklik darajasini” baholaydi – ya’ni maksimal olinadigan quvvatning $J_{sc} \cdot V_{oc}$ ko‘paytmasiga nisbati sifatida aniqlanadi (1) (2).

$$PCE = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{MPP} J_{MPP}}{P_{in}} = FF \frac{V_{oc} J_{sc}}{P_{in}}$$

Tandem arxitekturalari

Perovskitlarning eng hayajonli qo‘llanilishlaridan biri — ularni tandem (ko‘p tugunli) quyosh elementlarida ishlatishdir, bu orqali yagona tugunli elementlar samaradorligi chegarasidan ($\sim 33\%$ 1 quyosh uchun) oshish mumkin bo‘ladi. Eng keng tarqalgan tandem bu **perovskit/kremniy tandemi** bo‘lib, unda **band kengligi $\approx 1.7\text{--}1.8$ eV** bo‘lgan perovskit yuqori element **band kengligi 1.12 eV** bo‘lgan kremniy pastki element ustiga joylashtiriladi (7-rasm).



7-rasm. Perovskit-kremniyli 2-terminal (monolitik) tandem elementining soddalashtirilgan sxemasi.

7-rasm: Perovskit–kremniy 2-terminal (monolitik) tandem quyosh elementi uchun soddalashtirilgan sxema. Keng bandli perovskit yuqori elementi ($\approx 1.7\text{--}1.8$ eV, qizil qatlam) kremniy pastki elementi (1.12 eV, ko‘k qatlam) ustiga qo‘yilgan. Shaffof o‘tkazuvchi kontaktlar va ularni ketma-ket bog‘lovchi rekombinatsiya qatlami yordamida subelementlar ketma-ket ulanadi va butun tandem qurilma ikki p–n o‘tishli yagona element sifatida ishlaydi. 4-terminal konfiguratsiyada (bu yerda ko‘rsatilmagan) perovskit va kremniy elementlari alohida tayyorlanadi, o‘z elektrodlariga ega bo‘ladi va optik jihatdan birlashtiriladi (mexanik ravishda ustma-

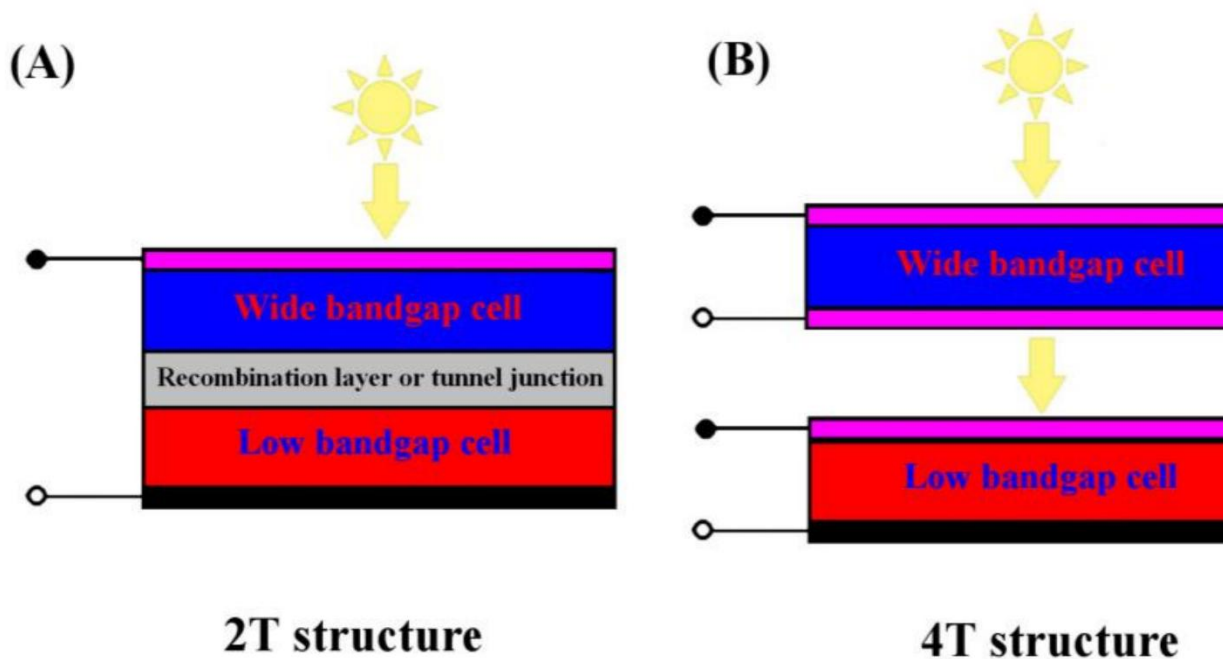
ust yoki spektral ajratuvchi orqali); bunda har bir subelement alohida ishlaydi va har biridan optimal quvvat alohida olinadi(16).

Perovskit yuqori energiyali ko‘rinadigan fotonlarni (moviy/yashil yorug‘lik) yutadi, shu bilan birga kremniy yutishi uchun qizil/infragizil nurlarni o‘tkazadi — bu esa kengroq spektrni samarali ishlatish imkonini beradi(1).

Ikki terminalli (2T) monolitik tandemda, perovskit va kremniy subelementlari bitta qurilma ichida ketma-ket ulanadi (buning uchun ularni bog‘lovchi qatlamlar va tokni muvofiqlashtirish talab qilinadi). Boshqa tomondan, to‘rt terminalli (4T) tandem faqat ikkita mustaqil elementni ustma-ust qo‘yadi (perovskit elementi kremniy elementi ustida) va tok muvofiqligini talab qilmaydi (lekin har bir element uchun alohida kontaktlar bo‘lishi kerak).

Perovskit/kremniy tandemlar avval aytib o‘tilganidek, ~34–35% samaradorlikka erishgan. **8-rasm** 2T va 4T perovskit-kremniy tandem tuzilmasini ko‘rsatadi.

Boshqa tandem variantlariga to‘liq perovskit tandemlar (ikkita turli band kenglikli perovskit: masalan, 1.8 eV keng band ustida 1.2 eV tor band) kiradi — ular ~30% samaradorlikka erishgan(55)(56). Shuningdek, **perovskit/CIGS** yoki **perovskit/organik** tandemlar ham o‘rganilmoqda, ayniqsa egiluvchan qo‘llanmalar uchun (masalan, perovskit/CIGS tandemlari tadqiqotlarda ~24% ga yetgan(9)).



8-rasm. Ikki terminalli perovskit / kremniy tandemli quyosh elementining sxemasi. (A) 2 ta terminal. (B) 4 ta terminal

8-rasm: Ikki terminalli perovskit/kremniy tandem quyosh elementsining sxematik ko‘rinishi. Keng band kenglikka ega bo‘lgan perovskit yuqori elementi kremniy pastki elementi ustiga joylashtirilgan bo‘lib, ular elektr jihatdan ketma-ket ulanadigan rekombinatsiya qatlam orqali bog‘langan. Ushbu misolda yuqori elementda shaffof o‘tkazuvchan oksid va elektron/teshik tashuvchi qatlamlar odatiy

PSC elementsiga o'xshash, pastki qismi esa standart kremniy p–n o'tishidan iborat. Bunday tandemlar o'rtacha 30% dan ortiq samaradorlikka erishgan, bu esa yagona kremniy elementlarining nazariy chegarasidan ancha yuqoridir(5).

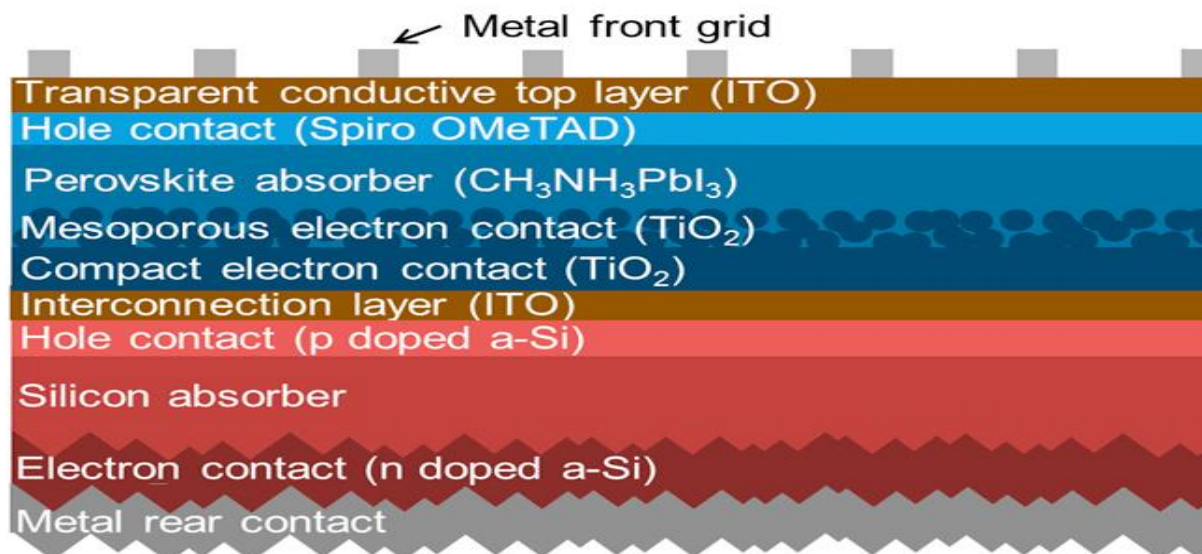


Figure 9. Perovskite–Si tandems

9-rasm: Perovskite–Silicon monolit tandem quyosh elementi tuzilishini ko'rsatadi: yuqori element mesoporous TiO_2 asosidagi perovskite qurilmasi bo'lib, pastki element crystalline silicon heterojunction (SHJ) strukturasidan iborat.

Perovskite qatlami $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3) deb belgilangan. HTL sifatida Spiro-OMeTAD qo'llanilgan bo'lib, bu perovskite elementlari uchun xosdir. ETL — TiO_2 (mesoporous + compact) bo'lib, perovskite texnologiyasining asosiy komponentidir. Pastki element esa a-Si:H(p) / c-Si / a-Si:H(n) qatlamlaridan tashkil topgan bo'lib, bu silicon heterojunction (SHJ) arxitekturasiga mos keladi.

Har bir qatlamning ishlash tamoyili:

1. Metal Front Grid

- Shaffof yuqori elektroddan tokni yig'ib oladi.
- Seriyali qarshilikni kamaytirgan holda yuqori optik shaffoflikni saqlaydi.

2. Transparent Conductive Top Layer (ITO)

- Indium Tin Oxide (ITO) shaffof elektrod vazifasini bajaradi.
- Yorug'likning maksimum miqdorda perovskite absorberiga yetib borishini ta'minlaydi va ajralgan zaryadlarni o'tkazadi.

3. Hole Contact (Spiro-OMeTAD)

- Perovskite quyosh elementlarida qo'llaniladigan standart **p-tip** organik hole transport layer (HTL).
- Perovskite ichida hosil bo'lgan teshiklarni ajratib oladi va tashiydi.

4. Perovskite Absorber Layer ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)

- Yuqori elementning asosiy yorug'lik yutuvchi qatlami.
- Silicon bilan tandem rejimi uchun mos keluvchi sozlanadigan bandgapga ega (~1.55–1.7 eV).
- Yuqori yutilish koeffitsienti va uzun carrier-diffuziya uzunligini ta'minlaydi.

5. Mesoporous Electron Contact (TiO₂)

- Elektron transport layer (ETL) sifatida ishlaydi.
- Zaryadlarni ajratishni kuchaytiradi va elektronlarning samarali ekstraksiyasini ta'minlaydi.

6. Compact Electron Contact (TiO₂)

- Zich TiO₂ bloklovchi/transport qatlami.
- Teshiklarning o'tib ketishini oldini oladi va selektiv elektron ekstraksiyasini ta'minlaydi.

7. Interconnection Layer (ITO)

- Perovskite yuqori elementi va silicon pastki elementini bog'lovchi yuqori o'tkazuvchan rekombinatsiya qatlami.
- Ikki ulamali tandem (2T) elementlarida to'g'ri tok mosligini ta'minlaydi.

8. Hole Contact (p-doped a-Si)

- P-tip dopantlangan hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H).
- SHJ arxitekturasining ajralmas qismi hisoblanadi.

9. Silicon Absorber

- Crystalline silicon (c-Si) pastki elementning absorber qatlami.
- Odatda ~150–180 μm qalinlikka ega.
- Tandem struktura uchun past bandgap (~1.1 eV) qatlamini ta'minlaydi.

10. Electron Contact (n-doped a-Si)

- SHJ tuzilmasida elektron transport layer vazifasini bajaradi.

11. Metal Rear Contact

- Silicon pastki elementining orqa elektrodi.
- Qurilmani yakunlaydi va samarali zaryad yig'ilishini ta'minlaydi.

Ishlash prinsipi

Perovskit/kremniy tandemda yuqori taqiqlangan zona kenglikka ega perovskit elementi kremniy elementi ustida joylashadi. Perovskit yuqori energiyali (ko'rinadigan/UV) fotonlarni yutadi va ularni yuqori kuchlanishda elektr energiyasiga aylantiradi, past energiyali infraqizil nurlar esa past qatlamda joylashgan kremniy elementiga o'tadi va u yerda yutiladi(16). Ikki terminalli (2T) monolitik tandemda sub-elementlar elektr jihatdan ketma-ket ulanadi – bu odatda umumiy rekombinatsiya qatlam (masalan, indiy qalay oksidi yoki tunnel o'tish) orqali amalga oshiriladi, bu yuqori elementning pastki kontakti bilan pastki elementning yuqori kontaktini bog'lab, zaryadlarning rekombinatsiyasiga imkon beradi(17). Bu esa har ikkala sub-elementda toklar bir xil bo'lishi kerakligini anglatadi. Bunga qarama-qarshi tarzda, to'rt terminalli (4T) tandemda har bir element o'z kontaktlariga ega bo'ladi; ikkala element bir xil tokda ishlashi shart emas va har biri o'zining maksimal quvvat nuqtasida ishlay oladi(16). 4T dizaynda odatda yarim shaffof perovskit element alohida kremniy elementi ustiga joylashtiriladi; har bir elementning chiqishi modul darajasida elektr jihatdan birlashtiriladi. 4T dizayn monolitik ulanish va tok moslashtirishdagi murakkabliklardan xalos qiladi, biroq bu ko'proq optik elementlar va ulanishlarni talab qiladi(16).

Samaradorlik: Perovskit–kremniy tandemlari yagona o‘tishli (single-junction) elementlarning nazariy chegarasidan yuqori natijalarga erishdi. Dastlabki ishlanmalardan biri Bailie va boshqalar (2015) tomonidan taqdim etilgan bo‘lib, ular 4T konfiguratsiyadagi qurilmada (MAPbI_3 perovskit + c-Si yoki CIGS element) taxminan 17% samaradorlikni ko‘rsatdi(18).

Shu bilan birga, monolitik 2T qurilmalar tez orada paydo bo‘ldi: Mailoa va boshqalar (2015) silliq kremniy geterotuzilmasi ustida perovskit bilan 13.7% samaradorlikni qayd etishdi(18). Doimiy taraqqiyot tufayli 2016–2017 yillarda 2T tandemlar 20% dan oshdi (masalan, Albrecht – 18%, Werner – 21%, bu zaryad tashish qatlamlarining yaxshilanishi hisobiga erishildi).

Muqarrar burilish nuqtasi 2018 yilda Sahli va hamkorlari tomonidan erishildi – ular Fraunhofer ISE tomonidan sertifikatlangan 25.2% samaradorlikka ega monolitik perovskit–Si tandemni namoyish etishdi(18). Bu qurilmada to‘lqinsimon teksturali kremniy pastki element va p–i–n konfiguratsiyadagi yuqori perovskit element ishlatilgan bo‘lib, ilg‘or yorug‘lik boshqaruvi yordamida aks ettirish va nojo‘ya yutilish kamaytirilgan edi(18).

Shu yilning o‘zida Oxford PV 27.3% samaradorlikka ega tandemni (perovskit + kremniy geterotuzilmasi) e‘lon qildi. 2020 yilga kelib esa kamida ikki mustaqil guruh 29% ko‘rsatkichdan o‘tishga muvaffaq bo‘ldi. Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) 2021 yil oxirida 29.8% sertifikatlangan samaradorlikni qayd etdi(18) – bu natijaga teksturalangan interfeys va yuqori darajada optimallashtirilgan keng bandli (~ 1.68 eV) perovskit yutuvchi qatlam yordamida erishildi.

2025 yil holatiga ko‘ra, 2T perovskit–Si tandemlar orasida rekord samaradorlik – **34.5%** – sanoat (LONGi) va akademik hamkorlik asosida o‘rnatilgan(18)(19). Bu tandemda teshik tashuvchi zarralarni samarali chiqarib olish uchun o‘z-o‘zidan yig‘ilgan monoqatlam (self-assembled monolayer) va ilg‘or interfeys passivatsiyasi qo‘llanilgan.

Ayni vaqtda, 4T konfiguratsiyadagi perovskit–Si tandemlar ham **~ 28 – 30%** gacha samaradorlikka erishgan (Oxford PV 4T konfiguratsiyada $\sim 28\%$ ko‘rsatgan)(29). Bu 2T natijalariga qaraganda biroz past bo‘lsa-da (optik yo‘qotishlar tufayli), ayrim sohalarda (masalan, ikki terminalli simlash qiyin bo‘lgan bino-integratsiyalashgan PV tizimlari) afzal hisoblanadi.

Barqarorlik va qo‘llanilish sohalari: Pastki qatlam kremniy elementining eng katta afzalliklaridan biri – bu uning uzoq vaqt davomida xizmat qilishi isbotlanganligidir. Biroq, tandem qurilmaning umumiy mustahkamligi yuqori perovskit elementning barqarorligiga bog‘liq bo‘ladi. Shu borada sezilarli yutuqlarga erishilgan: masalan, NREL laboratoriyasi tomonidan taqdim etilgan perovskit–GaAs tandemlari (kosmik ilovalar uchun o‘xshash yondashuv, keyingi bo‘limda ko‘rib chiqiladi) 10 000 soat davomida UV nurlanish ostida to‘g‘ri kapsullanganda faqat $< 5\%$ degradatsiya bilan ishlashga qodirligi ko‘rsatildi(30). Bu esa, perovskit–Si tandemlarini ham uzoq umrli qilish mumkinligiga ishonch uyg‘otadi.

Perovskit–kremniy tandemlari tijorat quyosh panellari uchun ayniqsa jozibador, chunki ular samaradorlikni sezilarli darajada oshirish imkonini beradi (30 – 35% oraliq‘ida), bunda faqat xarajatlar nisbatan ozgina ortadi. Oxford PV kabi

kompaniyalar hozirda 2-terminal (2T) tandem elementlarni modullar ishlab chiqarishga moslashtirmoqda va yaqin kelajakda 30% dan ortiq samaradorlikka ega kremniy asosidagi panellarni tijoratlashtirishni maqsad qilgan.

Laboratoriya sharoitida bu tandemlar odatda kichik maydonli (taxminan 1 sm^2) qurilmalar ko'rinishida bo'ladi, ammo hozirda kengaytirish, barqarorlikni oshirish (kapsullash, UV filtrlari, qo'rg'oshin boshqaruvi) yo'nalishlarida faol tadqiqotlar olib borilmoqda. Agar bu muammolar hal etilsa, perovskit–Si tandemlari yirik quyosh fermalari (maydon birligiga ko'proq quvvat olish) va uy-ro'zg'or panellari uchun keng tatbiq topishi mumkin.

Hozircha, oraliq yechim sifatida 4-terminal (4T) konfiguratsiyalar konsentrator fotovoltaik tizimlarida yoki mavjud kremniy panellarga qo'shimcha qatlam sifatida qo'llanilishi mumkin. Har qanday holatda ham, perovskit–kremniy tandemlari hozirgacha mavjud tandemlar ichida eng yetuk va eng yuqori samaradorlikka ega bo'lgan texnologiya hisoblanadi(18)(19).

Perovskit–CIGS tandem elementlari

Arxitektura va ishlash prinsipi: Ushbu tandemda yuqori element sifatida perovskit, pastki element sifatida esa polikristalli mis-indiy-galliy-selenid (CIGS, Cu(In,Ga)Se_2) yupqa qavatli fotoelement juftlashtiriladi. CIGS odatda 1.0–1.2 eV atrofida taqiqlangan zona kengligiga ega (bu Ga miqdoriga bog'liq), bu esa uni taxminan 1.7 eV perovskit ostida infraqizil nurlarni yutish uchun mos qiladi. Kremniy tandemlarida bo'lgani kabi, bu yerda ham 2-terminalli (2T) monolitik yoki ko'p qatlamli 4-terminalli (4T) konfiguratsiya ishlatilishi mumkin. Perovskitni CIGS elementi ustiga bevosita joylashtirish orqali monolitik qurilma tayyorlash mumkin, lekin bu ikki subelement orasidagi o'zaro mos va zarar bermaydigan oraliq qatlamlarni talab qiladi.

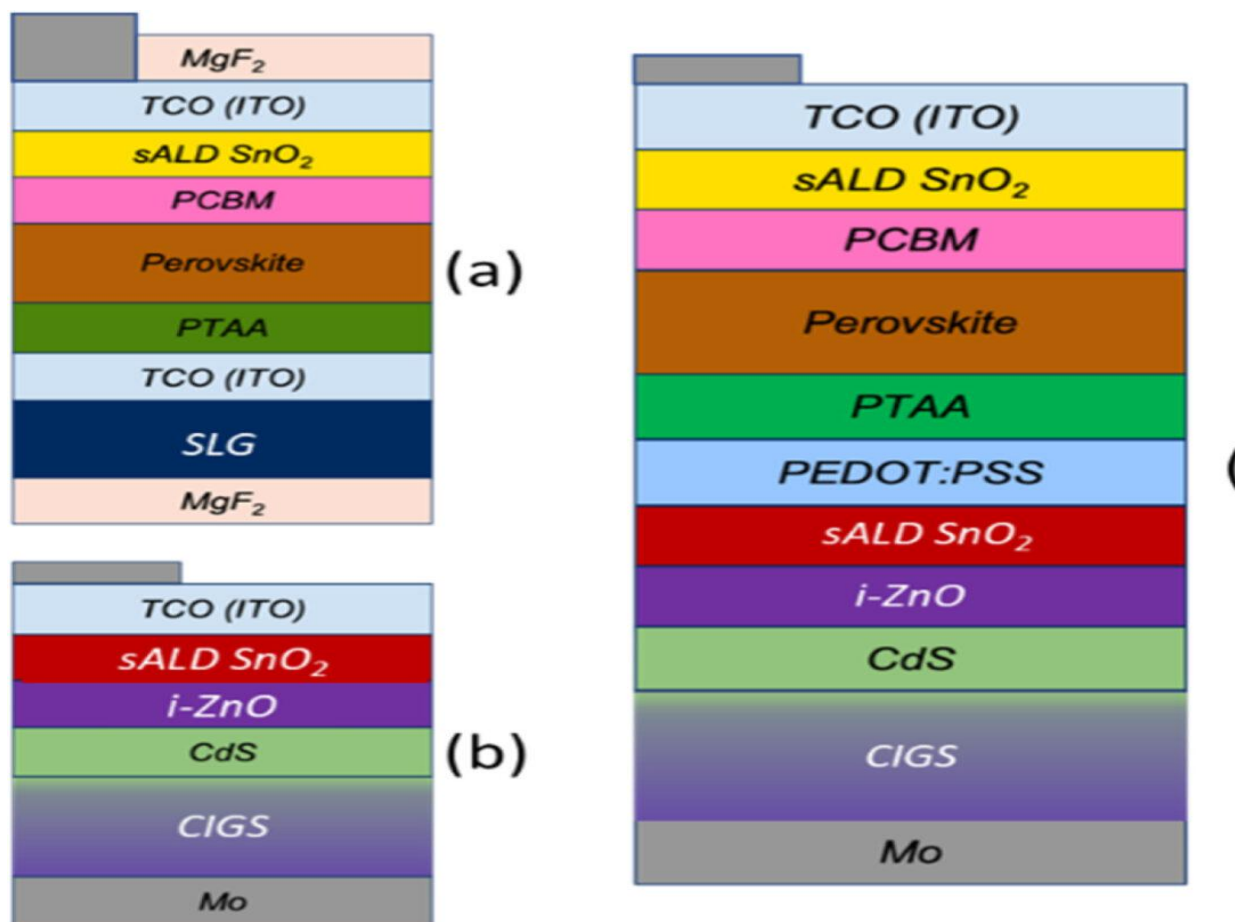
Dastlabki tadqiqotlar soddalik nuqtai nazaridan 4T yondashuvni afzal ko'rgan: masalan, Bailie va hamkasblari CIGS past elementli va 1.6–1.7 eV taqiqlangan zonali perovskitli $\sim 18.6\%$ samaradorlikka ega 4T tandem quyosh elementini taqdim etgan(21). Ishlash prinsipi boshqa tandemlar bilan bir xil – spektrni bo'lish: perovskit ko'rinadigan yorug'likni elektir energiyasiga o'zgartiradi, CIGS esa (qizil/infraqizil sohalarida kuchli yutuvchanlikka ega bo'lgan) qolgan qismini elektr energiyasiga aylantiradi.

Samaradorlik: Perovskit–CIGS tandemlari yuqori samaradorliklarga erishgan, biroq odatdagi perovskit–Si tandemidan bir necha foiz pastroq. 4-terminalli perovskit/CIGS tandemida har bir subelement alohida $\sim 17\text{--}18\%$ samaradorlik bilan $\approx 23.9\%$ umumiy PCE ko'rsatkichiga erishilgan(18). Bu yuqori sifatli CIGS past elementiga yetarli nur o'tkazishga imkon beradigan juda shaffof yuqori element (masalan, IZO shaffof elektrod va keng taqiqlangan zonali samarali perovskit) yordamida amalga oshirilgan(18).

Monolitik 2T perovskit–CIGS tandemlari ham yaratilgan, lekin ularning samaradorligi pastroq. Bunga sabab, CIGS ko'pincha yuqori haroratda qayta ishlanishini talab qiladi, bu esa oddiy perovskitlar bilan mos kelmaydi. Masalan,

2020-yilda eritma asosida tayyorlangan 2T monolitik perovskit/CIGS qurilmasi ~21% PCE ko'rsatdi (interfeys qatlamlarini optimallashtirib yo'qotishlarni kamaytirish orqali), bu esa CIGSning yagona elementli ~22% rekordiga yaqin natija (10b-rasmga qarang).

Yaqinda 26.4% samaradorlikka erishgan perovskit–organik tandemi (keyingi bo'limda ko'rib chiqiladi) perovskit–CIGSdan o'zib ketdi, bu esa perovskit/CIGS kombinatsiyasini yanada takomillashtirish imkoniyati borligini ko'rsatadi(19).



10-rasm. Yagona p-n-o'tishli perovskit (a) va CIGS elementlari (b), shuningdek, perovskit / CIGS tandem quyosh elementlari (c) ning sxematik tuzilmalari. Rasm: Delft Texnologiya Universiteti, Quyosh energiyasi materiallari va quyosh elementlari, Common License CC BY 4.0

Barqarorlik va qo'llanilish: CIGS quyosh fotoelementlari kremniy plastinkalariga nisbatan yupqaroq va yengilroq bo'lib, yuqori haroratda ishlash samaradorligini bildiruvchi harorat koeffitsiyentlari ham yaxshiroqdir. Shu sababli, perovskit–CIGS tandemlari og'irlikka sezgir sohalar – masalan, tomdagi quyosh panellari yoki transport vositalarida – jozibali variant bo'lishi mumkin. Bundan tashqari, har ikkala subelementni ham egiluvchan shaklda tayyorlash mumkin.

Asosiy muammolar kimyoviy tusga ega: perovskitdagi galogenlar CIGS qatlamlari bilan o'zaro ta'sirlashishi mumkin, shuning uchun perovskitni CIGS va uning CdS buferga qatlamini shikastlamasdan past haroratda cho'ktirish zarur. Yoritish va harorat ostidagi barqarorlik esa ehtiyotkorlik bilan kapsulalashni, yani

subelementlarni izolyatsiyalashni (ayniqsa, alohida kapsulalash talab etiladigan 4T konfiguratsiyada) talab qiladi.

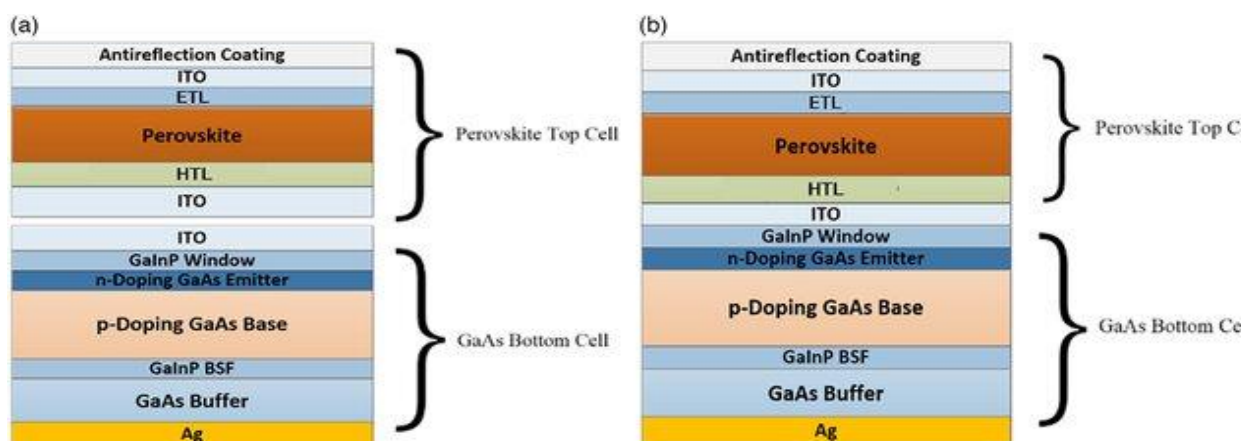
Nazariy jihatdan, agar har bir subelement optimallashtirilsa, perovskit–CIGS tandemi taxminan 30% samaradorlikka erisha oladi. Ayni paytda amalda yuqori 20% darajasiga chiqish bo'yicha faol izlanishlar olib borilmoqda. Agar bu muvaffaqiyatli amalga oshsa, ushbu tandemlar CIGS texnologiyasi samaradorligini ~23% atrofidagi yagona element chegarasidan oshirib, mavjud CIGS ishlab chiqarish texnologiyalaridan samaraliroq foydalanish orqali uning umrini uzaytirishi mumkin(18).

Perovskit–GaAs Tandem Elementlari

Arxitektura va qo'llanish sohasi: GaAs (galliy arsenid) – yuqori unumli fotoelektrik material bo'lib, yagona p-n o'tishli GaAs elementi uchun rekord PCE taxminan 29% atrofida. U asosan kosmik qurilmalar va konsentrator fotovoltakada ishlatiladi, chunki tan narxi yuqori. Perovskit yuqori qatlam elementi bilan GaAs pastki qatlam elementini birlashtirish orqali juda ham samarali tandem hosil bo'ladi, chunki har ikkala subelement ham o'zining radiativ samaradorlik chegarasiga yaqin ishlashi mumkin.

Odatdagi dizayn – bu 2-terminalli monolitik qurilma bo'lib, u 1.7–1.8 eV taqiqlangan zona oralig'iga ega perovskitni 1.42 eV GaAs ustiga joylashtirishni o'z ichiga oladi. Perovskit yuqori elementi eritma asosida GaAs ustiga cho'ktirilishi yoki alohida tayyorlanib 4-terminalli konfiguratsiyada birlashtirilishi mumkin. Ishlash prinsipi kremniy tandemiga o'xshash, biroq bu yerda pastki element (GaAs) ham to'g'ridan-to'g'ri taqiqlangan zona oralig'iga ega bo'lgan, yuqori sifatli element bo'lib, yuqori yoritilishda kremniydan ham ustun bo'lishi mumkin.

Perovskit–GaAs tandemlari ayniqsa kosmik kemalar va sun'iy yo'ldoshlar uchun mo'ljallangan quvvat manbai sifatida ko'rilmogda, chunki bu sohalarda har bir vatt uchun narxdan ko'ra og'irlik va samaradorlik muhimroq, va aynan GaAs asosidagi ko'p-o'tishli elementlar ustunlik qiladi.



11-rasm. a) 4-T va b) 2-T perovskit/GaAs tandemli quyosh elementlarining konfiguratsiya sxemalari. DOI: [10.1002/solr.202100121](https://doi.org/10.1002/solr.202100121)

Samadorlik: Perovskit–GaAs tandem elementlari laboratoriya sharoitida juda yuqori samadorliklarni namoyon qilgan. NREL yaqinda 32% dan ortiq samadorlikka ega perovskit/GaAs tandemini (2T monolitik konfiguratsiyada) e'lon qildi. Ushbu natija har ikkala subelementning ochiq kontur kuchlanishlari yuqoriligi bilan bog'liq: perovskit odatda 1.1 V dan yuqori, GaAs esa taxminan 1.0 V ni beradi (1 quyosh nuri ostida). Simulyatsiyalar ideal taqiqlangan zona oralig'i juftligi bilan perovskit–GaAs 2T tandemlari standart sharoitda 35–38% ga yetishi mumkinligini ko'rsatmoqda, bu hozirgi zamonaviy III–V ko'p-bog'lamli elementlarga teng keladi, balki arzonroq ham bo'lishi mumkin.

Amalda, Zhao va hamkorlari 30.3% samadorlikka ega monolitik perovskit/GaAs tandemini yaratdi; bunda ular 2T integratsiyaga moslashtirilgan to'liq noorganik perovskit (CsPbI_2Br) dan foydalandi. To'rt-terminalli konfiguratsiyalar ham sinovdan o'tkazilgan; masalan, mexanik tarzda GaAs elementi ustiga joylashtirilgan yarim shaffof perovskit orqali 30% dan yuqori samadorlikka erishilgan (bir guruh 4T konfiguratsiyada ~31% qayd etgan). Ushbu ko'rsatkichlar tez sur'atda yaxshilanmoqda, bu esa perovskit–GaAs tandemlarini an'anaviy ikki bosqichli III–V tandemlariga (masalan, GaInP/GaAs) raqobatbardosh qiladi.

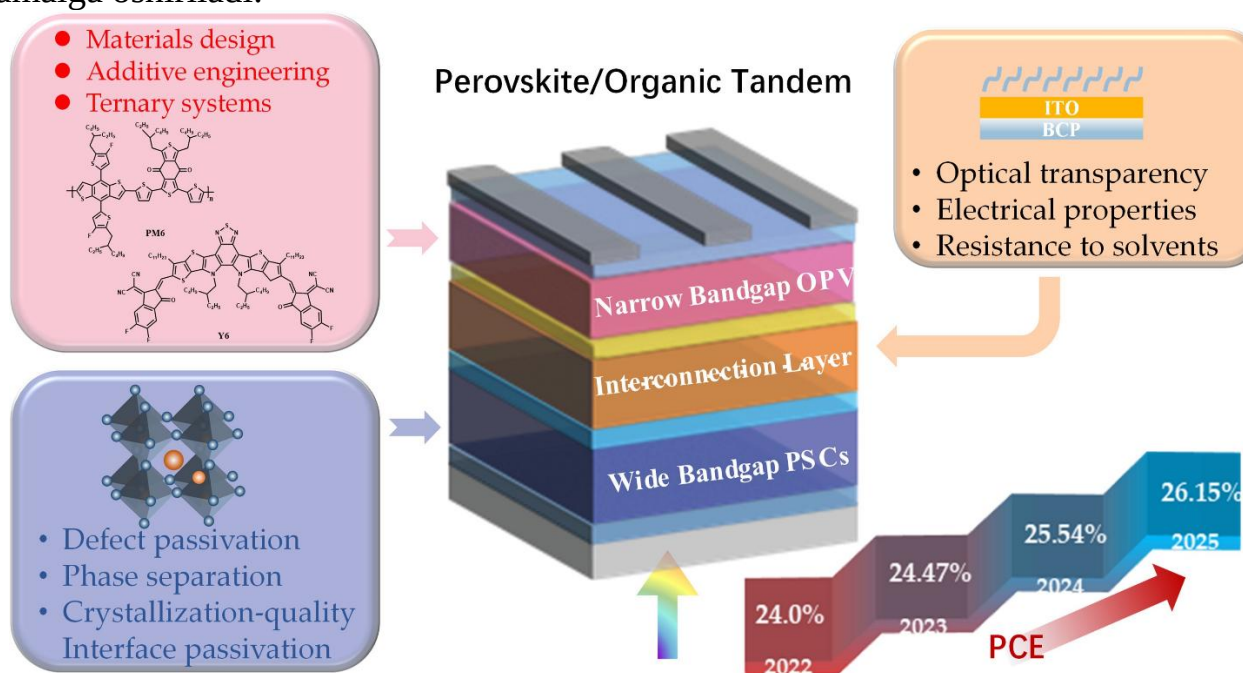
Barqarorlik: GaAs quyosh elementlari yuqori darajada radiatsiyaga chidamli va barqaror bo'lgani sababli ular kosmosda keng qo'llaniladi. Perovskitni qo'shish esa yangi barqarorlik muammolarini keltirib chiqaradi: UV ta'siri, termal sikllar, va ionlar diffuziyasi. Biroq, NREL tadqiqotida kapsullangan perovskit–GaAs namunalar 10 000 soatlik UV ta'siridan keyin <5% degradatsiyani ko'rsatgan, bu esa to'g'ri kapsulatsiya (va ehtimol UV-filtrli oynali qoplama) bilan tandem elementlar kosmik missiyalar uchun zarur barqarorlik talablariga javob berishi mumkinligini anglatadi. Bu muhim natija bo'lib, perovskit asosidagi tandemlar nafaqat yuqori samadorlik, balki murakkab sharoitlarda ham yuqori barqarorlikka ega bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi.

Potensial qo'llanilish sohalari: Perovskit–GaAs tandemlarining asosiy qo'llanilishi aerokosmik soha hisoblanadi – sun'iy yo'ldoshlar, yuqori balandlikdagi psevdoyo'ldoshlar (HAPS), yoki rover missiyalarida – bu yerda juda yuqori samadorlik va engil vaznning uyg'unligi ayniqsa qadrlanadi. Perovskit yuqori elementi bir necha yuz nanometrli yupqa qatlam sifatida joylashtirilishi mumkin, bu esa og'irlikni deyarli oshirmasdan, ko'p qatlamli III–V bog'lamli elementlardan ustun bo'lish ehtimolini beradi. Bundan tashqari, perovskitning taqiqlangan zona kengligini moslashtirish imkoniyati turli spektral sharoitlarga (masalan, kosmosdagi AM0 spektri) mos ravishda optimallashtirishga yo'l ochadi.

GaAs yer yuzidagi quyosh fermalari uchun juda qimmat bo'lsa-da, ushbu tandemlar kontsentratsiyalangan PV tizimlarda yoki maxsus ko'chma energiya manbalarida muayyan imkoniyatlariga ega bo'lishi mumkin. Perovskit–GaAs tandemlarining kosmosda muvaffaqiyati, umumiy perovskit texnologiyasining uzoq muddatli ishonchliligini ham isbotlashi mumkin, bu esa boshqa tandem formatlariga bo'lgan ishonchni tezlashtiradi(39).

Perovskit–Organik Tandem Elementlar

Arxitektura: Organik fotoelektr (OPV) elementlar – konjugatsiyalangan polimerlar yoki kichik molekulalarga asoslangan – perovskitlar bilan birlashtirilib, to‘liq yupqa qavatli tandem qurilmalarni hosil qilishi mumkin. Odatda, perovskit (taqiqlangan zona kengligi $\sim 1.6\text{--}1.8\text{ eV}$) yuqori taqiqlangan zona kenglikka ega yuqori element sifatida xizmat qiladi, past taqiqlangan zona kenglikka ega organik element esa (masalan, polimer:fulleren yoki non-fulleren qabul qiluvchi sistemalar, taqiqlangan zona kengligi $\sim 1.1\text{--}1.3\text{ eV}$) pastki element vazifasini bajaradi(19). Har ikki subelement moslashuvchan asos materiallarda(substratlarda) eritmadan tayyorlanishi mumkin, bu esa ularni monolitik tarzda, oraliq rekombinatsiya qatlamini joylashtirgan holda birlashtirish imkonini beradi. Odatda qo‘llaniladigan konfiguratsiya – bu 2-terminalli monolitik tuzilma bo‘lib, bunda organik subelementlar yarim shaffof qilinadi: shaffof elektrodlar (masalan, kumush nanotolalar yoki o‘tkazuvchan polimerlar) va aktiv qatlamni yupqalashtirish orqali amalga oshiriladi.



12-rasm. Perovskite–Organic Tandem elementlari

Ishlash Prinsipi: Perovskit element spektrning yuqori energiyali qismini (masalan, ko‘k/yashil fotonlar) elektr energiyasiga aylantiradi, organik element esa (yaqin infragizilni yuta oladigan qilib moslashtirilgan) perovskit yuta olmagan past energiyali fotonlarni o‘zlashtiradi. Organik materiallar odatda qizil/NIR sohasida nisbatan zaifroq yutuvchanlikka ega bo‘ladi, ammo taqiqlangan zona kengligi tor bo‘lgan ($\sim 900\text{--}1000\text{ nm}$ gacha yutuvchi) polimer yoki bo‘yoqdan foydalanish orqali organik pastki element $\sim 1.6\text{ eV}$ perovskit orqali o‘tkazilgan nurni samarali foydalanishi mumkin bo‘ladi. Monolitik perovskit/organik tandemdagi o‘zaro ulovchi qatlam odatda juda yupqa metall yoki metall-oksido materialdan iborat bo‘lib, organik donor va perovskit elektron tashuvchi qatlami orasida ohmik kontakt hosil qiladi.

Samaradorlik: Ahamiyatlisi shundaki, perovskit–organik tandemlar yaqinda gibrid tandemlar orasida rekord samaradorlik ko‘rsatkichlariga erishdi. 2023-yilda NUS/SERIS tadqiqotchilari tomonidan 2-terminalli perovskit/organik tandem uchun sertifikatlangan 26.4% PCE (1 sm^2 qurilma) natijasi e‘lon qilindi – bu perovskitga asoslangan barcha tandemlar ichida (perovskit–Si dan tashqari) eng yuqori ko‘rsatkichdir(19). Kichikroq maydon (0.05 sm^2) uchun ular 27.5% ga erishdi, bu esa ushbu tandem arxitekturasining salohiyatini ko‘rsatdi(19). Bu yutuq tor taqiqlangan zonali yangi ishlab chiqilgan organik PV elementi hisobiga amalga oshdi – unda yaqin IR sohasini yaxshi yutuvchi assimetrik non-fulleren qabul qiluvchisi ishlatilgan. Ushbu organik elementni $\sim 1.7\text{ eV}$ perovskit yuqori elementi bilan juftlashtirish orqali, ular yupqa qavatli tandemlardagi uzoq vaqtlik NIR yutilish muammosini hal qildilar. Ilgari perovskit/organik tandemlar orqada qolayotgan edi (ularning samaradorligi odatda 13–17% atrofida bo‘lgan). Masalan, bir necha yil oldin PBDB-T:SN6 (polimer:NFA) pastki elementi bilan $\sim 17\%$ natijaga erishilgan edi, so‘nggi yillarda esa bu 20–25% gacha oshirildi. Ammo yaqinda qayd etilgan 26.4% ko‘rsatkich perovskit–organik tandemlarni yuqori samarali texnologiya sifatida tanitdi(19). E‘tiborlisi shundaki, bu 26.4% natija hatto eng yaxshi bir qavatli perovskit elementining (25.7%) samaradorligidan ham yuqori va dastlabki perovskit–Si prototiplari bilan raqobatlasha oladi. Bu OPV texnologiyasining perovskitlar bilan birgalikda qanday rivojlanganini yaqqol ko‘rsatadi.

Barqarorlik va Qo‘llanilishi: Tarixan, perovskit hamda organik quyosh elementlari barqarorlik bilan bog‘liq muammolarga duch kelgan (kislorod, namlik va ultrabinafsha (UV) nurlarga sezuvchanlik). Shunga qaramay, ularning tandemdagi birikmasi barqarorlikni avtomatik yomonlashtirmaydi — aksincha, perovskit yuqori qavatli UV filtr sifatida organik elementni himoya qilishi mumkin, va tandemlar yakka elementlar singari kapsulyatsiya qilinadi. NUS guruhi ishlab chiqqan qurilma kichik maydonli va laboratoriyada sinovdan o‘tkazilgan bo‘lib, uzoq muddatli barqarorlik bo‘yicha ma‘lumotlar hali kutilyapti. Umuman olganda, organik quyosh elementlari to‘g‘ri kapsulyatsiya bilan bir necha yil davomida barqaror ishlay oladi, va tandem arxitekturasini ba‘zi tashqi kuchlanishlarni kamaytirishga ham yordam berishi mumkin (masalan, perovskit yuqori qavat organik subelementga tushadigan foton oqimini va issiqlik yukini kamaytirishi mumkin).

Qo‘llanilish Soha(lari): Perovskit–organik tandemlarning eng katta afzalligi — ularning mexanik egiluvchanligi va yengil vaznidir. Hou va hamkasblari ta’kidlaganidek, bu tandemlar dronlar, kiyimga o‘rnatiladigan elektronika va IoT qurilmalari kabi maxsus ilovalar uchun juda qulay, chunki bu sohalarida kremniyning og‘irligi va qattiqligi muammo tug‘diradi. Perovskit/organik tandem o‘rnatilgan egiluvchan folga matolarga yoki egri yuzalarga joylashtirilgan holda energiya manbai vazifasini bajarishi mumkin (masalan, o‘zini oziqlantiruvchi aqlli matolar, datchiklar yoki pilotsiz uchoq qanotlari). Hozirda 25% atrofidagi samaradorlik va 30%dan yuqori ko‘rsatkichlarga erishish istiqbollari mavjud(19). Ular yupqa qavatli PV texnologiyalarining afzalliklarini (yengillik, rulonga o‘rash orqali ishlab chiqarish imkoniyati) shisha asosli kremniy elementlari samaradorligiga yaqin ko‘rsatkichlar bilan birlashtiradi. Albatta, hali muammolar mavjud: har ikki material

ham namlikka sezuvchan, shuning uchun kuchli kapsulyatsiya talab etiladi, shuningdek, katta maydonli modullarga masshtablash oson bo'lmaydi. Ammo so'nggi rekordlar katta umid baxsh etmoqda. Xulosa qilib aytganda, perovskit–organik tandemlar yuqori samarali, egiluvchan quyosh panellarini yaratish uchun istiqbolli yo'ldir, ular an'anaviy quyosh elementlari uchun yaroqsiz bo'lgan sohalarda — egri yuzalarda o'rnatiladigan bino-integratsiyalashgan PV, quyosh to'qimalari yoki ko'chma zaryadlovchi qurilmalar kabi — yangi ilovalarni yuzaga chiqarishi mumkin.

Perovskit–Bo'yoq (DSSC) Bilan Sezgirlashtirilgan Gibrid Tandemlar

Konsepsiya va Dizayn: Bo'yoq bilan sezgirlashtirilgan quyosh elementlari (DSSC) va perovskit quyosh elementlari o'zaro bog'liq tarixga ega — aslida, perovskitlar dastlab DSSC larda bo'yoq sifatida qo'llanilgan. Gibrid tandem tuzilmalari taklif etilgan bo'lib, ular DSSC ni perovskit elementi bilan birlashtirib, kengroq spektrni qamrab olish imkonini beradi. Yondashuvlardan biri bu 4-terminalli tandemdir: masalan, qizil/NIR nurini yutuvchi bo'yoq bilan sezgirlashtirilgan TiO_2 asosidagi DSSC yarim shaffof perovskit elementining orqasida joylashtiriladi. Har bir element mustaqil ishlaydi va yakka holdagidan yuqoriroq umumiy samaradorlikka erishiladi. Yana bir yondashuv bu monolitik integratsiyadir: bu yerda DSSC (odatda bo'yoq bilan qoplangan mezoporozi TiO_2 va redoks elektrolit yoki qattiq teshik tashuvchi qatlamdan iborat) perovskit qurilmasi bilan bevosita qavatlash orqali birlashtiriladi. Masalan, olimlar bir necha bo'yoqdan foydalanib keng spektrni yutuvchi ko-sezgirlashtirilgan DSSC ni yuqori subelement, perovskit qurilmasini esa pastki subelement sifatida ishlatgan monolitik tandemni o'rganishgan, bu holatda ikkala element umumiy elektrodni ulashadi(24). Bu amalda DSSC fotoanodini perovskit p–i–n elementi ustiga qavatlashga teng keladi.

Ishlash Printsipi: DSSC qismi, ruteniy yoki organik bo'yoqlari bilan, perovskit yetarlicha yuta olmaydigan sohalarda samarali — ayrim DSSC bo'yoqlari yashil-qizil va hatto NIR (~900 nm gacha) diapazonda kuchli yutilish ko'rsatgichga ega. Perovskit elementi esa yuqori kuchlanish beradi va UV-ko'k nurlarni samarali yutadi. Tandemda DSSC yuqorida bo'lishi mumkin (agar bo'yoq ko'k-yashil diapazon uchun sozlangan bo'lsa, perovskit esa qizil uchun), lekin amalda perovskit ko'p hollarda ko'rinadigan spektrni to'liq yutadi. Shu bois, DSSC ni pastga joylashtirib, unga NIR bo'yoq berish va yuqoriga IRga shaffof perovskit joylashtirish mantiqiyroq bo'ladi. Monolitik qavatlash uchun esa suyuq elektrolit o'rniga qattiq g'ovak tashuvchi qatlamga ega qattiq holatdagi DSSC zarur bo'ladi, chunki suyuqlik perovskitga zarar yetkazishi mumkin.

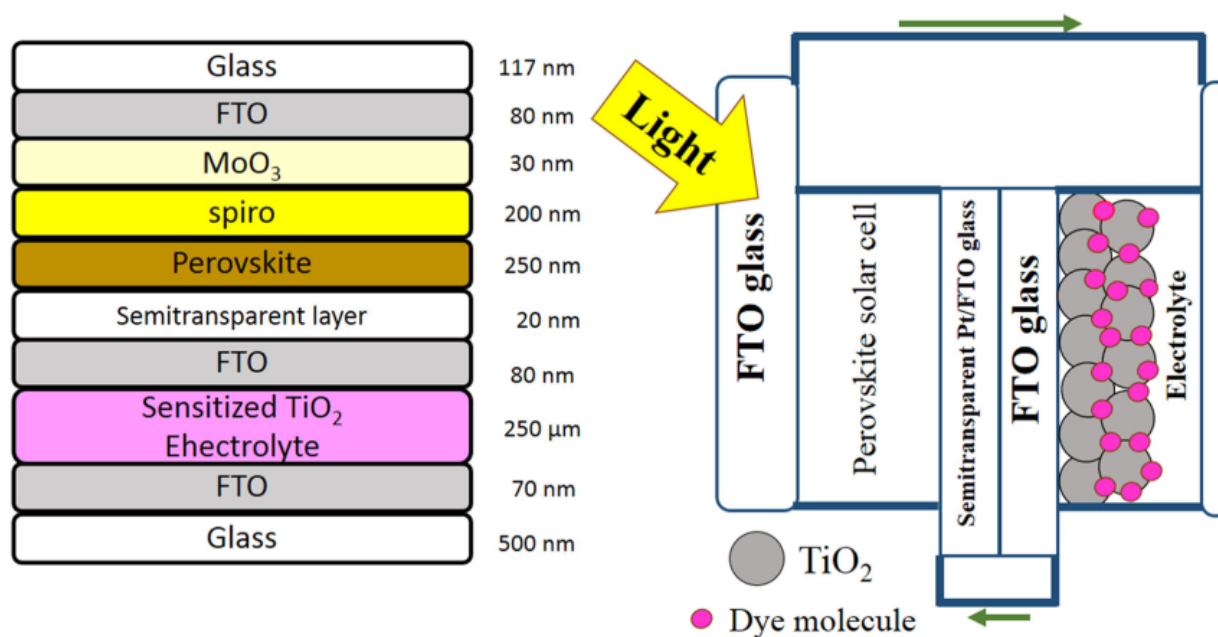


Figure 13. Ilmiy tekshirilayotgan tandem qurilmalarining sxematik tasviri.
doi.org/10.1007/s11664-019-07272-w

Samadorlik: Bu tor sohadagi ilmiy tadqiqot yo‘nalishi bo‘lib, samaradorlik darajalari tarixan boshqa tandem turlari bilan solishtirganda kamroq bo‘lgan. 2018-yildagi bir tadqiqotda yuqori element sifatida perovskit, pastki element sifatida esa ikkita DSSC konfiguratsiyasi (birida organik bo‘yoq, boshqasida klassik N719 bo‘yoq) qo‘llanilgan tandemlar 8.8% va 10.5% samaradorlikka erishgan(25). Bu past natijalar DSSC va perovskitni birlashtirishdagi qiyinchiliklarni — ayniqsa interfeysdagi yo‘qotishlar va optimal bo‘lmagan spektral bo‘linishni — ko‘rsatgan. Biroq so‘nggi yillarda rivojlanish kuzatilmoqda: masalan, bir guruh olimlar yuqori element sifatida ko-sezgirlashtirilgan DSSC va pastki element sifatida PbS kvant nuqtali elementdan iborat monolitik tandem qurib, taxminan 12% samaradorlikka erishgan(25).

Yana-da hayratlanarli tomoni shundaki, so‘nggi davrda ayrim laboratoriya o‘lchovlari (hali sertifikatlanmagan) 20–27% oralig‘ida samaradorlik ko‘rsatgan. Masalan, Xu va boshqalarning 2020-yildagi tadqiqotida p-turdagi DSSC va n-turdagi DSSC ni birlashtirib, tandem DSSC qurilgan va u 27% samaradorlikni ko‘rsatgan — lekin bu DSSC+perovskit emas, balki ikki DSSC ning p–n tandemi edi(27). DSSC–perovskit gibrirlarida esa, 2021-yildagi bir yondashuvda MAPbBr₃ perovskit elementi va bo‘yoqli DSSC 4-terminalli tarzda ustma-ust joylashtirilib, taxminan 13% samaradorlikka erishilgan (MAPbBr₃ faqat UV/ko‘k nurlarni yutadi, bo‘yoq esa qizil diapazonni)(28). Xulosa qilib aytganda, perovskit–DSSC tandemlari samaradorligi ko‘pincha boshqa perovskit tandemlariga nisbatan pastroq bo‘lib, odatda 10–15% atrofida. Yuqori samaradorlik haqida da‘volar mavjud (masalan, dual-LED yoritish sharoitida ~27%, yoki 1-quyosh ostida 27% natija ko‘rsatgan monolitik perovskit/DSSC konferensiyada taqdim etilgan), ammo ular keng ilmiy jamoatchilik tomonidan hali baholanmagan.

Kamchiliklar va Kelajakdagi Imkoniyatlar: Past samaradorlikning asosiy sabablari fundamental va amaliy omillar bilan bog‘liq: DSSClarning yakka

holatdagi samaradorligi past (~12% eng yaxshi bo'yoqlar bilan) va ko'pincha suyuq elektrolitdan foydalaniladi, bu esa qavatlashda muammolar tug'diradi. Agar qattiq holatdagi DSSC ishlatilsa, uning kuchlanishi bo'yoqning energiya darajalariga bog'liq bo'ladi va odatda perovskitdan past bo'ladi. Bundan tashqari, mezoporozi DSSC tuzilmasini planar perovskit qavatini bilan shikast yetkazmasdan birlashtirish ham oson emas. Barqarorlik ham muhim muammo — suyuq elektrolitli DSSC lar oqib chiqishi yoki korroziyaga olib kelishi mumkin, qattiq DSSC lar esa bo'yoqning issiqlik ostida yemirilishi ehtimoli bor.

Biroq, bu gibridlar past yorug'likda yoki ichki makon PV qo'llanmalarida foydali bo'lishi mumkin. DSSC lar tarqalgan yoki zaif intensivlikdagi nurlarda samaradorligini yaxshi saqlab qoladi (ayrim tandem DSSC lar past yorug'lik ostida 30% dan yuqori samaradorlikka erishgan(29)). Shunday qilib, perovskit–DSSC tandemlari LED yoritishli ichki makonlarda quyosh energiyasini yig'ish uchun samarali bo'lishi mumkin va hatto kremniydan ustun kelishi ehtimoli mavjud.

Xulosa: Perovskit–DSSC tandemlari perovskit–kremniy yoki perovskit–organik tandemlari kabi tijorat salohiyatiga ega bo'lmasa-da, ular ikki xil texnologiyani uyg'unlashtirish imkoniyatlarini namoyon etadi. Ushbu gibridlar ichki yoki filtrlangan yorug'likda yuqori samaradorlik kerak bo'ladigan maxsus ilovalarda foydali bo'lishi mumkin. Hozirda samaradorlik amaliy sharoitda 10–15% atrofida bo'lsa-da(48), yangi qizil/NIR bo'yoqlar va barqaror perovskitlar bilan bu natijalarni oshirish yo'llari izlanmoqda. Bu tadqiqotlar turli PV texnologiyalarini bitta qurilmaga birlashtirish bo'yicha chuqur tushuncha beradi.

Perovskit Quyosh Elementlarining Tayyorlash Usullari

Perovskit quyosh elementlarining jozibador jihatlaridan biri shundaki, ularni nisbatan sodda va arzon texnologiyalar bilan ishlab chiqarish mumkin — ayniqsa, kremniy fotovoltaiik texnologiyalari bilan solishtirganda. Perovskitlar eritma asosida tayyorlanishi mumkinligi sababli, ularni bosma texnologiyalar yordamida, yuqori tezlikda ishlab chiqarish imkoniyati mavjud. Quyida perovskit quyosh elementlarini tayyorlashda keng tarqalgan usullar keltirilgan:

Eritma Bilan Tayyorlash (Spin-coating): Laboratoriya sharoitida perovskit qatlamlarini tayyorlashning eng keng tarqalgan usuli — bu spin-coating (aylantirib qoplash) orqali prekursor eritmasini asos materialga (substratga) tushirishdir. Bu usul bir bosqichli yoki ikki bosqichli bo'lishi mumkin.

- **Bir bosqichli qoplama:** Prekursorlar (masalan, PbI_2 va metilammoniy iodid) eritmasi (solventlar va qo'shimchalar bilan birga) substratga tushiriladi va aylantiriladi; nam qatlam eritmasi bug'lanishi va ehtimoliy pechda pishirish (annealing) orqali perovskit kristalliga aylanishi mumkin. Bir bosqichli spin-coating usuli oddiy va tez, ammo qatlamning bir xilligi va morfologiyasini nazorat qilish murakkab — to'liq qoplamaslik yoki notekis kristall zarralari yuzaga kelishi mumkin. Bunday holatlarning oldini olish uchun spin-coating paytida anti-solvent tomizish yoki gaz bilan sovitish texnikalari qo'llaniladi, bu kristallanishni tezlashtiradi va silliq, zich qatlamlar hosil qiladi(3).

- **Ikki bosqichli (ketma-ket) qoplama:** Bu usulda avval metall-galogeni (masalan, PbI_2) qatlam holida (spin-coating yoki bug‘lantirish orqali) qoplanadi, so‘ngra bu qatlam organik galogenid (masalan, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$) eritmasiga botiriladi yoki ustiga surtiladi; bu modda ichkariga diffuziya qilib, perovskitga aylanadi. Ikki bosqichli usul kristallanishni yaxshiroq nazorat qilish imkonini beradi; masalan, aylanish jarayonidagi hajm kengayishi teshiklarni to‘ldirib, yuqori sifatli va bir hil qatlamlar hosil qiladi(3).

Ikkala usulning ham turli xil modifikatsiyalari mavjud: eritma muhandisligi (DMSO, DMF, GBL kabi qo‘shimchalar), bug‘ yordamida eritma tayyorlash, anti-solvent hammomlari, issiq quyish (hot-casting) va boshqalar — bularning barchasi yirik kristall donalari va kam nuqsonli qatlamlar olishga qaratilgan(3). Eritma asosidagi tayyorlash usullari kristall o‘shishini maxsus qo‘shimchalar bilan sozlash imkonini beradi — masalan, Lyuis bazalari (tiyomochohovina(thiourea) yoki piridin(pyridine) kabi) kristallanishni sekinlashtirib, yaxshiroq perovskit domenlari hosil bo‘lishini ta‘minlaydi(3).

Perovskit Quyosh Elementlarini Masshtabli Tayyorlash Usullari

Masshtablanadigan Qoplama Texnikalari: Spin-coating kichik laboratoriya elementlari uchun qulay bo‘lsa-da, bu partiyaviy (batch) jarayon bo‘lib, katta maydonli ishlab chiqarishga to‘g‘ridan-to‘g‘ri mos emas. Kattalashtirish uchun shunga o‘xshash eritma asosidagi qoplama usullari ishlatiladi: bular qatoriga pichoq (blade) bilan qoplash (doctor blading), slot-die qoplama, purkagichli (spray) qoplama, siyohli printer (inkjet printing) yoki rulondan-rulonga (roll-to-roll) usulda moslashuvchan substratlarda qoplash kiradi(3). Bu usullar perovskit “siyoh”ini katta yuzalarga surtadi va mini-modul miqyosida (bir necha sm^2 dan o‘nlab sm^2 gacha) yaxshi natijalar bergan. Bunda asosiy muammo katta yuzalarda qatlam sifati (bir xilligi, teshiklarsiz bo‘lishi)ni saqlab qolish va kristallanishda solvent qurishini barqaror boshqarishdir. Masalan, slot-die qoplama usuli nam havoda sovitish yoki tezkor infraqizil pishirish (flash IR annealing) bilan birgalikda qo‘llanib, $>100 \text{ sm}^2$ maydonda 20% samaradorlikka ega perovskit quyosh modullarini laboratoriya sharoitida tayyorlashga olib kelgan. AQSh Energetika Departamenti qayd etganidek, yuqori unumli qoplama va bosma ishlab chiqarishni takomillashtirish PSC’larni tijoratlashtirish yo‘lida muhim qadam hisoblanadi(1).

Bug‘ (Vapor) Bilan Qoplash: Boshqa bir usul — perovskit qatlamlarini vakuum yoki bug‘ ostida cho‘ktirishdir. Bu OLED yoki ba’zi yupa qa qatlamli fotovoltaiklarda ishlatiladigan texnologiyaga o‘xshaydi. Fizik bug‘ fazasida cho‘ktirish (PVD) usulida komponentlar (masalan, PbI_2 va MAI) alohida manbalardan vakuum kamerada bir vaqtda bug‘lantiriladi va substratda perovskit qatlamiga aylanadi(3). Kimyoviy bug‘ fazasida cho‘ktirish (CVD) yoki bug‘ yordamidagi eritma jarayonlarida esa, masalan, metall-galogeni qoplangan qatlam organik galogenid bug‘i bilan ta’sirga kirishib perovskitga aylanadi. Bug‘ usullari juda bir hil va teshiklarsiz qatlamlarni yuqori takroriylik bilan olish imkonini beradi. Shuningdek, bu usul ko‘p qatlamli tuzilmalarni osonlik bilan yaratishga yordam beradi – masalan, tandem elementlar uchun keng va tor tarmoqli perovskitlarni

ketma-ket bug' bilan cho'ktirsa bo'ladi, bu esa pastki qatlamlarni erituvchi ta'siridan saqlaydi. 2013 yilda ilk perovskit quyosh elementlari termal ko-evaporatsiya usuli bilan tayyorlangani (Malinkiewicz va boshq.) bug' usulining amaliy ishlashini isbotlagan. Bug' bilan qoplashning afzalliklari — bu qatlam bir xilligi, katta maydonlarga kengaytirish imkoniyati (bu OLED sanoatida allaqachon isbotlangan) va monolit tandemlarni yaratish imkonidir. Kamchiliklari — bu yuqori uskuna xarajatlari va ehtimoliy xom-ashyo isrofi (eritma usullariga nisbatan). Biroq, Oxford PV kabi kompaniyalar o'z tandem elementlari uchun eritma va bug' texnologiyalarini birlashtirgan gibrid ishlab chiqarish yo'nalishini ishlab chiqmoqda.

Bosma va Namuna Bilan Ishlash: Perovskit qatlamining o'zidan tashqari, to'liq modul ishlab chiqarishda qo'shimcha bosqichlar mavjud: zaryad tashuvchi qatlamlar va elektrodnlarni chop etish yoki qoplash, hamda monolit modullarda element chiziqlari va ulanishlarni namunalash (patterning). Yupqa qatlamli modullarda ketma-ket ulanishlarni yaratish uchun lazerli chizish (scribing) keng qo'llaniladi (P1, P2, P3 — elementlarni ajratish, qatlamlarni ulash va h.k.). Shu kabi texnikalar bilan >20% samaradorlikka ega perovskit modullari shisha substratlarda tayyorlangan, biroq metrlab kattalikdagi panelga barqaror tarzda kengaytirish hali ham faol tadqiqot yo'nalishi hisoblanadi.

Alohida ta'kidlash lozimki, hozirgi kunda eng yuqori samaradorlikka ega elementlar hali ham spin-coating usuli bilan kichik maydonlarda ($\approx 0.1 \text{ sm}^2$) tayyorlanmoqda. Ushbu usullarni katta maydonlarga o'tkazishda samaradorlik yo'qotilishini minimallashtirish muhim hisoblanadi(6). Masalan, pichoq yoki slot-die bilan perovskitni teksturali kremniy ustiga qoplab tayyorlangan tandemlarda kichik elementlarga nisbatan atigi bir necha foizlik samaradorlik yo'qotish kuzatilgan(3). Umuman olganda, perovskit quyosh texnologiyasining kuchli jihati — bu turli tayyorlash texnologiyalarining mavjudligi bo'lib, ishlab chiqarish yondashuvlarida moslashuvchanlikni ta'minlaydi.

Ishlash Ko'rsatkichlari va I-V xarakteristikalari

Quyosh elementi, masalan, perovskit quyosh elementi (PSC)ning xususiyatlarini aniqlash uchun, biz uning standart yoritish sharoitida tok–kuchlanish (I–V) xarakteristikasini o'rganamiz va asosiy ishlash parametrlarini aniqlaymiz. Bular quyidagilarni o'z ichiga oladi: ochiq zanjir kuchlanishi (V_{OC}), qisqa tutashuv toki (I_{SC}) yoki tok zichligi (J_{SC}), to'ldirish koeffitsienti (FF) va yakuniy quvvat aylantirish samaradorligi (PCE). Quyida ushbu atamalar va samaradorlikni qanday hisoblash tushuntiriladi, bunda quyosh elementsining odatiy J–V egri chizig'iga murojaat qilinadi.

Quvvat aylantirish samaradorligi (PCE): Bu — element tomonidan kiruvchi quyosh energiyasining elektr energiyasiga aylantirilgan qismi. Standart sinov sharoitlarida (1 kVt/m^2 yoritilish, AM1.5 spektr, element harorati 25°C), samaradorlik o'lchangan V–I chiziqdan hisoblab chiqiladi. Elementdan olinadigan maksimal elektr quvvati:

$$P_{\max} = V_{mp} \times I_{mp},$$

bu yerda **V_{mp}** va **I_{mp}** — tok–kuchlanish (I–V) chizig‘idagi maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanish va tokdir. Samaradorlik esa quyidagicha aniqlanadi:

$$PCE = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}}$$

Bu yerda **P_{in}** — kiruvchi yorug‘lik quvvati (standart sharoitda 100 mV/sm²), va $V_{oc} \times I_{sc} \times FF$ — maksimal quvvatni beradi (chunki $FF = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{oc}I_{sc}}$)(11).

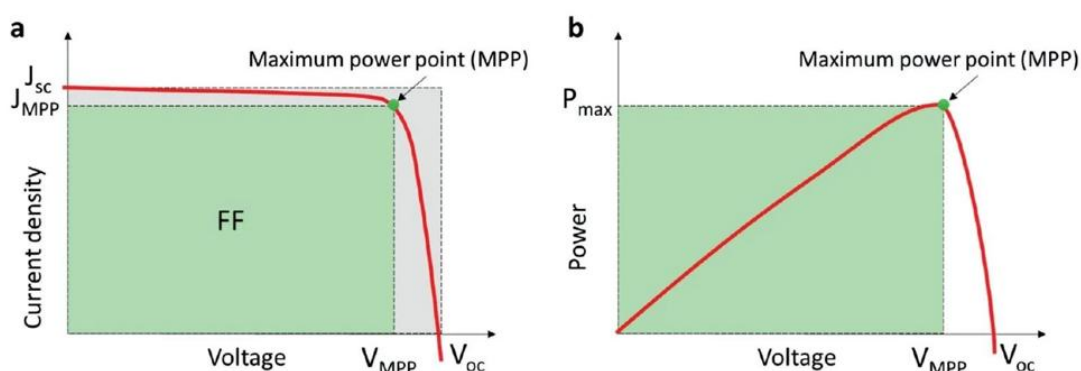
Amaliyotda ko‘pincha tok o‘rniga tok zichligi (J, mA/sm²) ishlatiladi. Shunday qilib, formulani quyidagi shaklda yozish mumkin:

$$PCE = \frac{J_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}}$$

Masalan, agar PSC $J_{sc} = 22 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 1.10 \text{ V}$, va $FF = 0.80$ kabi ko‘rsatkichlarga ega bo‘lsa, unda samadorlik (PCE) quydagiga teng bo‘ladi

$$\frac{22 \times 1.10 \times 0.80}{100} \approx 19.4$$

Zamonaviy ilg‘or elementlar (champion cells) taxminan **25 mA/sm²** atrofidagi **J_{sc}**, va **1,15–1,2 V** oralig‘idagi **V_{oc}** (taxminan 1,6 eV energiya bo‘shlig‘i uchun), hamda **0,84** gacha bo‘lgan **FF** qiymatiga erishgan, bu esa **taxminan 25% PCE** (quvvat aylantirish samaradorligi) ni beradi. Tandem elementlarda kuchlanishlar qo‘shiladi (masalan, perovskit + kremniy kombinatsiyasi uchun jami ~1,8 V), tok esa biroz pastroq bo‘ladi (odatda kichikroq tokga ega bo‘lgan sub-element bilan cheklanadi), bu esa yuqoriroq **PCE** ga erishish imkonini beradi, avval ko‘rganimizdek.



6-rasm. 1 quyoshli yorug‘lik ostida perovskit quyosh elementining odatdagi oqim zichligi-kuchlanish (J-V) egri chizig‘i

6-rasm: Quyosh nuri (bir quyosh sharoitida) ostida ishlayotgan quyosh elementining odatiy tok–kuchlanish (J–V) xarakteristikasi. Asosiy parametrlar ko‘rsatilgan: qisqa tutashuv toki (I_{sc}) $V=0$ da, ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}) $I=0$ da, hamda maksimal

quvvat nuqtasi (V_{mp} , I_{mp}), bu yerda $V \times I$ mahsuloti maksimal bo'ladi. Fill-faktor (FF) yashil kesma to'g'ri to'rtburchak ($V_{mp} \times I_{mp}$) maydonining qizil kesma to'g'ri to'rtburchak ($V_{OC} \times I_{SC}$) maydoniga nisbati sifatida aniqlanadi. Yuqori FF – grafik chizig'ining ko'proq “kvadrat” shaklda ekanini va yuqori samaradorlikni bildiradi[12][13].

Tok–Kuchlanish (I–V) Egri chizig'i: 6-rasmda yoritilish ostidagi quyosh batareyasining tipik J–V xarakteristikasi ko'rsatilgan. Batareya qisqa tutashganda ($V = 0$), tok maksimal darajada bo'ladi, bu qisqa tutashuv toki I_{SC} (yoki birlik yuzaga J_{SC}) deb ataladi. Bu holat, batareyada kuchlanish to'sig'i bo'lmaganida fotoelektr tok hosil bo'lishiga mos keladi. Aks holatda, batareya ochiq zanjirda bo'lsa ($I = 0$), kuchlanish V_{OC} gacha ko'tariladi – bu batareyaning eng katta taqdim eta oladigan kuchlanishidir (tok olinmasa)[81].

Ushbu ikki nuqta orasida grafik odatda nolinear (diodga o'xshash) shaklga ega bo'ladi. Har qanday nuqtadagi quvvat $P = V \times I$ (yoki tok zichligi uchun $V \times J$) bo'ladi; qisqa tutashuvda quvvat nolga teng ($V=0$), so'ng maksimal nuqtaga (V_{mp} , I_{mp}) ko'tariladi, va ochiq zanjirda yana nolga tushadi ($I=0$). Fill-faktor (FF) I–V chizig'ining “kvadratga o'xshashligi” ni o'lchaydi – $FF = (V_{mp} \times I_{mp}) / (V_{OC} \times I_{SC})$ tarzida aniqlanadi[13]. Geometrik tarzda bu – I–V grafik ostiga chiziladigan eng katta to'rtburchak maydonining $V_{OC} \times I_{SC}$ to'rtburchagiga nisbati. Yuqori FF (1 ga yaqin) – batareya V_{OC} yaqinigacha yuqori tokni saqlab qolayotganini anglatadi, bu esa istalgan holatdir. Yaxshi kremniy yoki perovskit batareyalarda FF odatda 0.75–0.85 oraliqda bo'ladi, yomon batareyalarda (masalan, yuqori qarshilik yoki rekombinatsiya sababli) FF 0.5 dan past bo'lishi mumkin.

I–V egri chizig'i element salomatligi haqida ham ma'lumot beradi: I_{SC} yaqinidagi qiyalik – shunt qarshilikka, V_{OC} yaqinidagi qiyalik esa – ketma-ket qarshilikka tegishli; ammo bu masalalar bu yerda batafsil ko'rib chiqilmaydi.

Perovskit quyosh elementlari uchun I–V egri chizig'ini o'lchashda gisterezis va o'tkinchi ta'sirlar sababli juda ehtiyotkorlik bilan yondashish kerak. Odatda, barqaror quvvat chiqishi (masalan, element V_{mp} da ushlab turilib, vaqt davomida tok o'lchanadi) aniqlanadi va eng ishonchli samaradorlik shunday baholanadi. Grafikning ideal shaklga yaqinligi (Shockley diod tenglamasiga yaqinligi) – rekombinatsiya mexanizmlarini ko'rsatadi. Tadqiqotchilar odatda harorat yoki yorug'lik intensivligiga qarab I–V o'lchovlar orqali ketma-ket qarshilik, shunt qarshilik, diod idealik koeffitsienti kabi parametrlarni ajratib oladilar, bu esa yo'qotish sabablari haqida tushuncha beradi.

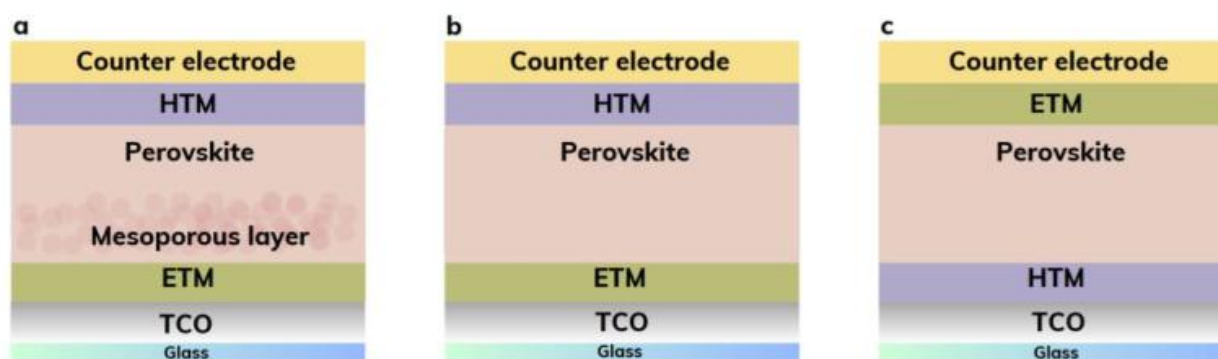
Tashqi kvant samaradorligi (EQE): I–V dan tashqari, yana bir muhim ko'rsatkich – elementning spektral javobi yoki EQE hisoblanadi, ya'ni har bir to'lqin uzunligidagi fotonlarning elektronlarga aylanish foizi. Yaxshi perovskit elementi EQE bo'yicha **80–90% dan yuqori** bo'ladi (~400–750 nm to'lqin oralig'ida, 1.6 eV perovskitlar uchun). EQE integralini quyosh spektri bilan hisoblash J_{SC} ni bashorat qiladi, va bu laboratoriyada o'lchangan J_{SC} bilan mos bo'lishi kerak. Tandem elementlarda ikkala sub-element (perovskit yuqori va kremniy pastki) EQE si alohida o'lchanadi – ayniqsa 2-terminal qurilmalarda tok mosligini tekshirish uchun.

Xulosa qilib aytganda, PSC ni baholashda samaradorlik (PCE) ni I–V grafik orqali aniqlash va bu grafikdagi V_{OC} , J_{SC} , hamda FF hissalarini tushunish zarur.

Hozirgi eng ilg'or yakka ulanishli PSClar ~ 1.2 V V_{OC} , >25 mA/cm² J_{SC} , va ~ 0.84 FF ga ega bo'lib, $>25\%$ samaradorlikni ta'minlamoqda[5]. Bu parametrlarni yanada takomillashtirish (ayniqsa nurlanmasdan rekombinatsiya yo'qotishlarini kamaytirib V_{OC} ni maksimalga yaqinlashtirish, va zaryad tashishni yaxshilash orqali FF ni yuqori darajada ushlab turish) – hozirgi ilmiy izlanishlarning faol yo'nalishidir.

Turli xil Perovskit Quyosh Elementlari Turlari va Konfiguratsiyalarining Taqqoslanishi

Perovskit quyosh elementlari (PSC) turli qurilma tuzilmalari va material tarkiblariga ega bo'lishi mumkin. Quyida biz bir nechta PSC toifalari va modellarini taqqoslaymiz, ularning samaradorligi, tok–kuchlanish (I–V) xarakteristikalari va mos qo'llanilish sohalaridagi farqlariga e'tibor qaratamiz:



14-rasm. PSClarning tuzilishi: (a) Mezog'ovakli tuzilma. (b) Oddiy n-i-p tuzilma.(c) Rejali p-i-n (teskari) tuzilma.

Mezopora va Tekis (Planar) Tuzilma(14-rasm):

2012–2014-yillardagi dastlabki yuqori samarali PSClar odatda bo'yalgan quyosh elementlaridan (DSSC) meros bo'lib olingan mezog'ovak TiO_2 skeletidan foydalangan. Bu turdagi qurilmalarda perovskit TiO_2 qatlamining (150–300 nm) g'ovaklariga kirib boradi va elektron ajratish uchun katta interfeys hosil qiladi. Mezog'ovak tuzilmalar yuqori fotoelektr tokini ko'rsatgan va dastlabki samaradorlik yutuqlariga muhim hissa qo'shgan (masalan, Burschka va boshq. 2013-yilda 15%)[3].

Biroq, keyinchalik aniqlanishicha, mezog'ovak TiO_2 qatlamlari mutlaq zarur emas – tekis (planar) geterotuzilmali elementlar (kompakt ETL va ustiga perovskit) ham samarali ishlashi mumkin, hatto yaxshiroq. Planar tuzilmalar strukturaviy jihatdan oddiyroq bo'lib, TiO_2 ning UV nurlanishda fotokatalitik yemirilishiga olib keluvchi barqarorlik muammolaridan qochadi. 2015-yilga kelib, planar elementlar samaradorlik bo'yicha mezog'ovak elementlarni ortda qoldirdi va ularni ishlab chiqarish ham soddalashti (bir qatlam kam bo'ladi). Mezog'ovak tuzilmalar hali

ham qalinlikdagi farqlarga nisbatan bardoshliligi va ba’zida yuqoriroq J_{SC} ko’rsatishi mumkin, biroq planar elementlar odatda FF va V_{OC} bo’yicha teng yoki yuqoriroq qiymatlarga erishadi. Bugungi eng yuqori samarali elementlar ko’pincha sinchkovlik bilan muhandislik qilingan interfeyslar bilan planar tuzilmani (n–i–p yoki p–i–n) qo’llaydi.

- **Oddiy (n–i–p) va Teskari(Invers) (p–i–n) Tuzilma:**

Bu konfiguratsiyalar yorug’lik tushadigan old kontakt qaysi turdagi qatlamdan iborat bo’lishiga bog’liq. Oddiy (n–i–p) tuzilmada old kontakt n-tip ETL (masalan, TiO_2 , SnO_2) bilan qoplangan bo’ladi, orqa kontakt esa p-tip HTL (masalan, spiro-OMeTAD). Bu konfiguratsiya ko’plab dastlabki qurilmalarda ishlatilgan va odatda juda yuqori V_{OC} va J_{SC} ni beradi.

Teskari (Invers) (p–i–n) elementlarda esa old qatlam p-tip materialdan (odatda PEDOT:PSS yoki noorganik NiO), orqa qatlam esa n-tip (ko’pincha PCBM kabi fulleren hosilalari) dan iborat bo’ladi[3]. Invers elementlarda gisterezis deyarli yo’q va ular yuqori haroratda ishlov berishni talab qilmaydi (masalan, TiO_2 uchun $500^{\circ}C$ sintratsiyadan qochiladi). Dastlab, invers PSCLar samaradorlik bo’yicha oddiy tuzilmadan (ayniqsa J_{SC} bo’yicha) biroz orqada bo’lgan, lekin so’nggi yutuqlar bu farqni bartaraf etdi. Masalan, 2022-yilda 22.1% sertifikatlangan samaradorlik va 84% FF bilan invers element e’lon qilindi[29], bu p–i–n tuzilmalar ham yuqori samarali bo’lishi mumkinligini ko’rsatdi.

Invers tuzilmalar tandem integratsiya uchun ayniqsa qulay (ko’plab perovskit–kremniy tandemi p–i–n ustki elementni ishlatadi, chunki tunnel rekombinatsiya ulanishi uchun yuqoridagi n-tip va pastdagi p-tipni bog’lash kerak). Xulosa qilib aytganda, oddiy va invers tuzilmalar – bu asosan ishlab chiqarish tanlovidir; ikkisi ham 25% dan yuqori samaradorlikka erishishi mumkin, agar qatlamlar va interfeyslar puxta muhandislik qilingan bo’lsa.

- **Qo’rg’oshinli va Qo’rg’oshinsiz Perovskitlar:**

Eng ilg’or PSCLar ABX_3 tuzilmasidagi B-pozitsiyada qo’rg’oshin (Pb) ni ishlatadi, chunki Pb-perovskitlar yuqori darajadagi yarim o’tkazuvchanlik xossalriga ega. Biroq, toksiklik sababli qo’rg’oshinsiz perovskitlar (masalan, qalay Sn^{2+} yoki germaniy asosida) bo’yicha qiziqish mavjud.

Afsuski, qalayli perovskitlar ($MASnI_3$ yoki $FASnI_3$) Sn^{2+} ning Sn^{4+} ga tez oksidlanishi sababli beqaror va juda past samaradorlikka ega (eng yaxshilari <10% samaradorlikka ega bo’lib, havoga juda sezuvchan). Qalay miqdori ortiqcha bo’lgan kompozitsiyalar, Sn+Ge aralashmalari yoki 2D qoplama qatlamlar orqali biroz yaxshilanish kuzatilgan. Vismut yoki surma asosidagi perovskitga o’xshash materiallar ham sinovdan o’tkazilgan, lekin odatda kengroq energetik teshikka yoki yomon zaryad tashish xususiyatiga ega.

2025-yil holatiga ko’ra, samaradorlik bo’yicha qo’rg’oshin-galogensiz perovskitlar bilan raqobat qila oladigan alternativ hali yo’q. Shu sababli, qo’rg’oshinsiz PSCLar uchun asosiy talablardan biri – qo’rg’oshinli perovskitlar kabi yuqori V_{OC} va past nuqson zichligiga erishishdir. Bu esa hozircha qalayli

perovskitlar uchun yuksak marradir. Shu bilan birga, Pb oqishini cheklovchi inkapsulyatsiya usullari ustida faol tadqiqotlar olib borilmoqda[3].

• **Yagona O'tishli (Single-Junction) va Tandem Elementlar:**

Yagona ulanishli perovskit quyosh elementi (PSC) faqat bitta perovskit yutuvchi qatlamdan (odatda $\sim 1.5\text{--}1.6$ eV bandgap) iborat bo'ladi va hozirda kichik o'lchamli qurilmalarda maksimal $\sim 26\text{--}27\%$ samaradorlikka erishmoqda. Perovskit boshqa element (odatda kremniy) bilan tandemda qo'shib ishlatilsa, Quyosh spektridan ko'proq quvvat olinadi va, yuqorida muhokama qilinganidek, samaradorlik 30% darajasiga yetdi.

I–V xarakteristikalari bo'yicha, yagona ulanishli elementda 1 quyosh nurlanishida (1 sun) odatdagi qisqa tutashuv toki (I_{SC}) $\sim 20\text{--}25$ mA/cm², ochiq kontur kuchlanishi (V_{OC}) esa $\sim 1\text{--}1.2$ V atrofida bo'ladi. 2-terminal (2T) perovskit–kremniy tandemi seriyali ulangan bo'lsa, umumiy tok deyarli yarim bo'ladi (kremniy tomonidan cheklangan $\sim 19\text{--}20$ mA/cm²), lekin kuchlanish esa taxminan ikki barobar ortadi (V_{OC} , tandem $\approx V_{OC}$, perovskit + V_{OC} , kremniy, odatda $\sim 1.8\text{--}1.9$ V) [8]. Tandem elementlarda fill faktor (FF) ham yuqori bo'lishi mumkin (eng yaxshi hollarda >0.80). Natijada umumiy samaradorlik (PCE) sezilarli darajada yuqori bo'ladi.

Biroq tandemlar ayrim murakkabliklarni ham keltirib chiqaradi: 2T qurilmalarda tok muvofiqligi, qo'shimcha interfeys qatlamlari, va ko'proq ishlab chiqarish bosqichlari talab etiladi.

Shuningdek, butunlay perovskit asosidagi tandemlar ham mavjud bo'lib, ularda ikki (yoki uch) xil bandgapli perovskit qatlamlari ishlatiladi. Hozirgi rekord ($\sim 30.1\%$ [7]) 2T butun-perovskit tandemi ~ 1.8 eV keng bandgapli old va ~ 1.2 eV tor bandgapli orqa elementni, hamda ulovchi interfeys qatlamlarini o'z ichiga oladi. Butun-perovskit tandemlar og'irligi yengil, moslashuvchan va nisbatan arzon (kremniy yo'q) bo'lishi sababli jozibali, ammo ular perovskit–kremniy tandemlariga nisbatan hali rivojlanish bosqichida.

• **Moslashuvchan va boshqa innovatsion formatlar:**

PSCLar past haroratda plastik yoki metall folga substratlarida tayyorlanishi mumkinligi sababli, moslashuvchan PSCLar ham yaratilgan. Bu turdagi qurilmalarda substrat sifatida o'tkazuvchi plastmassa yoki metall folga ishlatiladi va odatda invers (p–i–n) tuzilma tanlanadi (mo'rt qatlamlarning yorilishidan saqlanish uchun).

Moslashuvchan PSCLarda $>18\text{--}20\%$ samaradorlikka erishilgan bo'lib, bu ulardan kiyiladigan quyosh qurilmalari yoki dronlarda foydalanish imkonini beradi. Biroq, moslashuvchan substratlarga (ko'pincha haroratga sezgir) yuqori sifatli qatlamlarni cho'ktirish murakkabroq bo'ladi.

Yarim shaffof perovskit elementlar ham mavjud bo'lib, bunday qurilmalarda ikkala tomonda shaffof elektrodlar (masalan, yupqa metall yoki o'tkazuvchi polimerlar) ishlatiladi. Bunday elementlar binoga integratsiyalangan quyosh panellari (BIPV), ayniqsa oynali fasadlarda ishlatilishi mumkin. Ularning samaradorligi pastroq ($10\text{--}15\%$), lekin boshqa elementlar bilan (tandemda yoki deraza + BIPV) birgalikda qo'llansa, umumiy tizimga hissa qo'shishi mumkin.

Bundan tashqari, perovskit modullari (shisha asosida ketma-ket ulanadigan elementlar) $\approx$ modul o'lchamida (o'nlab cm^2 faol maydon) $>17\text{--}20\%$ samaradorlikka erishgan, bu esa yirik hajmga o'tish uchun ijobiy belgidir, garchi laboratoriya elementlariga nisbatan bir necha foiz kam bo'lsa ham [3].

Quyidagi jadvalda perovskit quyosh elementlarining (PSC) ayrim turlari qisqacha taqqoslab ko'rsatilgan:

PSC turi / Arxitekturas	Odatdagi samaradorlik (labda)	Xususiyatlari	Izohlar
Mesoporli n–i–p (TiO_2 skeleti)	$\sim 15\text{--}20\%$ (rekord $\sim 20\%$)	Perovskit ostida qalin TiO_2 skeleti; yuqori J_{SC} ; dastlabki elementlarda standart bo'lgan.	UV barqarorlik muammoli bo'lishi mumkin (TiO_2 degradatsiyani kuchaytirishi mumkin); ishlab chiqarish murakkabroq. 2013-yildagi ilk rekordlar (15% [3]). Keyinchalik, elektron tashish uchun zarur emasligi aniqlangan.
Yassi n–i–p (kompakt ETL bilan)	$\sim 20\text{--}26\%$ (joriy rekordlar)	Mesoporli qatlam yo'q; faqat yupqa kompakt ETL (masalan, SnO_2) va uning ustida perovskit. Eng yuqori samaradorliklar shu struktura bilan erishilgan.	Ishlab chiqarish oson, yaxshi V_{OC} . Yuqori samaradorlik uchun interfeyslar va sirtini passivatsiya qilish kerak. Ko'plab rekord elementlarda qo'llangan (masalan, Min va boshq. 25.7% [3]).
Yassi p–i–n (teskari/inverted)	$\sim 18\text{--}24\%$ (rekord $\sim 23\%$)	Qatlamlar tartibi teskari (HTL birinchi). Odatda PEDOT:PSS, PTAA, PCBM kabi organik kontaktlar ishlatiladi. Past haroratli jarayon.	Kam gisterezis, moslashuvchan substratlarda integratsiya qilish oson. Samaradorlik tez ortib bormoqda – masalan, 22% va 0.84 fill faktor bilan natijalar ko'rsatilgan[5]. Tandemlarda mashhur

PSC turi / Arxitekturası	Odatdagi samaradorlik (labda)	Xususiyatlari	Izohlar
Butun-perovskit tandem (2T)	~25–30% (rekord ~30%)	Ikkita perovskit bo‘g‘in (masalan, 1.8 eV + 1.2 eV) monolitik ulangan. Oraliq rekombinatsiya qatlamidan foydalaniladi.	(masalan, perovskit/kremniy). >35% samaradorlik va to‘liq yupqa plyonka asosidagi ishlab chiqarish imkoniyati mavjud. Tok mosligi va Pb–Sn asosidagi past bandgapli elementning barqarorligi muhim. Akademik guruhlar tomonidan namoyish etilgan (masalan, Nanjing Univ. 30.1%[7]). Yuqori samaradorlik, mavjud Si texnologiyasidan foydalanish.
Perovskit/kremniy tandemi (2T)	~25–35% (rekord 34.85%)	Yuqorida perovskit, pastda kremniy. Sanoatda katta qiziqish mavjud (masalan, Oxford PV, LONGi).	Muammolar: perovskit qo‘shish jarayonida kremniyga zarar bermaslik va uzoq muddatli barqarorlik. LONGi tomonidan o‘rnatilgan rekord: 34.85% (2025)[8].
Perovskit/kremniy tandemi (4T)	~29–32% (mustaqil elementlar)	Perovskit va kremniy elementlar alohida tayyorlanadi, optik jihatdan ustma-ust joylashtiriladi, ammo elektr jihatdan mustaqil (4 terminal).	Prototiplashtirish osonroq (tok muvofiqligi talab etilmaydi), ammo ikki alohida ulanish qutisi talab etiladi. Binoga integratsiyalangan PV g‘oyalari uchun mos (masalan, oynavand perovskit + kremniy panel).
Moslashuvchan PSC (plastik yoki metall folga substratida)	~15–21%	Odatda planar p–i– n PET yoki po‘lat folga ustida. Past haroratda cho‘ktiruvchi	Samaradorligi shisha asosligiga nisbatan pastroq, lekin engil va bukiluvchan. Substrat orqali namlik o‘tishi

PSC turi / Arxitekturası	Odatdagi samaradorlik (labda)	Xususiyatlari	Izohlar
		qatlamlardan foydalaniladi.	sababli barqarorlik past bo‘lishi mumkin, agar yaxshi qadoqlanmasa.
		Asosiy e’tibor uzoq umrga qaratilgan: masalan, 2D perovskitli qoplama qatlamlari, butunlay noorganik tarkiblar (CsPbI ₃) va h.k.	Masalan, 2022-yilda Zhao va boshqalar tomonidan ~17% samaradorlik va 30 yillik xizmat muddati prognozi bilan namoyish etilgan[4]. Kamchilik – stabilizatorlar boshlang‘ich samaradorlikni biroz kamaytirishi mumkin.
Barqaror PSC (2D/3D yoki interfeys muhandisligi bilan)	~17–20% (yuqori barqarorlik bilan)		

Quyidagidan ko‘rinib turibdiki, PSClarning turli “modellari” maksimal samaradorlik, moslashuvchanlik yoki barqarorlikni ustuvor deb hisoblaydi. Hozirda perovskit elementlarining boshqa turdagi elementlar bilan kombinatsiyasi (ya’ni tandemlar) eng yuqori samaradorliklarni ta’minlamoqda. Shu bilan birga, faqat perovskitdan tashkil topgan qurilmalar ham barqarorlik borasida jadal takomillashmoqda. Kutilishicha, gibrid yondashuvlar – masalan, o‘rtacha pastroq tarmoqli kenglikka ega perovskitni boshqa polikristall yupqa plyonkali element (masalan, CIGS yoki hatto organik PV) bilan birlashtirish – o‘ziga xos qo‘llanilish sohaslarini egallashi mumkin (yarim shaffof PV uchun va hokazo). Allaqachon, perovskit/CIGS 4-terminalli tandem qurilmasi 24.2% samaradorlikka erishgan (EPFL, 2020) [9], bu esa perovskitlarning boshqa PV texnologiyalarini kuchaytirishdagi moslashuvchanligini namoyish qiladi.

I–V xarakteristikalari farqlari nuqtai nazaridan: past samaradorlikka ega element (masalan, 15%) odatda yuqori samaradorlikdagi elementga qaraganda pastroq fill faktor (FF) va/yoki ochiq kontakt kuchlanishiga (V_{OC}) ega bo‘ladi. Masalan, dastlabki MAPbI₃ asosidagi elementlarda $V_{OC} \sim 0.9$ V va FF ~ 0.6 – 0.7 bo‘lgan[3], bugungi optimallashtirilgan elementlarda esa $V_{OC} > 1.1$ V va FF ~ 0.80 – 0.85 darajaga yetgan. Tandemlar, kichik elementlar ketma-ket ulanganligi sababli, agar toklar mos kelmasa “S-shaklidagi” I–V egri chizig‘ini ko‘rsatishi mumkin, biroq moslik yaxshi bo‘lsa, FF yuqori bo‘ladi. Yagona bo‘g‘inli (single-junction) va tandem qurilmalar orasida farq shundaki, yagona bo‘g‘inli element bitta diod egri chizig‘iga ega bo‘lsa, 2-terminalli tandem amalda yuqori V_{OC} bilan bitta diod kabi ishlaydi. Shunday qilib, asosiy I–V farqi – bu kengaytirilgan kuchlanishdir.

Xulosa qilib aytganda, eng optimal konfiguratsiya foydalanish maqsadiga bog‘liq: agar mutlaq eng yuqori samaradorlik istalsa, tandem (perovskit + Si yoki ko‘p

bo'g'inli perovskit) afzal. Agar past narxli bosma panellar kerak bo'lsa, u holda faqat perovskit asosidagi, moslashuvchan substratdagi yagona bo'g'inli elementlar ustun bo'lishi mumkin – hatto samaradorlik biroz pastroq bo'lsa ham – chunki ishlab chiqarish soddaroq. Tadqiqotchilar ayni paytda bu yo'nalishlarning barchasini faol o'rganmoqdalar.

Nazariya va qo'llanilishi: Perovskit fotoelementlari istiqbollari

Nazariy chegaralar: Taqiqlangan zona kengligi taxminan 1.6 eV bo'lgan yagona bo'g'inli perovskit fotoelementining muvozanat (Shockley–Queisser) samaradorlik chegarasi taxminan 30–33% ni tashkil qiladi[14]. Hozirgi samaradorlik allaqachon 25% atrofida bo'lib, kelgusida bu raqamni 27–29% ga yetkazish mumkin, agar masalan, spektrning qizil qismida kvant hosildorligini oshirish, V_{OC} ni nurlil chegaraga yaqinlashtirish uchun barcha nuqsonlarni passivatsiyalash va hokazo kabi yo'qotishlar bartaraf etilsa. Hozirgi fotoelementlarning tashqi lyuminessensiya samaradorligi hali eng yaxshi GaAs yoki kremniy elementlar darajasida emas, bu esa hali imkoniyatlar mavjudligini ko'rsatadi. Nazariy jihatdan, agar perovskit element tomonidan yutilgan fotonlarning 10–20% ini qayta chiqarishga qodir bo'lsa (bu kam nurlanmasdan rekombinatsiya belgisidir), V_{OC} ni taqiqlangan zona kengligi minus ~ 0.2 V ga yaqinlashtirish mumkin. Masalan, 1.6 eV taqiqlangan zona kengligi uchun bu ~ 1.3 – 1.4 V V_{OC} ni bildiradi. Agar J_{SC} va FF yuqori bo'lib qolsa, bu 28–30% yagona bo'g'inli samaradorlikka olib kelishi mumkin — bu juda yuqori, ammo erishib bo'ladigan maqsaddir.

Tandem va ko'p p-n-o'tishli perovskit qurilmalar esa yanada yuqori nazariy samaradorlik chegarasiga ega (ideal ikki p-n-o'tishli tandem uchun 43%, uch **p-n-o'tishli** uchun esa taxminan 50% (1 sun ostida)). Amaliy yo'l xaritasi esa kelgusi o'n yillikda perovskit–kremniy tandem (yoki faqat perovskitli uch **p-n-o'tishli** qurilma) bilan 40% ga erishishni mo'ljallamoqda. LONGi tomonidan namoyish etilgan 34.85% samaradorlikli tandem allaqachon yagona bo'g'inli chegarani oshib ketdi[8] va kelgusidagi yutuqlar yaxshiroq tok muvozanati va optik boshqaruv (aks ettirishni kamaytirish, infraqizil yutilishni oshirish uchun tuzilmali interfeyslar qo'llash) orqali amalga oshirilishi mumkin. So'nggi hisobotlarda uchta **p-n-o'tishga** ega uch bo'g'inli perovskit elementlar katta yuzada $\sim 20\%$ samaradorlikka erishgani qayd etilgan[15], bu esa yanada ko'p bo'g'inli tizimlarga yo'l ochadi.

Barqarorlik va tijoratlashtirish: Asosiy amaliy muammo – uzoq muddatli barqarorlikni ta'minlashdir. Muhim bosqichlar bosib o'tilgan – masalan, 2022 yilda tadqiqotchilar 30 yillik ekvivalent umrga ega qurilmani (ma'lum sinov sharoitlarida, kapsulatsiyalangan holda) namoyish etishdi, bunda interfeyslarni barqarorlashtirish uchun 2D himoya qatlami qo'llanilgan (Zhao va boshq., Science 2022)[4]. Ushbu qurilmaning samaradorligi nisbatan past ($\sim 17\%$) bo'lgan, ammo perovskitlarni uzoq umrli qilish mumkinligini isbotlagan. Kapsulatsiyani yaxshilash, barqaror kompozitsiyalarni tanlash (masalan, MA ni FA/Cs bilan almashtirish, perovskitni buzmaydigan noorganik HTL lar), o'zini tiklaydigan qo'shimchalar kabilar hozirda faol o'rganilmoqda. Ayrim startaplar (Oxford PV, Microquanta, Saule Technologies va boshqalar) allaqachon tajriba ishlab chiqarish liniyalarini barpo etmoqdalar.

Masalan, Oxford PV boshlang'ich mahsulot samaradorligi ~27% bo'lgan tandem elementlarni tijoratlashtirishni rejalashtirmoqda va kapsulatsiyalangan tandem modullar uchun 20 yillik umrni va'da qilmoqda[91]. Qurilishga integratsiyalangan fotovoltaika (BIPV) maqsadli bozor hisoblanadi: agar barqarorlik ta'minlansa, yarim shaffof perovskit panellardan deraza yoki fasad elementi sifatida foydalanish mumkin.

Qo'llanilish sohalari: Agar muammolar hal qilinsa, PSC lar turli sohalarda qo'llanilishi mumkin. Ularning yuqori samaradorligi va engil og'irligi quyosh energiyasi bilan ishlaydigan dronlar yoki transport vositalari uchun imkoniyatlar yaratadi. Moslashuvchanligi va yarim shaffofligi esa ularni derazalarga, issiqxonalar (o'simliklar uchun mos tuslar) yoki kiyiladigan qurilmalarga integratsiyalash imkonini beradi. Tandem perovskit–kremniy panellar mavjud kremniy quyosh fermalarini modernizatsiya qilish uchun ishlatilishi mumkin — masalan, tayyor kremniy elementlar ustiga perovskit qatlamini laminatsiyalash orqali “retrofit” tandem hosil qilish. Tarmoqdan mustaqil va kosmik ilovalar ham ko'rib chiqilmoqda: PSClarning yuqori quvvat-og'irlik nisbati kosmos uchun jozibali, garchi radiatsiyaga chidamlilik hali muammo bo'lsa-da (dastlabki sinovlar proton nurlanishida tez degradatsiyani ko'rsatgan, ammo ba'zi qo'shimchalar bilan buni kamaytirish mumkin).

Ekologik va xavfsizlik jihatlari: PSC lardagi qo'rg'oshin xavotir uyg'otadi; ammo perovskitning 1 m² da mavjud bo'lgan qo'rg'oshin miqdori (~0.1 g) avtomobil akkumulyatoridagidan ancha kam, va kuchli kapsulatsiya oqibatida sizib chiqish ehtimoli oldini oladi[3]. Panel zararlanganda qo'rg'oshinni ushlab qoluvchi maxsus qoplamalar bo'yicha tadqiqotlar davom etmoqda. Shu bilan birga, qo'rg'oshinsiz muqobil elementlar ustida ilmiy izlanishlar olib borilmoqda, ammo ularning samaradorligi hali Pb asosidagi perovskitlarga teng emas.

Xulosa: Perovskit quyosh elementlari – bu qattiq jism fizikasi, kimyo va materialshunoslikning uyg'unlashgan sohasi bo'lib, qisqa vaqt ichida kelgusi avlod fotovoltaikasi uchun yetakchi nomzodga aylandi. Ilmiy jihatdan ular o'ziga xos nuqson fizikasi (nuqsonlarga nisbatan bardoshlilik, ion harakati) va sozlanish xususiyatlari bilan qiziqarli. Amaliy jihatdan esa ular quyosh energiyasi narxini yanada pasaytirish va yangi qo'llanilish imkoniyatlarini taqdim etish potentsialiga ega. 2009 yildagi 3.8% samaradorlikdan 2025 yildagi 35% tandemga erishish – bu qayta tiklanuvchi energiya tadqiqotlaridagi eng hayratlanarli rivojlanish tarixlardan biridir va u hanuz davom etmoqda. Barqarorlik va yirik masshtabdagi ishlab chiqarish sohalaridagi izchil yutuqlar bilan, yaqin kelajakda perovskit texnologiyasi an'anaviy quyosh panellarini to'ldirishi yoki hatto ularni bozorda ortda qoldirishi mumkin – bu esa bizni barqaror energetik kelajak sari yaqinlashtiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

- Kojima, A.**, Teshima, K., Shirai, Y., Miyasaka, T. (2009). *Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells*. **J. Am. Chem. Soc.**, 131(17), 6050–6051[3]. (First demonstration of a perovskite-sensitized solar cell, ~3.8% efficiency.)
- Im, J.-H.**, Lee, C.-R., Lee, J.-W., Park, S.-W., Park, N.-G. (2011). 6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell. **Nanoscale**, 3(10), 4088–4093[3]. (Improved dye-sensitized style PSC with higher efficiency.)
- Lee, M. M.**, Teuscher, J., Miyasaka, T., Murakami, T. N., Snaith, H. J. (2012). *Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-superstructured Organometal Halide Perovskites*. **Science**, 338(6107), 643–647[3]. (Introduced solid-state mesoscopic PSC with spiro-OMeTAD, ~9–10% PCE.)
- Burschka, J.**, Pellet, N., Moon, S.-J., Humphry-Baker, R., Gao, P., Nazeeruddin, M. K., Grätzel, M. (2013). *Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells*. **Nature**, 499(7458), 316–319[3]. (Two-step deposition method yielding >15% efficiency.)
- Malinkiewicz, O.**, Yella, A., Lee, Y. H., et al. (2014). *Perovskite solar cells employing organic charge-transport layers*. **Nat. Photonics**, 8, 128–132[3]. (First planar inverted PSC via evaporation, ~12% PCE.)
- Liu, M.**, Johnston, M. B., Snaith, H. J. (2013). *Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapor deposition*. **Nature**, 501(7467), 395–398[3]. (Planar n–i–p PSC by co-evaporation, >15% PCE.)
- Zhou, H.**, Chen, Q., Li, G., et al. (2014). *Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells*. **Science**, 345(6196), 542–546[3]. (Achieved ~19% efficiency via interface and morphology control.)
- Jeon, N. J.**, Noh, J. H., Kim, Y. C., et al. (2014). *Solvent engineering for high-performance inorganic–organic hybrid perovskite solar cells*. **Nature Mater.**, 13(9), 897–903[3]. (Introduced mixed solvent and anti-solvent techniques; led to ~17% PCE and improved reproducibility.)
- Min, H.**, Lee, D. Y., Kim, J., Kim, G., Lee, K. S., Kim, K. S., **Seok, S. I.** (2021). *Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO₂ electrodes*. **Nature**, 598, 444–450[3]. (Reported a 25.7% efficient single-junction PSC with enhanced interfaces.)
- NREL, Best Research-Cell Efficiency Chart** (2022). National Renewable Energy Laboratory, rev. June 2022[3]. (Public data of record PV cell efficiencies – includes perovskite single-junction (25.7%) and tandem (34.5%) records up to 2022.)

Bellini, E., Shaw, V. (2025). *Longi achieves 34.85% efficiency for two-terminal tandem perovskite solar cell*. **PV Magazine**, April 18, 2025[8]. (News report of LONGi's record two-terminal perovskite/Si tandem, certified 34.85%.)

American Ceramic Society – Ceramic Tech Today (2023). *Perovskite solar cells charge ahead to record-breaking efficiencies*[5]. (Article summarizing recent efficiency records: perovskite-silicon tandems >33%, and all-perovskite tandem ~22% with FF 84%.)

Zhao, X., Liu, T., Burlingame, Q. C., et al. (2022). *Accelerated aging of all-inorganic, interface-stabilized perovskite solar cells*. **Science**, 377(6607), 307–310. (Demonstrated a CsPbI/Cl perovskite solar cell with 17% initial efficiency and projected 30-year lifetime, using a 2D capping layer to greatly improve stability[4].)

Park, N.-G. (2015). *Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology*. **Mater. Today**, 18(2), 65–72[3]. (Early review article discussing the rise of PSCs and their potential, by one of the pioneers in the field.)

Ossila Ltd. (n.d.). *Solar Cell Efficiency Formula – Ossila Knowledge Centre*[2]. (Web resource explaining how to calculate PCE, with definition of J_{SC} , V_{OC} , FF, etc.)

[1] Perovskite Solar Cells | Department of Energy

<https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>

[2] History of Perovskites and Perovskite Solar Cells | Ossila

<https://www.ossila.com/pages/history-and-evolution-of-perovskites>

[3] Perovskite solar cell - Wikipedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Perovskite_solar_cell

[4] First Long-Lived Perovskite Solar Cells Developed | BNL Newsroom

<https://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=221018>

[5] Perovskite solar cells charge ahead to record-breaking efficiencies - The American Ceramic Society

<https://ceramics.org/ceramic-tech-today/perovskite-solar-cells-charge-ahead-to-record-breaking-efficiencies/>

[6] Achievements, challenges, and future prospects for industrialization of perovskite solar cells | Light: Science & Applications

https://www.nature.com/articles/s41377-024-01461-x?error=cookies_not_supported&code=8c6c796a-271f-4493-8621-afc1c7a81279

[7] Highest Perovskite Solar Cell Efficiencies (2025 Update) — Fluxim

<https://www.fluxim.com/research-blogs/perovskite-silicon-tandem-pv-record-updates>

[8] Longi achieves 34.85% efficiency for two-terminal tandem perovskite solar cell – pv magazine International

<https://www.pv-magazine.com/2025/04/18/longi-achieves-34-85-efficiency-for-two-terminal-tandem-perovskite-solar-cell/>

[9] Energy Efficiency of Perovskite Solar Cells

<https://g2voptics.com/nrel-perovskite-efficiency/>

[10] Perovskite Solar Cell - Lumina Solar

<https://luminasolar.com/perovskite-solar-cell/>

[11] Solar Cell Efficiency Formula | Ossila

<https://www.ossila.com/pages/solar-cell-efficiency-formula>

[12] IV Curve - PVEducation.Org

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>

[13] Nominal Voltage, Voc, Vmp, Isc | Solar Panel Specifications

<https://www.electronicsforu.com/market-verticals/solar/difference-nominal-voltage-voc-vmp-is-imp-solar-panels>

[14] A Perspective on Perovskite Solar Cells: Emergence, Progress, and ...

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9035841/>

[15] A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture ...

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X20300888>

[18] Perovskite solar cell – Wikipedia - 18

https://en.wikipedia.org/wiki/Perovskite_solar_cell

[16] Perovskite Silicon Tandem Cells: Future of Solar Energy?

<https://www.electronicsforu.com/technology-trends/perovskite-silicon-tandem-cells-leading-future-of-solar-energy>

[17] Highest Perovskite Solar Cell Efficiencies (2025 Update) — Fluxim

<https://www.fluxim.com/research-blogs/perovskite-silicon-tandem-pv-record-updates>

[20] Designing next-gen solar panels with 50-year durability requirements for space missions

<https://atomfair.com/scibase2/article.php?id=185>

[19] NUS team achieves 26.4% efficiency of perovskite - organic tandem solar cell | Perovskite-Info

<https://www.perovskite-info.com/nus-team-achieves-264-efficiency-perovskite-organic-tandem-solar-cell>

[21] Wide-Bandgap Perovskite/Gallium Arsenide Tandem Solar Cells - Li

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.201903085>

[22] [PDF] An Exploration of All-Inorganic Perovskite/Gallium Arsenide ...

<http://lab.semi.ac.cn/library/upload/files/2021/6/1155110609.pdf>

[23] The best performance of 2-T CsPbI₃Br_x/GaAs tandem solar ...

https://www.researchgate.net/figure/The-best-performance-of-2-T-CsPbI-3Ax-Br-x-GaAs-tandem-solar-cells-at-the-points-of_tbl1_351091987

[24] (PDF) Monolithic Tandem Solar Cell With Co-Sensitized DSSC and ...

https://www.researchgate.net/publication/395731135_Monolithic_Tandem_Solar_Cell_With_Co-Sensitized_DSSC_and_Perovskite_Sub-Cells_Using_Spectral_Filtering_for_High-Efficiency_Photon_Management

[25] Enhanced Performance of Dye-Sensitized Solar Cells Using ...

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-019-07272-w>

[26] Tandem dye-sensitized solar cells achieve 12.89% efficiency using ...

<https://www.nature.com/articles/s41598-024-75959-0>

[27] Recent Progress in Developing Monolithic Perovskite/Si Tandem ...

<https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2020.603375/full>

[28] Optimization of absorption bands of dye-sensitized and perovskite ...

<https://xlink.rsc.org/?DOI=C4CP01937G>

[29] Tandem dye-sensitized solar cells with efficiencies surpassing 33 ...

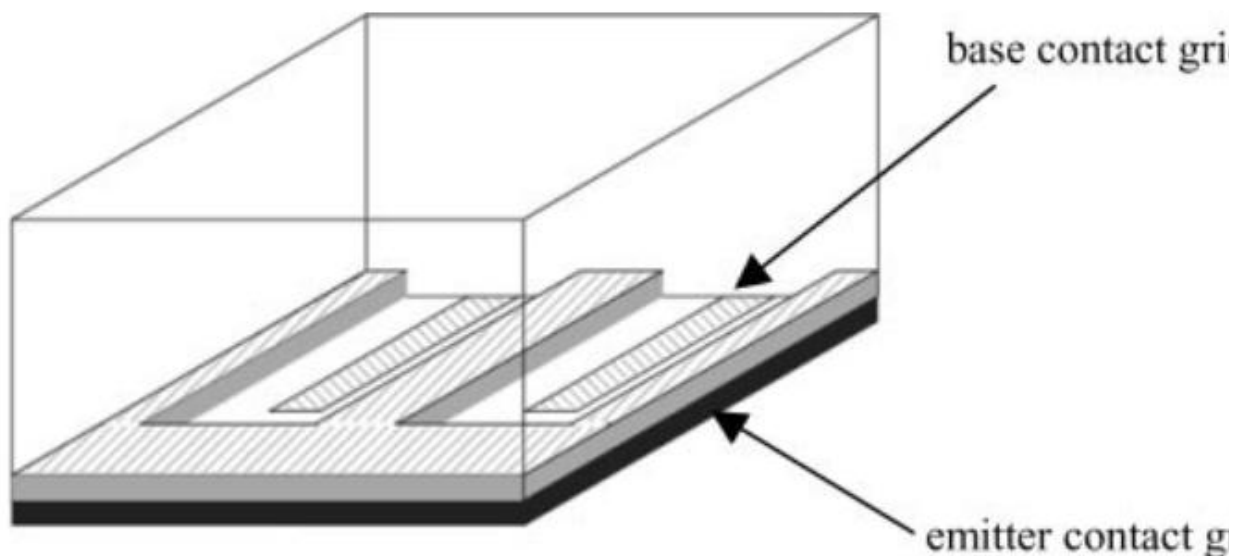
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894722028376>

5.1. ORQA KONTAKTLI (BC) QUYOSH ELEMENTLARI

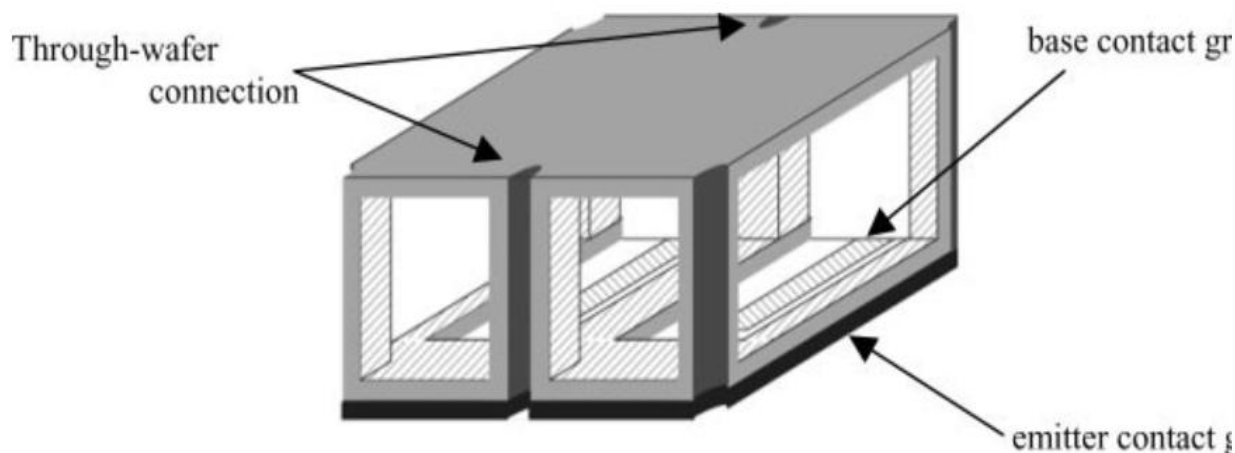
Kirish

Back-contact (BC) quyosh batareyalari barcha elektrodnlarni qurilmaning orqa tomoniga ko'chiradi, old tomondagi metall kontaktlarni olib tashlaydi va quyosh nurining to'liq yutulishiga imkon beradi[1]. Van Kerschaver va Beaucarne (2006) qayd etganidek, BC element arxitekturasini bo'yicha tadqiqotlar Schwartz tomonidan 1975 yilda birinchi marta taklif qilinganidan boshlangan[1]. BC dizaynlari uch asosiy toifaga bo'linadi:

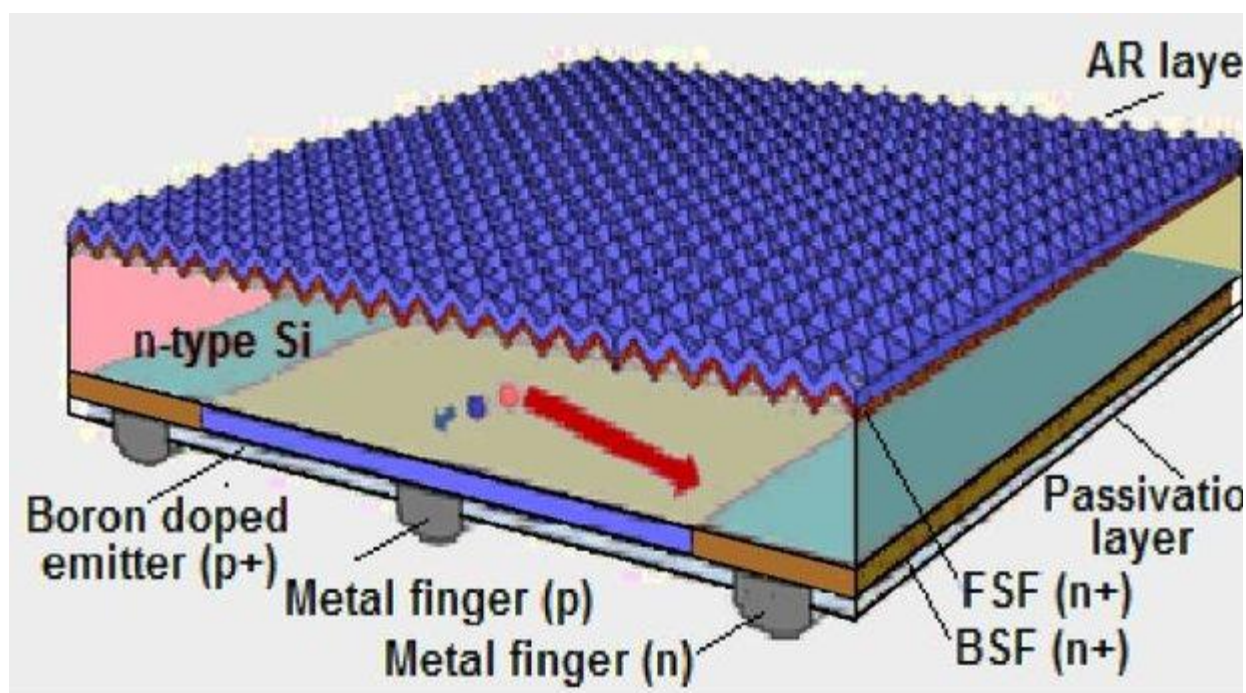
- Interdigitated Back-Contact (IBC) - integratsiyalangan orqa kontakt (back-junction, BJ) elementlar: ikkala p-n bog'lanish ham orqa tomonida joylashgan; old tomonida emitter mavjud emas (1-rasm)[2].
- Emitter Wrap-Through (EWT) elementlar: emitter old tomonda qoladi, lekin kontaktlar orqa tomonga teshiklar orqali o'tqazilgan (2-rasm) [3].
- Metallizatsiya Wrap-Through (MWT) yoki kontakt-wrap-through (CWT) elementlar: old tomondagi metall to'rtini saqlagan holda elektr ulanmalari orqa tomondagi element plitalariga yo'naltiriladi(3-rasm)[4].



1-rasm. Orqaga tutashgan quyosh batareyasining sxematik tasviri (DOI: 10.1002/pip.657)



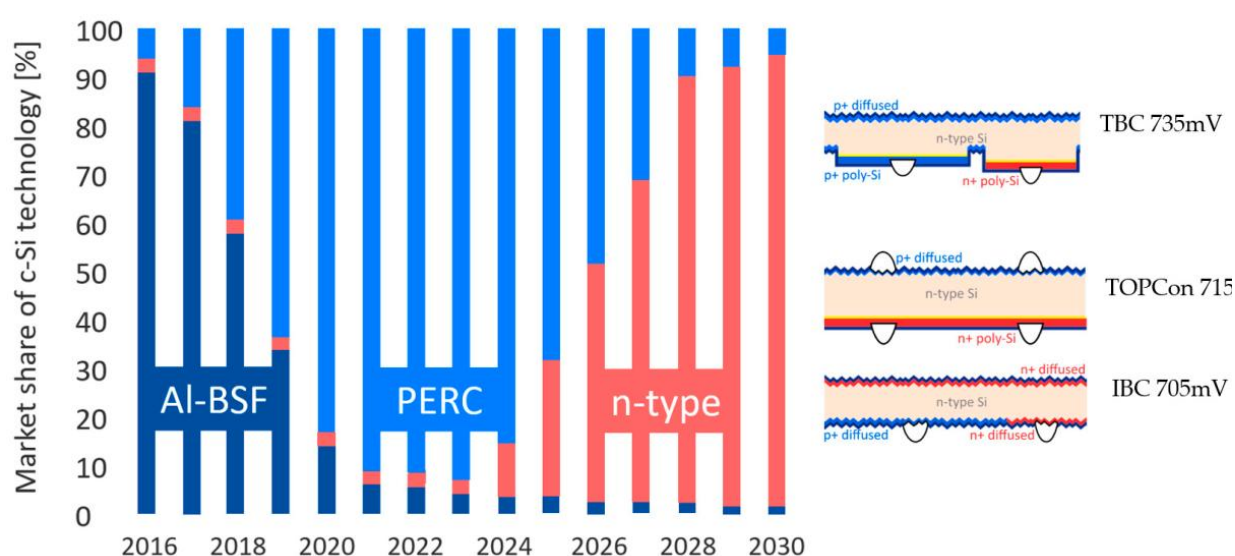
2-rasm. Emitterni orqa tomonigacha uzatgan quyosh batareyasining sxematik tasviri (DOI: 10.1002/pip.657).



3-rasm. Old tomoni: aks ettirishga qarshi teksturali Si; Orqa tomoni: o'zgaruvchan metall kontaktli n^+ va p^+ plitalar. [10.1109/HONET.2012.6421444](https://doi.org/10.1109/HONET.2012.6421444)

IBC elementlari old tomon skrinlarini (soyalanishini) bartaraf etadi (ya'ni front kontaktlar yo'q) va orqa metallizatsiya maydonini kengaytiradi, natijada batareya-ning ketma-ket qarshiligi kamayadi[5]. Ammo ularning ishlashi uchun yuqori sifatli materiallar talab etiladi: tashuvchi zaryad elementlari uchun uzoq tarqalish uzunligi va a'lo darajada sirt passivatsiyasi (old sirt rekombinatsiyasining minimal darajasi) kerak bo'ladi[5]. Amalda, IBC elementlar ko'pincha yuqori qarshilikli kremniydan foydalanadi va old sirt rekombinatsiyasini minimallashtirishga e'tibor beradi, shu sababli tokga deyarli faqat orqa tomonidagi p-n bog'lanishlar ta'sir qiladi. Van K

erschaver va Beaucarne ta'kidlaganidek, ketma-ket qarshilik va soyalanish o'rtasid a hech qanday ziddiyat bo'lmagani uchun, orqa bog'lanishni minimal saturatsiya va yuqori to'ldirish omiliga(Fill Factor, FF) erishish uchun optimallashtirish mumkin[6]. Bu esa BC elementlarni tandemli qurilmalarda ayniqsa istiqbolli qiladi: pastki subbatareya sifatida BC kremniy elementi ortiqcha tokni butun tizim bo'ylab ketma ket ulanishsiz old bloklarda yo'qotmasdan orqa kontaktlar orqali chiqarishi mumkin[7]. Bu BC (orqa kontaktli) elementlarini ayniqsa tandem qurilmalarda istiqbolli qiladi: pastki subelement sifatida, BC kremniy elementi ortiqcha tokni orqa kontaktlari orqali uzatishi mumkin, bu esa butun struktura bo'ylab ketma-ket ulanish natijasi yuzaga keladigan tok (current-matching) yo'qotishlaridan saqlanish imkonini beradi[7].



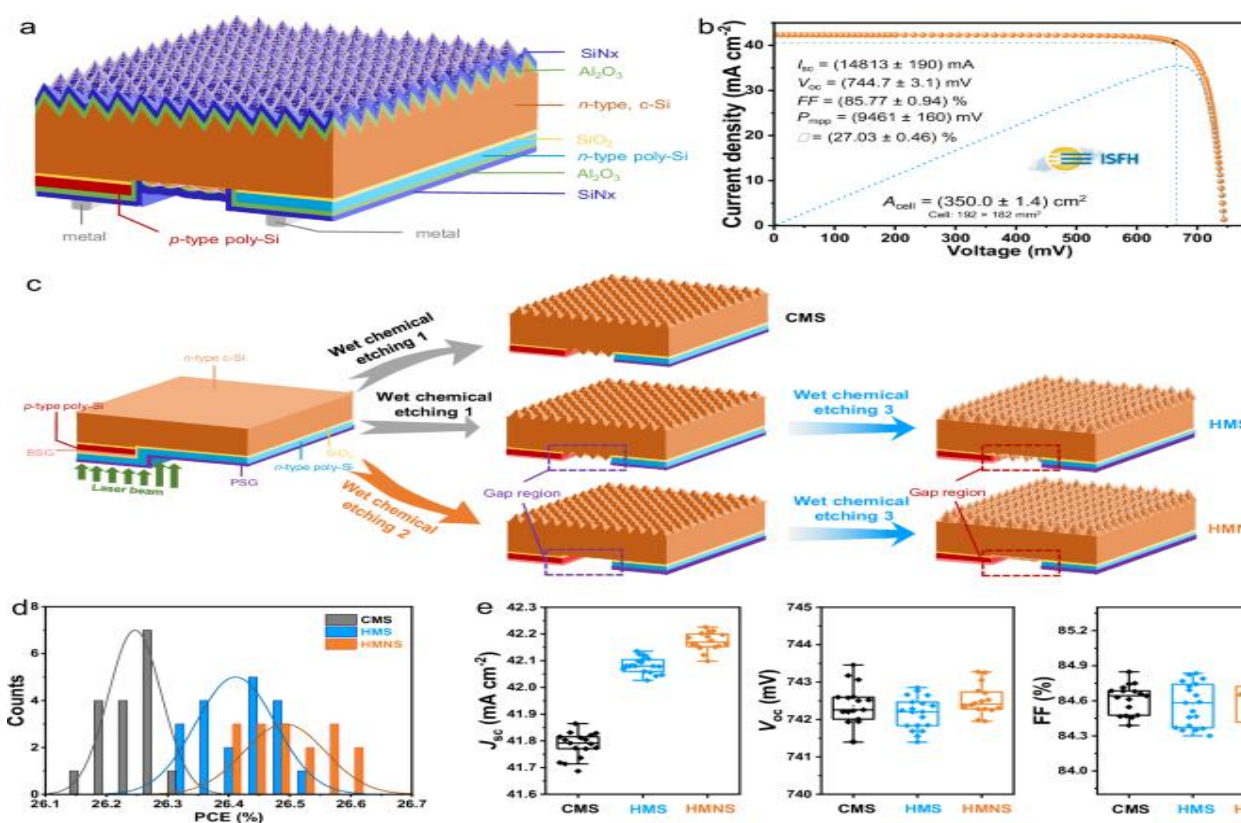
4-rasm. Al-BSF, PERC va n-turdagi quyosh batareyasi texnologiyalarining bozor ulushi, [3,4] (chapda) va n-turdagi texnologiyalarning 1 nm yupqa oksid qatlami (sariq chiziq) bilan bir yoki ikkita tashuvchi-tanlovchi kontaktsiz kesimlaridan qayta olingan bo'lib, mos ravishda 705 mV, 715 mV yoki 735 mV ga olib keladi (o'ngda).

BC quyosh elementlarida samaradorlikni oshirish

Rivojlanish tarixi va samaradorligi

1980–90-yillarda Purdueda va Stanfordda o'tkazilgan dastlabki tadqiqotlar I BC elementlarini konsentrator batareyalari sifatida namoyish etdi, keyinchalik esa ularni tekis qatlamli ilovalarga ham kengaytirdi (masalan, 1993-yilda SunPower kompaniyasi tomonidan yaratilgan “dunyo quyi-seriya avtomobili”[8]). 1990-yillarning o'rtalarida SunPower katta maydonli IBC elementlarda o'rtacha >22% samaradorlikka erishdi[9]. Doimiy ilmiy-tadqiqotlar va ishlanmalar rekord natijalarni yanada

oshirib bordi: yaqinda IBC silikon elementlarning samaradorligi 27% dan oshdi[9]. Masalan, SunPower kompaniyasining gibrid IBC (amorf Si passivatsiyasi yordami da) laboratoriya sharoitida 27.09% samaradorlikni (25.6% ochiq maydon sharoitida) qayd etdi[9], va Tong va boshq. (2025) 350 sm² yuzali tunnel-oksidli orqa kontakt (TBC) elementi uchun 27.03% natijani ko'rsatishdi[9]. Shuningdek, perovskit elementlari ham BC dizaynlarni qo'llashni boshladi: Blackburn va boshq. (2025) ma'lum otlariga ko'ra, BC-perovskitlar samaradorligi 2016 yilda ~6.5% dan 11% gacha oshgan[10] (so'nggi mikrostrukturali modullar samaradorligi taxminan 12.8% atrofida barqarorlashgan[10]). Bu yutuqlar quyidagi NREL diagrammasida aks etgan:



5-rasm: a) Qurilma konfiguratsiyasining diagrammasi. b) 350.0 sm² o'lchamdagi elementning tok-kuchlanish (I–V) va quvvat-kuchlanish (P–V) egri chiziqlari (p-tip soha: 300 μm, n-tip soha: 200 μm, qadam (pitch): 650 μm, plastinka qalinligi: 170 μm) – bu hajmdagi tijorat darajasidagi bir-bog'lanmali kremniy quyosh elementlari orasida umumiy maydon bo'yicha 27.03% samaradorlik bilan jahon rekordi o'rnatildi. c) Ushbu tadqiqotda o'rganilgan turli teksturaviy jarayonlar va sirt strukturalarining sxematik diagrammasi. d) Sanoat miqyosida ishlab chiqarilgan TBC (TOPCon Back Contact) quyosh elementlarining samaradorlik taqsimoti (p-tip soha: 450 μm, n-tip soha: 330 μm, qadam: 920 μm, plastinka qalinligi: 130 μm), CMS, HMS va HMNS asosida. e) Statistik Jsc (chapda), Voc (o'rtada) va FF (o'ngda) ko'rsatkichlari.

5-rasm: Kremniy IBC (yagona bog'lanmali kristalli kremniy, ko'k) hozirda taxminan 27% samaradorlikka yetmoqda [4][3]. Perovskit–kremniy tandemlari (quyi o'ng

da) 30% dan oshgan, III–V asosidagi tandem qurilmalar esa 47% dan ortiq samaradorlikka erishgan. (Ma'lumot manbasi: NREL [14].)

BC quyosh elementlarida samaradorlikni oshirish

Quyosh elementlarining samaradorligi (η) yutuluvchi quyosh nurlanishiga nisbatan chiqish elektr quvvatining ulushi sifatida belgilanadi. BC (orqa kontaktli) elementlar 1970-yillardagi ~15% dan hozirgi kungacha 27% dan ortiq darajaga yetdi — bu optik yo‘qotishlarning kamayishi, yaxshilangan passivatsiya va ilg‘or materiallar tufayli yuz berdi.

Samaradorlikni oshiruvchi asosiy omillar:

- **Old tomondan soylanishni yo‘qotish:** An’anaviy elementlar old kontakt panjarasi sababli 5–10% yorug‘likni yo‘qotadi; BC dizaynlari 5–7% ko‘proq yorug‘likni ushlaydi (Structuring IBC, 2024).
- **Passivatsiyani yaxshilash:** SiO₂ yoki Al₂O₃ kabi qatlamlar rekombinatsiyani kamaytirib, Voc ni 0.6 V dan 0.75 V gacha oshiradi (Improved Passivation, 2025).
- **Tashuvchilarni yig‘ishni optimallashtirish:** Orqada joylashgan interdigitate (bir-biriga o‘xshash) naqshlar ketma-ket qarshilikni (Rs) kamaytiradi va FF ni 70% dan 85% gacha oshiradi (Bifacial IBC, 2018).
- **Materiallardagi o‘zgarishlar:** p-tip kremniydan n-tipga o‘tish bor-oksigen defektlarini kamaytiradi; HJT yoki TOPCon bilan integratsiya qilinishi 2–3% qo‘shimcha samaradorlik beradi (Interdigitated Back Contact, 2025).
- **Ikki tononlama elementlar va masshtablash:** Zamonaviy BC elementlari bifasiyal bo‘lib, orqa yorug‘likni ham yutadi va ~20% ko‘proq quvvat beradi (Kim va boshq., 2022).

Vaqt bilan o‘zgargan Samaradorlik Tarixi (1-jadval)

Yil	Model/Tur	Samaradorlik (%)	Asosiy Yaxshilanish	Manba
1977	Dastlabki IBC prototipi	15–18	Interdigitate dopantlash	Lammert & Schwartz
1997	SunPower IBC	22	Lazerni naqshlash	Verlinden va boshq.
2014	Panasonic HJT-IBC	25.6	Amorf kremniy passivatsiyasi	Taguchi va boshq.
2017	POLO-IBC	26.1	Polikremniy kontaktlari	Richter va boshq.
2022	ALD IBC	18.6 (katta maydon)	Niqobsiz ishlab chiqarish	Procel-Moya va boshq.
2024	SHJ-BC	27.09	Lazerni kontakt ochish	Chen va boshq.
2025	BC-TOPCon Gibridi	27.5+	Antirefleksiyani optimallashtirish	Li va boshq. [web:52, web:59]

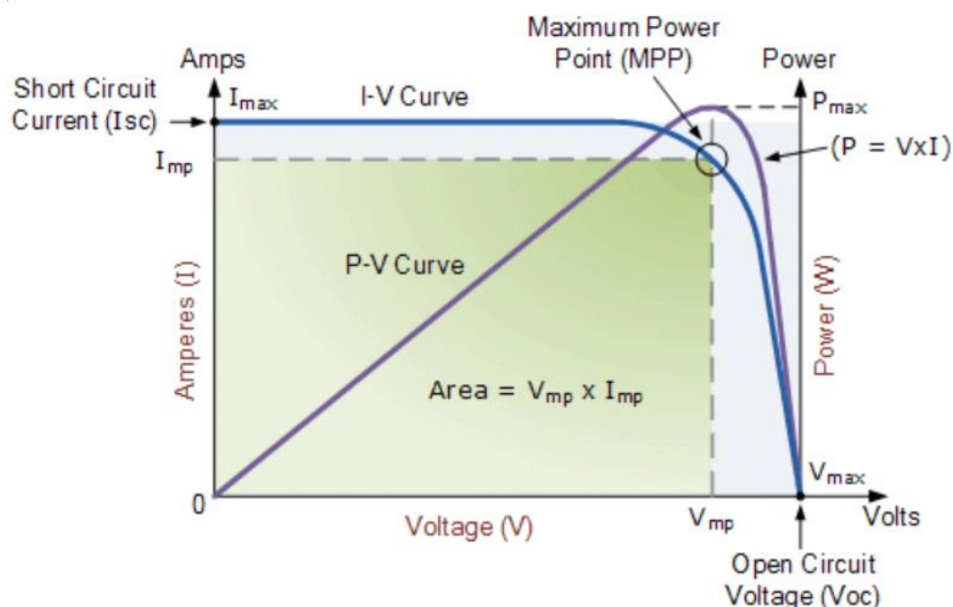
Nanotexnologiya va sun'iy intellekt asosida optimallashtirilgan loyihalar orqali samaradorlik oshmoqda va 2030-yilga kelib 30% ko'rsatkichga erishish mo'ljallanmoqda (FuturaSun, 2023).

Ushbu grafik va adabiyotlar tahliliga ko'ra, IBC kremniy elementlari yakka-junksiya Si bo'yicha rekord samaradorlikni egallab turibdi (taxminan 27% [4][3]). Perovskit asosidagi BC qurilmalar hali rivojlanish bosqichida bo'lib, ularning samaradorligi ikki xonali past ko'rsatkichlarda ($\geq 11\%$ [12]). Aksincha, ko'p-junksiya (2 yoki undan ortiq junksiya) tandem elementlar allaqachon ancha yuqori rekord samaradorlikka erishgan ($\approx 47\%$ [6]).

Muhimi shundaki, BC natijalari haqida so'z yuritilganda, quvvatni aylantirish samaradorligi (PCE – power conversion efficiency) quyidagi standart usulda hisoblanadi:

$$PCE = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{MP} \times V_{MP}}{P_{in}} = \frac{J_{SC} V_{OC} FF}{P_{in}}$$

Bu yerda J_{SC} — qisqa tutashuv oqim zichligi, V_{OC} — ochiq kontakt kuchlanishi va FF — to'ldirish koeffitsientini bildiradi [7]. Masalan, Tong va boshqalar $J_{SC} \approx 42.3 \text{ mA/cm}^2$ bo'lgan, kristalli kremniy uchun g'ayrioddiy yuqori oqim ko'rsatkichiga ega 27.03% TBC elementni hisobot qilganlar [4]. Yoritish sharoitida I–V egri chizig'i (quyida) odatda V_{OC} da nol oqim va nol kuchlanishda I_{SC} ni ko'rsatadi [7]. Eng yuqori quvvat nuqtasi (MPP) esa shu ikki qiymat oralig'ida joylashadi va FF shu nuqta orqali aniqlanadi [7].



6-rasm. Ideal quyosh elementi tenglamasi: $I = I_L - I_0 (\exp(qV/kT) - 1)$, bu yerda: I_L — yorug'lik ta'sirida hosil bo'lgan oqim, I_0 — teskari to'yinganlik oqimi, q — elektron zaryadi, k — Boltsman doimiysi, T — harorat (Kelvinlarda) ifodalaydi (**Manba:** Quyosh elementlari nazariyasi, Vikipediya).

Qurilma fizikasi: BC (Back-Contact) elementlarida p–n o'tish oraliqlari orqada, ya'ni elementning orqa tomonida joylashgan bo'ladi. Silikonli IBC (Interdigitated Back Contact) elementlarida orqa yuzaning bir qismi p⁺-tip dopant bilan, navbatdagi qismi esa n⁺-tip dopant bilan diffuziya orqali doplangan bo'ladi. Ichki elektr maydonlari aynan shu orqa p–n o'tishlarda hosil bo'ladi.

Bulk (asosiy) qismda hosil bo'lgan elektronlar yonalish bo'yicha (yoki dopant gradienti tufayli drift orqali) n⁺ mintaqaga, teshiklar esa p⁺ mintaqaga harakat qiladi. Zaryad tashilishi standart yarim o'tkazgichning uzluksizlik va drift-diffuziya tenglamalari asosida sodir bo'ladi: Poisson tenglamasi energiya zonalarining egilishi (band bending) ni belgilaydi, zaryad tashuvchi oqim esa

$$J = q\mu nE + qD \, dn/dx$$

ko'rinishida kontaktlarga oqib boradi.

Umumiy tok-kuchlanish (I–V) xatti-harakati hamon diodga o'xshash Shokli tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$J = J_0[\exp(qV/nkT) - 1] - J_{ph}$$

bu yerda J_0 — to'yinganlik toki bo'lib, rekombinatsiyani ifodalaydi.

Yuqori sifatli BC elementlarida J_0 qiymati kichik bo'lishi kerak (uzun umrli zaryad tashuvchilar va kam sirt rekombinatsiyasi orqali), bu esa V_{oc} va FF (to'ldirish koeffitsienti) ni oshirishga olib keladi.

Amaliyotda yuqori samaradorlikka ega IBC silikon elementlari mukammal passivatsiya qatlamlaridan (masalan, ALD orqali olingan yupqa oksidlar yoki amorf kremniy qatlamlari) foydalanadi, bu orqali sirt rekombinatsiyasi sezilarli darajada kamaytiriladi(1)(4).

Masalan, **Chu va boshq.** tomonidan taklif etilgan maxsus kontaktlarsiz IBC jarayoni natijasida $V_{oc} > 700 \text{ mV}$ ga erishilgan, bu qiymat har bir kontaktga ultra yupqa tunnel oksidi qo'shilganda yanada oshishi mumkin(2).

Haqiqatan ham, yuqoridagi 4-rasmda ko'rsatilganidek, bitta yoki ikkita tunnel-oksid/passivatsiyalovchi qatlam qo'shilishi orqali erishiladigan V_{oc} ni taxminan 10–30 mV ga oshirish mumkin: o'rtacha **oksidsiz holatda ~705 mV**, bitta kontakt passivatsiyalanganda **~715 mV**, ikkala kontakt passivatsiyalanganda esa **~735 mV** ga yetadi(2).

Chu va boshqalar tomonidan chop etilgan tadqiqotda, oddiy ekranga chop etilgan metallizatsiyaga ega IBC qurilmalari ham **700 mV dan ortiq V_{oc}** qiymatiga erishganligi qayd etilgan(2).

Bu kuchlanishdagi ortish (va unga mos ravishda FF – to'ldirish koeffitsienti oshishi) samaradorlikni yanada oshirish uchun muhim omildir. Umuman olganda, har bir qo'shimcha tashuvchilarni tanlovli kontakt V_{oc} va FF ni yaxshilaydi — biroq bu qo'shimcha texnologik jarayonlarni talab qiladi.

Shu bois, eng ilg'or BC elementlar orqa yuzaning har ikkala qutbida ham **“TOPCon-ga o'xshash” kontaktlar** (ya'ni juda yupqa **SiOx** qatlam + dopantlangan polikremniy) ni qo'llaydi(4),(2).

Ishlab chiqarish usullari

BC elementlarini tayyorlash odatiy quyosh elementlariga qaraganda murakkabroq. Ishlab chiqarishning asosiy bosqichlari quyidagilarni o'z ichiga oladi:

- old yuzani teksturalash/passivatsiyalash,
- orqa tomonda diffuziya naqshlarini hosil qilish,
- dielektrik qatlamni yotqizish,
- kontaktlarni ochish va faqat orqa tomonga metallizatsiya qilish.

Masalan, zamonaviy IBC (Interdigitated Back Contact) elementlari odatda old yuzada plazma yoki ho'l teksturalash bilan boshlanadi (bunda butun oldyuzani SiN_x yoki Al_2O_3 orqali passivatsiyalanadi), so'ng orqa tomonda naqshlangan diffuziya bajariladi. Fotolitografiya yoki lazerli naqsh berish orqali orqadagi interdigitated p^+/n^+ hududlar aniqlanadi(4).

Ilg'or ilmiy-tadqiqot elementlarida bir nechta fotolitografik bosqichlar orqali oksid/poly-Si qatlamlari aniq joylarga yotqiziladi (bunga Tong va boshqalar (4) hamda Wang va boshqalar (3) ning ishlari misol bo'ladi).

Lazerli doping ham qo'llaniladi: yaqinda chop etilgan tadqiqotda femtosoniya lazerlar yordamida tanlab dopinglash orqali geterotutashuvli IBC texnologiyasi ishlab chiqilgan bo'lib, bu niqobli jarayonlarni sezilarli darajada soddalashtiradi(4).

Ishlab chiqarish jarayoni (qo'llanish):

1. **Plastinka tayyorlash:** Yuqori tozalikdagi kremniy ingotlari **olmos simli arra** bilan plastinkalarga kesiladi (Manba: *Solar PV Basics, DOE*). Old yuzasi **KOH bilan kimyoviy teksturalash** orqali tozalanadi va aks ettirishga qarshi yuzaga aylantiriladi.
2. **Interdigitasiyalash uchun doping:** Orqa tomonda **navbatma-navbat p⁺ (bor bilan doplangan)** va **n⁺ (fosfor bilan doplangan)** hududlar hosil qilinadi. Buning uchun **niqobli diffuziya, ion implantatsiyasi, yoki lazerli doping** ishlatiladi (*PV-Manufacturing.org*). **Lazerli doping** esa **niqobsiz va arzon** usul hisoblanadi (*Maskless Plasma, 2023*).
3. **Passivatsiya qatlamlari:** **SiN_x yoki Al₂O₃** qatlamlari **PECVD** yoki **ALD** texnologiyalari orqali yotqiziladi. Bu qatlamlar yuzadagi rekombinatsiyani kamaytiradi (*TopCon Process, 2024*).
4. **Kontaktlarni hosil qilish:** Orqa kontaktlarga **Ag/Al metall chiziqlar** bosma (screen-print) yoki bug'latish (evaporatsiya) orqali yotqiziladi. **Bifacial elementlar** uchun orqaga shaffof qatlamlar ham qo'shiladi (*Back Side Contact, Patent*).
5. **Aks ettirishga qarshi qoplama:** Old yuzaga **SiN_x** qatlam **PECVD** orqali yotqiziladi.
6. **Pishirish va testlash:** **Vodorod bilan pishirish (annealing)** orqali nuqsonlar passivatsiyalanadi, so'ngra **I-V xususiyatlari test qilinadi** (*Screen Printed, PVEducation*).

Arzon muqobil naqshlash usullari ham ishlab chiqilgan. Masalan:

- **Mikrosfera (o'z-o'zidan yig'iluvchi boncuk) litografiyasi** — bu **orqa tomon naqshlarini** tozalash xonasi (cleanroom) litografiyasiz hosil qilishga imkon beradi(8).
- **Polimer plyonkalarda rulon-to-rulon (roll-to-roll) bosish** — orqa kontaktli **perovskit modullar** uchun yirik maydonli naqshlar tayyorlashda ishlatilgan(5).

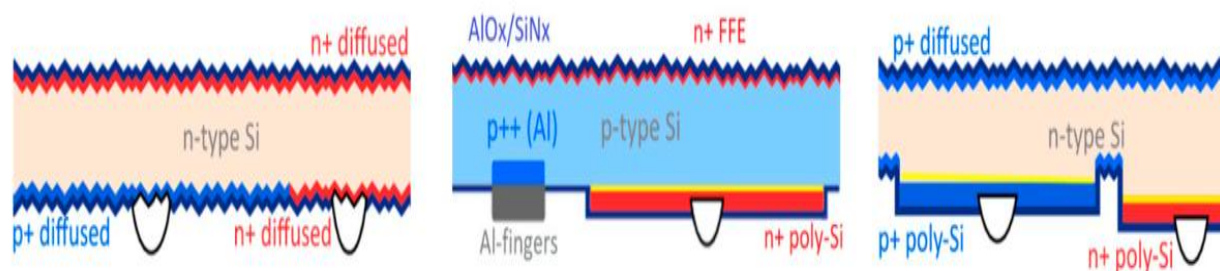
Sanoatda **SunPower** kompaniyasining dastlabki **IBC** usuli butun plastinkada p/n diffuziya qilib, so'ngra tanlab o'yish va elektrokaplama orqali kontaktlarni yaratgan. Keyinchalik, ISC Konstanz ishlab chiqargan "ZEBRA" elementlari ekranli bosma texnologiyasini IBCga moslashtirgan. Chu va boshqalar esa IBC uchun moslashtirilgan Ag screen-print texnologiyasi yordamida **700+ mV** ochiq kontakt kuchlanishiga ega elementlar ishlab chiqilganligini xabar berishgan(1).

7- va 8-rasmlar (quyida) turli element turlarining ishlab chiqarish jarayonlarini, jumladan **IBC** usullarini taqqoslaydi.

Yangi BC Arxitekturalari

7-rasm quyosh fotelementlari bozori yoki ilmiy-tadqiqot institutlari va sanoat korxonalari tomonidan ishlab chiqilgan yoki tadqiqot bosqichida bo'lgan uchta

asosiy IBC (orqa kontaktli) quyosh elementlari konsepsiyasining kesim koʻrinishlarini tasvirlaydi.



7-rasm. Uchta asosiy turdagi IBC (orqa kontaktli) element konsepsiyalarining kesim koʻrinishlari: **nol**, **bitta** va **ikkita tashuvchilarni tanlovchan oʻtkazuvchi kontaktga** ega variantlar. Qizil rang — **n-tip doplangan hududlar**, koʻk rang — **p-tip doplangan hududlar**, sariq rang esa — **nozik tunnel oksid qatlamini** ifodalaydi.

7-rasmning eng chap tomonida oddiy IBC quyosh elementi konsepsiyasi (masalan, ZEBRA) koʻrsatilgan. Bu turdagi element toʻliq diffuz qilingan boʻlib, hali tashuvchilarga tanlovchan kontaktlar bilan jihozlanmagan. Bu holat, bir tomondan, ochiq kontakt kuchlanishini taxminan 705 mV darajasida cheklaydi.

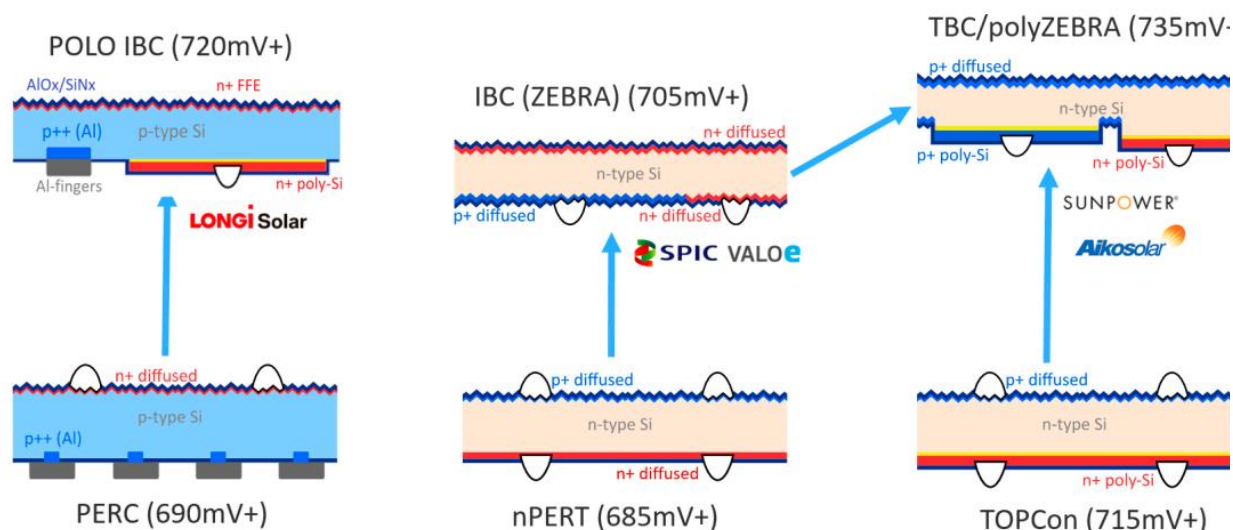
8-rasmning eng oʻng tomonida esa ikkala tashuvchi uchun tanlovchan kontaktga ega boʻlgan eng ilgʻor IBC qurilmasi koʻrsatilgan boʻlib, bu konstruktsiya quyosh elementi darajasida 25% dan yuqori samaradorlik salohiyatiga ega. Bu qurilma TOPCon va IBC texnologiyalarining kombinatsiyasi boʻlgani sababli, quyosh energetikasi sohasi buni TBC (TOPCon Back Contact) texnologiyasi deb atay boshladi.

3-rasm esa nega turli xil IBC konsepsiyalari mavjudligini yana bir bor tushuntirib beradi. Turli institutlar va kompaniyalar oʻzlarining ikki tomonlama kontaktli quyosh elementlari arxitekturasini takomillashtirishda turli strategiyalarga amal qilmoqda.

Masalan:

- LONGi va ISFH, PERC texnologiyasining faol tarafdorlari sifatida, 5 yil avval ECN/TNO tomonidan taklif qilingan PERC texnologiyasining soddalashtirilgan modernizatsiyasini ishlab chiqdilar.
- ISC Konstanz, ipv Stuttgart hamda Jolywood, SPIC va Valoe kabi kompaniyalar nPERT texnologiyasini takomillashtirish orqali TBC yoʻnalishida IBC rivojiga hissa qoʻshmoqda.
- SunPower va Aiko esa bevosita TBC texnologiyasini tanlagan.

Shuningdek, bu yerda koʻrsatilmagan yana toʻrtinchi muhim IBC yoʻnalishi mavjud — HJT IBC. Bu dastlab Kaneka tomonidan namoyish etilgan boʻlib, hozirda REC, Meyer Burger va ENEL kompaniyalari tomonidan faol rivojlantirilmoqda.



8-rasm. Har ikki tomonlama kontaktli quyosh elementlaridan kelib chiqqan holda rivojlangan turli xil IBC (interdigitated back contact) quyosh elementlari tuzilmalari.

8-rasm: Asosiy kremniy (Si) quyosh elementlari turlarining namunaviy ishlab chiqarish jarayonlari oqimi [2]. Masalan, IBC (ko‘k ustun) texnologiyasida, PERC kabi texnologiyalarga nisbatan qo‘shimcha diffuziya va naqshlash (patterning) bosqichlariga e‘tibor bering. (Chu va boshq., 2023 [2] dan moslashtirilgan.)

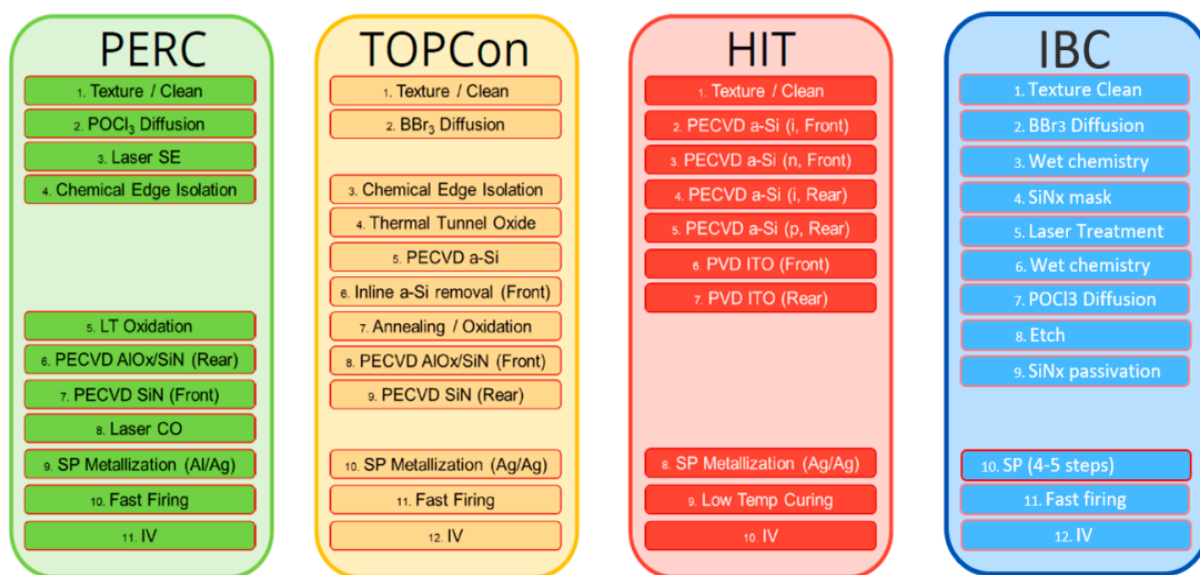
2-jadvalda ilmiy-tadqiqot va PV bozoridagi eng mashhur IBC quyosh batareyasi kontsepsiyalari jamlangan.

Jadval 2. Bozordagi mashhur IBC texnologiyalari va ularning xususiyatlari

	IBC Without Passivating Contact (PC)			POLO IBC One PC		TBC Both PC	
Company/ institute	SPIC/ISC	ipv Stuttgart	Jolywood	ISFH/ISC	SunPower	LG electronics	TRIN/
Brand name	ZEBRA/ Andromeda2.0	MESA	-	POLO IBC	Maxeon 6	NeonR	-
Type	n-type	n-type	n-type	p-type	n-type	n-type	n-type
In production	yes	no	yes	no	yes	no	no
Efficiency	24.6% [6,7]	23.3% [8,9]	23%	22.3% [10]	25%	25%	25.04% [
PERC related	80%	75%	70%	90%	0%	0%	20%
Module efficiency	22.3% [1] can be bifacial	unknown	unknown	unknown	22.8% [1]	22.3% not listed any more [1]	unknow

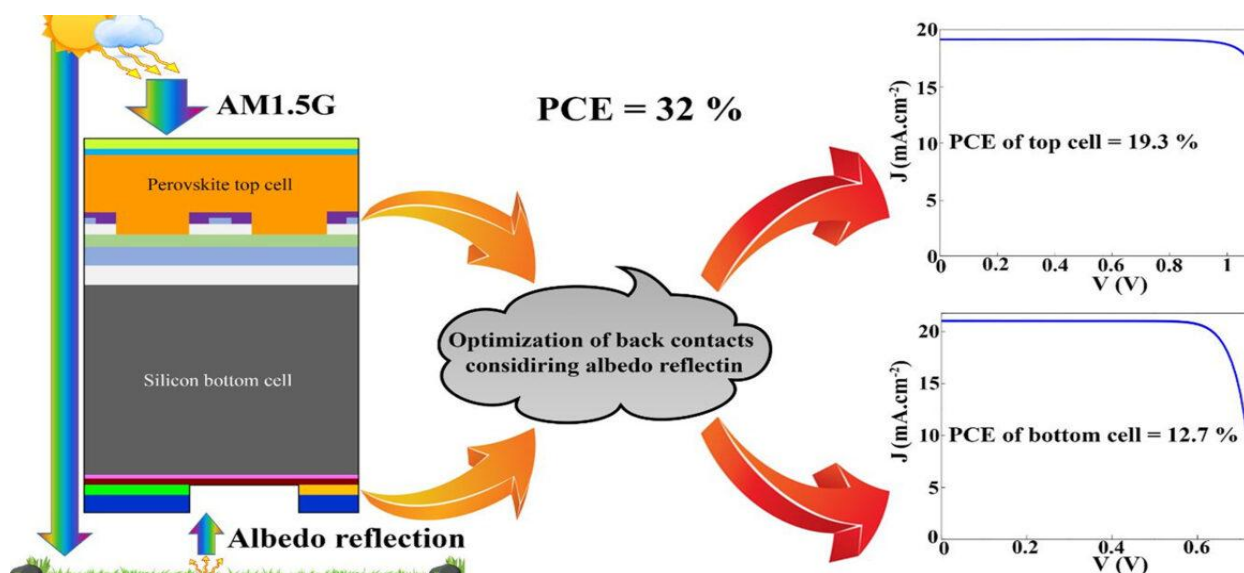
Tandemlar

9-rasmda PV (fotoelektrik) bozorida parallel mavjud bo'lgan asosiy element kontsepsiyalarining ishlab chiqarish jarayonlari tasvirlangan. PERC va n-turdagi texnologiyalarning bozor ulushlari 4-rasmda ko'rsatilgan. Endi PERC texnologiyasining o'rnini n-turdagi texnologiyalar egallayotgani shubhasiz. Biroq savol shundaki, n-turdagi qaysi kontsepsiya — TOPCon, HJT yoki IBC — bozor yetakchiligini qo'lga oladi?



9-rasm. PERC, TOPCon, HJT va IBC uchun jarayon oqimlari <https://doi.org/10.3390/solar3010001>

Tadqiqotchilar orqa kontaktli (BC) dizaynlar ustida innovatsiyalarni davom ettirmoqda. Variatsiyalar qatoriga gibrid kombinatsiyalar (masalan, EWT + IBC xususiyatlari), ultra yupqa oksid qatlamlariga ega bo'lgan barcha orqa kontaktli “tunnel” element kontsepsiyalari (TBC) va ko'p terminalli elementlar kiradi. Qizig'i shundaki, BC kontsepsiyalari hozirda tandem qurilmalariga ham tatbiq etilmoqda. Masalan, yaqinda to'rt terminalli Si/perovskit tandemda HJT-silikon pastki elementi va perovskit yuqori elementi ham interdigitated orqa kontaktlarga ega bo'lgan holda namoyish qilindi[9]. Ushbu tadqiqotda simulyatsiyalar 19.3% samaradorlikka ega IBC silikon pastki elementini va 12.7% samaradorlikka ega perovskit yuqori elementini ko'rsatdi, bu esa umumiy 32% tandem PCE ni tashkil etdi[9]. 10-rasmda ushbu dizayn tasvirlangan: naqshlangan yuqori element hatto yorug'likni tutib qolishni kuchaytirish uchun optik difraksion panjara vazifasini bajargan[9]. Bunday tandem IBC qurilmalari BC arxitekturasining boshqa quyosh element turlari bilan moslashuvchanligini ko'rsatadi.



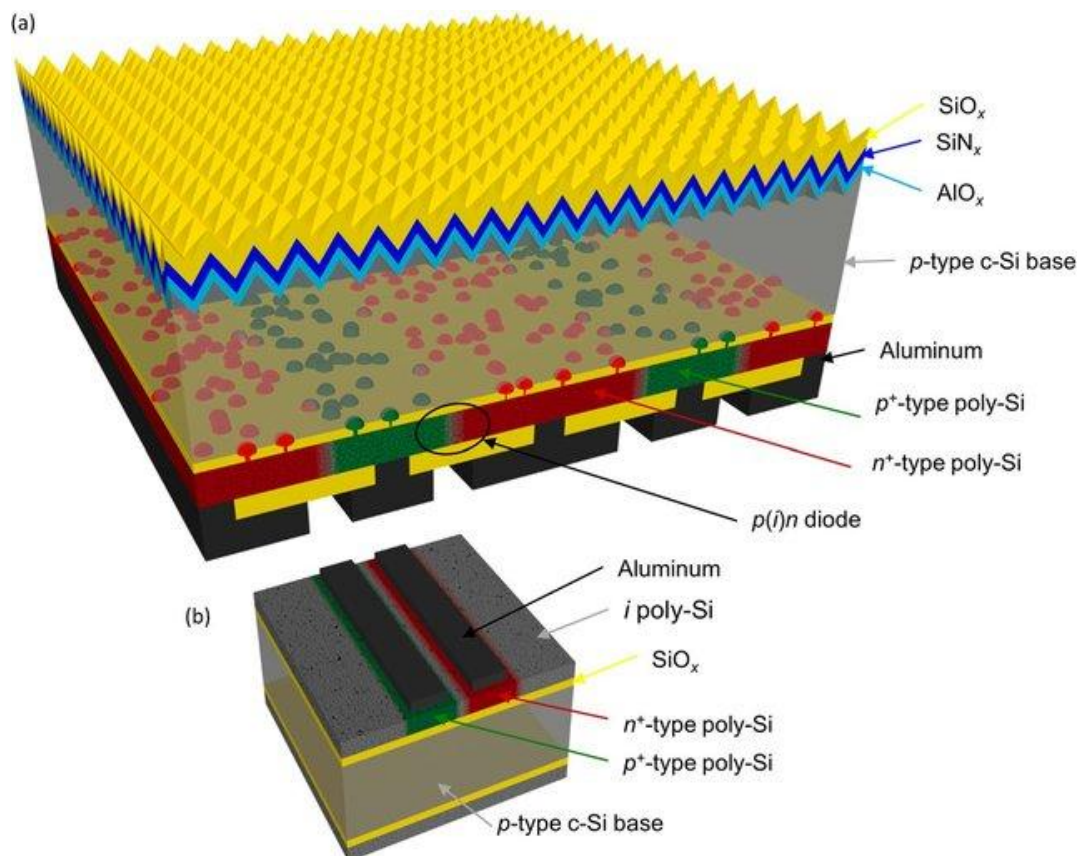
10-rasm. Quyosh elementining sxemasi

10-rasm: I–V (yoki J–V) egri chiziqlari — IBC arxitekturalari asosidagi simulyatsiyalangan to‘rt terminalli bifasiyal perovskit/silikon tandemdand[9]. Pastki HJT-IBC elementi 19.3%, yuqori perovskit-IBC elementi 12.7% PCE ga erishgan (umumiy 32%). Perovskit yuqori qatlami IBC silikon asosiga joylashtirilganda (tekis emas), difraksion yorug‘lik tutish orqali fototok oshgan[24]. (Abbasiyan va boshqalardan moslashtirilgan, 2025[9].)

Perovskite-Si BC tandemlari

BC kremniy (ko‘pincha IBC) yuqori samaradorlik va muvofiqlik tufayli tandemdagi pastki elementlar sifatida idealdir. Orqa kontaktli Perovskite-Si tandem quyosh xujayralari ilg‘or konfiguratsiya bo‘lib, barcha elektr kontaktlarini silikon pastki xujayraning orqa tomoniga joylashtiradi, soyani yo‘q qilish va zaryad olishni soddalashtirish orqali samaradorlikni oshiradi. Ushbu dizayn uch terminalli (3T) va to‘rt terminalli (4T) konfiguratsiyalarda amalga oshiriladi, 3T dizayni, ayniqsa, orqa bilan aloqada bo‘lgan silikon (IBC-Si) bazasidan foydalanadi.

Perovskite-Si BC tandemlari: Perovskite tepasi (1,7-1,8 eV tarmoqli oralig‘i) qisqa to‘lqin uzunliklarini o‘zlashtiradi; BC-Si pastki (1,1 eV) IR bilan ishlov beradi. Samaradorlik >30% (masalan, 2023 yilda 31,3%) (Verner va boshq., 2023). Nazariya: Shaffof elektrodlar orqali stacked, yig‘indisi Voc. Ilova: arzon, kengaytiriladigan (Pathways, 2024).



11-rasm. Ustki qatlam: Perovskit qatlami; O'rta qatlam: rekombinatsiya qatlami; Pastki: IBC Si orqa kontaktlari bilan.

11-rasm. (a) IBC quyosh elementi tuzilmasining sxematik chizmasi: n^+ va p^+ turdagi polikristall kremniy (poly-Si) kontakt "plitalar"i boshlang'ichda intrinsic (xossasiz) poly-Si hududi bilan ajratilgan. (b) p(i)n test tuzilmasining eskizi.

Organik-Perovskit Tandemlar va Orqa Kontakt (BC) Dizayni

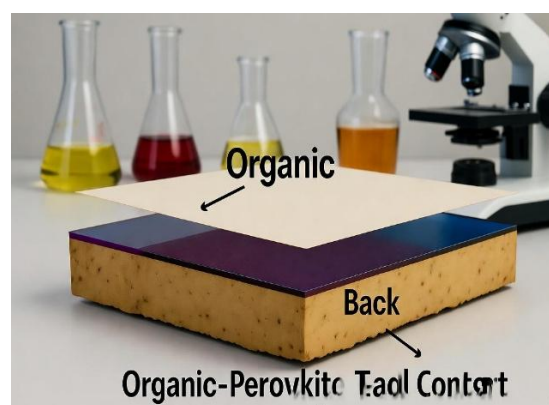
"Orqa kontaktli organik-perovskit tandemlar" deganda organik quyosh elementi (OSC) va perovskit quyosh elementi (PSC) birlashtirilgan tandem quyosh elementlari nazarda tutiladi, bunda pastki element (BC – bottom cell) mavjud bo'ladi (12-rasmga qarang). Ushbu moslamalar yuqori qatlam orqali o'tadigan past energiyali fotonlarni tutib qolish uchun BC-dan foydalanadi va bu orqali quyosh nurlanishining kengroq spektrini qamrab olib, umumiy samaradorlikni oshiradi. BC sifatida odatda kremniy ishlatiladi, ammo u perovskit, organik element yoki boshqa yarim o'tkazgich material ham bo'lishi mumkin.

Orqa kontaktli organik-perovskit tandemlarning ishlash prinsipi:

- **Tandem tuzilmasi:** Perovskit elementi yuqoriga, organik elementi esa pastga joylashtirilgan. Perovskit qatlam yuqori energiyali (ko'k/yashil) fotonlarni

yutadi, organik qatlam esa yuqori qatlamdan o'tgan past energiyali (qizil/infragizil) fotonlarni o'zlashtiradi.

- **Orqa kontaktli dizayn:** An'anaviy "sendvich" tipidagi shaffof old elektrodli tuzilma o'rniga, bunda ijobiy va manfiy kontaktlarning ikkalasi ham orqa tomoniga joylashtirilgan bo'ladi. Bu old elektrodga ehtiyojni yo'qotadi, yorug'likning bloklanishi yoki aks ettirilishining oldini oladi va elementga tushadigan quyosh nuri miqdorini oshiradi.
- **Ichki ulanish:** Har ikki quyi element elektronlar va teshiklar (hollar) o'zaro recombiniatsiyalanadigan zaryad qayta birikish qatlami orqali ulanadi. Bu qatlam elektronlarni bitta elementdan ikkinchisidagi hollar bilan birlashtiradi va to'liq elektr zanjirini tashkil qiladi.



12-rasm. Orqa Kontaktli Organik-Perovskit tandemlari

BC Turlari Taqqoslanishi: Har bir orqa kontakt (BC) arxitekturasida ma'lum darajadagi afzallik va kamchiliklarga ega. Toza IBC/BJ (buried junction) dizayni (old kontaktlarsiz) nazariy jihatdan eng yuqori samaradorlikni taklif etadi, chunki unda soya ta'siri minimal bo'ladi. Biroq, bu eng murakkab texnologik jarayonlar va yuqori sifatli materiallarni talab qiladi. Emitter-Wrap-Through (EWT) va Metal-Wrap-Through/Conductive-Wrap-Through (MWT/CWT) dizaynlari bu murakkablikni qisqartiradi: ular emitterni old tomonda qoldiradi yoki qisman old panjarani saqlaydi, lekin bu esa ma'lum darajada soya yo'qotishiga olib keladi.

Amaliyotda, IBC elementlari samaradorlik bo'yicha yetakchilik qiladi (taxminan 27% samaradorlik, hozirgacha mavjud bo'lgan wrap-through variantlari esa 24% dan yuqori natija ko'rsatmagan[1][4]). Quyidagi 1-jadvalda turli BC dizaynlarining odatiy ko'rsatkichlari keltirilgan: IBC elementlar eng yuqori Voc (ochiq zanjir kuchlanishi) va FF (to'ldirish koeffitsiyenti) ga ega, EWT/MWT esa bir oz pastroq kuchlanishlarga ega, ammo ishlab chiqarish jarayoni nisbatan sodda.

Orqa kontaktli perovskit elementlar hozircha kremniyga nisbatan orqada qolmoqda, biroq yaqinda yangi modulli dizaynlarda 11–12% ga yaqin PCE (quvvat aylanish samaradorligi) natijalari ularning salohiyatini namoyon etdi[5]. Organik va boshqa yupqa qatlamli BC dizaynlari esa asosan tadqiqot bosqichida bo'lib, hali yuqori samaradorlik bo'yicha rasmiy rekordlar mavjud emas. Shunga qaramay, BC kontseptsiyasi nurlanish yo'qotishlarini kamaytirishda foydali bo'lishi mumkin.

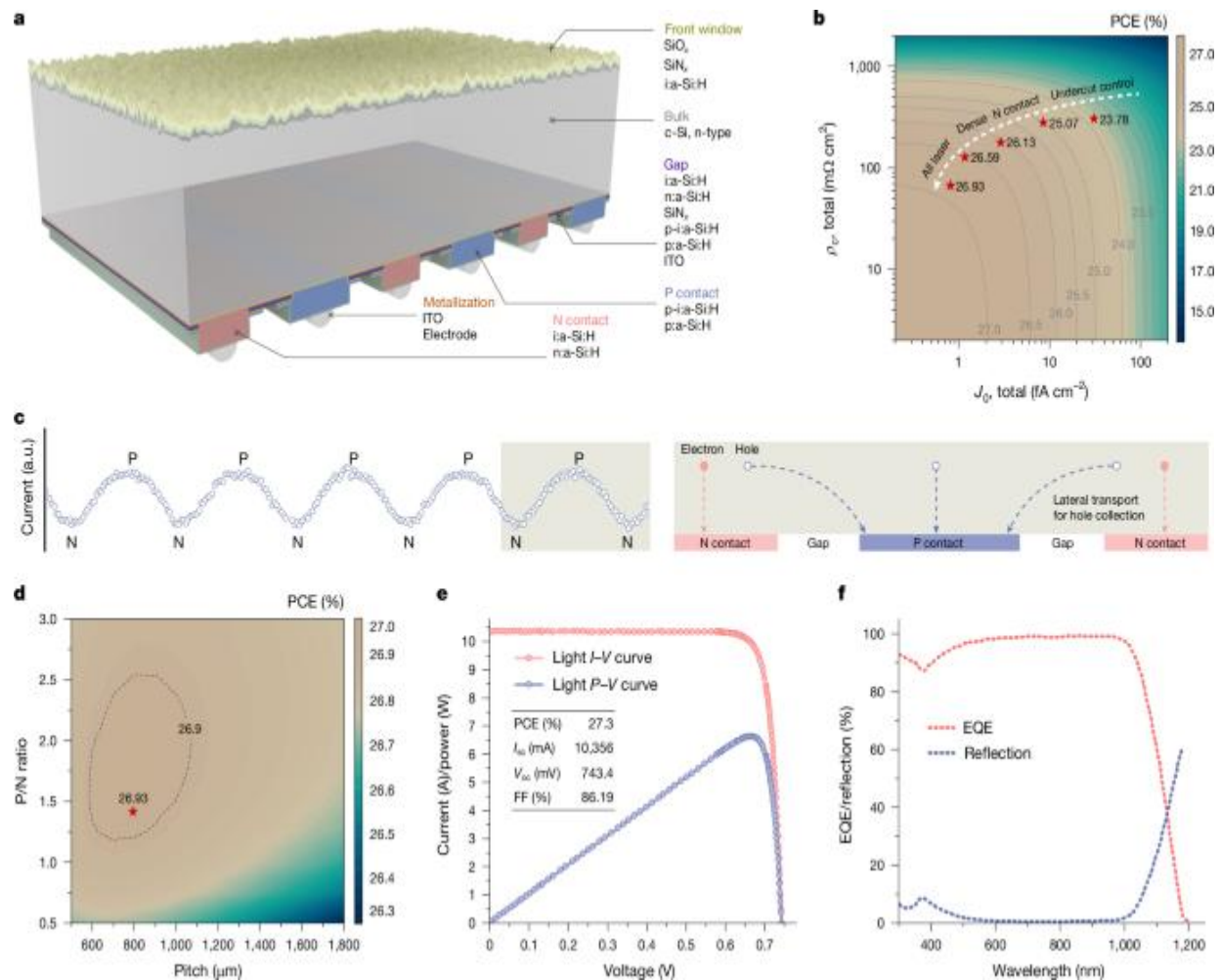
Samaradorlik va I–V Taqqoslash (3-jadval):

BC Turi	Material turi	Samaradorlik / rekord (PCE)	Taxminiy Voc	Asosiy xususiyatlar
IBC (orqa-birikma)	Kristall kremniy (c-Si)	~27.1%[3][4]	~740–760 mV	Old metall yo‘q; eng yuqori PCE; murakkab texnologik jarayon
IBC (TBC/HJT)	Passivatsiyalangan c-Si	27.03% (Tong et al. 2025)[4]; 27.09% (Wang et al. 2024)[3]	~750–770 mV	Idealga yaqin kontaktlar uchun tunnel-oksid/poli-Si ishlatiladi
Emitter Wrap-Through (EWT)	c-Si	~21% (kichik element)[1]	~700 mV	Emitter old tomonga diffuziyalangan; kontaktlar teshiklar orqali
Contact Wrap-Through (CWT/MWT)	c-Si, yupqa qatlamlar	~20–22%[1] (SunPower)	~700–730 mV	Old panjara saqlanadi; orqa kontakt padlari via’lar orqali ulanadi
BC-Perovskit	Perovskit (masalan, MAPbI ₃)	~11–12.8% (modul)[5]	~1.0 V	Interdigitated orqa elektrodlar; rivojlanayotgan texnologiya
BC-Organik (kontsepsiya)	Organik FV	Past (<10%, dastlabki ilmiy tadqiqot)	~0.6–0.8 V	Asosan eksperimental; naqshli elektrodlardan foydalanish mumkin

Model	Samaradorlik (%)	Voc (V)	Isc (mA/cm ²)	FF (%)	Afzalliklar/Kamchiliklar
Standart IBC	22–24	0.72	41	80	Yuqori Voc; murakkab ishlab chiqarish jarayoni
HJT–IBC	26–27	0.75	42	83	Yaxshilangan passivatsiya; qimmat
TOPCon–BC	25–26	0.73	41.5	82	Past Rs; ommaviy ishlab chiqarish mumkin

Model	Samaradorlik (%)	Voc (V)	Isc (mA/cm ²)	FF (%)	Afzalliklar/Kamchiliklar
Perovskit-BC	23–25	1.1	25	78	Sozlanadigan turg'unlik oralig'i; barqaror emas (He va boshq., 2025)

BC modellar old kontaktli (masalan, PERC – 23%) elementlarga nisbatan **V_{oc}** va **FF** ko'rsatkichlari bo'yicha ustunlik qiladi, chunki ular yorug'likni soya qiluvchi old elektrodga ega emas (Taqqoslash diagrammasi, [9-rasm]).



9-rasm. Lazerli naqsh berish orqali tayyorlangan kremniy geterotuzulishli orqa kontaktli quyosh elementlari

Xulosa: Orqa kontaktli (BC) quyosh elementlari – old tomondan yo‘qotishlarni yo‘q qilish orqali rekord darajadagi yuqori samaradorlikka erishishga imkon beradigan ilg‘or arxitekturani ifodalaydi. Nazariy afzalliklar – soyalanishni kamaytirish va har bir kontakti mustaqil optimallashtirish erkinligi – o‘n yilliklar davomida bu texnologiyaning rivojlanishiga turtki bo‘lgan[1]. Ishlab chiqarish jarayoni murakkab bo‘lsa ham zamonaviy IBC kremniy elementlari bu kontsepsiyani amalda tasdiqlab, >27% PCE ko‘rsatkichiga erishdi[3][4]. So‘nggi tadqiqotlar BC g‘oyalarini per

ovskit va tandem elementlariga ham tatbiq etmoqda[5][9]. Ishlab chiqarish hali ham qiyinchilik tug'dirsa-da, innovatsion naqshlash usullari (masalan, lazerli, o'z-o'zida n yig'iluvchi strukturalar) va materiallarning uzluksiz takomillashuvi yanada yuqori samaradorlikni va'da qilmoqda. Davom etayotgan tadqiqotlar BC arxitekturasida yangi variantlarni (masalan, wrap-through va IBC kombinatsiyalari yoki katta maydonli modullar) o'rganmoqda, bu esa noyob zaryad yig'ish geometriyasidan to'liq foydalanishga imkon beradi[10][11]. Barcha holatlarda, qurilmaning fizikasi diqqat bilan boshqarilishi lozim: energetik darajalar tuzilmasi shunday loyihalanadiki, yorug'likdan hosil bo'lgan tashuvchilar lateral yo'nalishda orqa kontaktlarga yo'naltiriladi, samaradorlik esa standart usulda ($PCE = (JSC \cdot VOC \cdot FF) / P_{in}$) hisoblanadi[4][7]. Murakkab yarimo'tkazgich fizikasi va amaliy muhandislik yechimlarining uyg'unligi orqali BC quyosh elementlari fotovoltaika samaradorligini yangi ufqlarga olib chiqishda davom etmoqda.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Van Kerschaver, E. & Beaucarne, G. *Back-contact solar cells: A review*. Prog. Photovolt: Res. Appl. **14**, 107–123 (2006)[1].
2. Tong, H. *et al.* *Total-area world-record efficiency of 27.03% for 350.0 cm² commercial-sized single-junction silicon solar cells*. Nat. Commun. **16**, 5920 (2025)[4].
3. Wang, G. *et al.* *27.09%-efficiency silicon heterojunction back contact solar cell and going beyond*. Nat. Commun. **15**, 8931 (2024)[3].
4. Chu, H. *et al.* *Interdigitated Back Contact Technology as Final Evolution for Industrial Crystalline Single-Junction Silicon Solar Cell*. Solar **3**, 1–14 (2023)[2].
5. Blackburn, D. *et al.* *Back-Contact Perovskite Solar Cells: Progress, Challenges and the Future*. ACS Appl. Mater. Interfaces **17**, 54329–54340 (2025)[5].
6. Bellini, E. *Scientists testing perovskite–silicon tandem solar cells with interdigitated back contacts*. pv magazine (Apr. 2025)[9].
7. Bellini, E. *Revolutionizing light capture: A comprehensive review of back-contact perovskite solar cell architectures*. pv magazine (2025)[10].
8. NREL (2025). *Best Research-Cell Efficiencies Chart*. Natl. Renew. Energy Lab., Golden, CO[6].

[1] Back-contact solar cells: a review

<http://lab.semi.ac.cn/download/0.4703671547021363.PDF>

[2] Interdigitated Back Contact Technology as Final Evolution for Industrial Crystalline Single-Junction Silicon Solar Cell

<https://www.mdpi.com/2673-9941/3/1/1>

[3] 27.09%-efficiency silicon heterojunction back contact solar cell and going beyond | Nature Communications

[https://www.nature.com/articles/s41467-024-53275-](https://www.nature.com/articles/s41467-024-53275-5?error=cookies_not_supported&code=e1e040f1-7000-47e5-8697-25d72d6ba82f)

[5?error=cookies_not_supported&code=e1e040f1-7000-47e5-8697-25d72d6ba82f](https://www.nature.com/articles/s41467-024-53275-5?error=cookies_not_supported&code=e1e040f1-7000-47e5-8697-25d72d6ba82f)

[4] Total-area world-record efficiency of 27.03% for 350.0 cm² commercial-sized single-junction silicon solar cells | Nature Communications

[https://www.nature.com/articles/s41467-025-61128-](https://www.nature.com/articles/s41467-025-61128-y?error=cookies_not_supported&code=ff892f95-fc85-48f2-b208-5adf85b9a5cf)

[y?error=cookies_not_supported&code=ff892f95-fc85-48f2-b208-5adf85b9a5cf](https://www.nature.com/articles/s41467-025-61128-y?error=cookies_not_supported&code=ff892f95-fc85-48f2-b208-5adf85b9a5cf)

[5] Back-Contact Perovskite Solar Cells: Progress, Challenges and the Future - PubMed

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40961283/>

[6] Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL

<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>

[7] Solar Cell I-V Characteristic Curves of a PV Panel

<https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html>

[8] nur.nu.edu.kz

<https://nur.nu.edu.kz/server/api/core/bitstreams/053af940-5064-4d59-b64b-bc77bf9fb69c/content>

[9] Scientists testing perovskite-silicon tandem solar cells with interdigitated back contacts – pv magazine International

<https://www.pv-magazine.com/2025/04/10/scientists-testing-perovskite-silicon-tandem-solar-cells-with-interdigitated-back-contacts/>

[10] All back-contact perovskite solar cell designs at a glance – pv magazine USA

<https://pv-magazine-usa.com/2025/09/04/all-back-contact-perovskite-solar-cell-designs-at-a-glance/>

[11] pub.mdpi-res.com

[https://pub.mdpi-res.com/solar/solar-03-](https://pub.mdpi-res.com/solar/solar-03-00001/article_deploy/html/images/solar-03-00001-g004.png?1671702949)

[00001/article_deploy/html/images/solar-03-00001-g004.png?1671702949](https://pub.mdpi-res.com/solar/solar-03-00001/article_deploy/html/images/solar-03-00001-g004.png?1671702949)

VI Bob

6.BO'YOQQA SEZGIR QUYOSH ELEMENTLARI(DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS (DSSC))

Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC), Grätzel elementlari deb ham ataladigan, yupqa plyonkali quyosh elementlarining bir turidir; ularda yorug'likni yutish va elektr energiyasini ishlab chiqarish uchun bo'yoq molekulalari ishlatiladi. Bo'yoqlarning yorug'lik ta'sirida elektr energiyasini ishlab chiqarishi haqidagi g'oya birinchi marta 1960-yillarda o'rganilgan. 1972-yilda Kaliforniya universiteti Berkeley olimlari fotosintezni taqlid qilish maqsadida shpinatdan ajratilgan xlorofildan foydalangan fotoelektrokimyoviy elementni namoyish etganlar – bu aslida oddiy bo'yoq bilan sezdirilgan quyosh elementi bo'lgan. Biroq, dastlabki bo'yoqli elementlar samaradorligi nihoyatda past va barqarorligi yomon bo'lgan, chunki organik bo'yoqlar parchalanib ketgan va tizim barqaror tok ishlab chiqarishni davom ettira olmagan. To'liq yirik yutuqlarga erishish uchun 1980-yillarning ikkinchi yarmigacha kutish kerak bo'ldi: Brian O'Regan va Michael Grätzel zamonaviy DSSCni birgalikda ixtiro qilib, TiO_2 elektrodi ustiga bo'yoq molekulalari bilan biriktirilgan nano tuzilmali qoplama yaratdilar. 1991-yilda O'Regan va Grätzel Nature jurnalida e'lon qilgan muhim maqolada 7.1% samaradorlikka ega bo'lgan bo'yoq bilan sezdirilgan TiO_2 quyosh elementi ko'rsatilgan. Ushbu qurilma ruteniyga asoslangan bo'yoqdan foydalangan keng to'qima TiO_2 plyonka va yodid/triiodid suyuq elektrolitini o'z ichiga olgan bo'lib, past narxga ega element uchun hayratlanarli darajada yuqori samaradorlikka erishgan va butun dunyoda e'tibor qozongan (Grätzel ushbu ish uchun 2010-yilda Millennium texnologiya mukofotini oldi).

Quyida DSSClarning rivojlanishi bosqichma-bosqich ko'rib chiqiladi – dastlabki namunalardan tortib eng so'nggi yutuqlargacha – shuningdek, ularning ishlash prinsipi, tok-kuchlanish xossalariidan samaradorlik qanday hisoblanishi, hamda yangi DSSC loyihalari (jumladan tandem elementlar va boshqa quyosh texnologiyalari bilan gibrid kombinatsiyalar) bilan qanday taqqoslanishi bayon etiladi.

DSSClarning rivojlanishi tarixi

Bo'yoq bilan sezdirilgan quyosh elementlariga oid konsepsiya birinchi marta 1960-yillarda paydo bo'lgan. Dastlab, DSSClarning paydo bo'lishidan oldingi davrda ham ekzotik tajribalar o'tkazilgan. Masalan, 1970-yillarda olimlar organik pigmentlar – xlorofillar yordamida fotoelektrokimyoviy elementlar yaratish ustida ishlaganlar. Biroq, bo'yoqli elementlarning dastlabki namunalariida samaradorlik past va barqarorlik yomon bo'lgan, chunki organik bo'yoqlar uzoq vaqt ishlamay, buzilib ketgan.

1980-yillarning oxirida yirik yutuqqa erishildi: Brian O'Regan va Michael Grätzel zamonaviy DSSCni ishlab chiqdilar. Ular bo'yoq qoplangan TiO_2 nanotuzilmali elektrodini ixtiro qilishdi. 1991-yilda Nature jurnalida e'lon qilingan

ma'ruzada ular 7,1% samaradorlikka ega bo'lgan bo'yoq bilan sezdirilgan TiO_2 quyosh elementini namoyish etdilar. Ushbu qurilma oddiy ruteniy asosidagi bo'yoq (Ru(II) bipiridil komplekslari) bilan qoplanilgan TiO_2 plyonka, shuningdek yodid/triiodid elektrolitini o'z ichiga olgan bo'lib, arzon narxga ega bazaviy qurilma uchun yuqori samaradorlikni ko'rsatdi. Bunday samaradorlik dunyo miqyosida katta e'tibor qozondi. Grätzel bu ishlari uchun keyinchalik 2010-yilda Millennium texnologiya mukofotini qo'lga kiritdi.

Bu davrda DSSClarning samaradorligi past bo'lgan bo'lsa-da, bo'yoq kimyosi va qurilma muhandisligidagi yutuqlar tufayli ushbu ko'rsatkichlar asta-sekin oshib bordi. Hozirgi zamon tadqiqotlarida DSSClarning samaradorligi 10–14% atrofida bo'lib, ilmiy jamoada e'tiborli hisoblanadi.

Ushbu yutuqdan so'ng, 1990-yillarning boshlarida tezkor rivojlanish bosqichi boshlandi. 1993-yilda Nazeeruddin va hamkorlari (Grätzel bilan birga ishlagan holda) yangi “N3” deb ataluvchi ruteniy bipiridil bo'yoqdan foydalangan holda DSSC (bo'yoqqa sezgir quyosh elementi) samaradorligini $\approx 10,3\%$ ga yetkazganliklarini e'lon qilishdi[1]. N3 bo'yoqi kengroq yorug'lik yutilishi va soddaroq molekulyar tuzilishga ega bo'lib, 1991-yildagi natijaga nisbatan konversiya samaradorligini taxminan 40% ga oshirdi. 1990-yillarning oxiriga kelib, bosqichma-bosqich takomillashtirishlar — masalan, dastlabki “tris(2,2'-bipiridil)” ruteniy kompleksidan yaxshilangan eruvchanlik va barqarorlik uchun di-tetrabutylammoniy shaklidagi N719 bo'yoqiga o'tish — natijasida barqarorlik oshdi va samaradorlik o'xshash ($\sim 10\text{--}11\%$) darajada saqlanib qoldi. 2001-yilda Grätzel guruhi “qora bo'yoq” (tri-tsianoruteniy terpiridin kompleksi) ni joriy etdi va bu AM1.5 quyosh yoritilishida 10,4% samaradorlikka erishdi[2]. Bu bo'yoq qizil/infragizil spektrda kengroq yutilish qobiliyatiga ega edi. 2000-yillar davomida yagona p-n-o'tishli DSSClar samaradorligi taxminan 7–11% oralig'ida bo'lib, tadqiqotchilar asosan chidamlilik muammolarini hal qilishga e'tibor qaratishdi.

2010-yillarda sezilarli yutuq: yangi sensibillizatorlar va redoks vositalari rivojlanishi bilan yuzaga keldi. 2014-yilda Mathew va hamkorlari kobalt asosidagi elektrolit bilan birgalikda rux-porfirin bo'yoqni ishlab chiqib, sertifikatlangan 13% elektr energiyasi konversiya samaradorligiga erishishdi[4]. Bu o'sha davrda DSSClar uchun rekord hisoblanardi va bu yutuq yorug'lik yutilishini molekulyar darajada kengaytirish hamda qurilmaning kuchlanishini oshirish orqali amalga oshirildi. Tadqiqotchilar TiO_2 ni donor- π -akseptor porfirin bo'yoq bilan sensibillash va an'anaviy I^-/I_3^- juftligiga nisbatan yuqoriroq kuchlanish beruvchi $\text{Co}^{2+/3+}$ redoks juftligidan foydalanish orqali yuqori fototokni saqlab qolgan holda fotokuchlanishni sezilarli darajada oshirishdi[4]. (Mathewning 2014-yilgi natijasi DSSClar amorf kremniy elementlari bilan bevosita quyosh nurlanishida raqobatlasha olishini ko'rsatgan muhim bosqich edi.)

Shu bilan birga, DSSClar muhim bir variantga ega bo'ldi: qattiq holatdagi bo'yoqli quyosh elementlari. 2012–2013-yillarda tadqiqotchilar organometall halogenidli perovskitlar (masalan, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) ni yorug'likni yutuvchi mukammal “bo'yoqlar” sifatida qo'llash mumkinligini aniqlashdi — ularni mesog'ovakli TiO_2 ichiga singdirish va suyuq elektrolit o'rniga qattiq holatdagi g'ovak tashuvchidan foydalanish orqali isbotlashdi. Bu qattiq holatli bo'yoqli elementlar tez orada

mustaqil soha sifatida perovskit quyosh elementlariga aylandi va 2013-yilda allaqachon 15% samaradorlikka erishdi. Masalan, Burschka va boshqalar (2013) ikki bosqichli perovskit cho'ktirish usulidan foydalanib, TiO_2 plyonkasiga perovskit kiritib, DSSC/perovskit gibrid elementini yaratishdi va ~15% PCE ga erishishdi. Bu yutuq DSSClar bilan an'anaviy yupqa plyonkali elementlar o'rtasidagi farqni yo'qotdi, chunki perovskit nafaqat bo'yoq, balki zaryad tashuvchi qatlam sifatida ham xizmat qila boshladi.

Shuni ta'kidlash kerakki, klassik DSSClar (molekulyar bo'yoq va suyuq elektrolitli) doirasida rekord samaradorlik hanuz 13–14% atrofida qolmoqda. 2020-yillar o'rtalariga kelib, laboratoriyadagi DSSClar odatda 11–12% samaradorlikka erishmoqda, eng yaxshi dizaynlar esa ~14% ga yaqin natijalarga yetmoqda (standart quyosh yoritilishi ostida)[3]. Muhimi, bu yuqori samaradorliklar yaxshilangan barqarorlik bilan birga kelmoqda (yaxshi muhrlash, kuchli bo'yoqlar, yangi elektrolitlar orqali), ammo DSSClarning keng tijoratlashirilishi uchun hali ham barqarorlik va katta hajmda ishlab chiqarish muammolari hal qilinishi lozim.

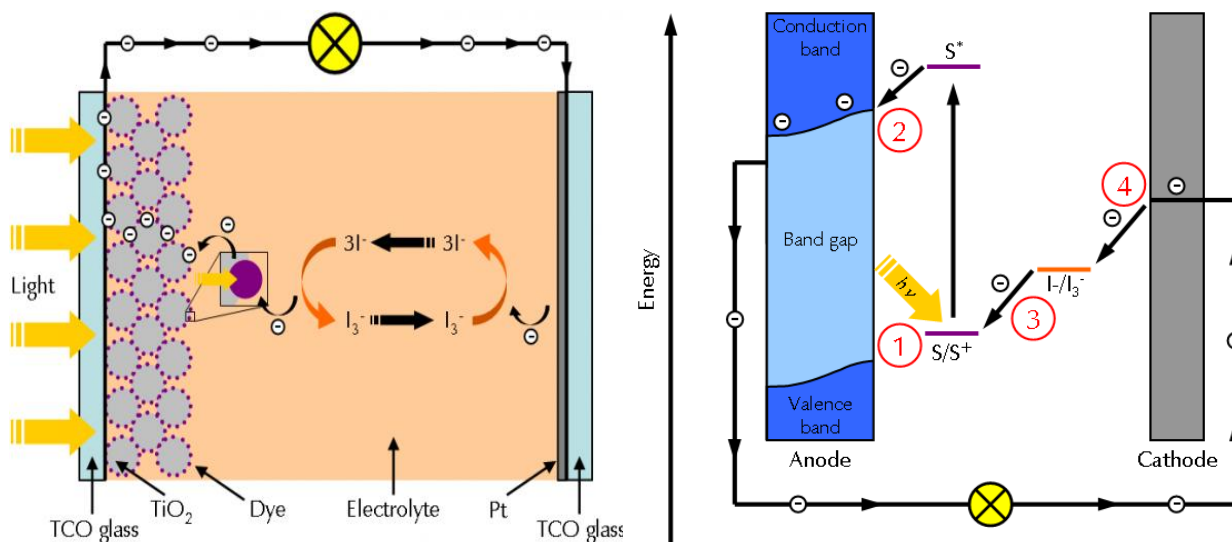
Tuzilishi va ishlash printsipi

DSSC odatda quyidagi asosiy tarkibiy qismlardan iborat: fotoanod, sensibilizator bo'yoq, elektrolit va katod. Fotoanod – bu shaffof o'tkazuvchan substrat (oyna yoki moslashuvchan plastmassa) bo'lib, uning ustiga yupqa, g'ovakchali TiO_2 (titan oksidi) nanokristallardan tashkil topgan qatlam surtiladi. Ushbu TiO_2 plyonka (bir necha mikron qalinlikda) keng ichki yuzaga ega bo'lib, unga bo'yoq molekulalari yagona qatlam(monolayer) tarzda biriktiriladi[5]. Bo'yoq – ko'pincha ruteniy-polipiridil kompleksi yoki metall bo'lmagan organik molekulalar – bo'lib, u TiO_2 yuzasiga biriktiriladi va o'simliklardagi xlorofill kabi yorug'likni yutuvchi material vazifasini bajaradi. Shu payt element ichidagi elektrolit (odatda yodid/triiodide (I^-/I_3^-) redoks juftligidan tashkil topgan) bo'yoq bilan qoplangan TiO_2 plyonkani o'rab oladi va uning poralariga kirib oladi. Oxir-oqibat, odatda platina qoplamali yoki uglerod qatlamli kontur elektrod (katod) fotoanodning qarama-qarshi tomoniga joylashtiriladi. Qurilma yopiq holda, elektrolit esa elektrodlar orasidagi bo'shliqni to'ldiradi.

Ta'kidlash kerakki, DSSCda yorug'lik yutilishi va zaryad tashilishi ikki turli material orasida ajratilgan. Bo'yoq yorug'likni yutadi va elektronlarni qo'zg'atadi, ular TiO_2 (n-tur yarimo'tkazuvchi) ga in'ektsiya qilinadi va o'tkaziladi, elektrolit esa musbat zaryad (g'ovak)larni redoks ta'siri orqali katodga yetkazadi. Ushbu vazifalar ajratilishi DSSCga quyidagilarga imkon beradi: silisium elementi kabi bitta material o'rniga, juda barqaror va optik faollikka ega bo'yoqlar va keng taqiqlangan zonaga ega yarimo'tkazuvchi skeletlar ishlatiladi. Biroq, bu qisman ma'lum yo'qotishlarni keltirib chiqaradi (masalan, bo'yoq/ TiO_2 interfeysidagi va elektrolitdagi qarshiliklar) va natijada ideal qurilmaga qaraganda samaradorlik biroz pasayadi.

DSSCning tuzilishi

Quyidagi rasm DSSCning asosiy tuzilishi va uning ishlash mexanizmini ko'rsatadi:

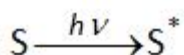


1a,b-rasm. DSSCning asosiy tuzilishi va uning ishlash printsipi. Qurilma quyidagilardan iborat: shaffof o'tkazuvchan oksid (TCO) bilan qoplangan shisha anodi, uning ustida bo'yoq molekullari bilan sezdirilgan mesoskopik TiO_2 qatlami, yodid/triiodide (I^-/I_3^-) redoks juftligi mavjud elektrolit va katalitik qoplamali qarshi elektrod. (<https://www.gamry.com/application-notes/physechem/dssc-dye-sensitized-solar-cells/>)

1b-rasm. Rang bilan sezdirilgan quyosh elementsining sxematik ko'rinishi. Qurilma quyidagi qismlardan tashkil topgan: (1) TCO (Shaffof o'tkazuvchan oksid) bilan qoplangan oynali anod, (2) uning ustida joylashgan mesoskopik TiO_2 qatlami bo'yoq molekullari bilan qoplangan, (3) yodid/triiodid redoks juftligini o'z ichiga olgan elektrolit, va (4) katalitik qoplamali katod. Quyosh nuri (moviy) bo'yoq molekullari (binafsha rang) tomonidan yutiladi, va bu bo'yoqlarning elektronlari TiO_2 o'tkazuvchanligiga in'ektsiya qilinadi (1-bosqich). Elektron ko'tarilishi: Yorug'lik energiyasi bo'yoq molekulasi qo'zg'atadi, uni yuqori energiya holatiga (S^*) olib chiqadi. Elektron in'ektsiyasi: Qo'zg'atilgan elektron darhol bo'yoqdan TiO_2 o'tkazuvchanlik bandiga in'ektsiya qilinadi (2-bosqich), natijada bo'yoq oksidlangan holatga o'tadi. Elektronlar TiO_2 tarmog'i bo'ylab TCO anodiga yetkazilib, tashqi zanjirga elektr tok sifatida oqadi. Shu vaqtda elektronini yo'qotgan bo'yoq molekullari oksidlangan holatda qoladi, ammo elektrolitdagi yodid-ionlar (redoks vositachilari) bo'yoqni tezda elektron bilan ta'minlab, bo'yoqni tiklaydi (2-bosqich). Bu jarayonda yodid triiodidga oksidlanadi. Elektron tashilishi: Elektronlar endi yarimo'tkazuvchi zarralar tarmog'i bo'ylab TCO elektrodiga yetkaziladi. Elektronlar tashqi zanjir bo'ylab katodga kelib, u yerda katalitik material (odatda platina) triiodidni yodidga kamaytiradi (3-bosqich), shu bilan aylanish zanjiri yopiladi.

Bu regenerativ sikl davom etadi: har bir foton ta'siridan keyin bo'yoq o'zining boshlang'ich holatiga qaytariladi va elektrolit, zaryadlarni elektrodlar orasida uzatadi, hech qanday moddani doimiy iste'mol qilmasdan. Quyida kimyoviy reaksiyalar 1–4-bosqichlarda ko'rsatilgan (katak) holatda sodir bo'ladi:

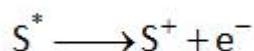
1-bosqich: Bo'yoq molekulasini dastlab o'zining erkin holatida (S) bo'ladi. Anodning yarimo'tkazuvchi materiali bu energiya darajasida o'tmas holatda (valentlik tarmog'i darajasida) bo'ladi. Quyosh nuri elementga tushganda, bo'yoq molekulasini o'z erkin holatidan (S) S^* holatiga o'tadi (1-tenglamaga qarang).



1-tenglama

Qo'zg'atilgan bo'yoq molekulasini endi yuqori energiya darajasiga chiqqani sababli yarimo'tkazuvchining energiya bo'shlig'ini bosib o'tadi. Natijada g'ovaklar (musbat zaryadlar) yarimo'tkazuvchida paydo bo'ladi.

2-bosqich: Qo'zg'atilgan bo'yoq molekulasini (S^*) elektronini TiO_2 o'tkazuvchanlik tarmog'iga topshiradi (2-tenglamaga qarang), ya'ni bo'yoq oksidlanadi. Yarimo'tkazuvchi shu energiya darajasida o'tkazuvchan bo'lib qoladi va elektronlar unda erkin harakatlana boshlaydi.



2-tenglama

So'ngra elektronlar diffuziya jarayonlar orqali anodning tok to'plovchisiga yetkaziladi. Agar tashqi yuk ulangan bo'lsa, u holda bu oqim elektr tok hosil qiladi.

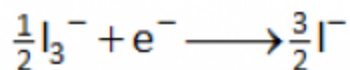
3-bosqich: Oksidlangan bo'yoq molekulasini (S^+) elektrolitdagi yodid-ionlar tomonidan elektron qabul qilib tiklanadi (3-tenglamaga qarang).



3-tenglama

Bu jarayonda yodid triiodidga oksidlanadi.

4-bosqich: Katodda triiodid yodidga qaytariladi (4-tenglamaga qarang), natijada yodid-ionlar yana tiklanadi.



4-tenglama

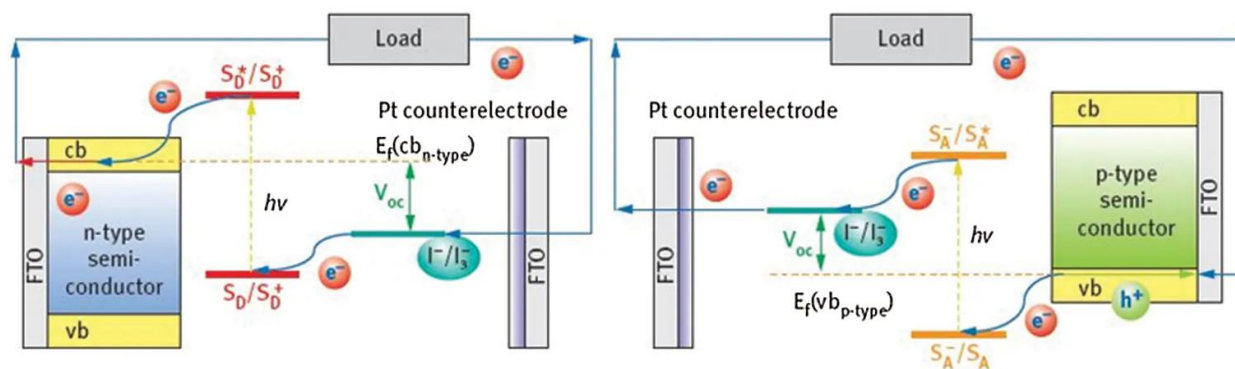
Ushbu jarayonlarni 1b-rasmda ko‘rib chiqsak, DSSC yorug‘lik yutilishini va zaryad tashishni turli materiallar orasida ajratishini ko‘ramiz. Bo‘yoq yorug‘likni yutib, elektronlarni qo‘zg‘atadi va TiO₂ ga in‘ektsiya qiladi (1–2-bosqich), elektrolit esa paydo bo‘lgan g‘ovaklarni tashiydi (2-bosqich). Rollarning bunday ajratilishi kremniy quyosh elementidagi kabi barcha vazifalarni bajaradigan bitta materialdan ko‘ra kimyoviy jihatdan juda barqaror, optik jihatdan faollikka ega bo‘lgan va spektrni keng qismini yutuvchi bo‘yoqlar va zaryadlarni yig‘ish uchun taqiqlangan zonasi keng bo‘lgan yarim o‘tkazgich materialdan foydalanishga imkon beradi. Ammo shu bilan birga, bo‘yoq/TiO₂ interfeysi va elektrolitdagi qarshiliklar kabilarning natijasida kuchlanish va tok yo‘qotishlari yuz beradi, bu esa samaradorlikni biroz kamaytiradi.

DSSCning n-tipli va p-tipli variantlari

DSSC – bu yorug‘likni elektr energiyasiga aylantiruvchi yarimo‘tkazuvch material asosidagi qurilma. Boshqa an‘anaviy tizimlardan farqli ravishda, DSSCda yarimo‘tkazuvch o‘zi yorug‘likni yutish hamda zaryad ajratish va tashishni birdaniga amalga oshirmaydi; aksincha, bu ikkala funksiyani alohida elementlar bajaradi. Tizimning har bir qismi DSSCning narxi va konversiya samaradorligiga sezilarli ta’sir qiladi. Yorug‘lik yutilish xususiyatlarini yaxshilash bo‘yoqni optimallashtirish orqali amalga oshiriladi. Biroq, zaryad tashish xususiyatlarini yarimo‘tkazuvchi va elektrolit tarkibini yaxshilash orqali kuchaytirish mumkin[6].

n-tipli DSSC

n-tipli materiallarga ega DSSClarda (masalan, TiO₂ yoki ZnO mesoskopik plyonkalar) bo‘yoq yorug‘likni yutadi va bu bo‘yoq n-tur yarimo‘tkazuvchining anod yuzasiga biriktirilgan bo‘ladi (2a-rasm). n-Turli DSSClar TiO₂ yoki ZnO plyonkalarini ITO yoki FTO substratlari ustida hosil qiladi va fotoanod vazifasini bajaradi. Bu yerda yorug‘lik ta’sirida bo‘yoqdan yarimo‘tkazuvchining o‘tkazuvchanlik bandiga elektron in‘ektsiya qilinishi bilan zaryad ajratish sodir bo‘ladi [7–10]..



2-rasm. n-turli (chap) va p-turli (o'ng) DSSClarning ishlash printsipi.[20]

2-rasm. n-tipli (chap) va p-tipli (o'ng) DSSClarning ishlash printsipi. n-tipli holatda bo'yoq yorug'likni yutadi va TiO_2 ga elektron in'ektsiya qiladi, elektrolit esa elektronini topshirilgan bo'yoqni tiklaydi. p-tipli holatda bo'yoq yorug'likni yutib, p-tip yarimo'tkazuvchining valentlik zonasiga g'ovak (musbat zaryad) in'ektsiya qiladi, elektrolit esa g'ovaklar uzatilishini ta'minlaydi.

p-tipli DSSC

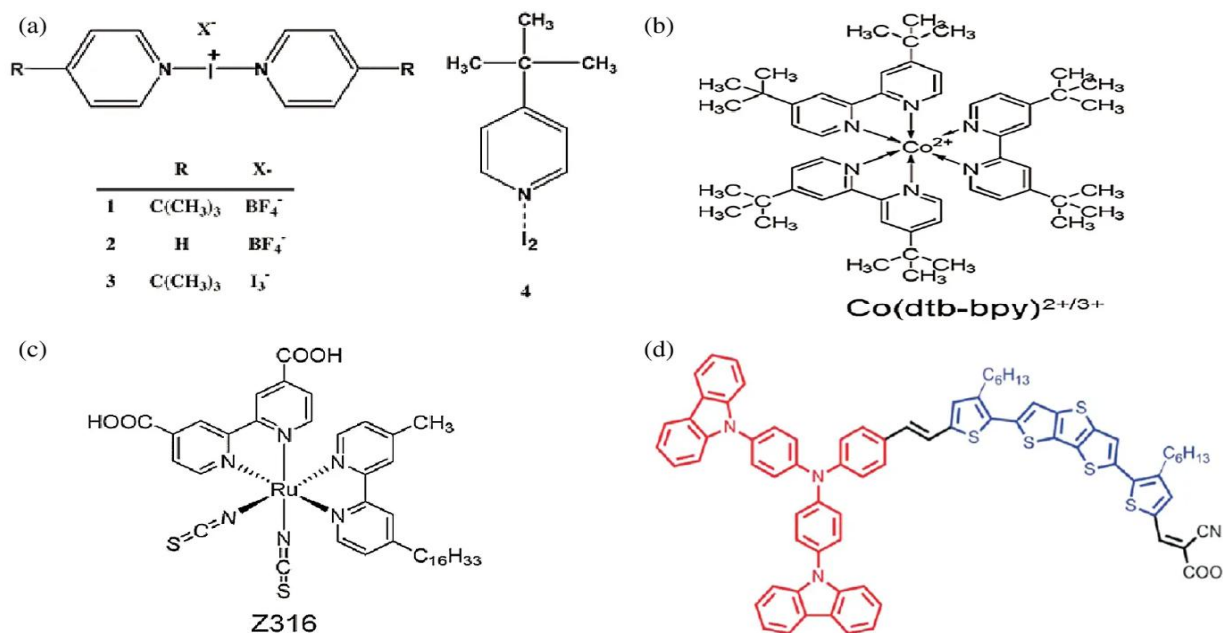
p-tipli yarimo'tkazuvchi tarmog'ida yorug'lik birinchi navbatda mesoskopik p-tur elektrod yuzasiga joylashtirilgan bo'yoq orqali yutiladi (2b-rasmda ko'rsatilganidek). p-Tur DSSClar asosan NiO elektrodlariga ega bo'lib, ular ITO va/yoki FTO substratlari ustida joylashgan. Bunday DSSClarda bo'yoq foto-qo'zg'algan zahoti, zaryad ajralishi bo'yoq molekulasida yoki yarimo'tkazuvchiga elektron o'tkazishni anglatadi; ya'ni bo'yoqqa NiO valentlik zonasidan g'ovak (musbat zaryad) in'ektsiya qilinadi[11–14]. Shunday qilib, yuqoridagi ikkala turda ham umumiy bo'lgan hodisa – oksidlangan yoki pasaytirilgan bo'yoqni elektrolit orqali tiklashdir.

Umuman olganda, hozirgacha ko'p olimlar n-turli DSSClarga e'tibor qaratmoqda: an'anaviy ruteniy va sink porfirin bo'yoqlaridan foydalanilganda samaradorlik 12–13% gacha yetdi[15,16]. Buning aksiga, p-turli DSSClarning samaradorligi ancha past. Xususan, p-tur DSSClarda ishlatiladigan yarimo'tkazuvchi odatda NiO bo'lib, uning konversiya samaradorligi 2.5% atrofida – bu p-tur DSSClarning eng yuqori ko'rsatkichi hisoblanadi[17]. Ammo bu bo'yoqlar katta sanoat miqyosida qo'llanilishi uchun ma'qul emas: chunki metalli bo'yoqlarning yuqori narxi, ularni ajratishning murakkab jarayoni va atrof-muhit muammolari mavjud. Shu sababli, ushbu texnologiyani keng ishlab chiqarish past haroratda tayyorlanadigan elektrodlar va tejamkor materiallarni ishlab chiqishga bog'liq bo'ladi. Shuning uchun turli DSSC turlarini o'rganish va arzon, yuqori samarador bo'lgan dizaynlarni topish muhim ahamiyat kasb etadi.

Materiallar

DSSCda fotonlarni yutish va elektronlar tashish ikki turli komponent orqali amalga oshadi: bo'yoqlar va n-turli nanokristalli TiO_2 . G'ovaklar (musbat zaryad) quyidagi vositalardan birida harakatlanadi:

- **Liquid electrolyte** – Suyuqlik elektroliti
- **Solid electrolyte** – Qattiq elektrolit
- **Quasi-solid-state electrolyte** – Yarim qattiq elektrolit



3-rasm. Elektrolit va bo‘yoq namunalar tuzilishi [18,19,20] (nashriyot tomonidan ruxsat bilan qayta nashr etilgan). (a) 4-tert-butilpirimidin (TBP) qo‘shimchasi bilan triiodid elektroliti, (b) kobalt tris-bipiridin kompleksi, (c) organik sensitizator Z316, (d) organik sensitizator Carbz-PAHTDTT

3-rasm: Quyidagi birikmalarning tuzilishi (nashriyot ruxsati bilan [18,19,20]): (a) TBP qo‘shimchasi bilan triiodid elektroliti, (b) kobalt tris-bipiridin kompleksi ([Co(bpy)₃]^{2+/3+}) bilan elektrolit, (c) organik bo‘yoq Z316, (d) organik bo‘yoq Carbz-PAHTDTT.

4-tert-butilpirimidin (TBP) qo‘shimchasi bilan triiodid asosidagi suyuq elektrolit (3a-rasm) DSSC uchun juda samarali elektrolit hisoblanadi. Yodid/triiodiddan tashqari, yuqori samaradorlikka ega DSSClarda tez-tez kobalt tris-bipiridin ([Co(bpy)₃]^{2+/3+}) redoks juftligi va Z316 nomli organik bo‘yoq qo‘llaniladi (3b va 3c-rasmlar). Bundan tashqari, ferrotseniyum/ferrotsen redoks juftligi ham noyob elektrokimyoviy xususiyatlarga ega. Masalan, metal bo‘lmagan organik bo‘yoq (Carbz-PAHTDTT) bilan birga ishlatilgan ferrotsen/ferrotseniyum elektrolit DSSClarda 7.5% dan yuqori samaradorlikka erishgan (3d-rasm) – bu yodid/triiodid asosidagi DSSClardan ham yuqori ko‘rsatkich. Shu sababli organik bo‘yoq bilan birga ferrotsen asosidagi elektrolitlar kelajakda DSSC dizaynlarida istiqbolli bo‘lib qolmoqda.

Qattiq elektrolitli DSSC

So‘nggi o‘n yillikda tadqiqotchilar DSSClarda suyuq elektrolit o‘rniga qattiq holatli elektrolitlardan foydalanishga e‘tibor qaratishdi. Qattiq elektrolitlar ishlatilishi ishlab chiqarishni yengillashtiradi, muhrlashni soddalashtiradi va

elementlarni monolit tarzda yig'ish imkonini oshiradi. Natijada, umumiy ishlash yaxshilanadi va DSSC narxi pasayadi.

Tadqiqotlar ko'rsatadiki, qattiq holatli DSSClarda (masalan, g'ovak tashuvchisi sifatida P3HT qatlamli) tashuvchilarni qayta birikishi bo'yicha yo'qotishlar ko'proq bo'lganligi sababli samaradorlik suyuq elektrolitli elementlarga nisbatan pasaygan. Misol uchun, CsSnI_3 asosidagi elementlar 10.2% samaradorlikka, Ag_2Se asosidagilar taxminan 5.9% ga erishgan. 2018-yilda o'tkazilgan tadqiqotda 80 mW/cm^2 yorug'likda bunday element 2.56% ko'rsatkichni berdi. Samaradorlik past bo'lganiga qaramay, qattiq elektrolitlar suyuqliklarga nisbatan sezilarli darajada barqarorroq bo'ladi. Chung va boshq. esa 2011-yilda birinchi perovskit asosli DSSCni yaratib, bu yo'nalishda keyingi tadqiqotlarni rag'batlantirdi.

Umuman olganda, qattiq elektrolitli DSSClarning barqarorligi yuqori bo'lsa-da, elektrod bilan zaif kontakt va g'ovakchali strukturaga suyuqlik kirishining pastligi sababli quvvat konversiya samaradorligi pasayadi[53]. Shu bilan birga, qattiq DSSClarning afzalliklari – ishlab chiqarishdagi soddalik, monolit qurilmalar tayyorlash osonligi, muhrlash va modulni joylash jarayonlari oddiyroq bo'lishi bilan namoyon bo'ladi.

Yarim qattiq elektrolitli DSSC

Electrolyte (elektrolit) DSSClarda hal qiluvchi rol o'ynaydi; quvvat samaradorligi unga bog'liq. Yarim qattiq polimer elektrolitlar suyuq va qattiq turlarining cheklovlarini bartaraf etadi, yuqori barqarorlik va ion o'tkazuvchanlik ta'minlaydi. Bunday elektrolitlar polimer matritsasi ichida suyuq erituvchi molekulalarni ushlab turadi (bug'lanishga yo'l qo'ymaydi) va shu bilan birga redoks-kanallarni hosil qiladi. O'tkir polimer membranalar suyuqlikni yaxshiroq ushlab turib, elektrod bilan aloqani va o'tkazuvchanlikni yaxshilaydi[23].

Masalan, Kim va boshq. PMMA asosidagi g'ovakli polimer membranalarni joriy etib, 2.4% samaradorlikka erishgan[24]. Boshqa ishlarda ham yarim qattiq elektrolit bilan 9.48% (8.84% suyuqqa nisbatan) [25] va 8.64% (1 kun yorug'lik) ko'rsatkichlar qayd etildi[26]. Ba'zi ishlarda esa DSSC 200 luksa nurda 12.23% samaradorlikka erishdi[27]. Boshqa tajribalarda PAniNT/rGOA aerogel bilan 5.47%[28], PIL/poliindole/PMMA kombinatsiyasi bilan 5.96%, polimer jelatorlar bilan esa ~9.72% (suyuqqa teng) samaradorlik ko'rsatildi[29] [30]. Polimer strukturasi samaradorlikka katta ta'siri bor.

Yarim qattiq elektrolitli DSSClarning quvvat samaradorligi suyuq elektrolitli elementlar bilan deyarli teng darajada bo'ldi. Biroq, bu turdagi qurilmalarning o'ziga xos afzalligi – yanada mustahkam muhrlanishi, ishlab chiqarish jarayonining soddaligi va modulni loyihalashda qulaylikdir. Ularning kamchiligi – suyuq elektrolitga nisbatan past ion o'tkazuvchanlik va tarmoq ichida zaif poro'zlarni egallash bilan bog'liq[31]. Bu tizimlarning uzoq muddatli barqarorligi bo'yicha ishonchli ma'lumotlar kam. Ammo laboratoriyalarning soni ortib borishi bilan bu sohada ko'proq ilmiy qiziqish paydo bo'lishi mumkin.

Bo'yoqlar va boshqa materiallar

DSSCda an'anaviy bo'yoqlar ruteniy asosidagi komplekslar (masalan, N_3 , N_719 yoki "qora bo'yoq") bo'lib, ular ko'zni ko'ruvchi diapazonida keng yutilishni ta'minlaydi va ancha barqaror hisoblanadi. Ruteniy bo'yoqlari TiO_2 ga elektron in'ektsiya qilishda yuqori kvant samaradorlikka ega va yodid elektrolit tomonidan regeneratsiya qilinishi uchun tegishli zamin potentsialiga ega. So'nggi yillarda qimmat metallarni kamaytirish va yutilish spektrini kengaytirish maqsadida turli metall bo'lmagan organik bo'yoqlar (masalan, donor- π -qabul qiluvchi bo'yoqlar) va porfirin bo'yoqlari ishlab chiqildi[2][3]. Bu yangi bo'yoqlar an'anaviy Ru bo'yoqlariga teng yoki undan yuqori samaradorlikka erishdi, ayniqsa yangi redoks shuttl bilan ishlatilganda.

Fotoanod materiali sifatida nanokristalli TiO_2 hanuzgacha bosh rolni o'ynaydi, chunki uning energiya bo'shlig'i (~ 3.2 eV) to'g'ri spektrda yaxshi ishlaydi va u keng tarqalgan. Alternativ materiallar sifatida ZnO va SnO_2 ham o'rganilgan, ammo ular odatda TiO_2 dan ustunroqlik ko'rsata olmadi. DSSCdagi elektrolit juda muhim bo'lib, u bo'yoq va katod o'rtasida zaryad uzatilishini ta'minlaydi. An'anaviy elektrolit organik erituvchi (masalan, asetonitril yoki valeronitril) ichida yodid/triiodid redoks juftligidan iborat. Bu I^-/I_3^- juftlik bo'yoq regeneratsiya kinetikasini tezlatadi, lekin uning past redoks potentsiali salbiy effekt keltirib chiqaradi (bir necha yuz mV kuchlanish yo'qotilishi).

Yuqori kuchlanishga erishish uchun kobalt(II/III) bipiridin kompleksi va mis(I/II) kompleksi kabi yuqori redoks potentsialga ega vositachilar kiritildi. Masalan, 13% samaradorlikka erishgan porfirin DSSC $Co^{3+/2+}$ shattlidan foydalangan Kamchilik shundaki, ba'zi yangi vositachilar sekinroq diffuziya qiladi, bu esa tokni kamaytiradi va elektron bilan qayta birikishi ehtimoli yuqori bo'lgani uchun, qo'shimchalar (masalan, TiO_2 bloklovchi qatlamlar) qo'llaniladi yoki bo'yoq bilan kompleks hosil qilishi mumkin, shuning uchun ehtiyotkorlik bilan molekulyar muhandislik talab etiladi. Katod odatda yupqa platina (Pt) qatlamidan iborat bo'lib, u triiodidni iodidga samarali qaytarilishini katalizlaydi[5]. Platina qimmat bo'lgani sababli, ko'plab tadqiqotlar muqobil qarshi elektrod materiallarini — masalan, uglerod nanotubalari, grafit, o'tkazuvchan polimerlar va o'tish metallari birikmalarini (masalan, NiS , Co_3Se_4 va boshqalar) — o'rganmoqda; ularning ba'zilar Pt bilan teng darajadagi samaradorlikni ko'rsatmoqda[32].

Yangi mexanizm sifatida elektrolit o'rniga qattiq g'ovak o'tkazgichidan foydalanish hisoblanadi. Masalan, Spiro-OMeTAD kabi qattiq organik yarimo'tkazuvchilar suyuq elektrolitni chiqarib tashlab, gibrid DSSCni yaratadi. Biroq, bunday qattiq DSSClarning samaradorligi odatda past bo'lib, ular perovskit quyosh elementlarining oldqismida qo'llaniladi (2012–2013 yillarda perovskit inqilobi tufayli 15% dan yuqori erishildi). Shuningdek, p-turli DSSClar bo'lgani kabi, ikkita turli DSSC (n-tur va p-tur) qo'shib ishlatilgan qo'llanmalar ham o'rganilmoqda. Masalan, ikkita DSSC ketma-ket ulanishi nazariy jihatdan 15% yoki undan yuqori samaradorlikka yetishi mumkin, ammo hozirgacha ularning samaradorligi kam (1–3%) bo'lib qolmoqda.

Ishlab chiqarish

DSSC texnologiyasining asosiy afzalliklaridan biri — bu nisbatan oddiy va past haroratda tayyorlash jarayonidir, u kristall o'stirish yoki yuqori vakuumda qoplama talab qilmaydi. Odatda, TiO_2 nanohissachalari pastasi TCO (o'tkazuvchan o'tkazgichli oksid) shishasiga doctor-blading yoki ekranli bosma usuli bilan surtiladi, so'ngra taxminan 450°C da sinterlanadi va bu orqali mexanik jihatdan barqaror, ammo g'ovakli elektrod hosil qilinadi[5]. (Plastik substratlar uchun esa past haroratli zarrachalar suspenziyasi yoki kimyoviy sinterlash usullari qo'llaniladi.) Sovutishdan so'ng, TiO_2 plyonkasi bo'yoq eritmasiga bir necha soat davomida solinadi — bu orqali sezgirlashtiruvchi molekulalar ichki yuzaning katta maydoniga monoqavat holda kimyoviy adsorbsiya qilinadi (bu jarayon ba'zida "bo'yoq yuklash" yoki sensitizatsiya deb ataladi)[5]. Ortiqcha bo'yoq yuvib tashlanadi va bo'yalgan elektrod qarshi elektrod bilan sendvich shaklida yig'iladi — ko'pincha bu uchun termoplastik muhrlovchi (masalan, Surlyn) bo'shliqni ta'minlovchi vosita sifatida ishlatiladi. Suyuq elektrolit to'ldirish teshigi orqali yoki yig'ish vaqtida kapillyar ta'sir orqali kiritiladi, so'ngra butun element muhrlanadi. Bu bosma va botirish jarayoni yirik hajmda ishlab chiqarish uchun mos keladi; haqiqatan ham, kompaniyalar DSSC modullarini ishlab chiqarish uchun moslashuvchan substratlarda rulonli bosma texnologiyasidan foydalangan. Tayyorlashning nisbatan soddaligi va asosan arzon materiallardan (shisha, TiO_2 , organiklar) foydalanilishi nazariy jihatdan DSSClarga qulay narx/samaradorlik nisbatini ta'minlaydi[5]. Bundan tashqari, DSSClar yarim shaffof va turli ranglarda tayyorlanishi mumkin (rang ishlatilgan bo'yoqqa bog'liq), bu esa ularni binolarga integratsiyalashgan fotoelektr tizimlarida yoki estetika muhim bo'lgan iste'molchi mahsulotlarida qo'llash imkonini beradi. Masalan, turli tilda tayyorlangan DSSC panellari Shveysariya va boshqa mamlakatlarda energiya ishlab chiqaruvchi derazalar sifatida o'rnatilgan[20].

Ishlab chiqarishdagi muammo va takliflar

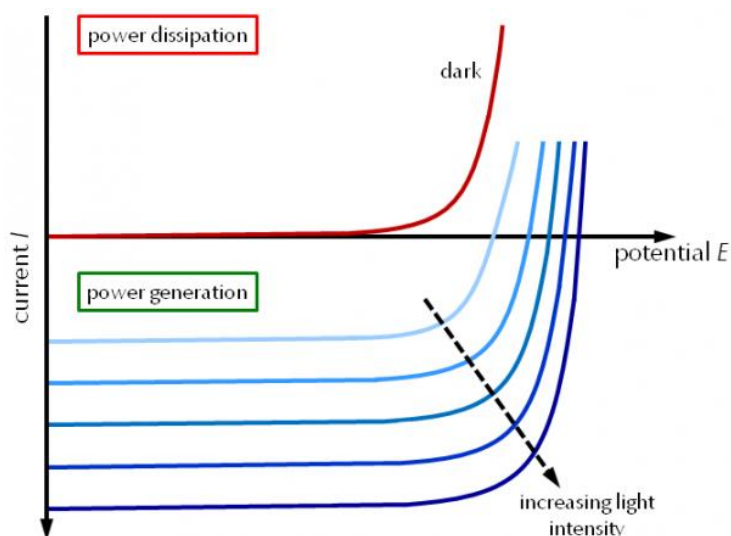
Ularning ishlab chiqarish jarayoni oddiy bo'lishiga qaramay, DSSC elementlarini yig'ishda barqarorlik va mahkamlash muhim masalalardan biridir. Suyuqlik elektroliti uchuvchan organik erituvchilarni o'z ichiga oladi va uni sizib chiqish va bug'lanishdan himoya qilish uchun qat'iy muhrlash zarur. Uzoq muddatli ultrabinafsha nurlanish va issiqlik ta'siri ba'zi bo'yoqlar va elektrolit komponentlarini yemirishi mumkin. Bunga qarshi kurashish uchun tadqiqotchilar uchuvchan bo'lmagan ion suyuqlik elektrolitlari va barqarorlikni yaxshilovchi kvazi-qattiq jel elektrolitlarini ishlab chiqdilar. Suyuqlik elektrolitini butunlay qattiq g'ovak tashuvchi (masalan, perovskit quyosh elementlarida yoki boshqa qattiq holatdagi DSSC larda) bilan almashtirish sizib chiqish muammosini bartaraf etadi, biroq bu holat TiO_2 interfeysida pastroq g'ovak to'ldirish va tezroq rekombinatsiya kabi yangi muammolarni keltirib chiqarishi mumkin[32].

DSSC elementlarining xizmat muddatini uzaytirish uchun kapsulyatsiyalash texnikalari, UV filtrlari hamda mustahkam bo'yoq tuzilmalari (masalan, bo'yoq agregatsiyasi va yemirilishini oldini oluvchi alkoksi himoya guruhlarini) qo'llaniladi. Zamonaviy eng ilg'or DSSClar 60 °C va undan yuqori haroratda yorug'lik ta'sirida minglab soat davomida barqaror qolishi mumkin, ammo kremniy asosidagi fotoelementlarga o'xshab 20 yildan ortiq tashqi muhitda ishlash muddatiga erishish hali ham ilmiy izlanishlarning faol yo'nalishidir.

Fotoelektrik xarakteristikalar va samaradorlikni hisoblash

Yorug'lik ta'sirida har qanday quyosh elementi tok hosil qiladi. Chiquvchi tok, avvalo, element kuchlanishiga va tushayotgan yorug'lik intensivligiga bog'liq bo'ladi. Tok-kuchlanish (I–V) egri chizig'i ushbu munosabatni tasvirlaydi. Odatda, DC milivoltmetriya usulida elementga ma'lum potentsial E berilib, uni kamaytirib yoki oshirib o'tkazib, elementning tok I o'lchanadi. Shu paytda, elementga doimiy intensivlikdagi yorug'lik manbasi yo'naltiriladi.

4-rasmda yorug'lik intensivligi o'sishi va yorug'lik yo'qligida DSSCning I–V egri chizig'i ko'rsatilgan (qora chiziq), shuningdek uning kuchlanish bo'yicha quvvat chiqish egri chizig'i (ko'k chiziq) ham keltirilgan. Asosiy parametrlar egri chiziq bo'yicha aniqlanadi:



4-rasm. Yorug'likli va yorug'lik berilmagan I-V egri chiziqlarining sxematik diagrammasi

- **Qisqa tutashuv tok (I_{SC})** – element terminalari qisqa tutashganida oqadigan tok (tashqi kuchlanish 0). Bu holatda hosil bo'ladigan elektr quvvat ham nolga teng.

$$I_{SC} = I_{max} = I(E = 0)$$

I_{SC} yorug'lik intensivligi ortishi bilan ko'payadi; bu element yetkazib bera oladigan maksimal tokni ifodalaydi (I–V egri chizig'ining vertikal y-oqini kesib o'tganda ko'rsatiladi). DSSClarda 1 quyosh ostida I_{SC} odatda 15–25

mA/cm² atrofida bo‘ladi, bu TiO₂ plyonka qalinligi va bo‘yoq yutilishiga bog‘liq.

- **Ochiq aylanish kuchlanishi (V_{OC})** – element aylanmasi ochiq (tok I=0) bo‘lgan holatda terminalar o‘rtasidagi kuchlanish. V_{OC} berilgan yorug‘lik intensivligida elementning erishishi mumkin bo‘lgan maksimal kuchlanishdir.

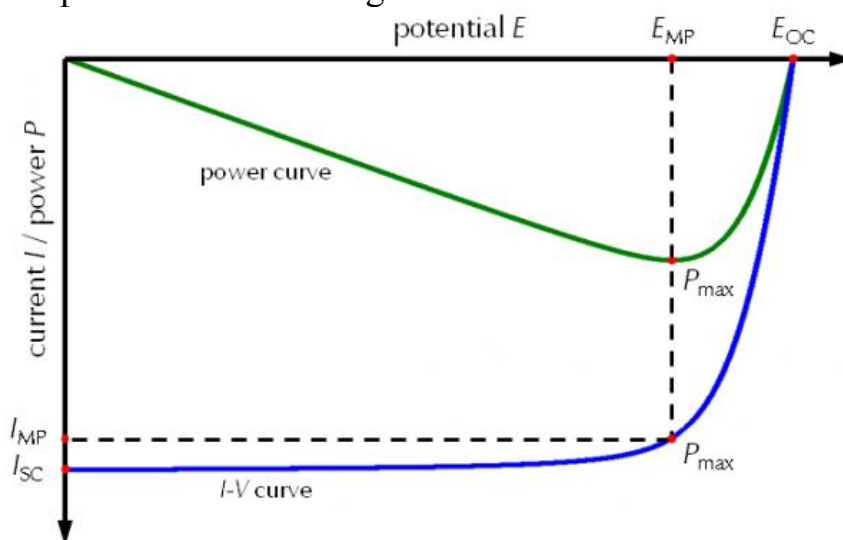
$$E_{oc} = E_{max} = E(I = 0)$$

DSSCda V_{OC} yarimo‘tkazuvchining fer-mi darajasi (yorug‘likda TiO₂ning o‘tkazuvchanlik darajasi) bilan elektrolit redoks potentsiali farqidan kelib chiqadi. Masalan, yaxshi redoks shuttlar (kobalt, mis) yoki TiO₂ yuzasini modifikatsiya qilish (elektron qayta birikishini kamaytirish) V_{OC} ni ~0.9–1.0 Vgacha oshiradi. DSSClarda yorug‘lik intensivligi pasayganda V_{OC} kamayadi, lekin u logarifmik darajada pasayadi, shuning uchun past yorug‘likda ham nisbatan yuqori voltaj saqlanadi.

- **To‘yinganlik faktori (FF)** – I–V egri chizig‘ining “kvadratga o‘xshashlik” o‘lchovi. $FF = (V_{MP} \cdot I_{MP}) / (V_{OC} \cdot I_{SC})$, bu erda V_{MP} va I_{MP} maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanish va tok[5]. I–V egri chizig‘ining to‘yinganlik faktori idealda 1 bo‘lsa (to‘rtburchak shakli egri), amaliy DSSClarda u odatda 0.6–0.75 atrofida bo‘ladi. High FF yuza qarshiligi va oqish yo‘llarini kamaytirish bilan ko‘riladi. To‘ldirish koeffitsiyenti (Fill Factor) — bu quyosh elementining maksimal hosil qilgan quvvati (P_{max}) bilan nazariy maksimal quvvati (P_{nazariy}) nisbatidir. To‘ldirish koeffitsiyenti uchun umumiy formulasi quyidagicha ifodalanadi:

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{theo}} = \frac{E_{MP} \cdot I_{MP}}{E_{OC} \cdot I_{SC}}$$

5-rasmda bu parametrlar ko‘rsatilgan:



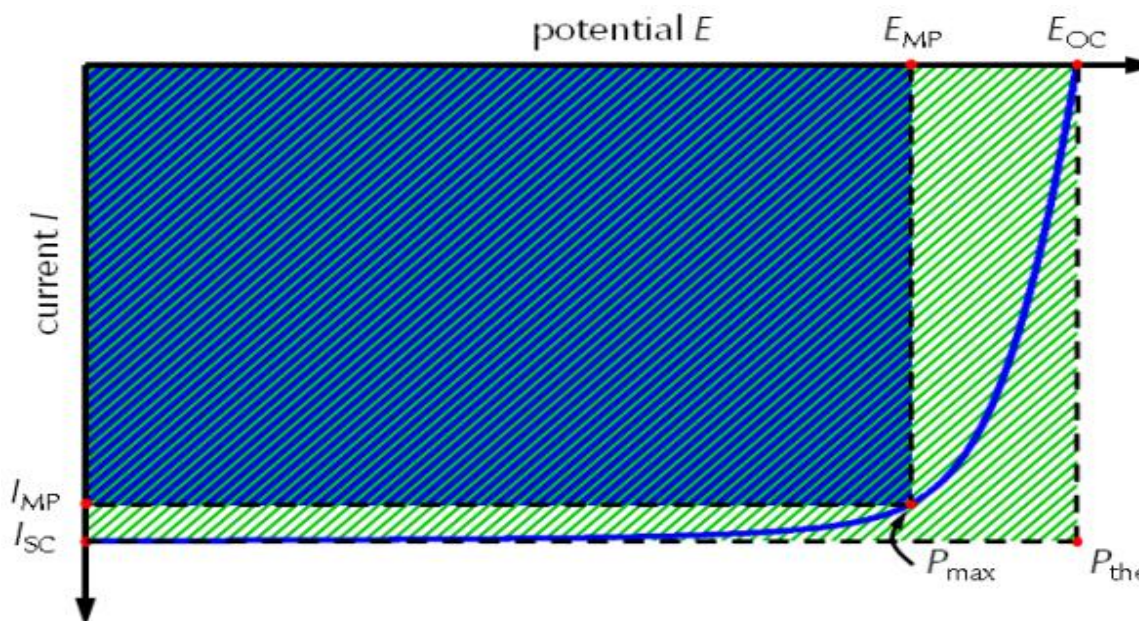
5-rasm. Quyosh elementsining tipik I–V egri chizig‘i (qora) va quvvat chiqish egri chizig‘i (ko‘k). Qisqa tutashuv tok (I_{SC}) va ochiq aylanish kuchlanish (V_{OC}) ko‘rsatilgan. Bir nechta muhim parametrlar ko‘rsatilgan.

Maksimal quvvat nuqtasi (MPP) – bu I–V egri chizig‘idagi nuqta bo‘lib, unda $V \cdot I$ (quvvat) ko‘paytmasi eng katta bo‘ladi (eng yuqori bo‘lgan ishlash nuqtasidir), bu 6-rasmdagi quvvat egri chizig‘ining cho‘qqisida ko‘rsatilgan. Bu nuqtada V_{mp} va I_{mp} qiymatlari olinadi. Ideal, qarshiliksiz ishlovchi element uchun $FF = 1$ bo‘ladi (ya‘ni, to‘liq to‘rtburchak shakldagi I–V egri chizig‘i), biroq real quyosh elementlarida $FF < 1$ bo‘ladi[4].

DSSC (bo‘yoq sezgirli quyosh elementi) lar uchun odatdagi to‘ldirish koeffitsiyenti 0.6–0.75 oralig‘ida bo‘ladi. Past FF quyidagilardan kelib chiqishi mumkin:

- ichki ketma-ket qarshilik (TCO, kontaktlar, elektrolit qarshiligi),
- shunt (ya‘ni, yon) qarshilik — oqish yo‘llari tufayli yuzaga keladigan yo‘qotishlar,
- va elementning o‘ziga xos diod xarakteristikalarini.

Yaxshi optimallashtirilgan kichik maydonli DSSC $FF \approx 0.70$ –0.75 qiymatga erishishi mumkin



6-rasm. To‘ldirish omilining grafik tasviri.

(<https://www.gamry.com/application-notes/physechem/dssc-dye-sensitized-solar-cells/>)

Quvvat konversiya samaradorligi (PCE yoki η) – bu tushayotgan yorug‘lik quvvatining nechanchi foizi elektr quvvatiga aylantirilganligini ifodalaydi. Ushbu samaradorlik quyidagicha hisoblanadi:

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} \times 100\%$$

bu yerda P_{in} – tushayotgan yorug‘lik quvvati (standart sharoitda $P_{in} = 100 \text{ mW/cm}^2$, ya’ni 1 quyosh, AM1.5 spektri). Masalan, agar DSSC uchun $V_{OC} = 0.75 \text{ V}$, $I_{SC} = 20 \text{ mA/cm}^2$ va $FF = 0.70$ bo‘lsa, u holda maksimal chiqish quvvati $0.75 \times 20 \times 0.70 \approx 10.5 \text{ mW/cm}^2$ bo‘ladi, shunda $\eta \approx 10.5 \text{ mW}/100 \text{ mW} = 10.5\%$. Amalda samaradorlikni o‘lchashda cell maydoni aniq belgilab olinadi va kalibrlangan quyosh simulyatori ishlatiladi. Masalan, agar 1 cm^2 maydondagi DSSC 10 mW quvvat ishlab chiqarsa, u 10% samaradorlikka ega bo‘ladi[33]. Odatda, 1 quyosh ostida 13% va undan yuqori samaradorlikka erishgan DSSClarning $V_{OC} \sim 0.9 \text{ V}$, $I_{SC} \sim 18 \text{ mA/cm}^2$, $FF \sim 0.75$ atrofida bo‘lgan holatlari kuzatilgan[3].

DSSClarning dinamik xususiyatlariga kelsak, ularning elektrolit o‘tkazuvchanligi tufayli reaksiya tezligi qattiq holatli qurilmalarga nisbatan boshqacha bo‘lishi mumkin. Masalan, katta elementlarda yoki yuqori yorug‘likda $I-V$ egri chizig‘ida kichik “S” shaklidagi birmuncha to‘siq paydo bo‘lishi mumkin (bu yodid/triiodidni tarqalishiga bog‘liq). Lekin bu yerda biz asosiy barqaror holat xususiyatlariga e’tibor qaratdik.

6-rasm: Quyosh elementi yorug‘lik ostida ishlayotgandagi odatdagi $I-V$ egri chizig‘i (qora chiziq) va quvvat–kuchlanish egri chizig‘i (ko‘k chiziq). Asosiy nuqtalar quyidagilardir: qisqa tutashuv toki (I_{SC}) $V = 0$ da, ochiq zanjir kuchlanishi (V_{OC}) $I = 0$ da, va maksimal quvvat nuqtasi (MPP) — bu yerda $V \cdot I$ ko‘paytmasi eng yuqori bo‘ladi. Fill-faktor (FF) bu to‘q ko‘k to‘rtburchak ($V_{mp} \times I_{mp}$) yuzasining och kulrang to‘rtburchak ($V_{OC} \times I_{SC}$) yuzasiga nisbati bo‘lib, $I-V$ egri chizig‘ining qanchalik “to‘rtburchak” shaklda ekanini ko‘rsatadi. Yuqori FF elementda ideal diod xatti-harakatiga va ichki yo‘qotishlarning kamligiga ishora qiladi. DSSC (bo‘yoq sezgirli quyosh elementlari) lar uchun odatdagi fill-faktor 0.6 dan 0.75 gacha bo‘ladi. DSSC ning I_{SC} va V_{OC} qiymatlari yoritilish sharoitiga bog‘liq: past yorug‘likda I_{SC} proporsional ravishda kamayadi, lekin V_{OC} faqat logarifmik tarzda pasayadi — bu esa DSSC larni xira yorug‘likda ham nisbatan yuqori samaradorlik bilan ishlashiga sabab bo‘ladi.

Dinamik xatti-harakat: DSSC (bo‘yoqqa sezgir quyosh elementlari) lar elektrolit orqali zaryad tashilishi tufayli qattiq holatdagi fotoelementlarga nisbatan boshqacha dinamik talabga ega ekanligini ta’kidlash lozim. Agar elektrolitdagi iodid/triiodid ionlarining massa tashilishi cheklovchi bosqich bo‘lsa (masalan, yirik elementlarda yoki juda yuqori yorug‘lik intensivligida), $I-V$ egri chizig‘ida biroz “S-shaklidagi” buzilishlar paydo bo‘lishi mumkin. DSSC ichki qarshiliklarini (masalan, $\text{TiO}_2/\text{bo‘yoq}$ zaryad o‘tkazish qarshiligi, elektrolitdagi I^-/I_3^- juftining Nernst diffuziya qarshiligi va boshqalar) tahlil qilish uchun elektrokimyoviy impedans(umumiy samarali qarshilik) spektroskopiyasi kabi usullardan foydalaniladi. Ushbu umumiy ko‘rinishda esa biz yuqorida keltirilgan barqaror holatdagi samaradorlik ko‘rsatkichlariga e’tibor qaratamiz.

Yangi yutuqlar, yangi turlari va gibrid arxitekturadagi DSSClar

So‘nggi o‘ttiz yil davomida olib borilgan tadqiqotlar natijasida DSSC (dye-sensitized solar cells – bo‘yoq bilan sezgirlashtirilgan quyosh fotoelementlari) texnologiyasining samaradorligi, barqarorligi yoki uni aniq ilovalarga moslashtirish

maqsadida ko‘plab varianti ishlab chiqildi. Quyida muhim texnologik yutuqlar umumlashtirilib, ularning ishlash xususiyatlari solishtiriladi:

Sezgirlashtiruvchi (sensitizer) bo‘yoqlarning takomillashuvi:

Dastlabki DSSClar sodda Ru(II) bipiridil bo‘yoqlaridan (masalan, N3) foydalangan. Keyinchalik N3 ga qarindosh bo‘lgan, tiosiyanat ligandlari o‘rniga tiosiyanat–fosfonat bog‘lovchilar bilan almashtirilgan **N719** bo‘yoqlari ishlab chiqildi; bu yaxshiroq bog‘lanishni ta‘minladi. Shuningdek, yaqin infraqizil (NIR) sohalarigacha yutilishni kengaytiruvchi **“Black Dye”** (ruteniy terpidil kompleksi) va turli metall bo‘lmagan organik bo‘yoqlar (masalan, kumarin bo‘yoqlari, indolin bo‘yoqlari, triarilamin asosidagi Donor– π –Akseptor bo‘yoqlari) ishlab chiqildi va turli tadqiqotlarda 9–12% samaradorlikka erishildi [3][1].

Organik bo‘yoqlarning ko‘pincha molyar yutilish koeffitsienti juda yuqori bo‘lib, ular orqali yupqaroq TiO₂ plyonkalaridan foydalanish mumkin, bu esa rekombinatsiya yo‘qotishlarini kamaytiradi. **Porfirin bo‘yoqlari** (masalan, **YD2-o-C8** va **SM315**, Mathew va hammualliflar, 2014 y.) katta yutilish kesimiga ega bo‘lib, spektral xossalarini sozlash imkoniyatiga ega; natijada $\approx 13\%$ gacha rekord samaradorlikka erishilgan [3].

Tadqiqotchilar ta‘lim va juda arzon DSSClar uchun tabiiy bo‘yoqlarni (mevalar, va h.k.) ham o‘rgandilar; bu orqali ishlovchi DSSClar tayyorlash mumkin bo‘lsa-da, ularning samaradorligi bir necha foizdan oshmaydi (masalan, xlorofill $\sim 4\%$, antosiyanin $\sim 1\text{--}2\%$) [1].

Bugungi kunda e‘tibor **keng spektrdagi quyosh nurlarini (shu jumladan, qizil va yaqin infraqizil fotonlarni) yutish** imkoniyatiga ega, barqaror sintetik bo‘yoqlarga qaratilgan. Shu bilan birga, **kosensitizatsiya** — ya‘ni spektrning o‘zaro to‘ldiruvchi qismlarini yutish uchun ikki yoki undan ortiq bo‘yoqdan birgalikda foydalanish usuli ham rivojlanmoqda. Masalan, ko‘rinadigan spektr uchun porfirin va qizil/NIR diapazoni uchun organik bo‘yoq ishlatilgan DSSClar yuqori fototok hosil qilib, ba‘zi hisobotlarda 14% dan ortiq samaradorlikka erishgan.

Elektrolitlar va redoks vositalari:

An‘anaviy iodid/triiodid suyuq elektroliti tez bo‘yoq regeneratsiyasi va eritmada iodid mavjudligi jihatidan yaxshi muvozanatni ta‘minlaydi, biroq u quyidagi kamchiliklarga ega: nisbatan past redoks potentsiali (bu V_{OC} ni cheklaydi), korrozivlik (yod metallarga zarar yetkazishi mumkin) va erituvchining uchuvchanligi. Ushbu muammolarni hal qilish uchun yangi redoks vositalari joriy etilgan. Masalan, I⁻/I₃⁻ o‘rniga kobalt(II/III) komplekslari (masalan, [Co(bpy)₃]^{2+/3+}) qo‘llanilishi redoks potentsialni $\approx 0,3$ V ga oshiradi, bu esa V_{OC} ni va umumiy samaradorlikni oshiradi — bu $>12\%$ samaradorlikka ega DSSClarda namoyon bo‘lgan [3].

Biroq, kobalt komplekslari diffuziyasi sekinroq va TiO₂ ichidagi elektronlar bilan rekombinatsiyalash muammosi mavjud, shu sababli bunday holatni kamaytirish uchun maxsus qo‘shimchalar va sirt ishlavlari (masalan, TiO₂ to‘siq

qatlamlari) qo'llaniladi. Yaqinda mis koordinatsion komplekslari ham redoks vositasi sifatida ilgari surilgan bo'lib, ular yuqori kuchlanish (~ 1 V) hosil qilishga va past qayta tashkil qilish energiyasiga ega.

Suyuq elektrolitlardan tashqari, yarim-qattiq yoki qattiq elektrolitlar ustida keng tadqiqotlar olib borilgan. Masalan, ion suyuqligi asosidagi elektrolitlar (bug' bosimiga ega bo'lmagan suyuq tuzlar) yuqori issiqlik barqarorligini ta'minlaydi va $>100^\circ\text{C}$ haroratda ishlay oladigan DSSClarga imkon bergan (ba'zan bu biroz samaradorlik pasayishiga olib keladi). Spiro-OMeTAD kabi g'ovak tashuvchi materiallar (hole-transport materiallar (HTM)) dan foydalanilgan qattiq holatdagi DSSClar esa, aslida, perovskit quyosh elementlari uchun poydevor bo'lib xizmat qilgan, lekin ularda o'ziga xos muammolar mavjud (masalan, gözeneklarni to'ldirish va barqarorlik masalalari) [32].

Qiziqarli muqobil elektrolitlardan biri bu ferrosen/ferroseniy juftligi bo'lib, bu juda barqaror va yuqori V_{OC} (~ 0.9 V) beradi, lekin diffuziyasi juda sekin, bu esa fototokni cheklaydi – bunday muammolarni hal qilish uchun yangi gel va polimer elektrolitlar ishlab chiqilmoqda. Umuman olganda, elektrolit yangiliklari maqsadi – iodid ta'minlaydigan tez bo'yoq regeneratsiya kinetikasini saqlagan holda, kuchlanishni va barqarorlikni oshirishdir.

Qattiq holatdagi va gibrid DSSClar:

Yuqorida ta'kidlanganidek, suyuq elektrolitni qattiq g'ovak tashuvchisi bilan almashtirish orqali DSSC gibrid yupqa plyonka qurilmasiga aylanadi. Bunga yaqqol misol – perovskit quyosh elementlari, unda organik-metall galoid perovskit modda nurni yutuvchi va ijobiy zaryad tashuvchi rolini bajaradi, shu bilan suyuq elektrolitga ehtiyoj qolmaydi.

2000-yillarning o'rtalarida Spiro-OMeTAD va organik bo'yoqlardan foydalanilgan qattiq holatdagi DSSClar sinovdan o'tkazilgan, lekin gözeneklarni to'liq to'ldira olmasligi sababli ularning samaradorligi nisbatan past ($\sim 5\text{--}8\%$) bo'lgan. 2012–2013 yillardagi perovskit yutug'i ushbu muammoni bartaraf etib, gözeneklarda haqiqiy yarim o'tkazgich qatlamini shakllantirish orqali yangicha yondashuvni namoyon etdi. Oradan bir yil o'tmay, perovskit asosidagi (suyuqliksiz) DSSClar 15% dan ortiq samaradorlikka erishdi va tezda DSSC chegaralaridan tashqariga chiqib, mustaqil fotoelektrik qurilmalar (25% dan ortiq) darajasiga yetdi.

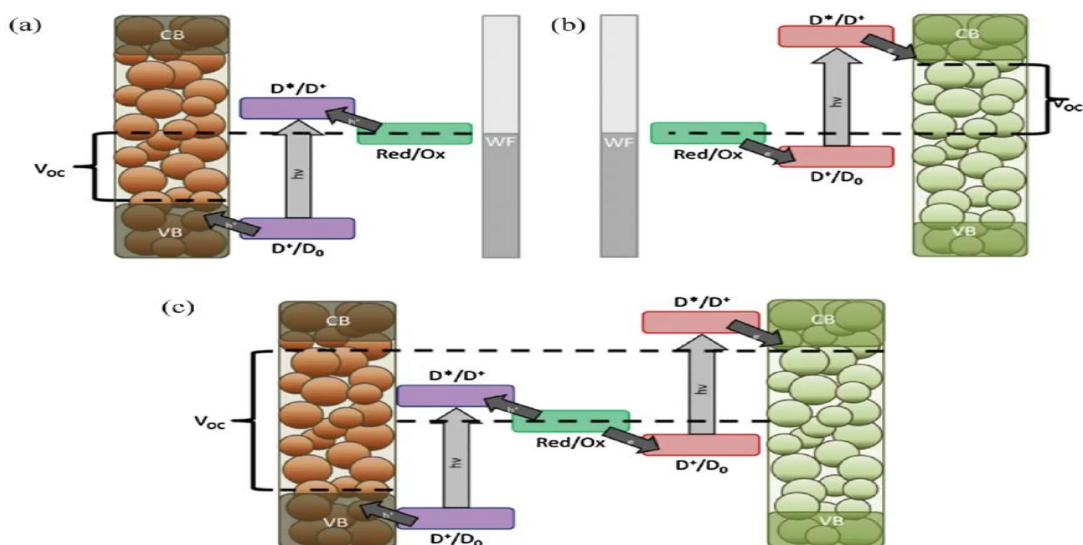
Yana bir qattiq holatdagi variant – bu p-turdagi DSSC bo'lib, bu p-turdagi yarimo'tkazgich (masalan, NiO) va uning valent zonasiga "g'ovaklar" yuboruvchi bo'yoqdan tashkil topgan fotoskatod tizimi hisoblanadi. P-turdagi DSSClar hozircha kam samarali (rekord $\approx 2.5\%$) [3], biroq ular tandem fotoelementlar qurishda foydali bo'lishi mumkin (quyida batafsilroq ko'rib chiqiladi).

Yaqinda olib borilgan tadqiqotlarda n-tur DSSC va p-tur DSSC ni birlashtirgan tandem konfiguratsiyalar o'rganilmoqda, bu orqali elektron va g'ovak yuboruvchi bo'yoqlardan birgalikda foydalanish maqsad qilingan. Hozirgacha bir necha p–n tandem DSSClar tayyorlangan, biroq umumiy samaradorlik past (1–3% atrofida) qolmoqda, chunki p-DSSC komponenti oqimni cheklaydi. Masalan, He va boshqalar (2014) tomonidan tayyorlangan NiO(p)/TiO₂(n) tandem elementi 1.91%

samaradorlikka erishgan – bu p- yoki n-tomonli DSSCdan yuqori, lekin oddiy n-DSSClar darajasidan ancha past. Biroq nazariy jihatdan to‘g‘ri optimallashtirilgan p–n tandem DSSC 15% yoki undan yuqori samaradorlikka erisha oladi, agar p-tomon oqimi yetarli darajada oshirilsa.

Tandem va ko‘p-bog‘lamali konfiguratsiyalar

Fotokatod (ya‘ni yorug‘likka sezgir katod) p-turdagi yarimo‘tkazgich va unga bog‘langan bo‘yoq molekulasi dan iborat bo‘lib, bu 7a-rasmda tasvirlangan. Fotoeksitatsiya (yorug‘lik bilan qo‘zg‘alish) sodir bo‘lganda, bo‘yoq molekulasi p-turdagi yarimo‘tkazgichning valent zonasiga teshik (musbat zaryad tashuvchisi) yuboradi. Boshqacha aytganda, ushbu teshik paydo bo‘lishi, yarimo‘tkazgichdan bo‘yoqqa elektron o‘tishini anglatadi. Bu zaryad almashinuvi tugagach, redoks-faol elektrolit bo‘yoq molekulasini oksidlab, uni neytrallaydi. Keyinchalik, hosil bo‘lgan teshik p-turdagi yarimo‘tkazgichning mesog‘ovak (mesoporous) tarmog‘i orqali tashqi elektr zanjirga uzatiladi. Bu jarayondan so‘ng, odatda katalitik qoplamali (odatda platina) qarshi elektrod elektrolitdagi qaytarilgan (reduksiya bo‘lgan) zarralarni yana oksidlab, zaryad muvozanatini ta‘minlaydi. Taqqoslash uchun, n-turdagi DSSCda (7b-rasmda ko‘rsatilganidek), fotoeksitatsiya natijasida bo‘yoq molekulasidan elektron yarimo‘tkazgichning o‘tkazuvchanlik (conduction) zonasiga yuboriladi va u mesog‘ovak tarmoq orqali tashqi zanjirga uzatiladi. Bu jarayondan keyin, elektrolit bo‘yoq molekulasini qaytaradi, ya‘ni unga elektron beradi, va yana katalitik qoplamali qarshi elektrod (odatda platina) ishchi elektroddan kelayotgan zaryadlar orqali elektrolitni tiklaydi (ya‘ni oksidlaydi). Bundan tashqari, tandem struktura holatida (7c-rasmda ko‘rsatilganidek), p- va n-turdagi DSSClar birga qavatma holatda joylashtiriladi. Ikkala tizim ketma-ket ulangan bo‘lib, agar zaryad hosil bo‘lishi muvozanatli bo‘lsa, bu konfiguratsiya natijasida yuqoriroq V_{OC} (ochiq zanjirdagi kuchlanish) hosil qilinadi [34].



7-rasm. (a) p-tipi (b) n-tipi va (c) tandem p-n tipidagi DSSC ning ishlash printsiplari [34]

n–n turdagi tandem DSSC

Bir bog‘lamli DSSC (ya’ni, yagona o‘tishli fotoelement) samaradorligi chegarasini (~14–15%) oshirish maqsadida, tadqiqotchilar komplementar (to‘ldiruvchi) spektral yutishga ega elementlarni ustma-ust joylash orqali samarani oshirishga harakat qilmoqdalar. Shunday yondashuvlardan biri bu — “n–n tandem DSSC” bo‘lib, unda ikki xil bo‘yoq bilan sezgirlashtirilgan ikkita TiO_2 fotoanod ketma-ket (yoki optik jihatdan parallel) ulanadi [3].

Ushbu qurilma turida ikkita alohida n-turdagi yarimo‘tkazgichli elektrodlar, ya’ni “n–n tandem strukturasiga ega DSSC”, ketma-ket holatda joylashtiriladi va natijada qurilmaning qisqa tutashuvdagi fototok zichligi (J_{SC}) oshadi. Yuqoridagi (ya’ni, tepa qatlam qismi) element ko‘k/yashil (yuqori energiyali) nurlarni so‘radigan bo‘yoqdan foydalanadi va qizil nurlar uchun yarim shaffofdir; quyi (pastki) element esa aynan shu qizil spektrni o‘z bo‘yog‘i orqali yutadi.

Ilk tandem tuzilma Wataru va hamkorlari tomonidan ishlab chiqilgan bo‘lib, unda yuqoridagi element N719 bo‘yoqi bilan, pastki element esa “Black dye” (qora bo‘yoq) bilan sezgirlashtirilgan. Ushbu DSSC tandem elementi birinchi tajribada 7.6% PCE (quvvat aylantirish samaradorligi)ga erishgan bo‘lib, bu natija har bir alohida elementnikidan yuqoriroq bo‘lgan [34].

Tandem struktura loyihasi, ayniqsa infraqizil diapazonni qamrab oluvchi bo‘yoqlar bilan boyitilgan kombinatsiyalar asosida samaradorlikni sezilarli oshirishga imkon berdi. Nelles va hamkorlari, N719 sezgirlashtirilgan element va “Black dye” bilan sezgirlashtirilgan element kombinatsiyasi orqali 10.5% PCEga erishganlarini qayd etganlar [3]. Ularning tadqiqotida ketma-ket ulangan DSSClar, alohida elementlarning V_{OC} qiymatlari yig‘indisiga teng yuqoriroq kuchlanish hosil qilishi, hamda oqim (I) kichikroq element bilan moslashishini ko‘rsatgan [35].

Hironori Arakawa va hamkorlari tomonidan taqdim etilgan boshqa bir ketma-ket tandem DSSC konfiguratsiyasida, TiO_2 qatlamining optimallashtirish orqali 1450 mV (1.45 V) kuchlanish, $10.8 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ fototok zichligi va 10.4% samaradorlikka erishilgan [36]. Bu natijalar, o‘sha davrdagi 7–8% atrofidagi yagona DSSC elementlar bilan solishtirganda, sezilarli yutuq hisoblanadi.

2010-yilda o‘tkazilgan boshqa bir tadqiqotda, TiO_2 qatlamining qalinligini optimallashtirish orqali, tandem DSSC samaradorligi ketma ket va parallel ulanish holatlari bo‘yicha tahlil qilingan. Parallel ulangan tandem DSSC eng yuqori PCE — 10.6% ko‘rsatgan [37].

Ma va hamkorlari esa DSSCni ko‘p qatlamli fotoanod bilan integratsiyalab, fototok zichligini oshirishga muvaffaq bo‘lgan va 11.05% maksimal samaradorlikka erishganlar [38].

Umuman olganda, ushbu dizaynlar yordamida DSSClar samaradorligi sezilarli darajada oshirilgan, ammo so‘nggi yillarda bu tizimlar bo‘yicha yangilangan natijalar kam xabar qilinmoqda. Shunga qaramay, kelajakda samaradorlikni oshirishga qaratilgan izlanishlar ushbu yo‘nalishga bo‘lgan qiziqishni yana kuchaytirishi mumkin.

p–n turdagi tandem DSSC

Ushbu turdagi qurilmalarda, bo‘yoq orqali sezgirashtirilgan p-turdagi va n-turdagi elektrodlar ketma-ket ulangan holda birlashtiriladi. Bunday tuzilma “p–n tandem strukturasiga ega DSSC” deb yuritiladi va u yuqoriroq fotovoltaik kuchlanish hosil qilishga qodir. Ushbu turdagi quyosh elementlarining umumiy samaradorligi, ayniqsa p-turdagi DSSCning nisbatan past ishlash ko‘rsatkichi sababli, hozircha cheklangan darajada bo‘lgan. Asosiy sabab shuki, bunday tuzilma quyosh nurlarining to‘liq spektrini samarali yuta olmaydi [39].

Shunga qaramay, innovatsion yondashuvlar ham mavjud. 2014-yilda Sobus va hamkorlari tomonidan quyosh spektridan chiqayotgan energiyani maksimal darajada yutish uchun yangi model taklif etilgan. Ular n-turdagi yarimo‘tkazgich sifatida TiO_2 , p-turdagi bo‘yoq sezgirashtirilgan yarimo‘tkazgich sifatida NiO , va ular orasiga redoks vosita (elektrolit) joylashtirganlar. Ushbu p–n DSSC modeli oddiy n-DSSC bilan solishtirganda yaxshilangan konversiya samaradorligini namoyon qilgan [40].

Tandem quyosh elementlarining yana bir ustunligi, bu — individual n-DSSC va p-DSSC bilan solishtirganda, umumiy kuchlanish (V_{OC}) ning oshishidir. Bu esa umumiy samaradorlikning oshishiga olib keladi. So‘nggi yillarda p-turdagi DSSClar bo‘yicha tadqiqotlar yangi bo‘yoq sezgirashtiruvchi moddalar va redoks tizimlarini ishlab chiqishga qaratilgan bo‘lib, ayniqsa fotokuchlanishning oshishi hisobiga p-DSSC samaradorligi sezilarli darajada yaxshilangan [41].

Wei va hamkorlari, 2016-yilda NiO aktiv qavatiga metall atomlarini doping qilish orqali p-DSSC samaradorligini oshirganlar [42]. Ho va boshqalar, 2016 va 2018-yillardagi ishlarda aktiv NiO fotoanod tarmog‘iga ixcham NiO bloklovchi qatlam kiritish orqali, p-DSSC hamda p–n DSSC samaradorligini oshirishga muvaffaq bo‘lganlar. Ular ishlab chiqargan p–n DSSC, oddiy n-DSSC bilan solishtirganda yuqoriroq fotokuchlanishni ko‘rsatgan bo‘lib, umumiy samaradorlik 1.486% ni tashkil etgan. Bundan tashqari, optimizatsiyalangan NiO qatlamini qo‘shish orqali bu ko‘rsatkich 1.913% gacha oshirilgan [43,44].

Umuman olganda, ushbu dizaynlar orqali DSSC samaradorligi sezilarli darajada oshirilgan bo‘lsa-da, so‘nggi yillarda bu boradagi nashrlar cheklangan. Biroq, kelajakda laboratoriya yutuqlari ushbu sohada yangi rivojlanishlarga turtki berishi mumkin.

DSSC uchun tandem yondashuvi nazariy jihatdan juda jozibali, chunki Shockley–Queisser limiti tandem tuzilmalarda (ya’ni, ikki turdagi energiya bo‘shlig‘i bilan) ancha yuqori bo‘ladi. Grätzelning bergan ma’lumotiga ko‘ra: yagona taqiqlangan zonaga ega element samaradorlik ~32%, tandemda esa ~46% gacha yetadi [33].

Biroq, tandem DSSCni amalda yaratish murakkab hisoblanadi: ikki element ichki elektr ulanishga ega bo‘lishi kerak (bu mexanik tarzda ustma-ust joylashtirish yoki monolitik integratsiya bo‘lishi mumkin), hamda ketma-ket ulanish uchun fototoklar muvofiqlashtirilgan bo‘lishi kerak [3].

Birinchi elementga yetarlicha yorug'lik yetib borishini ta'minlash uchun u qisman shaffof bo'lishi kerak, shu bilan birga ikkala bo'yoq va elektrolitlarning o'zaro mosligi ham talab qilinadi — bu esa muammolarni oshiradi.

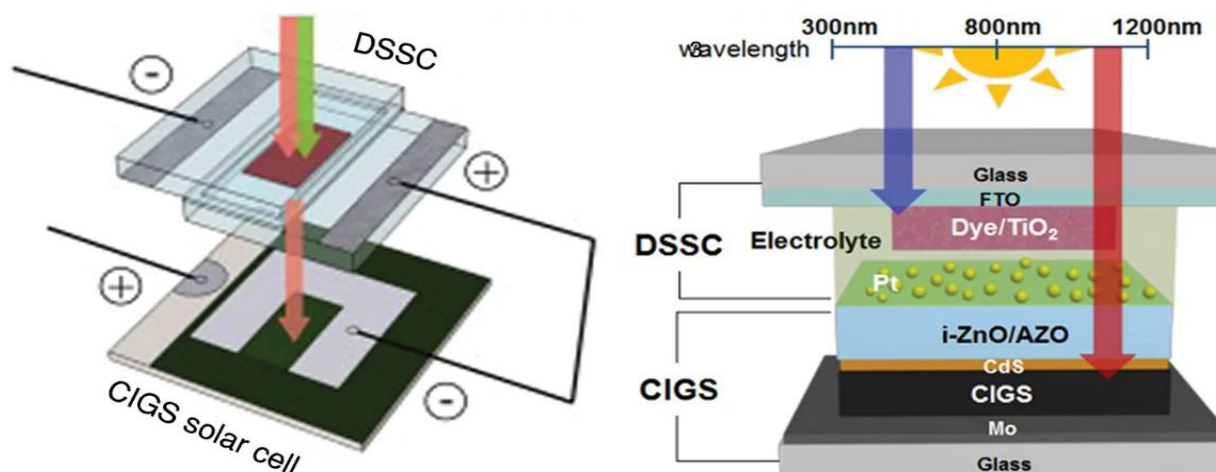
Yaqinda monolitik tandem DSSClar ustidan olib borilayotgan ishlanmalar haqida xabar qilindi. Masalan, bir tomonda TiO_2 fotoanod, ikkinchi tomonda NiO fotokatod joylashtirilgan yagona element shaklida. Agar bu tizim mukammallashtirilsa, p–n DSSC samaradorligi 15–20% yoki undan ham yuqori bo'lishi mumkin, chunki nazariy $V_{\text{OC}} \sim 1.4 \text{ V}$ ga yetishi va kengroq spektr yutilishi hisobiga fototok ham oshishi mumkin [3].

Gibrid tandemlar: CIGS–DSSC tandem quyosh elementlari

Yangi istiqbolli yo'nalishlardan biri — DSSCni boshqa turdagi quyosh elementlari bilan gibrid ko'p-o'tishli (multi-junction) tizimda birlashtirishdir. DSSClar ko'rinuvchi yorug'likni samarali yutish xususiyatiga ega va infraqizil diapazonga nisbatan yarim shaffof qilib tayyorlanishi mumkinligi sababli, ular c (masalan, CIGS yoki kremniy) bilan tandemda yuqori element sifatida ishlatiladi.

Mis–indiy–galliy–selenid (CIGS) asosidagi DSSC–CIGS tandem arxitekturasi, har bir alohida element spektrining turli qismlaridan maksimal darajada foydalanish orqali fotoelektrik konversiya samaradorligini oshirishga xizmat qiladi [45]. Ushbu tandem quyosh elementlari optimallashtirilgan DSSC va CIGS elementlari asosida yig'iladi: DSSC yuqori element, CIGS esa pastki element vazifasini bajaradi. Ketma-ket ulangan bu tuzilmada, DSSCning musbat elektrodi bilan CIGSning manfiy elektrodi elektr kabeli orqali ulanadi — bu holat ikkita terminalga ega tandem struktura hosil qiladi (8-rasmga qarang). Bunday yondashuv natijasida ochiq zanjir kuchlanishi (V_{OC}) oshadi va DSSCning umumiy samaradorligi yaxshilanadi [46].

Shu sababli, taqiqlangan zona energiya qiymati kichik bo'lgan materialning p–n o'tishli quyosh elementlari bilan DSSCni ketma-ket ulash orqali qurilgan tandem strukturasida chiqish kuchlanishini oshirish usuli sifatida ko'rilmogda. DSSC qurilmalari yarim shaffof bo'lgani uchun, ularni tandem strukturalarda yuqori qatlamga joylashtirish oson [48].



8-rasm. CIGS-DSSC tandem quyosh elementining konstruktiv yig'ilishi [47]

2006-yilda Liska va hamkorlari DSSC (yuqori qatlamda) va Cu(In,Ga)Se_2 asosidagi yupqa plyonkali elementni (pastki qatlamda) mexanik tarzda ustma-ust joylashtirilgan tandem strukturada birlashtirishga muvaffaq bo'lishdi va taxminan 15% samaradorlikka erishishdi (shundan $\sim 7\%$ DSSCdan va $\sim 8\%$ CIGSdan hosil bo'lgan) [3]. Ushbu gibrid yondashuv DSSCning yuqori kuchlanishli chiqishi (~ 0.8 V) bilan CIGS/kremniy elementlarining ($\sim 0.5\text{--}0.6$ V) kuchlanishini jamlab, umumiy ~ 1.4 V hosil qilgan. Har bir pastki element quyosh spektrining turli qismini yutgan.

Ayni paytlarda monolitik integratsiyaga o'tishga urinishlar bo'lmoqda: masalan, DSSCni bevosita CIGS sirtiga joylashtirish (ya'ni, CIGS ustiga TiO_2 /bo'yoq qatlamini qoplash). Yum va hamkorlari (2017) tomonidan yaratilgan monolitik DSSC–CIGS tandemi 12.35% samaradorlikka va 1.435 V kuchlanishga erishdi [49]. Ushbu qurilmada fototok DSSCning yarim shaffof yuqori elementi ($\sim 14 \text{ mA/cm}^2$) bilan cheklangan bo'lsa-da, har bir qismdan hosil bo'lgan kuchlanish jamlanib umumiy natijani oshirdi.

Bunday gibrid tandemlar yuqori kuchlanish talab qilinadigan qo'llanmalarda (masalan, elektroliz jarayonlarini quvvatlantirish yoki to'g'ridan-to'g'ri batareya zaryadlash) foydali bo'lishi mumkin.

Xuddi shunday, DSSC–kremniy tandemlari ham o'rganilgan, lekin kremniy bandgapi DSSC bilan optimal mos kelmaydi, bu CIGSga nisbatan cheklov hisoblanadi. Shunga qaramay, bu natijalar DSSC texnologiyasining boshqa turlar bilan moslashuvchan tarzda birlashtirilishi mumkinligini ko'rsatadi.

PSC–DSSC Tandem Quyosh Elementlari

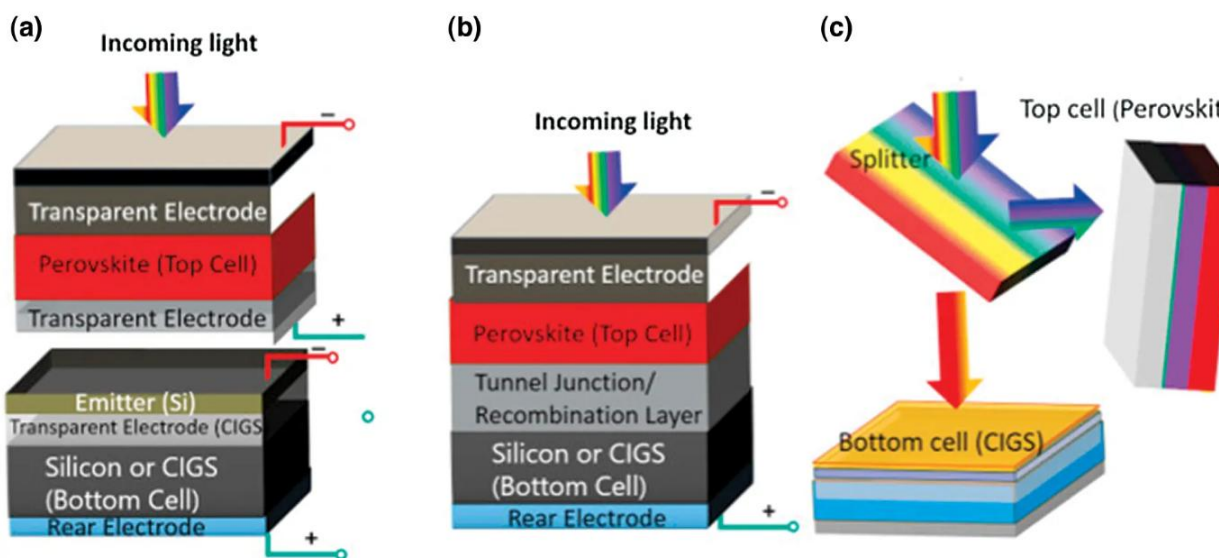
So'nggi yillarda perovskit quyosh elementlari (PSC) o'zining ajoyib samaradorligi va iqtisodiy jihatdan maqbul narxi bilan fotovoltaika sohasining diqqat markazida bo'lib kelmoqda [50]. Noorganik-organik galogen perovskitlar an'anaviy bo'yoqlarga nisbatan yuqoriroq yorug'lik yutish koeffitsientiga ega bo'lib, bu ularni DSSCda yordamchi yutiluvchi (sensitizer) sifatida qo'llash

imkonini beradi. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskit nanokristallari ilk bor 2009-yilda DSSCda sensitizer sifatida qoʻllangan [51].

Keyinchalik perovskitlar elektron va teshik tashuvchisi sifatida ham harakat qila olishi, shuningdek qattiq fazadagi perovskit plyonkalari zaryad hosil boʻlishi va tashilishini taʼminlashi aniqlangan. Biroq, suyuq elektrolit muhitida perovskitlarning tez erib ketishi ularning samaradorligini pasaytiradi [52,53,54].

Tandem geteroyuzali tuzilmalar — ayniqsa uzun toʻlqinli NIR (yaqin infraqizil) sohalarda spektral javobni yaxshilash uchun istiqbolli yondashuv hisoblanadi. Perovskit tandem quyosh elementlari elektr jihatdan ulanishiga qarab uch xil shaklda tuzilishi mumkin:

- 4-terminal (4T) tandem: mexanik tarzda ustma-ust joylashtirilgan ikkita mustaqil element (rasm 9a),
- 2-terminal (2T) tandem: monolitik (yagona qatlamli) tarzda integratsiyalashgan tuzilma (rasm 9b),
- Optik ajratuvchi tandem: yorugʻlik spektrini boʻlib, har xil toʻlqin uzunliklarini mos elementlarga yoʻnaltiradi (rasm 9c).



9-rasm. (a) 4 T (b) 2 T va (c) optik bo'linuvchi PSC tandem elementlarining struktura yig'ilishi [55]

Perovskit asosidagi 4T tandemlarda xalkogenid va kristall kremniy (c-Si) asosidagi pastki elementlar bilan 20.5% va 22.8% samaradorlikka erishilgan [56]. Mexanik tarzda yigʻilgan perovskit–kremniy tandemlar esa 26.4% samaradorlikka chiqqan [57]. Monolitik 2T tandemlar barqaror ishlash bilan 23.6% PCEga erishgan [58]. Optik spektr ajratilgan tandemlar esa yakka elementlarga nisbatan 40% gacha nisbiy samaradorlik yutugʻini koʻrsatgan [59].

Boshqa bir tadqiqotda perovskitlar termoelektrik modullar bilan integratsiyalashib, 23% dan yuqori samaradorlik (shundan 18.3% PSCdan) koʻrsatgan [60]. Ruteniyl asosidagi DSSC/perovskit tandemlari spektral ajratish orqali 21.5% samaradorlikka erishgan [61]; DX1/N719 sensitizatorlari bilan

yig'ilgan DSSC tandemlari past yorug'likda 12% samaradorlikka erishgan. Pankromatik DX3 DSSC yakka holda 18.4%, tandemda esa 21.5% samaradorlik bergan [61]. Yaqinda thioindigo ($C_{16}H_8O_2S_2$) yoki N719 bo'yoqlari yordamida tayyorlangan DSSC pastki elementli perovskit tandemlari mos ravishda 8.77% va 10.54% PCEga ega bo'lgan; teskari konfiguratsiyada (yuqorida DSSC, pastda PSC) DSSCning yuqori V_{OC} ko'rsatkichi kuzatilgan, biroq pastki DSSC J_{SC} ni cheklab qo'ygan [62].

Perovskit tandemlarida so'nggi yutuqlar – ayniqsa optimal bandgaplar va materiallar asosida – samaradorlikni sezilarli darajada oshirdi. Kelajakdagi tadqiqotlar bu borada yana-da katta natijalarga olib kelishi kutilmoqda.

Umuman olganda, ushbu bo'limda DSSCning turli turlari ularning fizik ko'rinishi va arxitektura yig'ilishi asosida taqqoslandi. Xulosa sifatida aytish mumkinki:

- Elektrolitning to'g'ri tanlanishi DSSC samaradorligiga sezilarli ta'sir qiladi. Ilmiy adabiyotlar tahlilidan ko'rinishicha, kvazi-qattiq va polimer jel elektrolitlar yuqori ion o'tkazuvchanligi va elektrod bilan yaxshi kontakt tufayli fotoelektrik samaradorlikni oshiradi.
- Tandem tuzilmalar esa yuqori samaradorlikka erishishi mumkin, chunki har bir alohida element optimallashtirilgan holda ishlaydi.

Moslashuvchan va ichki sharoitlar uchun qo'llanilishi

Dye-sensitized quyosh elementlari (DSSC) shisha o'rniga plastik yoki metall folga asoslarida tayyorlanishi mumkinligi sababli, moslashuvchan quyosh batareyalari uchun juda qulay hisoblanadi. Hozirda bir qancha kompaniyalar ichki maydonlarda yoki ko'chma quvvatlagichlar, simsiz datchiklar uchun moslashuvchan DSSC elementlarini ishlab chiqarmoqda.

Ichki yoritish sharoitida (ya'ni yorug'lik intensivligi past va spektrning ko'proq ko'rinadigan diapazoniga to'g'ri keladi), DSSC ko'plab boshqa quyosh elementlariga qaraganda yuqoriroq samaradorlik ko'rsatadi. Masalan, 1000 luxli lyuminescent yoritish ostida DSSC 30% dan ortiq quvvat aylantirish samaradorligi (PCE) ga erishgan, holbuki, kremniy yoki perovskit elementlari past yorug'likda sezilarli darajada samaradorlikni yo'qotadi.

Bu DSSCni kichik hajmdagi IoT qurilmalar, kalkulyatorlar va shu kabilar uchun ideal energiya manbaiga aylantiradi – ular estetik jihatdan chiroyli, yarim shaffof panellar shaklida loyihalalanishi mumkin. Haqiqatan ham, DSSC ba'zan "sun'iy fotosintez" deb ham yuritiladi va turli ranglar va naqshlarda tayyorlanishi mumkin. Ular yordamida ichki dekorativ ob'ektlar va o'yinchoqlarni energiya bilan ta'minlash ko'rsatmalari mavjud.

DSSCning tarqalgan va xira yorug'lik sharoitida ishlash qobiliyati – uning asosiy afzalliklaridan biridir. Bu xususiyat ularning sezilarli darajadagi fototok hosil qilish uchun past yorug'lik chegarasiga ega emasligi bilan bog'liq (ba'zi kremniy elementlar past yorug'likda rekombinatsiya ustun bo'lib ketganda deyarli "o'chib" qoladi).

Haroratdagi ishlash xususiyatlari

DSSClar, odatda, yuqori haroratda kremniy asosli elementlarga qaraganda yaxshi ishlash qobiliyatiga ega. Kremniy panellar harorat ko'tarilishi bilan katta kuchlanish yo'qotishiga uchraydi (odatda samaradorlik haroratga nisbatan $-0.45\%/^{\circ}\text{C}$ kamayadi).

Buning aksi o'laroq, DSSClar samaradorlik uchun kichikroq harorat koeffitsientiga ega bo'lib, bu ularning kimyoviy potensiallar asosida ishlash mexanizmiga borib taqaladi. Masalan, yuqori haroratda bo'yoq regeneratsiyasining tezlashuvi tufayli DSSCda fototok oshishi mumkin. V_{OC} biroz pasaysa ham, umumiy samaradorlik harorat ortishi bilan keskin kamaymaydi.

Bu holat issiqligi yuqori iqlimlarda, yoki ichki makondagi issiqlikka duch keladigan quyosh quvvatli datchiklar kabi qurulumalarda DSSCga muhim ustunlik beradi.

Muammolar va istiqbollar

Dye-sensibilizatsiyalangan quyosh elementlari (DSSC) arzon materiallar, oddiy ishlab chiqarish jarayoni, moslashuvchanlik, ichki makonlarda yuqori samaradorlik va rangli shaffoflik kabi ko'plab afzalliklarga ega bo'lishiga qaramay, ularning keng ommalashishiga to'sqinlik qilayotgan muayyan muammolar mavjud. Asosiy muammolar quyidagilardan iborat:

- **Foton-to-elektron aylantirish samaradorligi:** hozirgi kunda DSSC'lar hali ham kremniy asosidagi an'anaviy quyosh elementlaridan (samaradorligi 20% dan ortiq) yoki perovskit elementlaridan ($\sim 25\%$) past samaradorlikka ega.
- **Uzoq muddatli barqarorlik:** Eng yuqori samaradorlik ($\sim 13\text{--}14\%$) faqat uchuvchan elektrolitlar va maxsus laboratoriya sharoitlarida yaratilgan aks ettiruvchi qatlamiga ega elementlarda erishilgan.

Amaliy foydalanishda, ya'ni DSSC'larni kattaroq modullarga aylantirishda, samaradorlik bir xonali raqamgacha pasayib ketadi.

Barqarorlik jihatidan, zamonaviy DSSC'lar to'g'ri kapsulatsiya qilingan taqdirda nisbatan yaxshi barqarorlikka ega bo'lishi mumkin. Ayrim hisobotlarda DSSC'lar o'rtacha yorug'lik va haroratda minglab soat davomida faqat ozgina degradatsiya ko'rsatgan. Biroq, 20 yillik tashqi sharoitdagi (UV nurlanish, issiqlik, muzlash va erish sikllari) barqarorlikni ta'minlash hamon katta muammo bo'lib qolmoqda.

Elektrolit masalasi ham muhim: suyuq elektrolit vaqt o'tishi bilan sizib chiqishi yoki bug'lanib ketishi mumkin, shuningdek, iodid/triiodid redoks jufti metall kontaktlarni korroziyaga uchratishi mumkin (garchi epoksi qoplamalar va himoya qatlamlar bu muammoni yumshatishga yordam bersa ham). Shu sababli, suyuq elektrolitni qattiq yoki gel shaklidagi elektrolitga almashtirish hozirda faol tadqiqot yo'nalishidir.

Bu borada muhim yutuqlarga erishilmoqda: ionik suyuqlik asosidagi DSSC'lar, polimer gel elektrolitlari va boshqalar yuqori haroratda barqarorlikni yaxshilagan.

Yana bir muammo – DSSC'larda nodir va qimmat elementlar, xususan ruteniy va platina ishlatilishi. Shuning uchun, hozirda butunlay metallsiz bo'yoqlar va arzon

uglerod asosidagi katalizatorlar ustida ishlanmoqda – bu narxni kamaytirish va resurs yetishmovchiligi muammosini bartaraf etishga xizmat qiladi.

Kelajak yo‘nalishlari

Kelgusida DSSC tadqiqotlari quyidagi yo‘nalishlarda davom etmoqda:

- **Yangi redoks mediatorlar:** V_{OC} ni oshirish va rekombinatsiyani kamaytirish.
- **Upconversion va ham-sensibilizatsiya texnikalari:** bo‘yoq sezmaydigan past energiyali fotonlardan ham foydalanish.
- **Tandem konfiguratsiyalari:** bitta bog‘lamali samaradorlik chegarasini yengish.

Ishlab chiqarish nuqtai nazaridan, DSSC'larni keng ko‘lamli bosma texnologiyalar orqali masshtablash va binoga integratsiya qilinadigan PV tizimlariga tatbiq etish ustida ishlar olib borilmoqda.

EPFL SwissTech Conference Center (Shveytsariya) bu borada muhim tijorat loyihasi bo‘ldi – uning fasadida 300 m² DSSC panellari ishlatilgan bo‘lib, bu texnologiyaning arxitektura bilan integratsiya imkoniyatlarini namoyon etdi.

Xulosa

Dye-sensibilizatsiyalangan quyosh elementlari 1991 yilda 7% samaradorlikdan boshlab, 2020 yilda ~14% ga yetdi – bu bo‘yoq kimyosi va element muhandisligidagi katta yutuqlarni ko‘rsatadi.

DSSC'lar “uchinchi avlod” quyosh texnologiyalari orasida ilmiy ta'siri bo'yicha eng muvaffaqiyatli tizimlardan biri hisoblanadi. Yaqin orada ular kremniy batareyalarni global energiya ishlab chiqarishda to'liq almashtira olmasa-da, ichki PV, shaffof deraza paneli, kiyiladigan energiya tizimlari va shunga o'xshash sohalarda o'ziga xos o'rin egallamoqda. Bu erda ularning moslashuvchanligi, rangliligi va kam yorug'likda ishlashi asosiy ustunliklar sanaladi.

DSSC'lar samaradorligi va barqarorligini oshirish borasidagi izchil innovatsiyalar, shuningdek, perovskit quyosh elementlari kabi yangi sohalar bilan sinergetik rivojlanishlar kelajakda ularning yanada ommalashishiga zamin yaratadi.

Nazariy jihatdan DSSC'lar tandem dizaynlar orqali 30% dan ortiq samaradorlikka ega bo'lishi mumkin va bosma ishlab chiqarish imkoniyati ularni an'anaviy quyosh panellari qo'llanilishi qiyin bo'lgan hududlarda muqobil PV texnologiyasi sifatida ilgari suradi.

Foydalanilgan Adabiyotlar:

Dye-sensitized Solar Cell – Wikipedia (2025): General background on DSSC technology, history and operating principles.

O'Regan, B. & Grätzel, M. (1991): *A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films.* **Nature**, 353, 737–740. The original paper demonstrating the first modern DSSC with ~7% efficiency[1].

Nazeeruddin, M. K. et al. (1993): *Conversion of light to electricity by cis-X₂Bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) charge-transfer sensitizers (X = Cl⁻, Br⁻, I⁻, CN⁻, and SCN⁻) on nanocrystalline TiO₂ electrodes.* **Journal of the American Chemical Society**, 115(14), 6382–6390. – Achieved >10% efficiency with the “N3” dye[2], improving upon Grätzel’s 1991 cell.

Mathew, S. et al. (2014): *Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers.* **Nature Chemistry**, 6, 242–247. – Reported a record 13% DSSC using a co-sensitized porphyrin dye and cobalt electrolyte[4].

Papageorgiou, N. (2013): *“Dye-sensitized solar cells rival conventional cell efficiency,”* EPFL News. – News release on the 15% efficient solid-state (perovskite-sensitized) DSSC developed by Grätzel’s group, marking a turning point in DSSC evolution.

Pandey, A. K. et al. (2021): *Advancements in the Development of Various Types of Dye-Sensitized Solar Cells: A Comparative Review.* **Energy & Environment**, 118(4), 597–628. – Comprehensive review of DSSC progress, including efficiency trends (7%→14%), tandem designs, and alternative materials[4][32].

Ito, S. et al. (2012): *Investigation of Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells – Ruthenium Complexes, Metal-Free Dyes, Porphyrins, and Natural Dyes.* In: **“Solar Cells – Dye-Sensitized Devices”**, Ed. L. Vayssieres, InTech. – Provides an overview of dye developments and lists performance of various dyes (N719, “Black Dye”, etc.)[1][3].

Gamry Instruments (2015): *Application Note: Dye-Sensitized Solar Cells – Physical Chemistry Analysis*[7][44]. – Describes the construction and theory of DSSCs, with diagrams of energy levels and I–V curves, and explains key parameters like I_{sc}, V_{oc}, FF, and η.

GCell (G24 Power Ltd.): *“Efficiency of DSSC” Web Page* (2020)[35][36]. – Discusses DSSC efficiency improvements, measurement under standard and indoor conditions, and quotes theoretical limits (32% single junction, 46% tandem as per Grätzel).

EPFL Media (2012): *“Transparent, colored solar panels to debut as power-generating windows,”* EPFL Press Release[20]. – Describes the installation of 300 m² of dye-sensitized solar cell panels as colorful glass facade elements on the SwissTech Convention Center (demonstrating DSSC use in building-integrated photovoltaics).

[1] Investigation of Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells: Ruthenium-Complex Dyes, Metal-Free Dyes, Metal-Complex Porphyrin Dyes and Natural Dyes
https://www.researchgate.net/profile/Seigo-Ito/publication/221919557_Investigation_of_Dyes_for_Dye-Sensitized_Solar_Cells_Ruthenium-Complex_Dyes_Metal-Free_Dyes_Metal-Complex_Porphyrin_Dyes_and_Natural_Dyes/links/5641c68208aeacfd8937b374/Investigation-of-Dyes-for-Dye-Sensitized-Solar-Cells-Ruthenium-Complex-Dyes-Metal-Free-Dyes-Metal-Complex-Porphyrin-Dyes-and-Natural-Dyes.pdf

[2] Review dye-sensitized solar cells - ScienceDirect.com
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389556703000261>

[3] Advancements in the Development of Various Types of Dye-Sensitized Solar Cells: A Comparative Review
<https://www.techscience.com/energy/v118n4/42649/html>

[4] Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the ...
<https://www.nature.com/articles/nchem.1861>

[5] Dye Sensitized Solar Cells-Dye Solar Cells-DSSC-DSC Gamry Instruments
<https://www.gamry.com/application-notes/physechem/dssc-dye-sensitized-solar-cells/>

[6] File:Dye Sensitized Solar Cell Scheme.png - Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dye_Sensitized_Solar_Cell_Scheme.png

6. Cavallo, C., Di Pascasio, F., Latini, A., Bonomo, M., Dini, D. (2017). Nanostructured semiconductor materials for dye-sensitized solar cells. *Journal of Nanomaterials*, 2017, 1–31. DOI 10.1155/2017/5323164. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
7. Barnes, P. R., Miettunen, K., Li, X., Anderson, A. Y., Bessho, T. et al. (2013). Interpretation of optoelectronic transient and charge extraction measurements in dye-sensitized solar cells. *Advanced Materials*, 25(13), 1881–1922. DOI 10.1002/adma.201201372. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Listorti, A., O'Regan, B., Durrant, J. R. (2011). Electron transfer dynamics in dye-sensitized solar cells. *Chemistry of Materials*, 23(15), 3381–3399. DOI 10.1007/s11120-013-9849-7. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. Costa, R. D., Guldi, D. M. (2014). Carbon nanomaterials as integrative components in dye-sensitized solar cells. *Solar Cells*, 11, 12. DOI 10.1104/pp.116.2.571. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Feihl, S., Costa, R. D., Pflock, S., Schmidt, C., Schönamsgrubner, J. et al. (2012). Nickel oxide nanostructured electrodes towards perylenediimide-based dye-sensitized solar cells. *RSC Advances*, 2(30), 11495–11503. DOI 10.2135/cropsci2002.1919. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
11. Gibson, E. A., Le Pleux, L., Fortage, J., Pellegrin, Y., Blart, E. et al. (2012). Role of the triiodide/iodide redox couple in dye regeneration in p-type dye-

- sensitized solar cells. *Langmuir*, 28(15), 6485–6493. DOI 10.1007/BF00384257. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
12. Le Pleux, L., Smeigh, A. L., Gibson, E., Pellegrin, Y., Blart, E. et al. (2011). Synthesis, photophysical and photovoltaic investigations of acceptor-functionalized perylene monoimide dyes for nickel oxide p-type dye-sensitized solar cells. *Energy and Environmental Science*, 4(6), 2075–2084. DOI 10.1039/C1EE01148K. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 13. Qin, P., Wiberg, J., Gibson, E. A., Linder, M., Li, L. et al. (2010). Synthesis and mechanistic studies of organic chromophores with different energy levels for p-type dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(10), 4738–4748. DOI 10.3923/ijb.2008.309.314. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 14. Gibson, E. A., Smeigh, A. L., Le Pleux, L., Fortage, J., Boschloo, G. et al. (2009). A p-type NiO-based dye-sensitized solar cell with an open-circuit voltage of 0.35 V. *Angewandte Chemie*, 48(24), 4402–4405. DOI 10.1002/anie.200900423. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 15. Chiang, C. C., Hung, C. Y., Chou, S. W., Shyue, J. J., Cheng, K. Y. et al. (2018). Ptcofe nanowire cathodes boost short-Circuit currents of Ru (II)-Based Dye-Sensitized solar cells to a power conversion efficiency of 12.29%. *Advanced Functional Materials*, 28(3), 1703282. DOI 10.1002/adfm.20170328. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 16. Mathew, S., Yella, A., Gao, P., Humphry-Baker, R., Curchod, B. F. et al. (2014). Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers. *Nature Chemistry*, 6(3), 242–247. DOI 10.1093/aob/mcm047. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 17. Perera, I. R., Daeneke, T., Makuta, S., Yu, Z., Tachibana, Y. et al. (2015). Application of the tris (acetylacetonato) iron (III)/(II) redox couple in p-Type Dye-Sensitized solar cells. *Angewandte Chemie*, 54(12), 3758–3762. DOI 10.1002/anie.201409877. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 18. Hansen, P. E., Nguyen, P. T., Krake, J., Spanget-Larsen, J., Lund, T. (2012). Dye-sensitized solar cells and complexes between pyridines and iodines. a NMR, IR and DFT study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 98, 247–251. DOI 10.1046/j.0031-9317.2001.1140108.x. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 19. Nusbaumer, H., Moser, J. E., Zakeeruddin, S. M., Nazeeruddin, M. K., Grätzel, M. (2001). CoII(dbbip)₂²⁺ complex rivals Tri-iodide/Iodide redox mediator in Dye-sensitized photovoltaic cells. *The Journal of Physical Chemistry B*, 105(43), 10461–10464. DOI 10.3390/plants9010088. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 20. Yanagida, S., Yu, Y., Manseki, K. (2009). Iodine/Iodide-free Dye-sensitized solar cells. *Accounts of Chemical Research*, 42(11), 1827–1838. DOI 10.1093/jxb/50.333.543. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 21. Tian, H., Sun, L. (2011). Iodine-free redox couples for dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry*, 21(29), 10592–10601. DOI 10.1039/C1JM10598A. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

22. Iftikhar, H., Sonai, G. G., Hashmi, S. G., Nogueira, A. F., Lund, P. D. (2019). Progress on electrolytes development in Dye-sensitized solar cells. *Materials*, 12(12), 1998. DOI 10.1104/pp.73.3.555. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
23. Shih, C. M., Wu, Y. L., Wang, Y. C., Kumar, S. R., Tung, Y. L. et al. (2018). Ionic transport and interfacial interaction of iodide/iodine redox mechanism in agarose electrolyte containing colloidal titanium dioxide nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 356, 565–572. DOI 10.1016/j.jphotochem.2018.01.034. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
24. Kim, D. W., Jeong, Y. B., Kim, S. H., Lee, D. Y., Song, J. S. (2005). Photovoltaic performance of dye-sensitized solar cell assembled with gel polymer electrolyte. *Journal of Power Sources*, 149, 112–116. DOI 10.1016/j.jpowsour.2005.01.058. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
25. Dong, R. X., Shen, S. Y., Chen, H. W., Wang, C. C., Shih, P. T. et al. (2013). A novel polymer gel electrolyte for highly efficient dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(29), 8471–8478. DOI 10.1039/C3TA11331K. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
26. Liu, L., Wu, Y., Chi, F., Yi, Z., Wang, H. et al. (2019). An efficient quasi-solid-state dye-sensitized solar cell with gradient polyaniline-graphene/PtNi tailored gel electrolyte. *Electrochimica Acta*, 316, 125–132. DOI 10.1016/j.electacta.2019.05.115. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
27. Venkatesan, S., Liu, I. P., Hung, W. N., Teng, H., Lee, Y. L. (2019). Highly efficient quasi-solid-state dye-sensitized solar cells prepared by printable electrolytes for room light applications. *Chemical Engineering Journal*, 367, 17–24. DOI 10.1016/j.cej.2019.02.118. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
28. Mohan, K., Bora, A., Roy, R. S., Nath, B. C., Dolui, S. K. (2019). Polyaniline nanotube/reduced graphene oxide aerogel as efficient counter electrode for quasi solid state dye sensitized solar cell. *Solar Energy*, 186, 360–369. DOI 10.1016/j.solener.2019.05.030. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
29. Thomas, M., Rajiv, S. (2020). Porous membrane of polyindole and polymeric ionic liquid incorporated PMMA for efficient quasi-solid state dye sensitized solar cell. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 394, 112464. DOI 10.1016/j.jphotochem.2020.112464. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
30. Masud Kim, K. M., Kim, H. K. (2020). Polymer Gel electrolytes based on PEG-functionalized ABA triblock copolymers for quasi-solid-state Dye-sensitized solar cells: Molecular engineering and key factors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(37), 42067–42080. DOI 10.1021/acsami.0c09519. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
31. Upadhyaya, H. M., Senthilarasu, S., Hsu, M. H., Kumar, D. K. (2013). Recent progress and the status of dye-sensitized solar cell (DSSC) technology with state-of-the-art conversion efficiencies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119, 291–295. DOI 10.2478/s11756-007-0111-7. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

[32] [3] Dye-sensitized solar cell – Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell

[33] Efficiency of DSSC | Dye Sensitized Solar Cells | GCellG24
<https://gcell.com/dye-sensitized-solar-cells/advantages-of-dscc/efficiency>

34. Nattestad, A., Perera, I., Spiccia, L. (2016). Developments in and prospects for photocathodic and tandem dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 28, 44–71. DOI 10.1016/j.jphotochemrev.2016.06.003. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
34. Kubo, W., Sakamoto, A., Kitamura, T., Wada, Y., Yanagida, S. (2004). Dye-sensitized solar cells: Improvement of spectral response by tandem structure. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 164(1–3), 33–39. DOI 10.1016/j.jphotochem.2004.01.024. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
35. Dürr, M., Bamedi, A., Yasuda, A., Nelles, G. (2004). Tandem dye-sensitized solar cell for improved power conversion efficiencies. *Applied Physics Letters*, 84(17), 3397–3399. DOI 10.1063/1.1723685. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
36. Yamaguchi, T., Uchida, Y., Agatsuma, S., Arakawa, H. (2009). Series-connected tandem dye-sensitized solar cell for improving efficiency to more than 10%. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(6–7), 733–736. DOI 10.1016/j.solmat.2008.09.021. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
37. Yanagida, M., Onozawa-Komatsuzaki, N., Kurashige, M., Sayama, K., Sugihara, H. (2010). Optimization of tandem-structured dye-sensitized solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 297–302. DOI 10.1016/j.solmat.2009.10.002. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
38. Miao, Q., Wu, L., Cui, J., Huang, M., Ma, T. (2011). A New type of Dye-Sensitized solar cell with a multilayered photoanode prepared by a film-Transfer technique. *Advanced Materials*, 23(24), 2764–2768. DOI 10.1002/adma.201100820. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
39. Wood, C. J., Summers, G. H., Clark, C. A., Kaeffer, N., Braeutigam, M. et al. (2016). A comprehensive comparison of dye-sensitized NiO photocathodes for solar energy conversion. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(16), 10727–10738. DOI 10.1039/C5CP05326A. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
40. Sobuś, J., Ziółek, M. (2014). Optimization of absorption bands of dye-sensitized and perovskite tandem solar cells based on loss-in-potential values. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(27), 14116–14126. DOI 10.1039/C4CP01937G. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
41. Maufroy, A., Favereau, L., Anne, F. B., Pellegrin, Y., Blart, E. et al. (2015). Synthesis and properties of push–pull porphyrins as sensitizers for NiO based dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(7), 3908–3917. DOI 10.1039/C4TA05974C. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Wei, L., Jiang, L., Yuan, S., Ren, X., Zhao, Y. et al. (2016). Valence band edge shifts and charge-transfer dynamics in Li-doped NiO based p-type

DSSCs. *Electrochimica Acta*, 188, 309–316. DOI

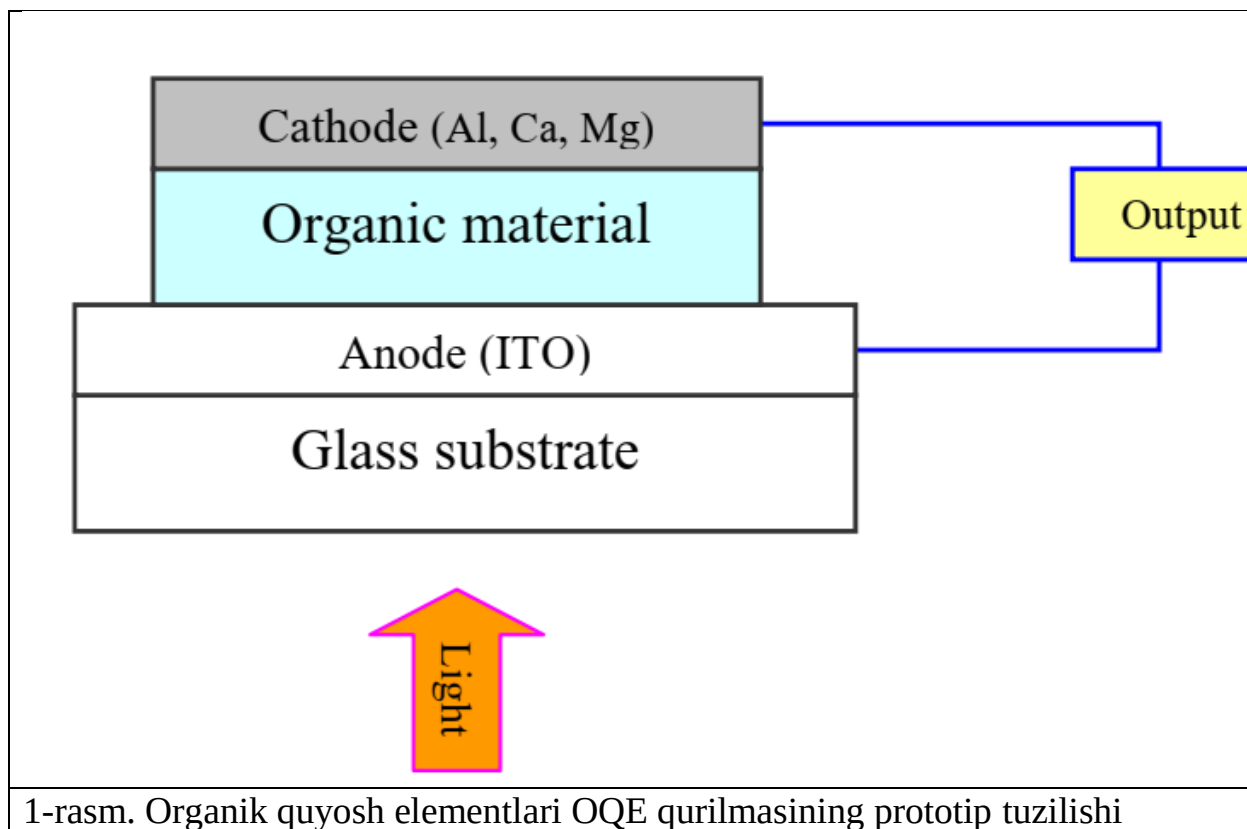
10.1016/j.electacta.2015.12.026. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

43. Ho, P., Thogiti, S., Cheruku, R., Ahn, K. S., Kim, J. H. (2018). Enhanced efficiency via blocking layers at photocathode interfaces in cobalt-mediated tandem dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*, 161, 9–16. DOI 10.1016/j.solener.2017.12.035. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
44. Ho, P., Ahn, K. S., Cheruku, R., Kim, J. H. (2016). P-Type dye-sensitized solar cells: Enhanced performance with a NiO compact blocking layer. *Synthetic Metals*, 217, 314–321. DOI 10.1016/j.synthmet.2016.04.006. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
45. Balasingam, S. K., Lee, M., Kang, M. G., Jun, Y. (2013). Improvement of dye-sensitized solar cells toward the broader light harvesting of the solar spectrum. *Chemical Communications*, 49(15), 1471–1487. DOI 10.1039/C2CC37616D. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
46. Ito, S., Dharmadasa, I. M., Tolan, G. J., Roberts, J. S., Hill, G. et al. (2011). High-voltage (1.8 V) tandem solar cell system using a GaAs/Al_xGa_(1-x) as graded solar cell and dye-sensitized solar cells with organic dyes having different absorption spectra. *Solar Energy*, 85(6), 1220–1225. DOI 10.1016/j.solener.2011.02.024. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
47. Moon, S. H., Park, S. J., Kim, S. H., Lee, M. W., Han, J. et al. (2015). Monolithic DSSC/CIGS tandem solar cell fabricated by a solution process. *Scientific Reports*, 5(1), 8970. DOI 10.1038/srep08970. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
48. Mehrabian, M., Dalir, S. (2018). Numerical simulation of highly efficient dye sensitized solar cell by replacing the liquid electrolyte with a semiconductor solid layer. *Optik*, 169, 214–223. DOI 10.1016/j.ijleo.2018.05.059. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [49] Schematic diagram of a DSSC/CIGS tandem solar cell. (b)
Transmittance... | Download Scientific Diagram
https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-DSSC-CIGS-tandem-solar-cell-b-Transmittance-of-Y123-sensitized_fig3_305893846
52. Gong, J., Sumathy, K., Qiao, Q., Zhou, Z. (2017). Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs) Advanced techniques and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 234–246. DOI 10.1007/s11099-005-5134-0. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
50. Wali, Q., Iftikhar, F. J., Elumalai, N. K., Iqbal, Y., Yousaf, S. et al. (2020). Advances in stable and flexible perovskite solar cells. *Current Applied Physics*, 20(5), 720–737. DOI 10.1016/j.cap.2020.03.007. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
51. Lu, H., Sun, J., Zhang, H., Lu, S., Choy, W. C. H. (2016). Room-temperature solution-processed and metal oxide-free nano-composite for the flexible transparent bottom electrode of perovskite solar cells. *Nanoscale*, 8(11), 5946–5953. DOI 10.1039/C6NR00011H. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

53. Olaleru, S. A., Kirui, J. K., Wamwangi, D., Roro, K. T., Mwakikunga, B. (2020). Perovskite solar cells: The new epoch in photovoltaics. *Solar Energy*, 196, 295–309. DOI 10.1016/j.solener.2019.12.025. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
54. Anaya, M., Lozano, G., Calvo, M. E., Míguez, H. (2017). ABX₃ perovskites for tandem solar cells. *Joule*, 1(4), 769–793. DOI 10.1016/j.joule.2017.09.017. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
55. Wali, Q., Elumalai, N. K., Iqbal, Y., Uddin, A., Jose, R. (2018). Tandem perovskite solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 84, 89–110. DOI 10.1016/j.rser.2018.01.005. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
56. Werner, J., Dubuis, G., Walter, A., Löper, P., Moon, S. J. et al. (2015). Sputtered rear electrode with broadband transparency for perovskite solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 141, 407–413. DOI 10.1016/j.solmat.2015.06.024. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
57. Duong, T., Wu, Y., Shen, H., Peng, J., Fu, X. et al. (2017). Rubidium multication perovskite with optimized bandgap for perovskite-silicon tandem with over 26% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 7(14), 1700228. DOI 10.1002/aenm.201700228. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
58. Bush, K. A., Palmstrom, A. F., Yu, Z. J., Boccard, M., Cheacharoen, R. et al. (2017). 23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability. *Nature Energy*, 2(4), 17009. DOI 10.1038/nenergy.2017.9. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
59. Shen, H., Walter, D., Wu, Y., Fong, K. C., Jacobs, D. A. et al. (2020). Monolithic perovskite/Si tandem solar cells: Pathways to over 30% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 10(13), 1902840. DOI 10.1002/aenm.201902840. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
60. Zhou, Y., Yin, X., Zhang, Q., Wang, N., Yamamoto, A. et al. (2019). Perovskite solar cell-thermoelectric tandem system with a high efficiency of over 23%. *Materials Today Energy*, 12, 363–370. DOI 10.1016/j.mtener.2019.03.003. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
61. Kinoshita, T., Nonomura, K., Joong Jeon, N., Giordano, F., Abate, A. et al. (2015). Spectral splitting photovoltaics using perovskite and wideband dye-sensitized solar cells. *Nature Communications*, 6(1), 8834. DOI 10.1038/ncomms9834. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
62. Hosseinneshad, M. (2019). Enhanced performance of dye-sensitized solar cells using perovskite/DSSCs tandem design. *Journal of Electronic Materials*, 48(9), 5403–5408. DOI 10.1007/s11664-019-07272-w. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

7. ORGANIK QUYOSH ELEMENTLARI

Organik quyosh elementlari (OQE) yorug‘likni so‘raydigan yarimo‘tkazgichlar sifatida uglerodga asoslangan (organik) materiallardan foydalanadi. Ular fototokoshlikning dastlabki kashfiyotlari (masalan, 1906-yildagi antrasendagi natija) va birinchi organik fotovoltaik effektga borib taqaladi. Tang va boshq. (1987) Kodak kompaniyasida mis ftaltsiyanat (CuPc) va C₆₀ dan foydalangan holda birinchi ikki qatlamli OQE elementini yaratdi, natijada deyarli 1% samaradorlik (PCE) qo‘lga kiritildi[1]. Ushbu ikki qatlamli donor–akseptor dizayni OQE tadqiqotlari boshlanganiga sabab bo‘ldi. **1-rasm**da organik quyosh elementlari qurilmasining prototip tuzilishi keltirilgan. Bunday qurilmalar quyosh energiyasini yangi bozorlar – soatlar, kalkulyatorlardan tortib noutbuklargacha – quvvatlantirish imkonini berishi mumkin.



1990-yillarda tuzilgan polimerlar va fullerenga o‘xshash akseptorlar (masalan, P3HT:PCBM) hajmiy geterotuzulma (katta fazali gibridd) konsepsiyasini yo‘lga qo‘yib, samaradorlikni oshirdi (Yu va boshq., 1995; Heeger va boshq., 2012[2]). 2010-yillarga kelib tandem (ko‘p qatlamli) OQE elementlari 10% samaradorlikdan oshdi[2]. So‘nggi yillarda sertifikatlangan samaradorlikning record ko‘rsatkichi 19–20% atrofida e‘lon qilindi[3][4].

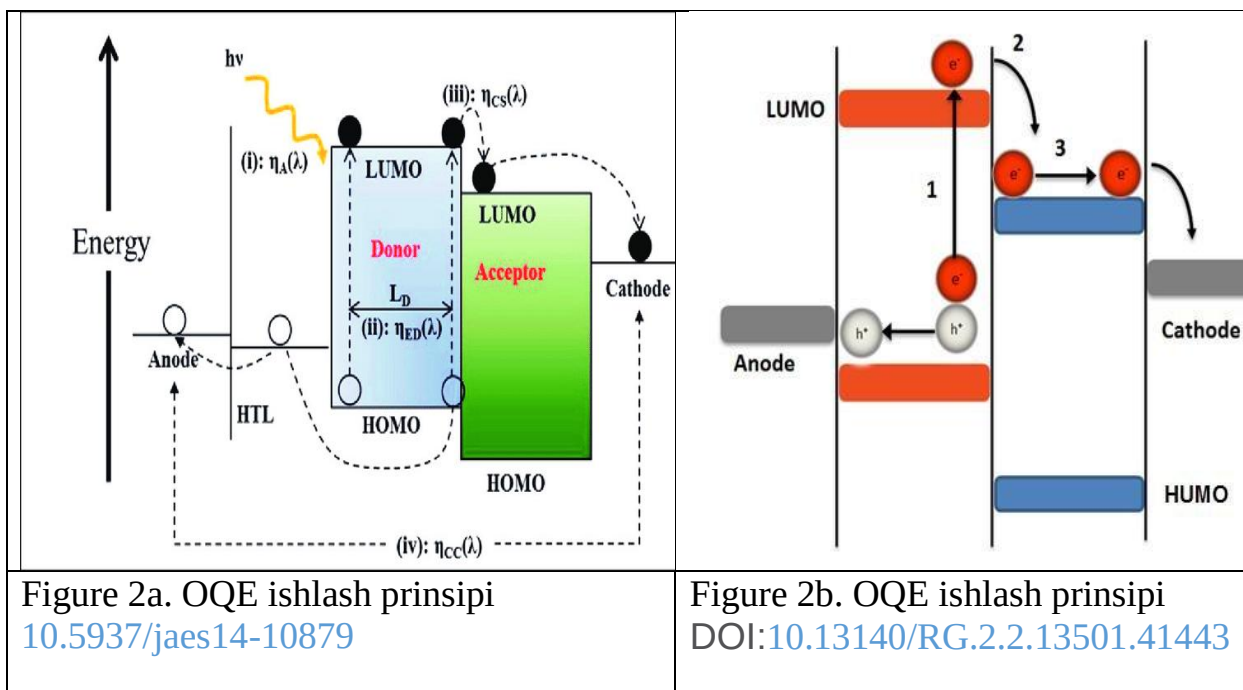
Quyidagi jadvalda yillar kesimida organik quyosh elementlari sohasidagi asosiy yutuqlar keltirilgan:

Yil (Guruh)	PCE (%)	Izoh (Materiallar/sozlanishi)	Manba
1987 (Kodak, Tang va b.)	~1%	CuPc/C ₆₀ dan tashkil topgan ikki qatlamli OQE[1]	Tang va b. (1987)[1]
2013 (Heliatek, Le Séguillon)	12,0%	Vakuumda bug‘ boshi orqali kichik molekulali tandem (2 qatlam)[5]	Heliatek (2013)[5]
2015 (Zhang va b.)	~10%	Eritmada tayyorlangan polimer tandem (10,6% sertifikatlangan)[2]	NREL (2015)[2]
2023 (Xitoy PolyU)	19,3%	Fullerenga o‘xshamagan polimer asosidagi rekord[2]	Zhan va b. (2023)[2]
2024 (Chen va b.)	20,82%	Kristallanishni boshqarish bilan bitta bo‘g‘inli OQE[4]	Chen va b. (2025)[4]
2025 (Sun va b.)	19,96%	Arzon polimer (CF ₃ -o‘zgargan) asosidagi OQE[6]	Sun va b. (2025)[6]
2025 (Kanazawa Univ.)	8,7%	To‘liq organik (CNT/PEDOT:PSS elektrodleri) OQE[7]	Jowett (2025)[7]
2025 (NUS, Hou va b.)	26,4% (T)	Perovskit–organik tandem (sertifikatlangan)[8][9]	Hou va b. (2025)[8][9]

Bu yutuqlar yangi donor/akseptor materiallariga (masalan, fullerenga o‘xshamagan Y6 kabi) va yaxshilangan morfologiyalar hamda qurilma dizaynlariga asoslanadi. OQElar yengil va egiluvchan bo‘lib qolmoqda, shuningdek, eritma muhandisligi va qo‘shimchalar orqali samaradorlikni 20% darajasidan oshirish bo‘yicha tadqiqotlar davom etmoqda[5].

Qurilma Tuzilishi va Ishlash Printsipi

OQE qurilmasi odatda shisha yoki egiluvchan substratda joylashgan shaffof anodd (mas., ITO qatlamiga) va undan keyin g‘ovaklarni tashuvchi qatlam (mas., PEDOT:PSS), faol qatlam (donor va akseptor materiallarining bulk gibrid aralashmasi) hamda katoddan (mas., alyuminiy) tashkil topgan bo‘ladi[6]. OQElar to‘rt bosqichli jarayon orqali quyosh nurini elektr tokiga aylantiradi: (1) fotonlarni yutilishi, (2) electron-g‘ovak juftligi (eksitonlar)ning tarqalishi, (3) donor–akseptor interfeysida zaryadlarning ajralishi, (4) va elektrodlarda zaryadlarning yig‘ilishi [1][11](Figure 2a,b).



Yorug‘lik yutulganida fotonlar donor materialida bog‘langan elektron–g‘ovak juftlari (eksitonlar) hosil qiladi. Ushbu eksitonlar (~10 nm) donor/akseptor interfeysiga tarqaladi va u yerda erkin zaryadlarga bo‘linadi: elektronlar akseptor qatlamga o‘tadi, g‘ovaklar esa donor qatlamda qoladi. Ichki elektr maydoni (elektrodlar orasidagi o‘rnatilgan kuchlanish) elektronlarni katodga, g‘ovaklarni anodga itarib, fototok jaryd hosil qiladi[11][12].

Oddiy OQEda qatlam tuzilishi (*anod / g‘ovak oqimini bloklovchi qatlam*) – *donor:akseptor* – (*elektron oqimini bloklovchi qatlam / katod*) ko‘rinishidadir. Invertlangan arxitekturada kontaktlarning tartibi aksincha bo‘lib, bu ko‘pincha qurilmaning barqarorligini yaxshilaydi. Anorganik pv-elementlardan farqli o‘laroq, OQElarda klassik p–n o‘tish mavjud emas; buning o‘rniga donor–akseptor energiya darajalarining farqi eksitonlarni ajratishga xizmat qiladi[13][11].

I–V Xususiyatlari va Samaradorlik

Nurlanish sharoitida o‘lchanadigan tok–kuchlanish (J–V) chizig‘i OQEning ishlash samaradorligini belgilaydi. Asosiy parametrlar qisqa tutashuv tok zichligi (J_{SC}), ochiq doira kuchlanishi (V_{OC}) va to‘ldirish koeffitsienti (FF) dir. Samaradorlik (PCE) quyidagi formula bilan hisoblanadi:

$$\eta = \frac{V_{OC} \times J_{SC} \times FF}{P_{in}}$$

bu yerda P_{in} – tushuvchi yorug‘lik quvvati[14]. Amalda, V_{OC} J–V egri chizig‘ining x-o‘q bo‘ylab kesishish nuqtasiga (0 tokdagi kuchlanish), J_{SC} esa y-o‘qi bo‘ylab kesishish nuqtasiga (0 kuchlanishdagi tok) to‘g‘ri keladi[12].

To'ldirish koeffitsienti egri chiziqning "kvadratlashganlik darajasi"ni o'lchaydi va maksimal quvvat to'rtburchagini $V_{OC} \cdot J_{SC}$ hosil qiluvchi maydonga nisbati sifatida belgilanadi[15]. Tarixan OQElarda FF past (ko'pincha <70%) bo'lar edi, ammo invertlangan arxitektura yordamida 75% dan yuqori qiymatlar qayd etilgan[16].

Tadqiqotlarda J–V egri chizgilari standart sinov sharoitida (AM1.5G spektri, 100 mV/sm²) o'lchanadi. Bundan tashqari, OQE ning tashqi kvant samaradorligi (EQE) ham qo'llanilib, turli to'lqin uzunliklardagi yorug'likni elektr tokiga aylantirish samarasini ko'rsatadi. Ushbu ko'rsatkichlar birgalikda qurilmaning umumiy unumdorligini baholashga yordam beradi[13][3]. Ahamiyatlisi, tadqiqotchilar 19% dan yuqori sertifikatlangan OQE samaradorlik natijalarini e'lon qilganlar: masalan, Chen va boshq. (2025) yagona bo'g'inli OQEda 20,82% samaradorlikni qayd etdi[4], Sun va boshq. (2025) esa yangi arzon polimer yordamida 19,96% natijaga erishdi[6].

Materiallar va O'zgarishlar

OQE ishlab chiqarishda turli organik yarimo'tkazgich materiallaridan foydalaniladi. Donor sifatida odatda π -konjugatsiyalangan polimerlar yoki kichik molekulalar (mas., P3HT, PTB7, D18, PTQ15) ishlatiladi, ular ko'rinadigan yorug'likni yutadi. Akseptor materiallariga fullerenga asoslangan birikmalar (PC₆₁BM, PC₇₁BM) hamda yaqinda kiritilgan fullerenga o'xshamagan akseptorlar (mas., Y6, N3) kiradi, bu esa yuqori J_{SC} va barqarorlikka olib keladi. Donor va akseptorning tanlovi unumdor banqapni belgilaydi va shu tariqa erishiladigan V_{OC} ni (odatda ~0,7–1,1 V) aniqlaydi[17].

Qurilma arxitekturasida yagona bo'g'inli BHJ elementlari va tandem yoki ko'p bo'g'inli OQElarni o'z ichiga oladi. Tandem OQElarda turli kenglikdagi bo'g'inlar ketma-ket ulanib, quyosh spektrining katta qismini qamrab oladi (anorganik tandem elementlariga o'xshab) [2][9]. Masalan, Heliatek vakuum sharoitida kichik molekulali qatlamlarni joylashtirib, tandem (ikki qatlamli) OQE yaratdi va bir bo'g'inli 12,0% samaradorlikka erishdi; bu natijani ular ~15% silikonga teng deb baholadi[5]. Har bir holatda shaffof o'tkazuvchan elektrodlar (ITO, PEDOT:PSS) va metall katodlar (Al, Ag) qurilma to'plamini to'ldiradi.

Gibrid va Tandem Kombinatsiyalari

OQElar ko'pincha boshqa fotovoltaiik elementlar bilan tandem to'plamlarda kombinatsiyalanadi. Keng taqiqlangan zona qiymatiga ega OQElar kremniy, CIGS yoki perovskit ostki elementlari ustida element sifatida ishlatilishi mumkin[11]. Organik yuqori bo'g'in elementlar yuqori energetik (ko'k/UV) fotonlarni yutadi, pastroq energiyali yorug'likni esa pastki elementga o'tkazadi[11]. Yaqinda perovskit–organik tandem elementi bo'yicha yirik natijalar kuzatildi: masalan, Hou va boshq. (NUS, 2025) perovskit–organik tandem elementida qisqa(yaqin) infraqizil diapazondagi to'lqinlarni yutgani uchun 26,4% sertifikatlangan samaradorlik(PCE) ga erishdi[8][9]. Bunday gibridlar OQElarning arzon, OQE xususiyatlarini o'zgartirish orqali tandem samaradorligini nazariy 30% chegarasiga

yaqinlashtirishga yordam beradi. Shuningdek, turli organik qatlamlarga ega ko'p otishli(multijunction) qurilmalar va OQE–DSSC gibridlari ham sinovdan o'tkazilmoqda[20].

OQE–CIGS Tandemi

Tezis jihatdan organik old qavat va CIGS pastki elementni ketma-ket birlashtirish mumkin (3-rasm). Yaqin Sharqdagi olimlar kiyimlarga mos egiluvchan ikki terminalli organik/CIGS tandem quyosh elementsini ishlab chiqdilar. Ushbu qurilma 1,89 V ochiq doira kuchlanishi, 17,55 mA/sm² qisqa tutashuv tok zichligi va 82,79% to'ldirish ko'effitsientini ko'rsatdi[21]. Qurilmaning tarkibiga indiy-sn-oksidi (ITO) va shisha substrat, CIGS yutiluvchi qatlam, kadmiy sulfid (CdS) tampon qatlami, sink oksidi (ZnO), alyuminiy dope qilingan ZnO (ZnO-Al) optik shaffof katod, shaffof o'tkazuvchi oksidlar asosidagi interqatlam, molibden trioksidi (MoO₃) g'ovak tashuvchi qatlami, PM6:m-DTC-2F organik materialli absorber va yana bir ZnO qatlami kiradi[22]. Standart nur sharoitida simulyatsiya dastlab 22,5% samaradorlik ko'rsatdi. CIGS yutiluvchisining dopirovkasi oshirilishi va old/ orqa element qatlamlari (mos ravishda 100 nm va 2,5 µm) qalinliklarini optimallashtirish orqali tadqiqotchilar tandem qurilmaning samaradorligini 27,46% ga ko'tardilar. Shu bilan birga 1,89 V ochiq doira kuchlanishi, 17,55 mA/sm² tok zichligi va 82,79% FF qayd etildi[23]. Organik element va CIGS qurilmasi individual ravishda mos ravishda 12,20% va 20,10% samaradorlikka erishdi[24].

Nazariy jihatdan, organik quyosh elementi bilan CIGS (mis-indiy-galliy-selenid) quyosh elementini ketma-ket tarzda joylashtirish (3-rasmga qarang) mumkin. Yaqin Sharqdagi olimlar kiyiladigan qurilmalar uchun mo'ljallangan, moslashuvchan, ikki terminalli organik/CIGS tandem quyosh elementini ishlab chiqdilar. Ushbu qurilma quyidagi parametrlarni namoyish etdi: ochiq kontakt kuchlanishi (V_{OC}) – 1,89 V, qisqa tutashuv oqim zichligi (J_{SC}) – 17,55 mA/cm² va to'ldirish ko'effitsienti (FF) – 82,79%.

Ushbu qurilmaning tarkibiga quyidagilar kiradi:

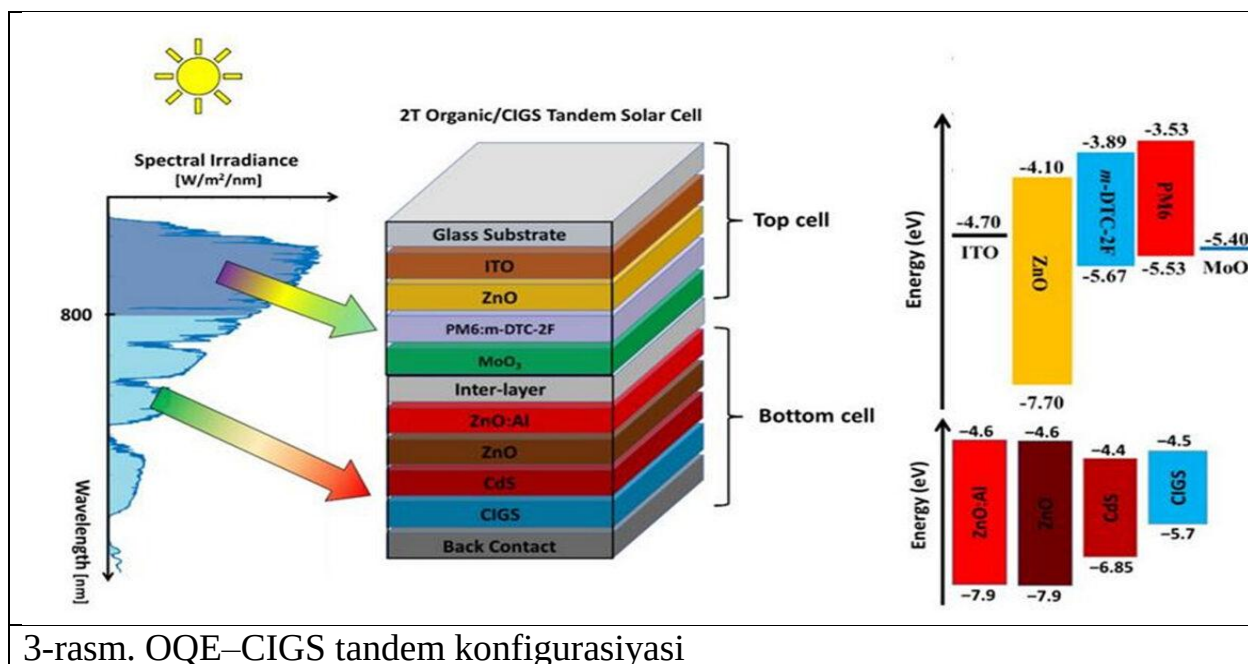
- **Indiy qalay oksidi (ITO) va shisha substrat,**
- **CIGS yutuvchi qatlam,**
- **Kadmiysulfid (CdS) tampon qatlami,**
- **Sink oksidi (ZnO),**
- **Aluminiy kirishmasi kiritilgan ZnO (ZnO:Al) – optik jihatdan shaffof katod,**
- **Shaffof o'tkazuvchi oksidlar (TCO) asosida interqatlam,**
- **Molibden trioksidi (MoO₃) dan tashkil topgan g'ovak tashuvchi qatlam (HTL),**
- **Organik material (PM6:m-DTC-2F) asosida yaratilgan yutuvchi qatlam,**
- **Va yana bir ZnO qatlami.**

Standart nurlanish sharoitida (AM1.5) o'tkazilgan dastlabki modellashirishda ushbu tandem qurilma 22,5% samaradorlikka (PCE) erishdi.

Tadqiqot guruhi CIGS yutuvchi qatlamini kuchliroq kirishma kiritish hamda yutuvchi qatlamlarning qalinligini optimallashtirish (old element uchun 100 nm va orqa element uchun 2,5 μm) orqali tandem qurilmaning umumiy samaradorligini 27,46% gacha oshirishga muvaffaq bo'ldi.

Bunda $V_{OC} = 1,89\text{ V}$, $J_{SC} = 17,55\text{ mA/cm}^2$, va $FF = 82,79\%$ ko'rsatkichlarga erishildi.

Alohida holda, organik element samaradorligi 12,20%, CIGS qurilmasi esa 20,10% samaradorlikni namoyish etdi.



3-rasm. OQE–CIGS tandem konfiguratsiyasi

Organic–DSSC Gibridlari

Organik quyosh elementlari (OQE)–DSSC gibridlari – bu tandem qurilmalar bo'lib, ular OQE'ning arzon organik polimerlarini keng spektrni yutish xususiyati bilan, DSSC'ning bo'yoq bilan sezgirlashtirilgan TiO_2 fotoanodi orqali samarali zaryad hosil bo'lishi bilan birlashtiradi. Ushbu gibridlarda ko'pincha ikki (2-terminal) yoki to'rt (4-terminal) ulangan holatda bo'lib, birlamchi (single-junction) samaradorlik chegarasidan o'tish uchun komplementar spektrlardan foydalanadi.

Organik–DSSC gibridda an'anaviy DSSC element organik quyosh elementi (subelement) bilan birlashtiriladi. Ikkita ulanish sxemasi mavjud:

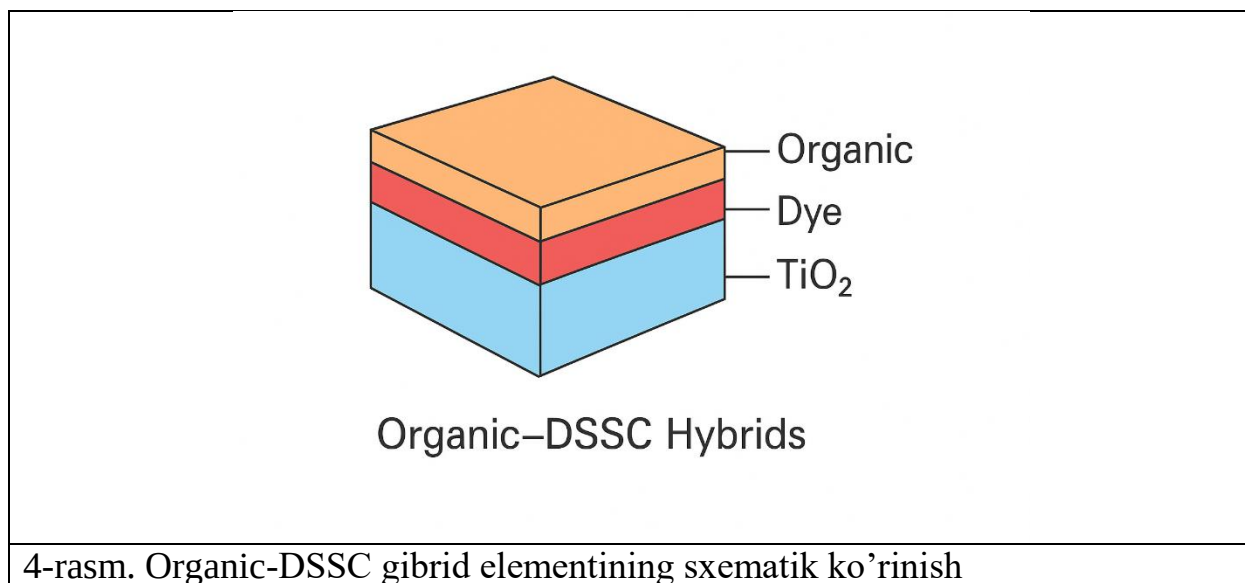
1. Ketma-ket ulanish (ikki terminal): bunda DSSC va OQE bir xil tokni baham ko'radi, kuchlanishlari esa qo'shiladi. Bu V_{OC} ni oshirishi mumkin, ammo bu uchun toklarni muvofiqlashtirish talab qilinadi. Masalan, DSSC'ni noorganik elementga ulash $\approx 0.3\text{ V}$ ga yuqoriroq tandem V_{OC} ni bergan (lekin J_{SC} DSSC bilan cheklangan)(4).

2. Parallel ulanish (to'rt terminal): bu holatda ikkala subelement bir xil V_{OC} da ishlaydi, lekin toklar qo'shiladi. Bu past yoritilishda yaxshi natija berishi mumkin, ammo impedans (umumiy samarali qarshilik) nomuvofiqligi sababli amaliy jihatdan cheklovli.

Organik–DSSC gibrirlarining natijalari hozircha cheklangan. Bir tajribada (DSSC/CIGS analogi) faqat $\approx 6.1\%$ samaradorlik (PCE) kuzatilgan(4). Umuman olganda, gibrir OQE–DSSC tandemlari spektral ustma-ustlik va rekombinatsiya yo'qotishlari sababli samaradorlik faqat bir necha foiz atrofida qolmoqda. (Hozirgacha sertifikatlangan yuqori samarali OQE+DSSC tandemi yo'q). Shunga qaramay, gibrirlar kengroq spektrni yutish imkonini beradi – masalan, bo'yoq orqali ko'rinadigan yorug'lik, organik yutuvchi orqali esa uzun to'lqinli (yaqindan infraqizilgacha) nurlar yutiladi – ammo bu borada murakkab, batafsil tadqiqotlar kam.

Tuzilishi(4-rasmga qarang):

- Yuqori qavat: OQE (masalan, P3HT:PCBM aralashmasi)
- Recombination qatlami: PEDOT:PSS/ITO
- Pastki qavat: DSSC (TiO_2 fotoanod, organik/yoki ruteniy bo'yoq, elektrolit, platina katod)



Ishlab chiqarish:

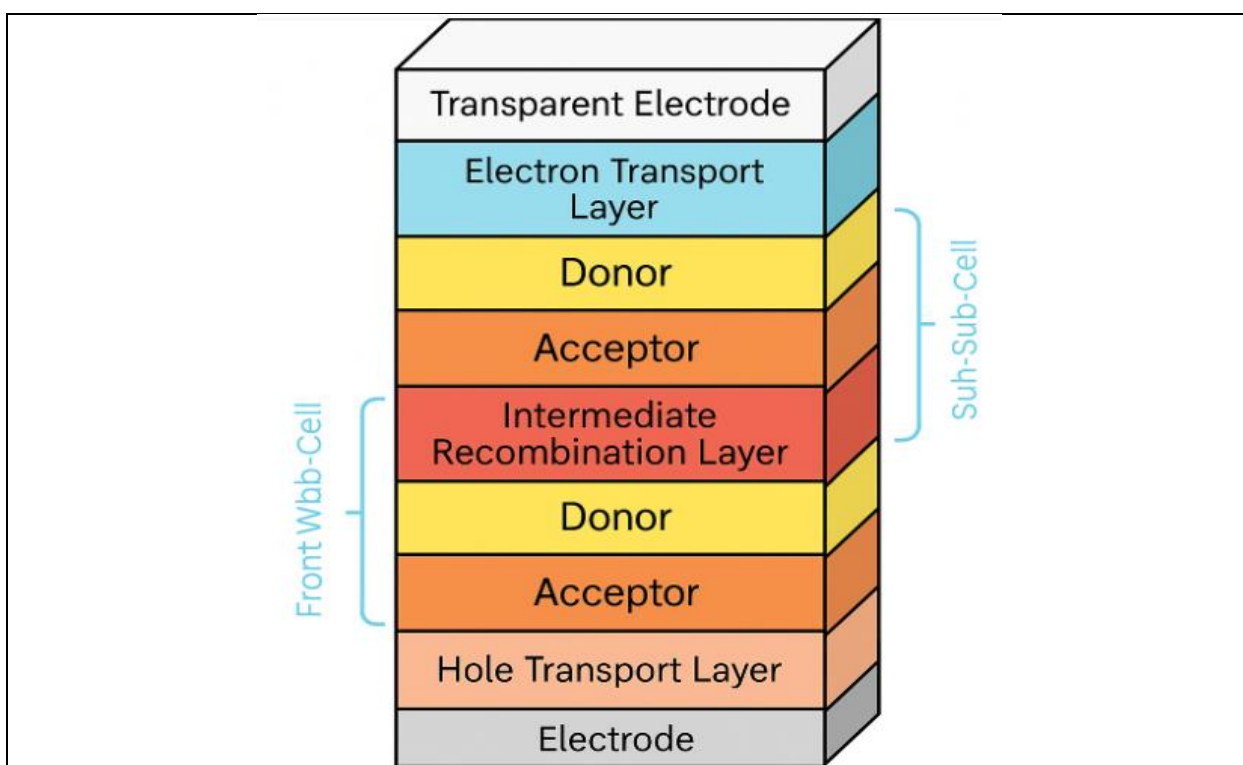
- Spin-coating orqali organik qatlamlar hosil qilinadi
- TiO_2 qatlami yotqiziladi, bo'yoq bilan sezgirlashtiriladi, elektrolit bilan yig'iladi(5-rasmga qarang).

Samaradorlik:

- Organik sezgirlashtiruvchilar bilan tandem DSSC'lar – 11.02% gacha samaradorlik (PCE)
- Gibrid konfiguratsiyalar – 10–12% atrofida,
- Optimallashtirilgan noorganik-organik variantlarda esa – 18% gacha imkoniyat mavjud.

To'liq Organik Tandem OQE–OQE

5-rasm: Monolit tarzda ustma-ust joylashtirilgan ikki subelementli (oldingi keng taqiqlangan zona va orqa kichik taqiqlangan zona) to'liq organik tandem OQE sxematik ko'rinishi [1][2]. Ketma-ket ulangan OQE–OQE tandemida, komplementar yutish qatlamlari yorug'lik spektrining kengroq diapazonini qamrab oladi va ikkala subelementning ochiq kontakt kuchlanishlari (V_{OC}) qo'shiladi [1]. Har bir donor–akseptor tutashuvda hosil bo'lgan zaryad juftliklari oraliq rekombinatsiya qatlami orqali yig'iladi, bu esa umumiy kuchlanish va umumiy tok hosil qiladi. Optimal dizayn uchun subelementlar orasida tok muvozanati zarur; aks holda, pastroq tokli subelement butun tandemning chiqishini cheklaydi.



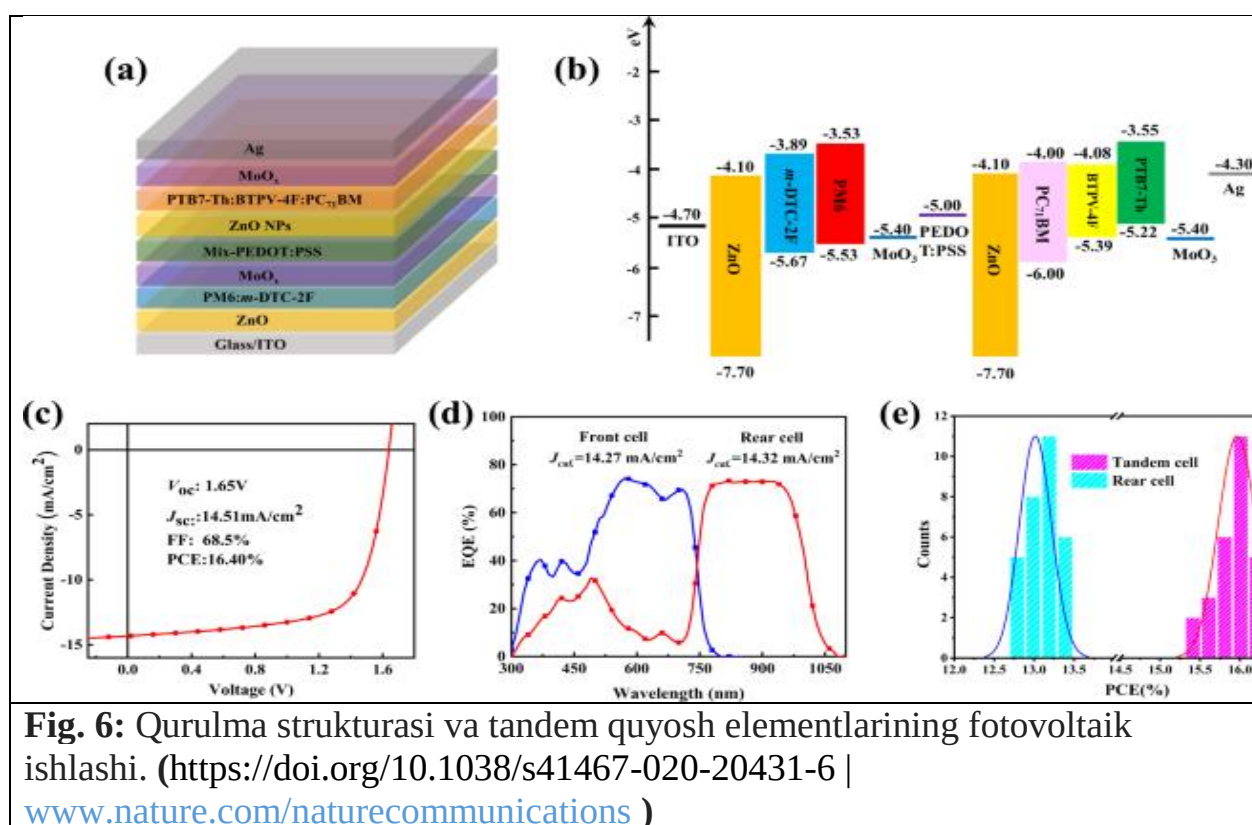
5-rasm. Monolit tarzda ustma-ust joylashtirilgan ikki subelementli (oldingi keng taqiqlangan zona va orqa kichik taqiqlangan zona) to'liq organik tandem OQE sxematik ko'rinishi [1][2].

Amaliyotda tandem organik quyosh elementlari (OQE) yuqori konversiya samaradorligi (PCE) bo'yicha rekord natijalarga erishgan. Masalan, Wang va boshqalar (2025) yangi nonfulleren akseptorlar asosida qurilgan ikki terminalli

tandemda 21.5% (sertifikatlangan 21.2%) samaradorlik (PCE) natijasini xabar qilganlar [2].

Bungacha esa Jia va hammualliflar (2021) ketma-ket ulangan tandem element orqali 16.40% (oldingi element 13.40%) samaradorlikka erishgan edi [3]. Bu tandemning tok–kuchlanish xususiyatlari V_{OC} (Jia va boshqalar maqolasidagi 6c-rasm) 1.65 V, $J_{SC} \approx 14.5 \text{ mA/cm}^2$ va to‘ldirish koeffitsienti 68.5% ekanligini ko‘rsatgan [3].

Umuman olganda, to‘liq organik tandemlar hozirda 15% dan ortiq PCE darajasiga yetgan bo‘lib, ba’zi holatlarda ~21% gacha yetgani haqida ma’lumotlar mavjud [2].



6-rasm:

- Tandem organik quyosh elementlarining (OQE) qurilma arxitekturalari.
- Tandem OQE tarkibidagi materiallarning energiya darajalari diagrammasi.
- AM 1.5G, 100 mW/cm² yoritish sharoitida optimal tandem OQE uchun tok–kuchlanish (J–V) egri chizig‘i.
- Tandem OQE’ning old va orqa quyi-elementlari uchun tashqi kvant samaradorligi (EQE) spektrlari.
- 30 ta individual qurilma asosida BTPV-4F asosidagi bir elementli OQE va tandem OQE’lar uchun fotoelektr konversiya samaradorligi (PCE) taqsimoti.

Tandem OQEdagi old va orqa quyi-elementlar o‘rtasidagi tok muvozanatini tushunish uchun, EQE spektrlari o‘lchandi (6d-rasmga qarang). Monolitik tandem OQE’larda, maxsus bir quyi-element EQE spektrini olish uchun boshqa quyi-

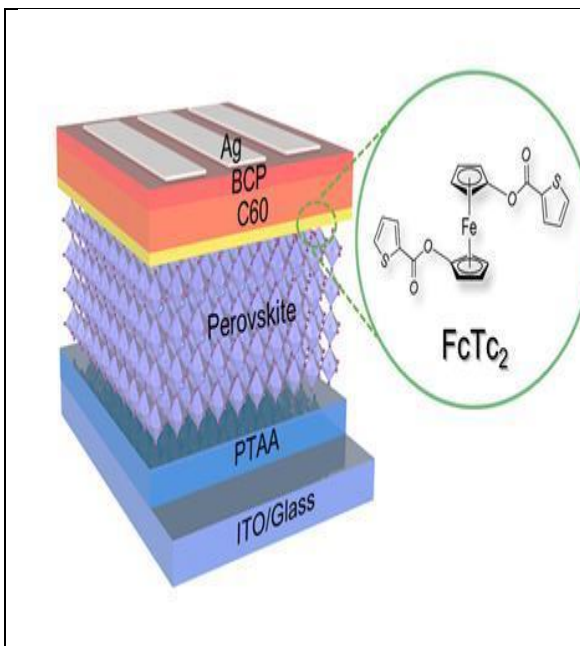
elementga yorug'lik teskari bias yoritish beriladi, shunda tekshirilayotgan quyi-element o'zining yutilish spektri oralig'ida tokni cheklaydi. Ushbu tadqiqotda, orqa va old quyi-elementlar o'lchovlari uchun mos ravishda 550 nm qisqa to'lqinli filtr va 850 nm uzun to'lqinli filtr orqali bias yoritish taqdim etildi. Orqa quyi-element 760–970 nm to'lqin uzunligi oralig'ida 65% dan yuqori javob bilan keng EQE spektrini ko'rsatdi. Old va orqa quyi-elementlarning integrallashgan qisqa tutashuv oqimi (J_{sc}) mos ravishda 14.27 va 14.32 mA/cm² ni tashkil etdi, bu esa har bir quyi-elementda yuqori darajada muvozanatli tok hosil bo'lishini bildiradi. Tandem OQE'ning yuqori va yaxshi muvozanatlashgan J_{sc} ko'rsatkichlari, asosan, ikkala quyi-elementning komplementar yutilish spektriga va har bir faol qatlamning ehtiyotkorlik bilan sozlangan qalinligiga bog'liq.

Boshqa tur OQE Gibrid Kombinatsiyalari (ixtiyoriy)

Perovskit–OQE Tandemi: Perovskitlarning sozlanadigan tarmoqli kengligi (bandgap) ularni organik quyosh elementlari (OQE) bilan birga ishlatishga jozibador qiladi. Bunday tandemda perovskit asosidagi yuqori qatlam (keng bandgap) ko'rinadigan yorug'likni yutadi, organik pastki qatlam esa (tor bandgapli akseptor) yaqin infraqizil (NIR) fotonlarni o'zlashtiradi.

So'nggi yillarda bu turdagi gibridlar bilan yuqori samaradorliklarga erishilgan. Masalan, Brinkmann va boshqalar (2022) ultranazik indiy oksidli interfeysli tandem yordamida 24.0% (sertifikatlangan 23.1%) PCE ni qayd etganlar [5].

Zhu va hammualliflar (2023) organometallik interfeys qatlami bilan kuchaytirilgan invers perovskit quyosh elementi ishlab chiqib, sertifikatlangan 24.3% samaradorlik va rekord darajadagi ish barqarorligini namoyish etganlar. Dizaynda ferrosenil-bis-tiofen-2-karboksilat (FcTc₂) molekulasi elektron tashuvchi qatlam (C60) va perovskit yutuvchi qatlam orasiga joylashtirilgan. Ushbu molekula elektron ajratilishini sezilarli yaxshilab, ionlarning migratsiyasini cheklagan, natijada qurilma barqarorligi oshgan (7a-rasm). Jia va boshqalar (2025) organik pastki elementning infraqizil yutuvchanligini oshirish orqali bu natijani 26.7% gacha yetkazganlar [6] (7b-rasm). Ushbu qurilmalar ≈ 2.15 V V_{OC} ko'rsatgan va organik/perovskit qatlamli gibridlar salohiyatini yaqqol namoyon qilgan.



7a-rasm. Perovskit quyosh elementi teskari tuzilmasi — **ferrosenil-bis-tiofen-2-karboksilat** (Ferrocenyl-bis-thiophene-2-carboxylate) molekulasi bilan kuchaytirilgan. Ushbu birikma perovskit qurilmasining samaradorligi bo'yicha yangi rekord o'rnatilishiga yordam bergan. Manba: ©

[Science/AAAS](#)

Z Li et al, *Science*, 2022, **376**, 416

(DOI: [10.1126/science.abm8566](https://doi.org/10.1126/science.abm8566))

7b-rasm. Singapur Milliy Universiteti olimlari tomonidan ishlab chiqilgan yangi perovskit-organik tandem element 26,4% ga teng quvvat aylantirish samaradorligiga erisha oladi, bu esa ushbu turdagi qurilmalar uchun ilgari o'rnatilgan ko'rsatkichdan yuqori natijadir.

OQE–Si Tandemi

Organik quyosh elementlari (OQE)–kremniy (Si) tandemi — bu gibrid qurilmalar bo'lib, qisqa to'lqin uzunlikdagi (400–650 nm) Quyosh nurining yutuvchisi amorf kremniy (a-Si) asosidagi yuqori element va uzun to'lqinli (650–950 nm) Quyosh nurining yutuvchisi organik pastki elementni o'z ichiga oladi. Bu ikki element oraliq rekombinatsion qatlam orqali bog'lanadi va natijada bitta o'tishli (single-junction) elementlar samaradorligidan yuqori natijalarga erishish mumkin.

Tuzilishi: Odatda bu monolitik 2-terminalli struktura bo'lib, quyidagilardan iborat(Figure 8):

- FTO oynali substrat
- a-Si p-i-n qatlam

- ITO (50 nm) + PEDOT:PSS (40 nm) oraliq qatlam
- Organik faol qatlam (masalan, PDPP3T:PC61BM aralashmasi, ~110 nm)
- Katod interfeys qatlami (masalan, PFEO SO₃Na)
- Alyuminiy katod

Energetik zonalar (energy bands) samarali zaryad rekombinatsiyasi uchun moslashtirilgan.

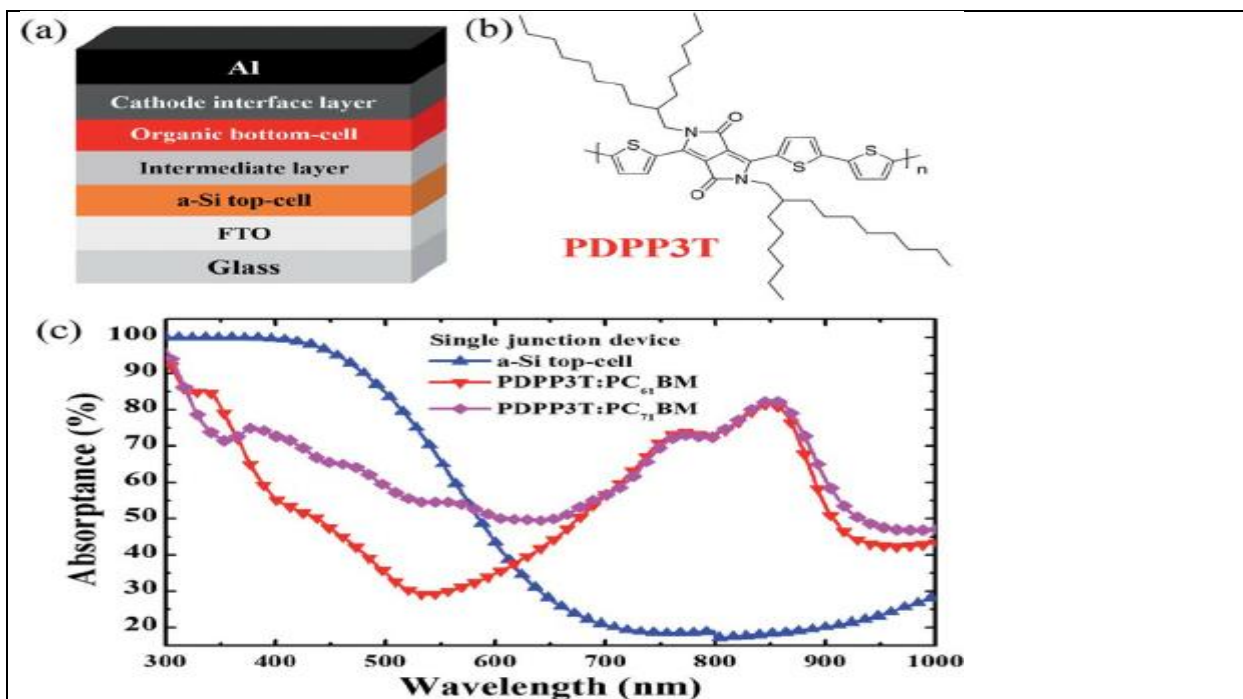
Ishlab chiqarish texnologiyasi:

- a-Si PECVD (plazma-yordamida kimyoviy bug‘ bilan cho‘ktirish) orqali
- ITO — sepish (sputtering) bilan
- PEDOT:PSS va organik qatlamlar — spin-coating bilan
- Katod — bug‘latib kondensatsiyalash bilan yasaladi
- a-Si qatlami qalinligi (72–125 nm) oqimga moslashtirish (current matching) uchun optimallashtiriladi

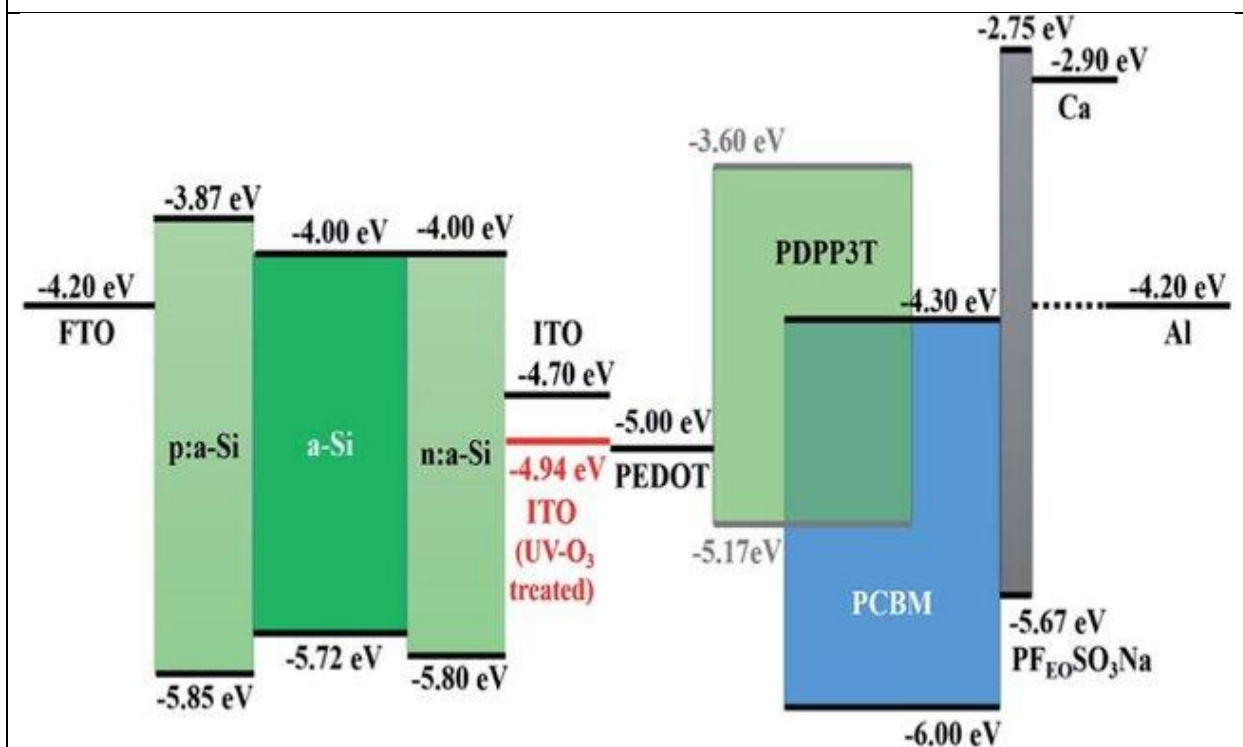
Samaradorlik:

- Quvvat aylantirish samaradorligi (PCE) — 7.5% gacha,
- $V_{OC} \approx 1.51$ V (ikkala element yig‘indisi),
- $J_{SC} \approx 6.73$ mA/cm²,
- To‘ldirish koeffitsienti (FF) $\approx 73\%$
- Bu qiymatlar yagona a-Si (4.15%) yoki OQE (5.89%) ga qaraganda yuqoriroq.
- Optimallashtirish bilan 14% PCE ga erishish mumkin.
- 4-terminalli so‘nggi dizaynlar 25.86% gacha samaradorlik ko‘rsatgan (masalan, P3HT:PC70BM organik qatlamlari bilan).

Xuddi shunday, organik-kremniy tandemlar hali asosan nazariy bosqichda. Ba’zi tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, 1.7 eV organik yuqori elementni 1.1 eV kristall kremniy (c-Si) bilan bog‘lash orqali samaradorlik oshirilishi mumkin, biroq amaliy natijalar hali yetarli emas. Perovskit–Si tandemining rekordi (~34.8%) bu boradagi imkoniyatlarni ko‘rsatmoqda, biroq OQE–Si tandemlar hali to‘liq amalga oshirilmagan.



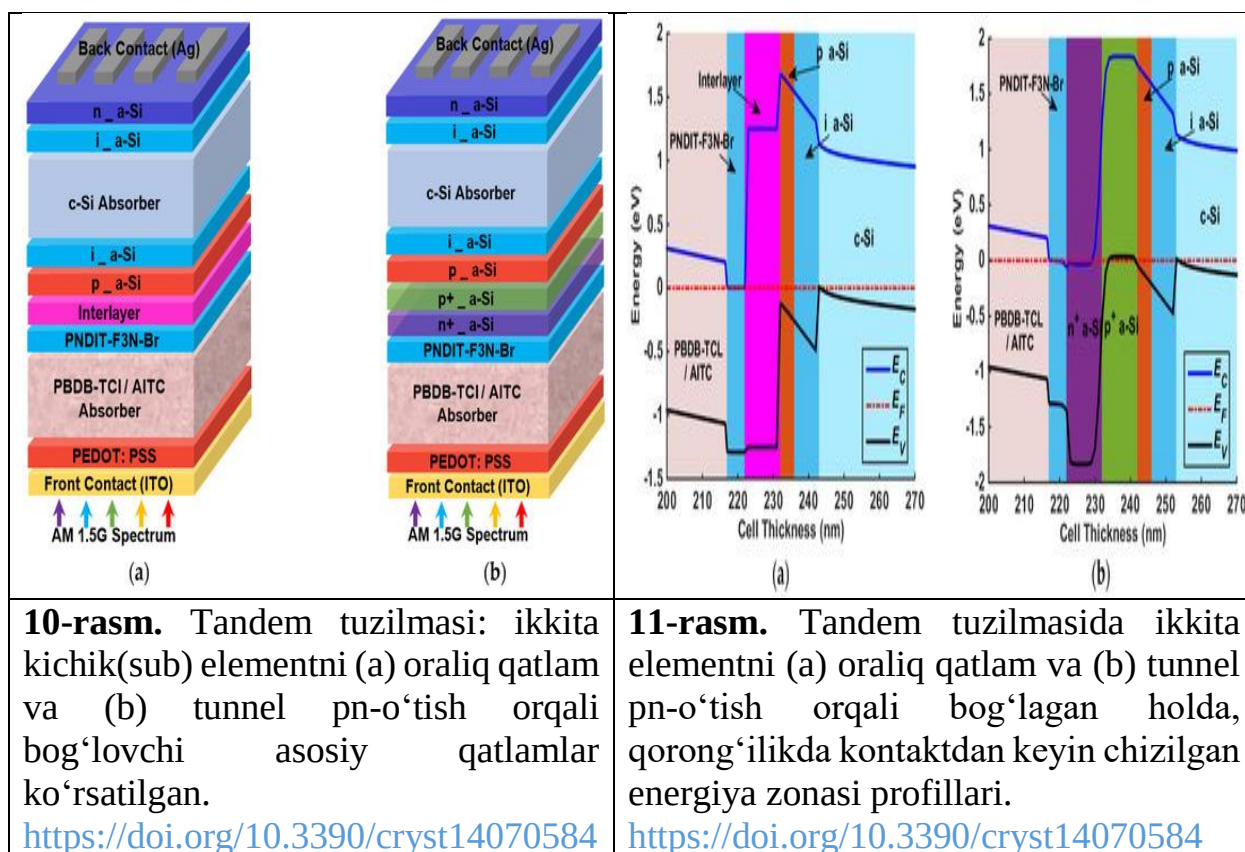
8-rasm. (a) Organik/a-Si gibrtd tandem quyosh elementining tuzilishi; (b) gibrtd tandem quyosh elementida ishlatiladigan kichik taqiqlangan zonali polimer PDPP3T ning kimyoviy tuzilishi; va (c) organik yupqa plyonka va a-Si yupqa plyonkaning normallashtirilgan yutilish spektrlari. DOI: [10.1039/c4ta02690j](https://doi.org/10.1039/c4ta02690j)



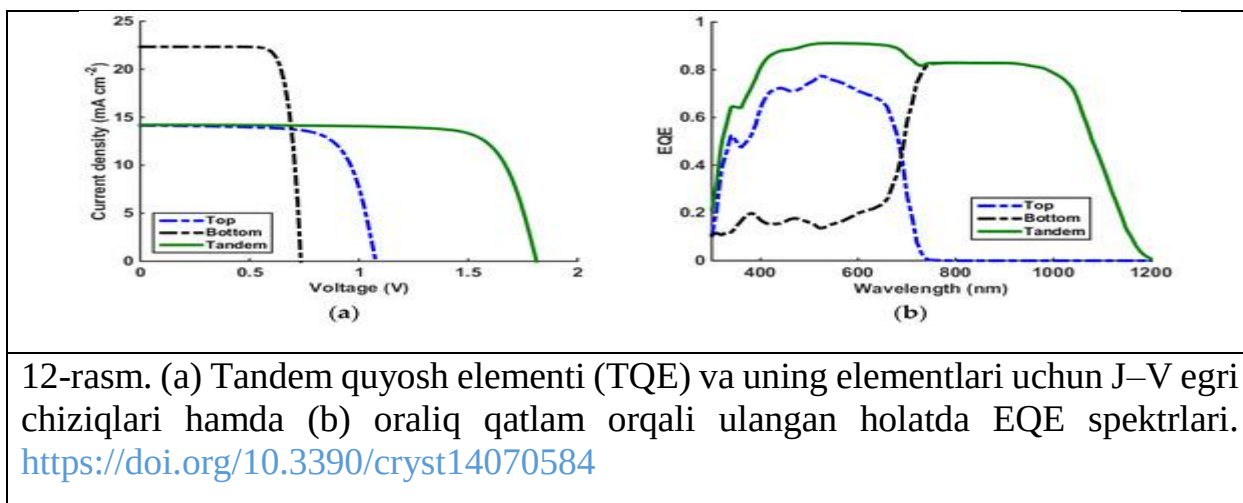
9-rasm. Organik/a-Si gibrtd tandem quyosh elementi uchun taxminiy energiya zonalari diagrammasi. ITO qatlamining ish funksiyasi SKPM (Scanning Kelvin Probe MicroQEopy) yordamida o'lchangan. DOI: [10.1039/c4ta02690j](https://doi.org/10.1039/c4ta02690j)

Ikki kichik(sub)-element

Taklif etilgan organik/Si tandem tuzilmasi 11-rasmda tasvirlangan. Loyihalashtirilgan strukturada keng turg'unlik zonasiga ega bo'lgan organik oldingi element tor turg'unlik zonasiga ega bo'lgan Si orqa element bilan birlashtirilgan. Ushbu tandem konfiguratsiyasida tarkibiy elementlar o'zaro bog'lovchi oraliq qatlam (10a-rasm) yoki tunnel pn-o'tish orqali (10b-rasm) bog'langan. Biz ikkala bog'lanish texnologiyasini ham o'rganib, ularning farqlarini ko'rsatdik. 11a va 11b-rasmlarda mos ravishda yuqori va pastki elementlar orasida oraliq qatlam va tunnel o'tish orqali ulanish holatlarida, qorong'ulikda tuzilgan energiya zonali profillari tasvirlangan.



Bundan tashqari, 12-rasmda yuqori, orqa va tandem elementlarning J–V egri chiziqlari (12a-rasm) hamda ularning EQE egri chiziqlari (12b-rasm) bo'yicha modellash natijalari tasvirlangan. 2-jadvalda esa barcha element parametrlari keltirilgan. Ushbu holatda tandem element quyidagi ko'rsatkichlarga ega: $J_{SC} = 14.2 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC} = 1.81 \text{ V}$, $FF = 77.54\%$, va $PCE = 20.03\%$.



2-jadval. Organik/kremniy tandem fotoelementlarining har xil ulanish usullari bilan modellashtirilgan parametrlari.

PV Parameters		J_{sc} (mA/cm^2)	V_{OC} (V)	FF (%)	PCE (%)
Interlayer	Top sub-cell	14.15	1.08	72.26	11.01
	Bottom sub-cell	22.34	0.73	80.48	13.20
	Tandem cell	14.22	1.81	77.75	20.03
Tunnel junction	Top sub-cell	14.32	1.08	72.23	11.14
	Bottom sub-cell	23.51	0.74	80.37	13.93
	Tandem cell	14.13	1.84	77.95	20.20

Rekord natija:

Rekord natijaga ega bo'lgan perovskit–kremniy tandem (~34.8%) katta salohiyatga ega ekanligini ko'rsatmoqda, biroq OQE–Si (organik-kremniy) tandem tizimlari hali amalda to'liq joriy etilmagan.

Tayyorlash texnologiyasi

Organik quyosh elementlari (OQE) turli ishlab chiqarish usullariga mosligi bilan ajralib turadi. Polimer asosli OQElar uchun eritmali usullar (masalan, spin-qatlamlash, pichoq yoki slot-die qoplama, inkjet bosma) keng qo'llaniladi, bu esa moslashuvchan modullarni roll-to-roll usulida ishlab chiqarishga imkon beradi. Ushbu usullarda donor/qabul qiluvchi aralashmasi erituvchida eritiladi va substratga qoplanadi; erituvchi tanlovi va quritish sharoitlari optimal fazaviy ajralish va kristallanishni ta'minlashda muhim ahamiyatga ega(10). Muqobil usul sifatida kichik molekulali OQElar uchun vakuum termal bug'lantirish ishlatiladi: material vakuumda qizdiriladi va substrat ustida yupqa plyonka holida

kondensatsiyalanadi(18). Masalan, Heliatek kompaniyasining qurilmalari har biri taxminan 5 nm bo'lgan vakuumda bug'latilgan oligomer qatlamlarini ishlatadi; bu usul orqali ingichka, bir jinsli qatlamlar yuqori takrorlanuvchanlik bilan hosil qilinadi(19).

Umumiy ishlab chiqarish bosqichlariga elektron yoki teshik bloklovchi oraliq qatlamni cho'ktirish (V_{oc} ni yaxshilash uchun) va qatlamdan keyingi pishirish (annealing) kiradi. Inkapsulyatsiya zarur, chunki organik materiallar kislorod va namlikka sezgir. Ishlab chiqarishda, Heliatek kabi kompaniyalar roll-to-roll sinov liniyalarini ishlab chiqdi: ularning birinchi ishlab chiqarish liniyasi (2012 yilda ishga tushirilgan) organik quyosh plyonkalarini sanoat hamkorlariga yetkazib bera boshlagan(20). Roll-to-roll bosma texnologiyasi arzon, keng maydonli OQE ishlab chiqarish uchun istiqbolli bo'lib, ayniqsa yengil va yarim shaffof ilovalar (masalan, binoga integratsiyalashgan quyosh panellari) uchun qulay hisoblanadi(11)(20).

Quvvat aylantirish samaradorligini (PCE) oshirish maqsadida OQElar turli strukturalarda tayyorlanadi (14-rasmda ko'rsatilgan).

- **Yagona aktiv qatlam (13A-rasm):** Anod (asos qatlam(substrat)da joylashgan) va katod orasida bitta aktiv qatlam joylashgan bo'ladi. **Jarayon:** aktiv qatlam anod/asos qatlam (substrat) ustiga cho'ktiriladi, so'ngra katod qo'shiladi. Bunday strukturada electron-g'ovak juftliklarning ajralish samaradorligi past bo'lgani uchun quvvat aylantirish samaradorligi (PCE) past bo'ladi.

- **Ikki qatlamli geteroo'tishli (13B-rasm):** Donor va akseptor qatlamlari anod (substratda) va katod orasida ketma-ket joylashtiriladi. **Jarayon:** donor anod ustiga cho'ktiriladi, so'ng akseptor va katod ketma-ket joylashtiriladi. Bu struktura interfeysda electron-g'ovak juftlik ajralishini yaxshilaydi, ammo electron-g'ovak juftliklarning diffuziya masofasi qisqa bo'lgani sababli, juda yupqa qatlamlardan foydalanishni talab qiladi.

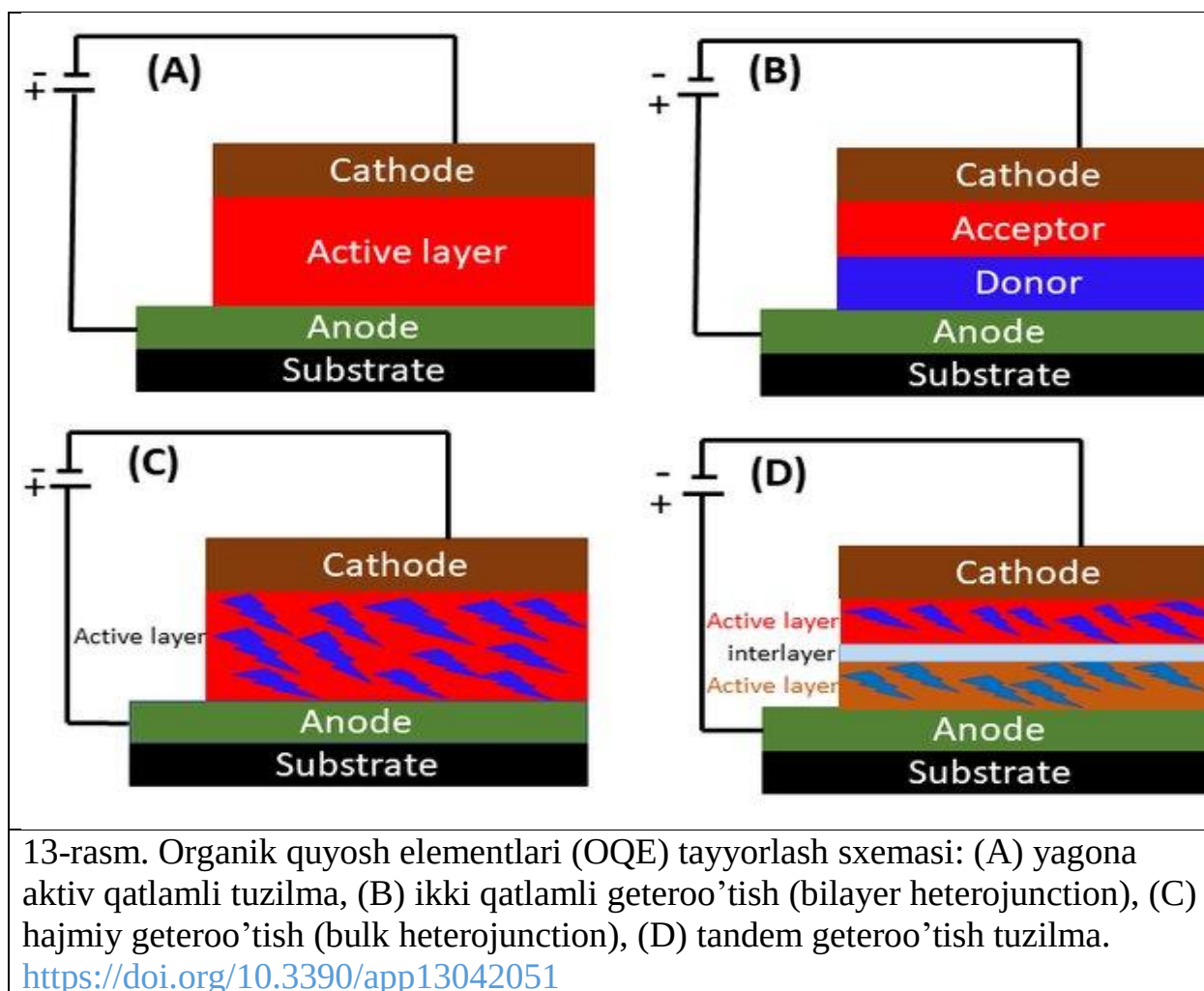
- **Ommaviy geteroo'tishli (bulk heterojunction) (13C-rasm):** Donor va akseptor moddalar aralashmasi anod (substratda) va katod orasida aktiv qatlam sifatida ishlatiladi. **Jarayon:** donor (masalan, P3HT) va akseptor (masalan, PCBM) moddalari aralashtiriladi, aralashma anod ustiga cho'ktiriladi, so'ngra katod qo'shiladi. Bu strukturada interfeys maydoni kengayadi, bu esa electron-g'ovak juftlik diffuziyasi va ajralishini yaxshilaydi hamda ~18% PCE ga erishiladi.

- **Tandem geteroo'tishli (13D-rasm):** Komplementar yutish spektrlariga ega ikki kichik element (sub-cell) anod (substratda) va katod orasida, oraliq qatlam bilan ajratilgan holda joylashtiriladi. **Jarayon:** birinchi aktiv qatlam anod ustiga cho'ktiriladi, so'ng oraliq qatlam, undan keyin ikkinchi aktiv qatlam va nihoyat katod qo'shiladi. Bu struktura kvazi-Fermi sathlarini moslashtiradi; keng spektrli yorug'likni yutishga imkon beradi va panjaraga moslik (lattice matching) talab etmasdan, oddiy va arzon ishlab chiqarish orqali amalga oshiriladi.

Umumiy geteroo'tish tuzilmalar uchun ishlab chiqarish bosqichlari quyidagilardan iborat:

- (i) foton yutilishi natijasida electron-g'ovak juftliklar hosil bo'ladi,
- (ii) electron-g'ovak juftliklar interfeysga diffuziyalanadi,

- (iii) interfeysda erkin zaryad tashuvchilarga ajraladi,
- (iv) ushbu zaryadlar elektrodlar orqali tashiladi va yig'iladi.



Samaradorlikni Hisoblash va Solishtirish

OQElar uchun muhim elektr parametrlar – ochiq doira kuchlanishi, qisqa tutashuv toki, maksimal quvvat nuqtasi, to'ldirish koeffitsienti, PCE va kvant samaradorlikdir. Ushbu parametrlarning o'zaro bog'liqligi klassik tok–kuchlanish (I–V) egri chizig'ida namoyon bo'ladi (15,16-rasmlar). PCE formulasi [14]:

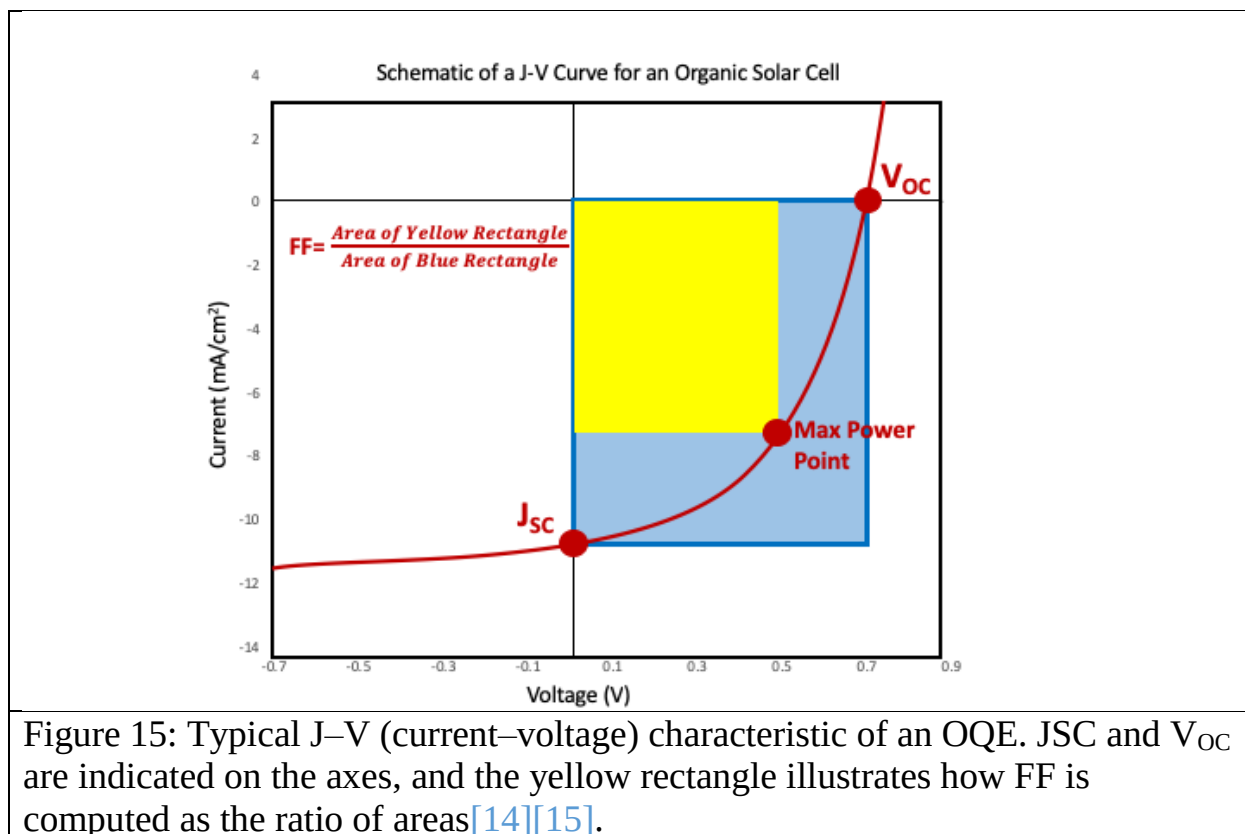
$$\eta = \frac{V_{OC} \times J_{SC} \times FF}{P_{in}}$$

OQElarga har qanday PV qurilmasida qo'llanadi. Masalan, agar $V_{OC}=0,9$ V, $J_{SC}=20$ mA/sm², $FF=0,70$ bo'lsa, $\eta \approx 12,6\%$ (100 mV/sm² nurda). Yangi va ilg'or elementlarda (2025-yil holatiga ko'ra) odatda $V_{OC} \sim 0,8-1,0$ V, $J_{SC} \sim 15-25$ mA/sm² va $FF \sim 0,75-0,80$ ko'rsatiladi[15][17]. Qurilmaning qator va paralel qarshiliklari ham I–V chizig'ining shakliga ta'sir ko'rsatadi: yomon plyonka sifati yoki yomon interfeyslar FF ni kamaytirib, samaradorlikni pasaytirishi mumkin.

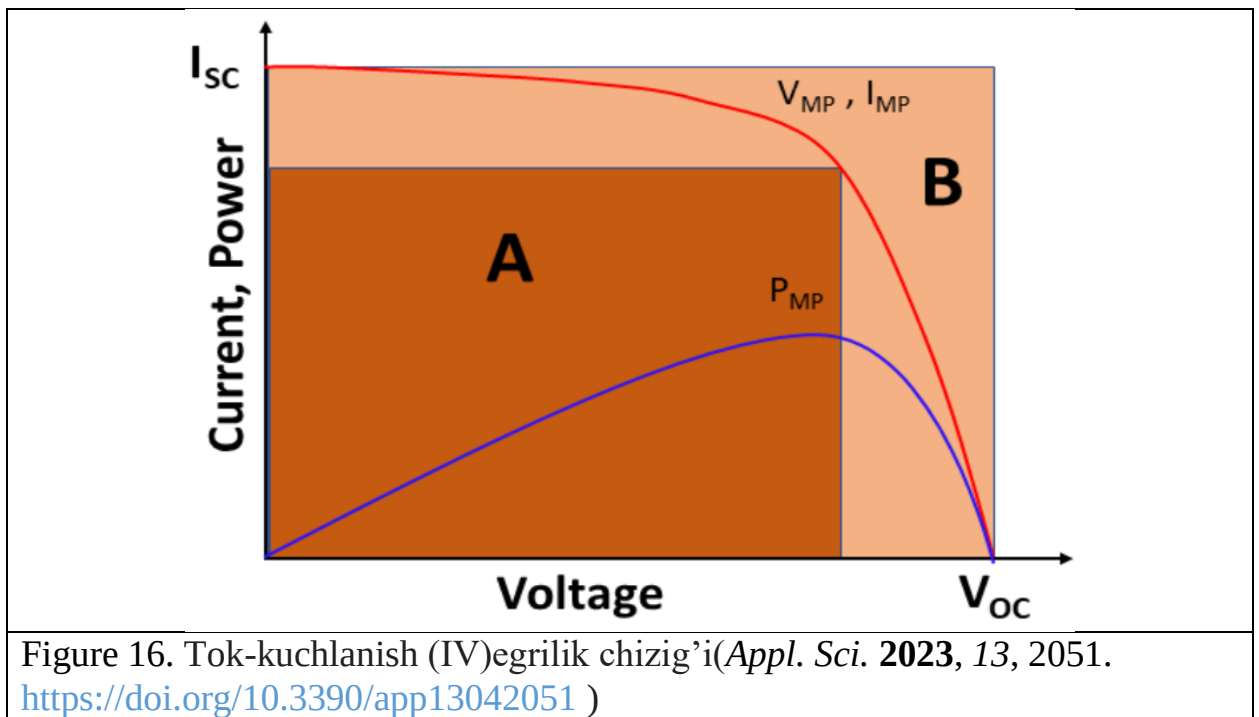
Eksperimental sharoitda J–V egri chiziqlari standart sinov sharoitlarida (AM1.5G spektri, 100 mW/cm²) o'lchanadi (15-rasm). Shuningdek, OQE qurilmalarining tashqi kvant samaradorligi (EQE) ham qo'llaniladi, u to'lqin

uzunligiga bog'liq fototok hosildorligini ko'rsatadi. Ushbu ikkala parametr birgalikda elementning ishlash ko'rsatkichlarini miqdoriy baholash imkonini beradi [3][13].

E'tiborlisi, tadqiqotchilar tomonidan 19% dan yuqori sertifikatlangan samaradorlikka ega OQE lar qayd etilgan: masalan, Chen va hammualliflar (2025) yagona p-n-o'tishli OQE da **20.82%** samaradorlikka erishgan [4], Sun va hammualliflar (2025) esa arzon polimer asosida **19.96%** samaradorlikni namoyish etgan [6].



Samaradorlikni baholaganda laboratoriya elementlari va tijorat modullari o'rtasidagi farqni inobatga olish zarur. Laboratoriya sharoitida OQElar ~20% PCE ko'rsatgan bo'lsa-da, dastlabki tijorat modullari (mas., Konarka) atigi 3–5% samaradorlikka erishgan va qisqa yashsh davriga ega bo'lgan[21]. Masalan, Heliatekning laboratoriya elementlari 12% natija bilan, rulonli surtilgan plyonka modullarida ~7–10% ga o'tdiv[22]. Umuman olganda, tijorat OQElari paxta ichki kiyimlar va binolar fasad elementlari kabi egiluvchanlik va kam yorug'likda ishlash imkonini talab qiladigan bozor segmentlariga yo'naltiriladi. Yuqoridagi jadvalda laboratoriya va sinov bosqichi natijalari ham kontekst uchun keltirilgan.



Samaradorlikni taqqoslash

Taqqoslashda laboratoriya o'lchamidagi elementlar bilan katta maydonli modullar/prototiplarni farqlash muhimdir. Laboratoriya darajasidagi OQE elementlar ~20% PCE ko'rsatkichlariga erishgan bo'lsa-da, tijorat modullari ancha past natijalarni qayd etgan.

- Dastlabki tijorat prototiplari (masalan, Konarka) ~3–5% samaradorlikka ega bo'lgan va qisqa umr ko'rgan [21].
- **Heliatek** laboratoriya elementlarida 12% samaradorlikka erishgan bo'lib, bu ko'rsatkich roll-coated modularda ~7–10% samaradorlikka aylangan [20][22].

Umuman olganda, tijorat OQE texnologiyasi yuqori samaradorlik rekordi uchun emas, balki moslashuvchanlik, egiluvchan substratlar, bino elementlariga integratsiya, past yoritilish sharoitida ishlash kabi afzalliklarga ega bo'lgan maxsus bozor segmentlariga yo'naltirilgan.

Kontekst uchun yuqorida keltirilgan jadvalda laboratoriya va pilot-masshtab natijalari birgalikda ko'rsatilgan.

Oxirgi Yutuqlar va Qo'llanmalar

~1,5 eV banqapli OQE uchun nazariy maksimal samaradorlik (Shockley–Queisser chegarasi) taxminan 30% ni tashkil etsa-da, amaliy maqsadlar biroz pastroq. Tadqiqotchilar yutilish diapazonini kengaytirish (masalan, tandem va uch tarkibli aralashmalar yordamida) va radiatsiya bo'lmagan yo'qotishlarni

kamaytirishga e'tibor qaratmoqda. Yangi, fullerenga o'xshamagan akseptorlar va qo'shimcha modifikatsiyalangan morfologiyalar ba'zi tizimlarda samaradorlikni ikki karra oshirishga imkon berdi[10]. Masalan, Chen va boshq. (Nature Materials, 2025) organik kristallanish regulyatoridan foydalangan holda 100–400 nm qalinlik oralig'ida 20,82% PCE ga erishdi[4].

OQElar yengillik, shaffoflik va mexanik egiluvchanlik talab etiladigan ilovalar uchun mos keladi. Ularning past haroratda ishlov berilishi plastmassa va to'qimachilik materiallariga integratsiya qilish imkonini beradi[11]. Materiallarning arzonligi hisobiga OQElarda ~10–15% PCE tijorat nuqtai nazaridan maqbul deb baholanadi[23]. Stabilitetni yaxshilash (mas., yaxshiroq himoya, yangi materiallar) bo'yicha ishlar davom etmoqda; OQElar laboratoriya tajribasidan haqiqiy mahsulotlarga (mas., quyosh bilan quvvat oluvchi devor qog'ozlari, PV fasad panellari) yo'l olmoqda[20][23].

Muhim Xulosalar

- OQElar organik donor–akseptor yarimo'tkazgichlariga asoslanadi; birinchi ikki qatlamli qurilma (Tang, 1987) atigi ~1% samaradorlikka ega bo'lgan[1].
- Zamonaviy OQElar hajmiy geterotuzulma aralashmalari va ilg'or materiallardan foydalanadi, hozirgi kunda esa 20% dan yuqori PCE natijalari qayd etilgan[4][6].
- Samaradorlik tok–kuchlanish egri chizig'i bilan belgilanadi: $\eta = (V_{OC} \cdot J_{SC} \cdot FF) / P_{in}$ [14], bu yuqorida tasvirlanganidek.
- Yuqoridagi jadval yilma-yil rekord OQE samaradorliklarini solishtirib, tez o'sib borayotgan tendentsiyani ko'rsatadi[5].
- OQElar boshqa PV texnologiyalari bilan tandem qilish orqali umumiy quvvatni oshirish imkoniyatiga ega (mas., perovskit yoki kremniy bilan) [8][11].
- Ishlab chiqarishda eritma bosib chiqarish va vakuum bilan bug'latish usullari qo'llaniladi; masalan, Heliatek kompaniyasi roll-to-roll usulida OQE plyonkalarini muvaffaqiyatli ishlab chiqargan[19][20].

Foydalanilgan adabiyotlar:

- Babar, S. (2020). *Tris(8-Hydroxyquinolate) Metals for Solution-Processed Organic Solar Cells*. arXiv preprint[1].
- **Wikipedia:** *Organic solar cell* (accessed 2025) – article on OQE principles, I–V analysis, and history[14][15].
- Sun, C.-K. *et al.* (2025). “Breakthrough in low-cost organic solar cells: new low-cost polymer hits record 19.96% efficiency,” *Science China Chem.* (news release)[6].
- Chen, H. *et al.* (2025). “Organic solar cells with 20.82% efficiency and high tolerance of active layer thickness through crystallization sequence manipulation,” *Nature Mater.* 24, 444–453[4].
- Jowett, P. (2025). “Scientists fabricate all-organic solar cell with record 8.7% efficiency,” *PV Magazine* (news, May 2025)[7].
- **Wikipedia:** *Organic solar cell – Use in tandem photovoltaics* (2025) – discusses hybrid tandem concepts[11].
- NUS News (2025). “NUS researchers achieve record-setting perovskite–organic tandem solar cell (26.4% PCE),” National University of Singapore press release[8][9].
- Le Séguillon, T. (2013). “Heliatek achieves 12% organic solar cell efficiency,” *Optics.org* (Jan 23, 2013)[5][19].
- Zhang, R. *et al.* (2024). “Equally high efficiencies of organic solar cells processed from different solvents reveal key factors for morphology control,” *Nature Energy* 10, 124–134[3].

[1] TRIS (8-HYDROXYQUINOLINATE) METALS FOR SOLUTION PROCESSED ORGANIC SOLAR CELLS

<https://arxiv.org/pdf/2007.12734>

[2] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [21] [23] Organic solar cell - Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_solar_cell

[3] [10] Equally high efficiencies of organic solar cells processed from different solvents reveal key factors for morphology control | Nature Energy

[https://www.nature.com/articles/s41560-024-01678-](https://www.nature.com/articles/s41560-024-01678-5?error=cookies_not_supported&code=72c830b6-b118-4c50-a689-3fa3dd9d3e4c)

[5?error=cookies_not_supported&code=72c830b6-b118-4c50-a689-3fa3dd9d3e4c](https://www.nature.com/articles/s41560-024-01678-5?error=cookies_not_supported&code=72c830b6-b118-4c50-a689-3fa3dd9d3e4c)

[4] Organic solar cells with 20.82% efficiency and high tolerance of active layer thickness through crystallization sequence manipulation | Nature Materials

[https://www.nature.com/articles/s41563-024-02062-](https://www.nature.com/articles/s41563-024-02062-0?error=cookies_not_supported&code=b90a2e7e-87b4-47fe-bf49-837e497ee3c6)

[0?error=cookies_not_supported&code=b90a2e7e-87b4-47fe-bf49-837e497ee3c6](https://www.nature.com/articles/s41563-024-02062-0?error=cookies_not_supported&code=b90a2e7e-87b4-47fe-bf49-837e497ee3c6)

[5] [19] [20] [22] Heliatek achieves 12% organic solar cell efficiency

<https://optics.org/news/4/1/36>

[6] Breakthrough in low-cost organic solar cells: new low-cost polymer hits record 19.96% efficiency with industrial promise | EurekAlert!

<https://www.eurekalert.org/news-releases/1084938>

[7] Scientists fabricate all-organic solar cell with record 8.7% efficiency – pv magazine International

<https://www.pv-magazine.com/2025/05/02/scientists-fabricate-all-organic-solar-cell-with-record-8-7-efficiency/>

[8] [9] Boosting solar efficiency: NUS researchers achieve record-setting perovskite tandem solar cell with novel NIR-harvesting molecule

<https://news.nus.edu.sg/nus-researchers-achieve-record-setting-perovskite-tandem-solar-cell/>

VII Bob

8. SHAFFOF QUYOSH ELEMENTLARI

Kirish

Quyosh fotovoltaik (PV) texnologiyasi bir necha avloddan o'tgan bo'lib, har bir avlod samaradorlikni oshirib, qo'llanilish sohasini kengaytirdi. **Birinchi avlod** quyosh elementlari monokristalli kremniy (c-Si) plastinalariga asoslangan bo'lib, bu texnologiya bugungi bozorda ustun o'rinni egallab turibdi, chunki kremniy ko'p va uning ishlab chiqarish jarayonlari yaxshi o'rganilgan. **Ikkinchi avlod** PV yupqa qatlamli materiallar (masalan amorf kremniy, CdTe, CIGS)ni kiritildi; mazkur avlod quyosh elementlari ishlab chiqarishda material sarfini kamaytirib, egiluvchan dizaynlarni yaratishga imkon beradi. **Uchinchi avlod** quyosh elementlarida ko'p bo'g'inli (multijunction) qurilmalar paydo bo'ldi, bunda turli to'lqin uzunliklarida faol bo'ladigan bir nechta yarimo'tkazgich qatlamlari Quyosh spektrni kengroq qamrab olish uchun ustma-ust joylashtiriladi. Masalan, tandem bog'lanishlar (masalan kosmik quyosh elementlarida GaInP/GaAs/Ge) qo'llanilishi natijasida ushbu qurilmalar konsentratsiyalangan nur sharoitida taxminan 47% rekord samaradorlikka erishdi[1].

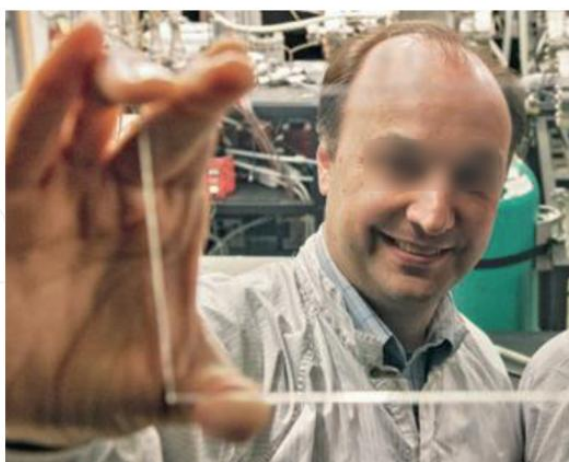
Ko'p diapazonli nurlarni yutilishga intilish shuni ko'rsatdiki, quyosh spektrini turli maxsus qatlamlarga ajratish yagona bo'g'inli Shockley–Queisser chegarasidan (~33% bitta diapazon uchun) ancha yuqori samaradorlikni ta'minlaydi. Ushbu tarixiy samaradorlik izlanishlari 3- va 4-avlod kontseptsiyalarining doirasida shaffof quyosh texnologiyalari uchun poydevor yaratdi[2]. Shaffof quyosh elementlari (SHQE, TSC(transparent solar cells)) – bu katta samaradorlikni oshirishdan ko'ra, energiya konvertatsiyasi va optik shaffoflikni muvozanatlashtirishga yo'naltirilgan yangi yo'nalishdir. Shaffof PV g'oyasi oynalar, shisha fasadlar, transport oynalari va elektron ekranlar kabi ko'z bilan ko'rilmaydigan sirtlar orqali quyosh energiyasini integratsiya qilish zaruriyatidan kelib chiqqan. An'anaviy quyosh panellari qalin bo'lib(shaffof emas), o'rnatish uchun maxsus maydonini talab qiladi; bu esa zich qurilgan shahar hududlarida ularni keng qo'llashni cheklaydi. Tadqiqotchilarning hulosasiga ko'ra, SHQE (TSC) texnologiyalari yordamida har qanday oynani(bino oynalari, issiqxona tomlari, avtomobil oynalari, qurilma ekranlari) energiya ishlab chiqaruvchi yuzaga aylantirish imkoniyatini yaratadi[3]. Masalan, faqat AQShda taxminan 5–7 milliard kvadrat metr shisha yuzasi mavjud bo'lib, agar uning bir qismini shaffof quyosh qoplamalari bilan qoplash mumkin bo'lsa, bu milliy elektr energiya ehtiyojining sezilarli qismini qoplash imkonini beradi[4]. Shunday qilib, shaffof quyosh elementlarini ishlab chiqish ham texnologik qiyinchilik, ham asosiy funksiyasini o'zgartirmasdan mavjud har qanday sirtlarga (ko'rinish va yorug'likni ta'minlash orqali) toza energiya ishlab chiqarishni imkonini beradi.

Rivojlanish tarixi

Shaffoflik konsepti avvalgi yutuqlar asosida rivojlangan. 1990-yillarda O'Regan va Grätzel tomonidan ishlab chiqilgan bo'yoqqa sezgir quyosh elementlari (DSSC) yarim shaffof va rangli PV imkoniyatini taqdim etdi, biroq ularning samaradorligi o'rtacha edi. Keyinchalik organik va gibrid perovskite quyosh elementlari (ko'pincha to'rtinchi avlod PV deb ataladi) juda ingichka faol qatlamlar qisman shaffof bo'lishi mumkinligini ko'rsatdi. 2010-yillarda MIT va Michigan State University (MSU) tadqiqotchilari ushbu g'oyalarni rivojlantirib, yorug'likning ko'rinuvchi qismini o'tkazib yuborib, faqat ultrabinafsha (UB, UV(ultraviolet)) va infraqizil (IQ, IR(infrared)) fotonlarni yutadigan quyosh elementlarini yaratdi; natijada qurilma inson ko'zi uchun deyarli ko'rinmas holatda bo'ldi[4]. Bu yondashuv ilgari "ko'rinarli" PV urinishlardan tubdan farq qiladi: oldingi harakatlar odatda monokristalli kremniy elementlarini (bo'sh joy) bir-biridan ajratib(uzoqlashtirib) yoki ingichkalashtirib ishlatish bilan cheklangan edi – bular samaradorlikni e'tibor bermasdan, faqat shaffoflikni ta'minlagan edi. Yangi avlod shaffof quyosh elementlarida esa ko'rinmaydigan spektr qismlarini egallovchi yangi materiallar va dizaynlar qo'llaniladi; ya'ni yorug'likning ko'rinadigan qismini(spekterini) o'tkazib, faqat UV va IR nurlarni yutib turadi. Asosiy maqsad – fotonlarni faqat ko'rinmaydigan spektrdan olish orqali elementini shaffof saqlagan holda energiya ishlab chiqarishdir.

Shaffof quyosh elementlarining ishlash prinsiplari

Shaffof quyosh elementlari material va qurilish arxitekturasini orqali ko'rinmaydigan (UV va IR) yorug'likni elektrga aylantirib, ko'rinadigan yorug'likni minimal yo'qotish bilan o'tkazadigan printsiplarga asoslanadi. Masalan, ba'zi qurilmalar maxsus yarimo'tkazgichlar yordamida to'g'ridan-to'g'ri fotovoltaiik konvertatsiya qiladi, boshqalari esa luminoforli aylantirish va nur yo'naltirish usullaridan foydalanadi. Natijada shaffofderaza yoki ekran ortida joylashtirilsa ham, bu qurilmalar "ko'rinmas" tarzda quvvat hosil qiladi.



1-rasm. Shaffof Quyosh panellari. DOI:
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.110062>

Tadqiqotchilar shisha PV elementlarini yaratishga harakat qilish o'rniga, TLSC (transparent luminescent solar concentrator) – shaffof luminesent quyosh konsentratorini ishlab chiqdilar[4]. Shaffof quyosh panellari shishaga o'xshash shaffof luminesent konsentrator qatlamini ishlatadi, chunki u tabiatan shaffofdir. Bu qurilma energiya mo'ljallangan UV va IR spektr qismlarini yutishi uchun organik molekulalardan foydalanadi. Organik molekulalarning elektronlari nurlanish energiyasi bilan eksitlanib, yuqori energetik orbitalga sakraydi. Ular normal holatga qaytganda, energiya IR nurlanishi (yorug'lanish yoki porlash ko'rinishida) sifatida ajraladi, bu energiya ko'rinmaydigan bir to'lqin uzunlikda bo'ladi. Ushbu chiqarilgan IR nurlari plastmassa chetlariga yo'naltiriladi, u yerdagi an'anaviy quyosh elementlari (masalan, oynaning ramkasidagi ingichka element tasmlari) ularni elektr energiyasiga aylantiradi. Bu texnologiya avtomobil oynalari, bino oynalari, mobil telefonlar va boshqa shaffof yuzali qurilmalarda qo'llanishi mumkin. Hozirda uning tijoratlashtirishni cheklovchi omili samaradorligining atigi taxminan 1% atrofida bo'lishi hisoblanadi.

Organik tuzlar IR va UV nurlarni yutib, ularni IR to'lqin uzunliklarida qayta chiqaradi (agar jarayonlar ko'rinmaydigan spektrda sodir bo'lsa). Shu sababli qurilma ko'rinmasdek ko'rinadi. TLSC organik tuzlardan tashkil topgan bo'lib, ular maxsus UV va IR nurlarni yutadi, so'ngra ularni boshqa ko'rinmaydigan to'lqin uzunlikda nur (luminesent yorug'lik) sifatida chiqaradi. Bu to'lqin uzunligi derazaning chetidagi ingichka PV element bo'laklariga yo'naltiriladi va u yerda elektr energiyasiga aylantiriladi. Bunday shaffof quyosh panellarini ommaviy ishlab chiqarish natijasida samaradorlik taxminan 10% ga yetishi mumkin, bu esa har bir uy yoki ofis binosining derazasidan elektrtoki olish imkonini beradi va inqilobiy natija keltirishi mumkin[4].

Shaffof quyosh panellari ikkita toifaga bo'linadi: (i) qisman shaffof quyosh panellari va (ii) to'liq shaffof quyosh panellari. (i) Qisman shaffof panellarga misol tariqasida germaniyalik Heliatek GmbH tomonidan ishlab chiqilgan texnologiya kiradi; bu panel kiruvchi quyosh nurining taxminan 60% ni yutadi va taxminan 7.2% (FIK)ni energiyaga aylantirish samaradorligini ko'rsatadi. Biroq, quyosh energiyasi hosil qilish miqdori o'tkaziladigan va yutiladigan yorug'lik miqdorini moslab oshirilishi mumkin; masalan, janubga qaragan oynali binolar o'tkaziladigan yorug'likni kamaytirib, quvvat hosilini ko'paytiradi. (ii) To'liq shaffof panellarga AQShning Michigan State University olimlari tomonidan yaratilgan namuna kiradi; ular oddiy oynaga juda o'xshash to'liq shaffof PV oynalarni yaratishga erishdilar va taxminan 10% (FIK) energiya aylantirish samaradorligiga erishdilar. Kattaroq yoki ko'proq derazalar ko'proq energiya quvvatini ishlab chiqarishi mumkin[4]. Hozirgi vaqtda Michigan State University va MIT tadqiqchilari, shuningdek Brite Solar, Physee va Ubiquitous Energy kabi ishlab chiqaruvchilar shaffof quyosh panellari texnologiyasi bo'yicha ilg'or izlanishlar olib bormoqda (1-rasmga qarang). Ubiquitous Energy kompaniyasi 9,8% energiya aylantirish samaradorligiga erishgan va to'liq energiya mustaqilligiga ega binolarni (ya'ni, "net-zero energy buildings") yaratish yo'lida ishlamoqda [4].

Ta'rifga ko'ra, shaffof quyosh elementi ko'rinadigan yorug'likning o'tishini sezilarli darajada kamaytirmasdan, quyosh nurlaridan elektr energiyasi hosil qilishi kerak. Bu esa quyosh elementlari texnologiyasi uchun muhim muammo tug'diradi: an'anaviy quyosh elementlari fotonlarni yutib, elektron-teshik juftlarini hosil qilish orqali ishlaydi. Shunday ekan, shaffof elementlar ko'rinadigan spektrdagi fotonlarni yutishdan voz kechishi yoki ularni ko'rinmaydigan shaklda qayta chiqarish usulini topishi lozim. Shaffoflikka erishish uchun ikki asosiy strategiya mavjud:

- **Tanlab yutish asosida shaffof quyosh panellari:** An'anaviy quyosh panellaridan farqli ravishda, bunday panellar ko'rinadigan yorug'likni to'liq yutmaydi. Ular inson ko'zi uchun ko'rinmaydigan ultrabinafsha (UV) va infraqizil (IR) nurlarni tanlab yutadi va ularni elektr energiyasiga aylantiradi. Quyosh nuri shaffof quyosh oynasi orqali o'tadi, ammo bu panelda yorug'lik yutilishi o'ziga xos tarzda sodir bo'ladi. Qurilma ko'rinmas spektr qismini faol ravishda yutib, ko'rinadigan qismini o'tkazib yuboradi. Bu sababli panel shaffof ko'rinishda bo'ladi.
- **Luminesent pastga konversiya (yoki qayta nurlanish):** Ushbu yondashuvda kiruvchi ko'rinadigan yorug'lik to'g'ridan-to'g'ri elektr zaryadlarini hosil qilish uchun yutilmaydi. Buning o'rniga, shaffof muhit (odatda polimer yoki shisha) luminesent markazlar (organik bo'yoqlar, kvant nuqtalar va boshqalar) bilan to'yingan bo'ladi. Ular UV yoki yuqori energiyali ko'rinadigan nurni yutib, uni uzunroq to'lqin uzunligida (odatda IR spektrida) qayta chiqaradi. Ushbu qayta chiqarilgan nur to'lqin yo'naluvchanligi orqali qurilma chetlariga yo'naltiriladi va u yerda yashirin PV tasmalari (masalan, oynaning rom qismidagi an'anaviy quyosh elementlari) tomonidan yutiladi. Bu — **transparent luminescent solar concentrator (TLSC)** printsipiga asoslanadi [1]. Bu jarayonda deraza o'zi yorug'lik yig'uvchi yo'naltiruvchi sifatida ishlaydi: u deyarli shaffof bo'lib qoladi, chunki luminesensiya asosan ko'rinmas to'lqin uzunliklarini qamrab oladi. Ko'rinadigan fotonlar qurilma orqali to'g'ridan-to'g'ri o'tadi yoki ba'zi dizaynlarda ular ham ko'rinadigan to'lqin sifatida qayta chiqariladi, natijada vizual tiniqlik saqlanadi. Bu yondashuvning cheklovi shundaki, barcha yutilgan energiya chetdagi elementlarga yetib bormaydi — bir qismi qayta nurlanish yoki yo'naltirishda yo'qotiladi. Natijada umumiy samaradorlik nisbatan past bo'lishi mumkin. Dastlabki TLSC prototiplari atigi ~1% samaradorlik bilan ~86% shaffoflikka erishgan edi [1]. Shunga qaramay, bu texnologiya katta maydonli oynalarga mos bo'lishi va arzon organik tuzlar yoki bo'yoqlardan foydalanishi sababli, yirik yuzalarda arzon elektr energiyasi ishlab chiqarish uchun istiqbolli hisoblanadi. Tadqiqotchilarning ta'kidlashicha, luminesens markazlarini sozlash va yo'naltirishni yaxshilash orqali TLSC texnologiyalari sanoat miqyosida ~10% gacha samaradorlikka yetishi mumkin [1]. Bu esa zamonaviy shaharlardagi ulkan shisha yuzalarni hisobga olgan holda inqilobiy natija bo'ladi.

Qanday strategiya qo'llanmasin, barcha shaffof quyosh elementlari shaffof elektrodnlarni o'z ichiga olishi lozim. An'anaviy kremniy elementi old yuzasida o'tkazmaydigan metall panjaraga ega bo'ladi; shaffof qurilmalarda esa old va orqa kontaktlar ham shaffof o'tkazgichlar (masalan, indiy-oqsimob oksidi — ITO yoki grafenga asoslangan qatlamlar) bo'lishi maqsadga muvofiqdir [4]. Bu yorug'likning kirib chiqishini minimall to'siq bilan ta'minlaydi. Ba'zi dizaynlarda agar elektrod qurilma chetida joylashgan bo'lsa yoki ko'rish qiyofasiga sezilarli ta'sir qilmaydigan tarzda naqshlangan bo'lsa, u o'tkazmaydigan bo'lishi mumkin (masalan, oynaning perimetri bo'ylab tor kontakt tasmalari). To'liq shaffof elementlarda esa odatda shaffof o'tkazuvchi oksidlar yoki ultra yupqa metall plyonkalar elektrod sifatida qo'llaniladi.

Yana bir muhim ko'rsatkich bu O'rtacha Ko'rinadigan Yorug'lik O'tkazuvchanligi (Average Visible Transmittance, AVT) bo'lib, u qurilma orqali o'tadigan ko'rinadigan yorug'lik miqdorini (inson ko'zining to'liq uzunligiga bo'lgan sezuvchanligi bilan og'irlangan holda) foizda ifodalaydi. Mukammal tiniq oynaning AVT qiymati taxminan 100% bo'ladi, holbuki qora tusli oynada bu ko'rsatkich 50% atrofida bo'lishi mumkin. Shaffof fotovoltaik (PV) qurilmalar odatda 50% yoki undan yuqori AVT darajasiga erishishni maqsad qilgan. Biroq bu yerda tabiiy samaradorlik-shaffoflik muvozanati mavjud: shaffoflik ortgani sari (ya'ni oynaning tiniqligiga yaqinlashgani sari), quyosh nurlari energiyaga aylantirilish ehtimoli pasayadi, ya'ni ko'proq yorug'lik o'tkaziladi va kamroq yutiladi[19]. Shu sababli, ko'plab qurilmalar yarim shaffof shaklda ishlab chiqiladi — bu holda ko'rinadigan yorug'likning bir qismi yutiladi yoki qurilmaning o'zi biroz rangli bo'ladi, lekin bu yondashuv samaradorlikni oshirishga xizmat qiladi. Masalan, yorug'likning 50% qismi o'tkaziladigan, qolgan 50% esa yutiladigan qisman shaffof quyosh elementlari to'liq shaffof qurilmalarga qaraganda ancha yuqori samaradorlikka ega bo'ladi, garchi ular tashqi ko'rinishda biroz rangli tuyulsa-da. Keyingi bo'limlarda turli texnologiyalar uchun aniq ko'rsatkichlarni taqqoslaymiz.

Qurilma ishlash printsiptini umumlashtiradigan bo'lsak: shaffof quyosh elementlari inson ko'ziga ko'rinmaydigan nurlanish (UV va IR) ni yutib, uni elektr energiyasiga aylantira oladigan materiallar va arxitekturaviy yechimlardan foydalanadi. Shu bilan birga, ular ko'rinadigan yorug'likni minimal yo'qotish bilan o'tkazib yuboradi. Ba'zi qurilmalar ushbu natijaga to'g'ridan-to'g'ri fotovoltaik aylanish orqali erishadi (maxsus yarimo'tkazgichlar yordamida), boshqalari esa luminesent konversiya va yorug'lik yo'naltiruvchilardan foydalanadi. Natijada, oynaga yoki displeyga o'rnatilgan bunday qurilma fon rejimida — ko'zga ko'rinmas tarzda — energiya ishlab chiqaradi. Keyingi bo'limlarda biz shaffof quyosh elementlarining asosiy turlarini tasniflab, har birining bu printsiplarni amalda qanday qo'llashini ko'rib chiqamiz.

Shaffof Quyosh Elementlari Texnologiyalarining tasnifi

Turli yondoshuvlar yordamida shaffof yoki yarim shaffof quyosh elementlari yaratilgan. Ular faol materiallari va ishlash mexanizmlariga ko'ra tasniflanadi. Asosiy toifalarga quyidagilar kiradi: shaffof luminesent quyosh konsentratorlari

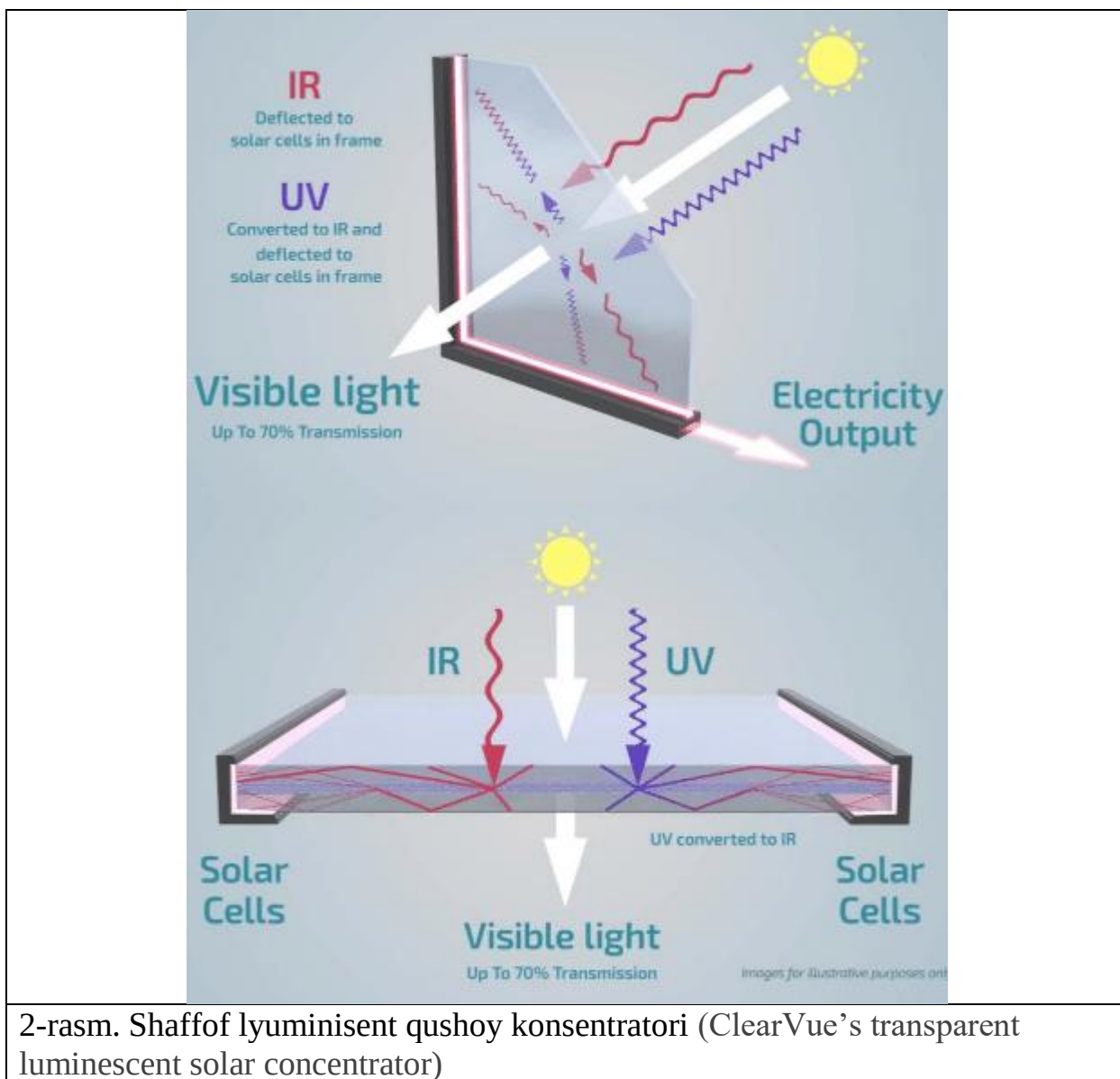
(TLSC), bo'yoqqa sezgir quyosh elementlari (DSSC), perovskit asosidagi shaffof elementlar, polimer (organik) quyosh elementlari, kvant nuqta asosidagi elementlar va kristalli kremniy shaffof elementlar. Har bir tur shaffof quyosh elementlar o'ziga xos ishlash prinsiplari, afzalliklari va cheklovlariga ega.

Shaffof luminesent quyosh konsentratorlari (TLSC)

TLSClar eng intuitiv ravishda "shaffof" PV qurilmalardir, chunki ular shisha yoki plastinka kabi toza ko'rinishga ega bo'lib, yorug'likni yutuvchi molekulalar bilan to'ldirilgan. TLSCda deraza yoki uning ustidagi polimer qatlamiga UV va/yoki yuqori energetik ko'rinadigan nurni yutib, ularni infraqizil spektrda qayta chiqaruvchi materiallar kiritilgan. Qayta chiqarilgan nur oynaning chetidagi ingichka PV elementlarining tasma-siga yo'naltirilib, u orqali oqib keladi[1]. Derazaning asosiy qismi ko'zga deyarli shaffof ko'rinadi, chunki bu lumino-forlar ko'rinadigan yorug'likni yutmaydi (yoki faqat noaniq rang tus beradi).

Misollar va samaradorlik: TLSClar bo'yicha dastlabki tajribalarni Richard Lunt va hamkasblari olib bordi. 2014-yilda MSU jamoasi oddiy oynani quvvat manbaiga aylantiruvchi to'liq shaffof luminesent konsentrator qurilishini e'lon qildi[1]. Bu qurilma inson ko'ziga deyarli 100% shaffof bo'lib, asosiy e'tibor faqat UV (quyosh energiyasining kichik fraksiyasi) yutilishiga qaratilgani uchun o'rtacha ~1% samaradorlikka ega edi[14]. Keyingi yillarda samaradorlik biroz oshirildi. Masalan, Ubiquitous Energy kompaniyasi tomonidan ishlab chiqilgan yirik TLSC oynasi organik bo'yoqlar yordamida UV/IR spektr qismlarini yutib, ~50% shaffoflikda taxminan 3–5% samaradorlikni ko'rsatdi[5]. Avstraliyadagi ClearVue kompaniyasi anorganik nanozarra metodini qo'llab, IR nurlarni oynaning chetiga yo'naltiruvchi tuzilmani yaratdi; ularning ikkinchi avlod panellari taxminan 30 W/m² (~3% samaradorlik) quvvat bilan, ~70% ko'rinadigan shaffoflikni saqlab ishlab berdi[6]. ClearVue'ning yangi "Solar Vision" oynasi esa ~5% umumiy samaradorlik va yuqori shaffoflikni birlashtirishni maqsad qilgan[6].

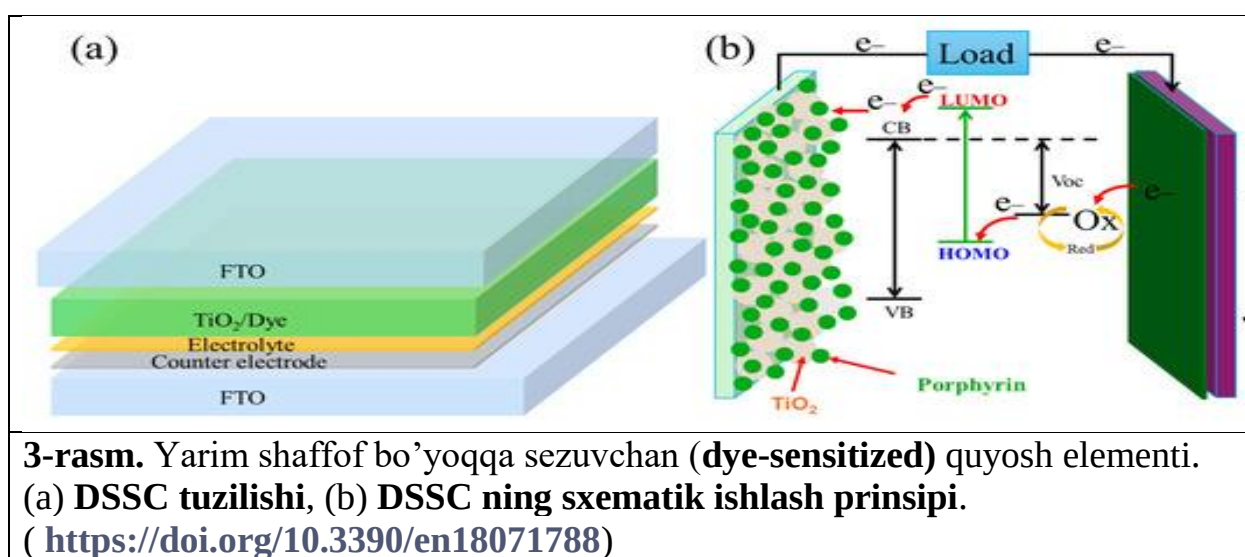
Turli-bosh qiyoslama: TLSClarning(Figure 2) eng yoqimli taraflaridan biri – ularni keng o'lchamli derazalarda qo'llashdagi qulaylik, chunki lumino-for moddalar bilan ishlov berilgan katta shisha panellar an'anaviy deraza ishlab chiqaruv jarayonlariga mos keladi. Shuningdek, dizayn jihatidan moslashuvchan: bo'yoq yoki kvant nuqta kontsentratsiyasini o'zgartirish orqali shaffoflik va quvvat hosil qilish o'rtasida tanlov qilish mumkin. Ozgina bo'yoq qo'shilgan qisman shaffof qurilmalar (masalan, himoya oynalari bilan quvvat ishlab chiqaradigan oynalar) ham sinovdan o'tkazilgan. Ammo TLSClar uchun muayyan chegaralar mavjud: Stoks poloshi va qayta chiqarish yo'qotishlari tufayli barcha yutilgan fotonlar chetga yetib bormaydi, shuningdek yutiladigan spektr qismi cheklangan. Yuqori shaffoflik (80–90% AVT)da samaradorlik ko'pincha 1–2% atrofida bo'lib qoladi[1]. Hozirgi kunda yangi lumino-for materiallarini (masalan, infraqizil spektrni kengroq qamrab olish qobiliyatiga ega nanokristallar yoki noyob yer elementlarini) izlash davom etmoqda, bu esa kelajakda samaradorlikni yaxshilashga yordam berishi mumkin.



Samaradorligi nisbatan past bo'lishiga qaramay, **TLSC (Transparent Luminescent Solar Concentrator)** texnologiyasi **bino integratsiyalashgan fotovoltaika (BIPV)** uchun katta istiqbollarni va'da qilmoqda, chunki ularning estetik jihatlari tengsiz – binolar an'anaviy shisha ko'rinishini saqlagan holda elektr ishlab chiqaruvchi shaffof oynalarga ega bo'lishi mumkin. TLSC texnologiyasi shuningdek, boshqa tizimlar bilan birgalikda ham qo'llanilishi mumkin: masalan, TLSC oynasi yorug'likni chetki qismlarga jamlaydi, bu joylarda yuqori samarali ko'p elementli (multijunction) elementlar joylashtirilgan bo'lishi mumkin. Bu esa yorug'likni jamlash va spektral ajratish konsepsiyalarining uyg'unlashuvi bo'ladi. Xulosa qilib aytganda, TLSC'lar shaffof PV texnologiyasining bir chekkasini ifodalaydi: maksimal shaffoflik va funksionallik, hozirda samaradorlik ikkinchi o'rinda turadi, biroq material sohasidagi yutuqlar bilan u ham oshishi kutilmoqda.

Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC)

Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) — bu yaxshi o'zini isbotlagan uchinchi avlod PV texnologiyasi bo'lib, yarim shaffof va hattoki rangli shaklda ishlab chiqarilishi mumkin. Bu ularni tabiiy ravishda shaffof yoki yoritilgan (translyutsent) qo'llanmalarga moslashtiradi. DSSC odatda quyidagi komponentlardan tashkil topgan bo'ladi: g'ovakli titanium dioksid (TiO_2) nanopartikula qatlami, yorug'lik yutuvchi bo'yoq, elektrolit (yoki qattiq holatdagi teshik tashuvchi material) va qarshi elektrod. An'anaviy (notiniq) DSSC'lardagi orqa qatlam ko'pincha yorug'likni qayta aks ettirish uchun reflektor bilan qoplangan bo'ladi. Biroq shaffof yoki ikki tomonli (ikki tomonli DSSC) qurilmalarda ikkala elektrod ham shaffof o'tkazgichlardan iborat bo'ladi (masalan, fluor bilan doplangan qalay oksidi shisha), bu esa yorug'likka har ikki tomondan kirishga imkon beradi [27].



3-rasm. Yarim shaffof bo'yoqqa sezuvchan (**dye-sensitized**) quyosh elementi.
(a) DSSC tuzilishi, (b) DSSC ning sxematik ishlash prinsipi.
(<https://doi.org/10.3390/en18071788>)

DSSC'da shaffoflikka erishish uchun bir nechta yondashuvlar qo'llaniladi:

- **Yupqa TiO_2 plyonkalar yoki nanotuzi strukturalar:** TiO_2 plyonkalari juda yupqa yoki kam zichlikdagi nanotuzilmalar ko'rinadigan yorug'likning bir qismini yutmasdan o'tkazishga imkon beradi. Bu yondashuvda bo'yoq miqdorini cheklash orqali yutilishni kamaytirish hisobiga shaffoflik oshiriladi, biroq bu ba'zan samaradorlik hisobiga bo'ladi. Ba'zi DSSC'lar TiO_2 nanotub yoki nanonaychalar strukturasi yordamida ishlab chiqiladi, ular orasidan yorug'lik bimalol o'ta oladi [28].
- **Tanlab yutuvchi bo'yoqlar:** Ba'zi bo'yoqlar faqat ma'lum to'lqin uzunliklarini yutadi (masalan, faqat IR yoki tor ko'rinadigan spektrda), bu qurilmaga ma'lum bir rangli tus beradi. Masalan, asosan yashil spektrni yutuvchi bo'yoqlar elementni pushti tusli ko'rsatadi (qizil va ko'k nurlarni o'tkazadi). Mos bo'yoqlarni tanlash yoki ularni kombinatsiyalash orqali DSSC'lar kulrang yoki engil rangli ko'rinishga ega bo'lishi mumkin, bu esa estetika va yutilishni muvozanatlashtiradi.

- **Shaffof qarshi elektrodlar:** An'anaviy platina bilan qoplangan shisha o'rniga to'liq shaffof materiallardan (masalan, yupqa karbon nanotub yoki grafen qatlami) foydalanish orqa tomondan yorug'likni o'tkazishni ta'minlaydi.

Misollar va samaradorlik: Shaffof va yarim shaffof DSSC'lar bir qator tadqiqotlarda yaxshi natijalar ko'rsatgan. Masalan, ekran bosma usuli bilan qo'llanilgan TiO_2 nanopartikula plyonkasi asosida ~60% yorug'lik o'tkazuvchanligi va 9.2% energiya samaradorligiga ega DSSC namoyish etilgan. Bu natija (60% AVT va 9.2% samaradorlik) DSSC texnologiyasining nazariy jihatdan an'anaviy kremniy panellar samaradorligiga yaqinlashishi mumkinligini ko'rsatadi, garchi bunday qurilma vizual tusga ega bo'lishi ehtimoldan holi emas. Boshqa bir tadqiqot ikki qatlamli TiO_2 tuzilmasidan foydalanib, yorug'lik oqimini oshirish bilan birga shaffoflikni saqlagan holda 7–8% samaradorlik va ~55% shaffoflikka erishgan. Amaliy jihatdan, DSSC asosidagi shaffof panellar (ko'pincha “quyosh oynalari” yoki “quyosh shishasi” deb ataladi) 3–5% samaradorlik va turli turlarda tijoratda taqdim etilgan. Masalan, **Exeger** va **Greatcell** (avvalgi nomi **Dyesol**) kompaniyalari DSSC plyonkalarini yopiq makon yorug'ligini yig'ish va binolar oynalari uchun turli rang va shaffoflik darajalarida ishlab chiqishgan.

DSSC'lar past yorug'lik sharoitida va noto'g'ri burchaklarda nisbatan yaxshi ishlaydi, bu esa har doim to'g'ridan-to'g'ri quyoshga qarab turmaydigan oynalar uchun foydalidir. Ular **eritma asosida tayyorlanadigan texnologiyalar** bilan ishlab chiqarilishi mumkin (masalan, doctor-blading yoki ekran bosma orqali TiO_2 ni surish va bo'yoqqa botirish), bu esa ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirish imkonini beradi. Arxitektura nuqtai nazaridan, rangli PV oynalarga ega bo'lish imkoniyati jozibali hisoblanadi – bunday holda, elektr ishlab chiqaradigan rangli vitraj oynalarni tasavvur qilish mumkin.

Biroq DSSC'lar uchun shaffof rejimdagi ba'zi muammolar mavjud: ularning aksariyati suyuq elektrolitlardan foydalanadi, bu esa oqib ketish yoki muzlash kabi muammolarga olib kelishi mumkin (har holda, qattiq holatdagi variantlar mavjud). Shuningdek, haqiqatan neytral (rangsiz) tusga erishish qiyin – bo'yoqlar ko'rinadigan spektrni qisman yutgani sababli DSSC'lar odatda yorug'likni ranglaydi. Faqatgina UV yoki IR ni yutuvchi bo'yoqlar yordamida rangsiz DSSC yaratish mumkin, lekin bu odatda samaradorlikning sezilarli darajada pasayishiga olib keladi. Shunga qaramay, yangi bo'yoq sezgirlashtiruvchilar va kobalt yoki yodsiz elektrolitlar ustidagi izlanishlar yaxshilanishlarga olib kelishi mumkin.



4-rasm. BIPV (Binoga integratsiya qilinadigan-Building-Integrated Photovoltaics) qo'llanmalariga mo'ljallangan yarim shaffof bo'yoqqa sezuvchan (dye-sensitized) quyosh moduli. *University of Rome Tor Vergata*

Xulosa qilib aytganda, DSSC'lar yarim shaffof holatda ishlab chiqilishi mumkin va ular o'rtacha samaradorlikka ega istiqbolli shaffof fotovoltaik texnologiyadir. Ular estetik jihatdan moslashuvchan (turli ranglar) va diffuz yorug'lik sharoitida yaxshi ishlash ko'rsatkichlariga ega. DSSC'larning shaffof quyosh texnologiyasidagi roli, odatda, to'liq shaffoflik talab qilinmaydigan yoki hatto qisman shaffoflik maqsadli bo'lgan sohalarda (masalan, qora tusli oynalar yoki dekorativ PV panellar) muhimdir. Hozirda ular o'rtacha holatni egallaydi: to'liq shaffof organik qurilmalarga qaraganda yuqori samaradorlik, ammo pastroq shaffoflik (odatda 50–70% oralig'ida) va ko'rinadigan tus.

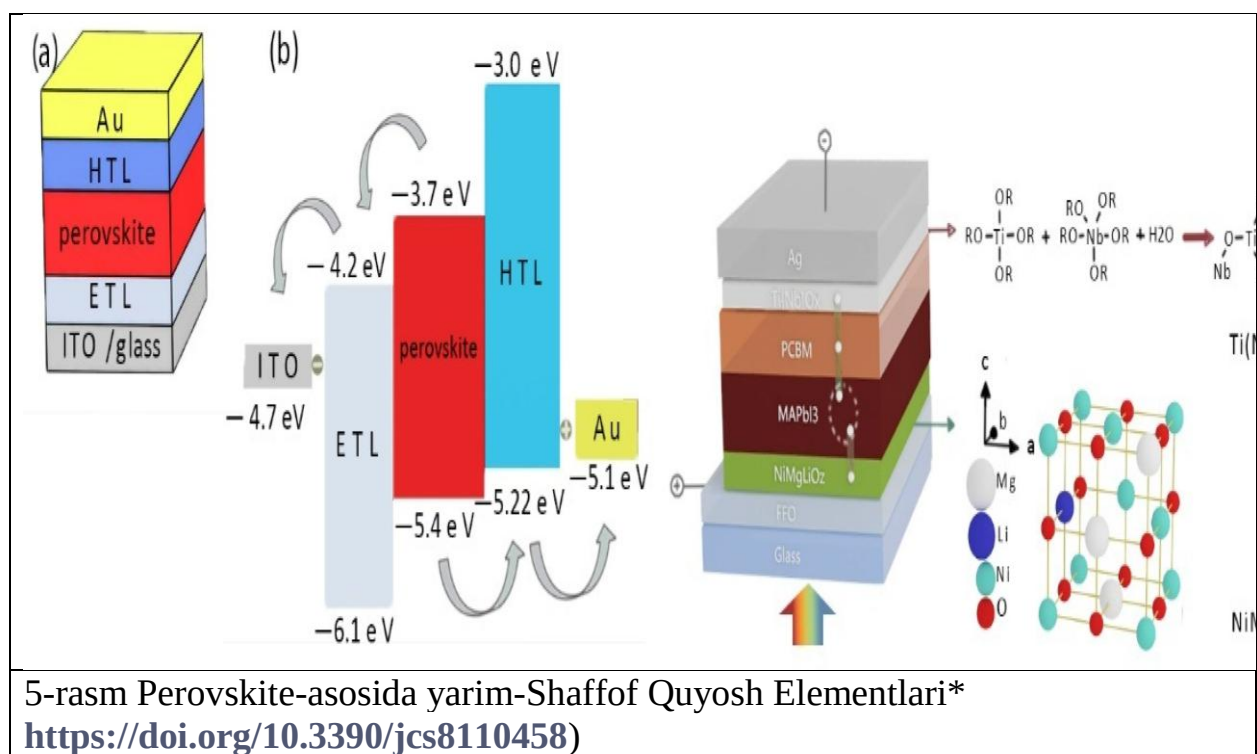
Perovskite Asosidagi Yarim Shaffof Quyosh Elementlari

Metall-galogensimon perovskite quyosh elementlari o'zining tezkor samaradorlik o'sishi (laboratoriya elementlarida 25% dan ortiq samaradorlikka erishgan) va sozlanadigan energiya teshigi (bandgap) tufayli katta ilmiy va sanoat e'tiborini tortmoqda. Perovskite materiallari (odatda $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ kabi gibridd organik-noorganik qo'rg'oshin-galogensimon birikmalar) ko'rinadigan yorug'likni kuchli yutadi, ammo tarkibiy yoki qalinlikdagi o'zgarishlar orqali ularni yarim shaffof qilish mumkin. Yarim shaffof perovskite quyosh elementi konsepsiyasi ayniqsa tandem konfiguratsiyalar va ko'rinarli oynavand qo'llanmalar uchun juda istiqbollidir.

Shaffof perovskite elementini olishning bir yo'li — perovskite qatlamini juda yupqa qilish bo'lib, bu orqali yorug'likning ma'lum qismi o'tishga ruxsat etiladi. Yana bir yondashuv — keng energiya teshigiga ega perovskite (masalan, halogenlar aralashmasi yoki 2D perovskitlar)dan foydalanishdir; bu holatda faqat UV va ko'rinadigan spektrning kichik bir qismi yutiladi, qolgan uzun to'liqinli nurlar esa

o'tadi. Bundan tashqari, shaffof elektrodlar (masalan, ITO va ultra yupqa metall yoki o'tkazuvchi oksidli orqa kontaktlar) orqali yorug'likni to'liq o'tkazish mumkin.

Namunalar va samaradorlik: 2014 yilda Ispaniyadagi Antioxiya Universiteti tadqiqotchilari tomonidan yaratilgan yarim shaffof perovskite elementi 6.4% energiya konversiya samaradorligiga va 29% o'rtacha ko'rinadigan yorug'lik o'tkazuvchanligiga (AVT) ega bo'lgan. Boshqa bir variant 7.3% samaradorlik va 22% AVT ko'rsatgan. Ushbu qurilmalar perovskitni 40 nm dan yupqa qatlami sifatida bug'latib cho'ktirish orqali tayyorlangan va 6 nm qalinlikdagi yarim shaffof oltin elektrod (LiF bilan qoplangan) orqali aks ettirish kamaytirilgan. Hosil bo'lgan qurilmalar qora tusli oynaga o'xshagan: birinchi qurilma yuqoriroq shaffoflik (~29%) evaziga pastroq samaradorlik, ikkinchisi esa biroz shaffoflikni qurbon qilgan holda yuqoriroq samaradorlik ko'rsatgan. Keyingi ishlar bu natijalarni yanada yaxshilagan: masalan, 77% maksimal shaffoflikka va 12.7% samaradorlikka ega perovskite elementi ishlab chiqilgan. Ushbu qurilmada ko'p qatlamli struktura va aks ettirishga qarshi qoplama yordamida shaffoflik va samaradorlik o'rtasida optimal muvozanat ta'minlangan.



Perovskite elementlari shuningdek, tandem qurilmalarda yuqori qatlam sifatida xizmat qilishi mumkin, bu yerda shaffoflik orqa qatlamdagi elementga o'tuvchi yorug'likni ta'minlaydi. Masalan, yarim shaffof perovskit (taxminan 1.7 eV bandgap) va kremniy (1.1 eV) kombinatsiyasidagi tandem hozirda faol tadqiqot yo'nalishlaridan biridir. Perovskit UV va ko'rinadigan yorug'likni yutadi, kremniy esa o'tuvchi qizil/IR yorug'likni yutadi. Tadqiqotchilar perovskit/kremniy tandemlarida perovskit qatlamining qizil spektrda taxminan 50% shaffoflikka ega bo'lgan holatlarida 25% dan yuqori samaradorlikka erishgan. Shaffof oynavand quyosh texnologiyasi kontekstida ham yarim shaffof perovskit qatlami boshqa yarim

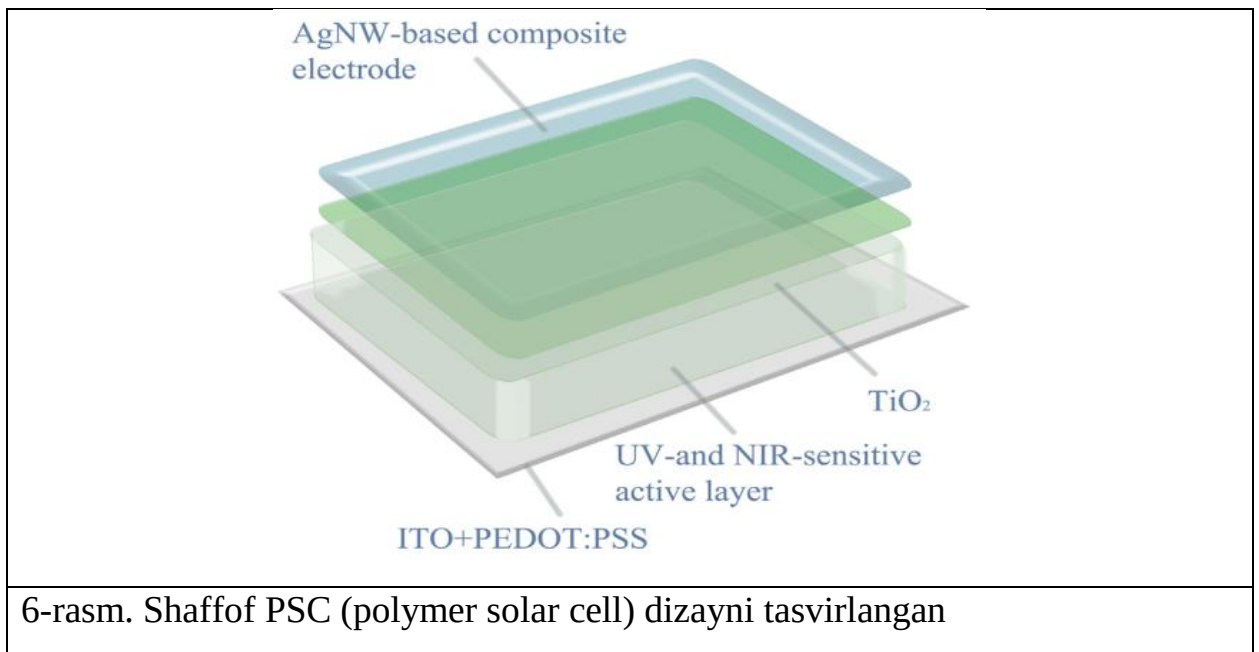
shaffof yoki tanlab yutuvchi qatlam bilan kombinatsiyalab spektrning kengroq qismini ishlatish mumkin.

Perovskite shaffof elementlarining afzalliklari – yuqori potentsial samaradorlik (kuchli yutilish va sozlanadigan bandgap tufayli) va nisbatan oddiy ishlab chiqarish texnologiyasi (ko‘plab usullar aylantirib cho‘ktirish yoki bug‘latish orqali amalga oshiriladi). Ular, agar to‘g‘ri loyihalansa, neytral rangdagi shaffoflikka ham erisha oladi – masalan, oz miqdorda bo‘yoq qo‘shish yoki ko‘p bandgapli aralashmalar orqali uzatiluvchi spektrni tekislashtirish orqali. Asosiy muammo esa – **barqarorlik**: perovskitlar namlik va UV nurlanishga sezgir bo‘lib, oynaviy qo‘llanmalarda uzoq muddatli ishlash muhim ahamiyatga ega. Shu bois, inkapsulyatsiya texnologiyalari va UVga bardoshli perovskite tarkiblari (masalan, bromid qo‘shish yoki noorganik kationlar ishlatish) bo‘yicha faol tadqiqotlar olib borilmoqda. Shuningdek, ko‘plab perovskitlar tarkibida qo‘rg‘oshin mavjud bo‘lib, bu ularni keng ko‘lamli tijorat oynalari uchun ekologik xavf ostiga qo‘yadi (qo‘rg‘oshinsiz perovskitlar yoki izolyatsiya strategiyalari bo‘yicha izlanishlar davom etmoqda).

Xulosa qilib aytganda, perovskite asosidagi shaffof elementlar yarim shaffof PV texnologiyalari uchun yuqori samaradorlikka ega istiqbolli variant hisoblanadi. Ular dastlab mustaqil shaffof oynalar emas, balki tandem PV modullari yoki ko‘p qatlamli qoplamalarda yarim shaffof qatlam sifatida ishlatilishi kutilmoqda. Shunga qaramay, material barqarorligi yaxshilangan sari, perovskit PV qoplamali, biroz tusli, lekin elektr ishlab chiqaruvchi binolar oynalarini tasavvur qilish mumkin. Allaqachon, yarim shaffof perovskite mini-modullari prototiplarda sinovdan o‘tkazilgan bo‘lib, elektr ishlab chiqaruvchi oynavand shisha uchun yaqin kelajakdagi tijorat salohiyatini namoyon qilmoqda.

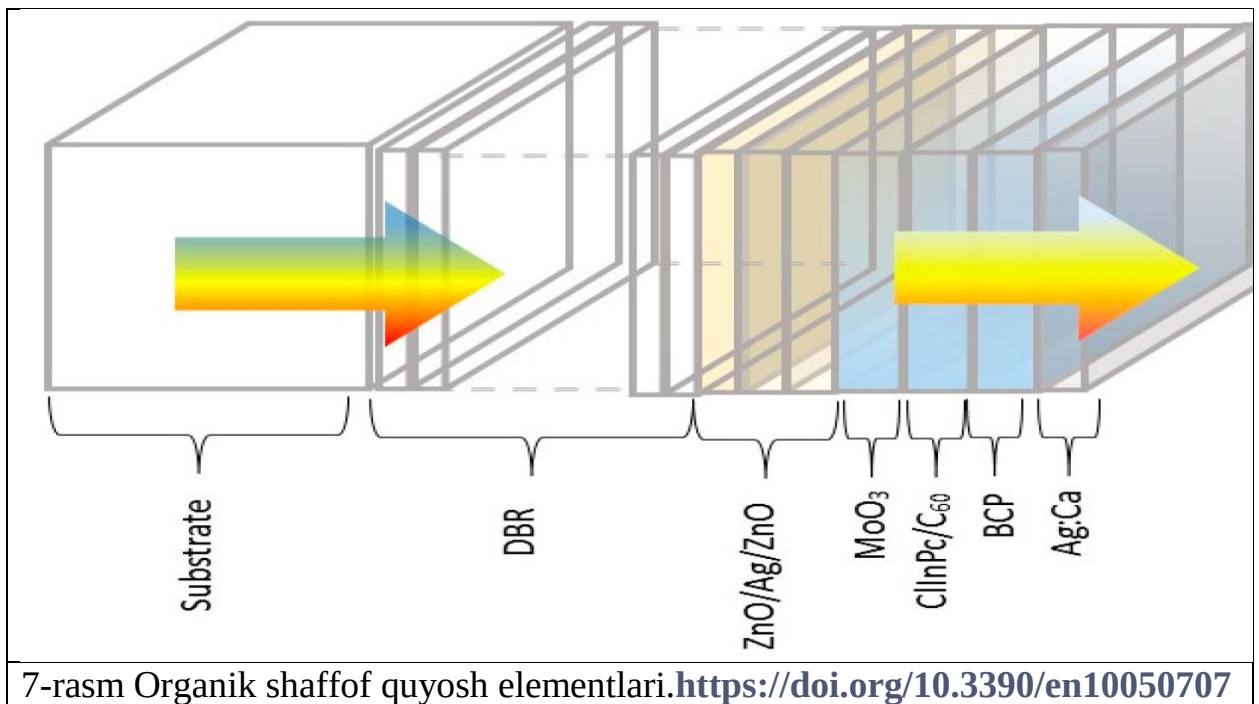
Polimer va Organik Shaffof Quyosh Elementlari

Organik fotovoltaik (OPV) elementlari – uglerod asosidagi molekulyar yoki polimer yarimo‘tkazgichlardan foydalanadigan PV qurilmalar – o‘z mohiyatiga ko‘ra yarim shaffof bo‘lishi mumkin, chunki ularning yutuvchi qatlami juda yupqa bo‘lishi va yutilish spektri moslashtirilishi mumkin. Ular ba‘zan polimer quyosh elementlari yoki organik shaffof PV deb ataladi. Ko‘plab organik yarimo‘tkazgichlar aynan ma’lum to‘lqin uzunliklarida yorug‘likni yutadi va agar inson ko‘zi ko‘radigan spektrni yutishdan qochilsa, ularni shaffof yoki biroz tusli holga keltirish mumkin.



6-rasmda shaffof **PSC** (polymer solar cell) dizayni tasvirlangan. Unda 2 ta shaffof elektrod mavjud bo‘lib, ular orasiga UV va NIR nurlarga sezgir faol qatlam joylashtirilgan. Faol material elektron donor vazifasini bajaruvchi polimer heterotugun (geterosturturali) va **PCBM** (elektron qabul qiluvchi) ni o‘z ichiga oladi; bu kombinatsiya **PBDTT-DPP:PCBM** ni tashkil etadi.

Miles Barr, Vladimir Bulović va ularning MITdagi jamoasi (keyinchalik Ubiquitous Energy hammuassislari) shaffof organik quyosh elementlari bo‘yicha dastlabki ishlanmalardan birini namoyish etdilar. Ular ultrabinafsha (UV) va infraqizil (IR) nurlanishni yutuvchi ikki xil organik molekuladan (birortasi donor, boshqasi fullerenga o‘xshash akseptor) foydalangan holda, ikki tomonlama shaffof elektrodga ega elementni yaratdilar[4]. Qurilma faollashtirilgan qatlami atigi bir necha o‘n nanometr qalinlikda bo‘lib, shaffof indiy-qalay oksidi va shaffof o‘tkazuvchi oksid/metall yupqa qatlam orasiga joylashtirilgan edi. Bu element, yuqorida ta’kidlanganidek, ko‘rinadigan yorug‘likning ~70% ini o‘tkazgan va dastlabki samaradorligi ~2% bo‘lgan[39]. Keyingi rivojlantirish ishlari davomida jamoa bir nechta elementlarni ketma-ket ulash orqali (IR nurlanishdan yaxshiroq foydalanish maqsadida) samaradorlikni oshirdi va 4–5% atrofidagi natijaga erishdi, shunda ham 50% dan ortiq shaffoflik saqlanib qolgan[40]. 2020-yilga kelib, Ubiquitous Energy o‘zining ClearView Power™ deb nomlangan organik qoplamasi yordamida kichik maydonli elementda 9.8% samaradorlikka erishganini tasdiqlagan, bu jahon rekordi sifatida e’lon qilingan[5]. Amaliy jihatdan ular to‘liq hajmli shaffof oynalar 7–10% samaradorlik va taxminan 50% ko‘rinadigan yorug‘lik o‘tkazuvchanligiga ega bo‘lishini kutmoqdalar[5].



Boshqa kompaniyalar va laboratoriyalar ham organik shaffof PV sohasida muhim natijalarga erishgan. Germaniyaning OPV ishlab chiqaruvchisi Heliatek kichik molekulali oligomerlardan foydalangan holda, qisman shaffof organik elementlar ishlab chiqdi va ular 40% shaffoflikda 7.2% samaradorlik ko'rsatdi[7]. Bu 2014-yilda shaffof OPV uchun rekord bo'lgan va hatto 40% shaffof plyonka ham eski kremniy panellari bilan taqqoslanadigan samaradorlikka erisha olishini ko'rsatgan (agar bu element butunlay xira bo'lganida, Heliatek elementining samaradorligi ~12% bo'lgan bo'lardi, lekin 40% shaffoflik tufayli yorug'likning atigi 60% i yutiladi, natijada o'lgangan samaradorlik 7.2% bo'lgan[7]). Ushbu plyonkalar avtomobil tom oynalari va binolar shishalarida foydalanish uchun mo'ljallangan bo'lib, kul-yashil soyani ta'minlaydi. Yaqinda olib borilgan polimerli quyosh elementi tadqiqotlarida, masalan, rangli organik vitraj panellarida, ~5% samaradorlik va 50% shaffoflik turli ranglarda (turli polymer:fullerene aralashmalari yoki ma'lum to'lqin uzunliklariga sozlangan non-fullerene akseptorlar orqali) namoyish etilgan.

Organik shaffof quyosh elementlarining afzalliklari orasida mexanik egiluvchanlik (ular plastik substratlarga joylashtirilgan holatda egiluvchan yoki egri shaffof panellar sifatida ishlab chiqilishi mumkin), yengillik va potentsial arzon narxli rulonli ishlab chiqarish (roll-to-roll) mavjud. To'g'ri faollashtiruvchi qatlam dizayni orqali ular neytral ko'rinishga ega bo'lishi mumkin – darhaqiqat, Ubiquitous Energy mahsulotining savdo nuqtalaridan biri shuki, ularning qoplamasi shishada "ko'rinmas" bo'lib, oddiy kuzatuvchi uchun sezilmaydi[8]. Bu ko'rinadigan spektrda har qanday bo'yoq yoki polimer yutilishini ehtiyotkorlik bilan filtrlash orqali amalga oshiriladi. Buning o'rniga, organik birikmalar inson ko'zi ko'rmaydigan UV va yaqin IR nurlanishni yutadi.



8-rasm. Mexanik egiluvchan organik shaffof quyosh elementlari

Transparent OPV ilovalaridagi muammolar boshqa organik texnologiyalar bilan o'xshash: barqarorlik (organik materiallar UV nurlanishi va kislorod/suv ta'sirida yemirilishi mumkin, shuning uchun yaxshi kapsulalash zarur), va o'rtacha samaradorlik. Laboratoriyada ~10% natijaga erishilgan bo'lsa-da, tijoriy mahsulotlarda dastlab ~5–7% ko'rsatkichlar kuzatiladi. Bundan tashqari, shaffof elektrodalarda ko'pincha mo'rt va qimmat indiy-qalay oksidi ishlatiladi; butunlay egiluvchan shaffof OPV yaratish uchun kumush nanotellari yoki o'tkazuvchi polimerlar kabi alternativalar ustida izlanishlar olib borilmoqda. Yana bir cheklov shundaki, organik yutuvchilar odatda tor spektral yutilish diapazoniga ega, shuning uchun ikki yoki uchta yutuvchini qavatlab ishlatgan taqdirda ham, agar ko'proq ko'rinadigan yorug'likni qurbon qilinmasa, quyosh spektrining ba'zi qismlari ishlatilmay qoladi.

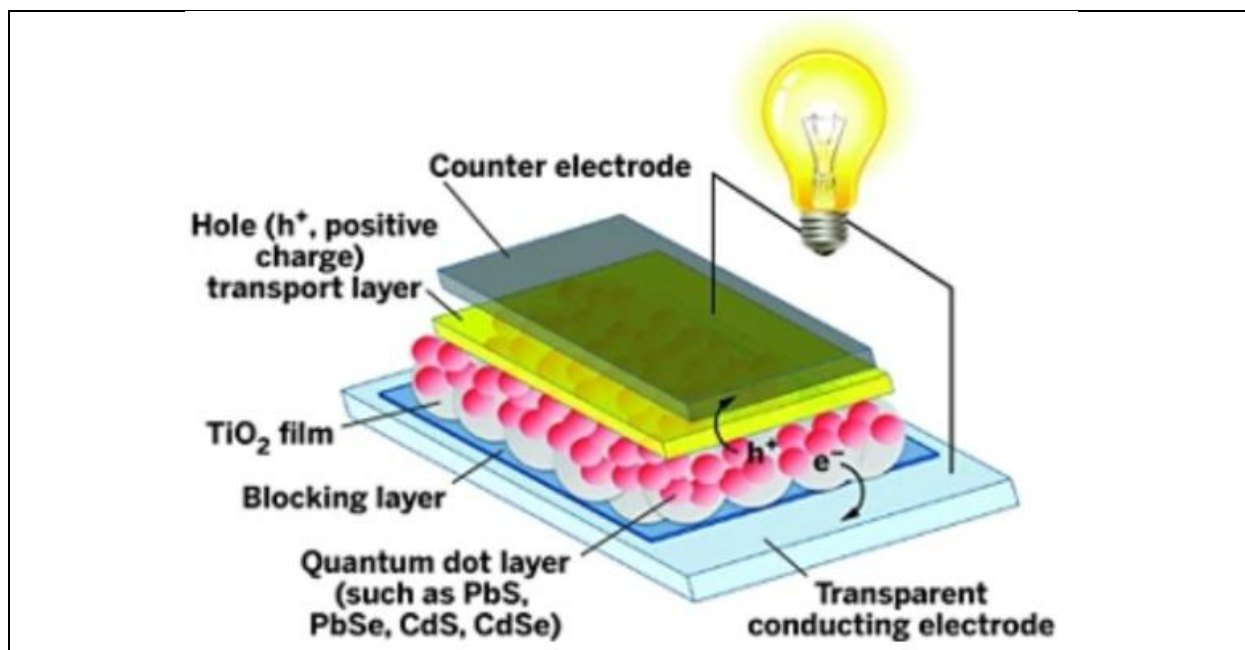
Umuman olganda, polimer/organik shaffof quyosh elementlari "haqiqiy shaffof" PV variantlari orasida eng yetuk texnologiyalardan biridir. Ular allaqachon tijoriy sharoitlarda sinovdan o'tkazilmoqda: masalan, Ubiquitous Energy kompaniyasining shaffof quyosh oynalari ba'zi tijoriy binolarda o'rnatilgan bo'lib, ijarachilar ularni oddiy shishalardan farqlay olmaydilar, biroq bu oynalar fon rejimida har bir kvadrat metr uchun bir necha vatt quvvat hosil qilmoqda[46]. Uzoq umr va samaradorlik oshgani sari, organik shaffof PV yashil arxitektura uchun standart shishalash variantiga aylanishi mumkin.

Kvant nuqtalari asosidagi shaffof quyosh elementlari

Kvant nuqtalari (Quantum Dot, QD) asosidagi quyosh elementlari yorug'lik yutuvchi sifatida yarim o'tkazgich nanokristallardan foydalanadi. QDlar kvant cheklanishi (quantum confinement) tufayli o'z o'lchamiga qarab sozlanadigan tarmoqlanish oralig'iga (bandgap) ega bo'lib, ularni spektrning ma'lum qismlarini yutadigan qilib muhandislik yo'li bilan loyihalash mumkin. QD asosidagi shaffof fotoelektrik qurilmalar (PV) uchun ikki asosiy yondashuv mavjud: kvant nuqtali yorug'lik nurlantiruvchi kontsentratorlar (TLSC tarkibidagi QDlar luminofor

sifatida xizmat qiladi) va yarim shaffof kvant nuqtali geterokechuvli quyosh elementlari.

Yorug'lik nurlantiruvchi konsentratorlarda kvant nuqtalari (masalan, CdSe/ZnS yadrosi va qobig'i bo'lgan QDlar yoki kremniy QDlari) shaffof matritsaga joylashtiriladi. Ko'plab QDlar ultrabinafsha va ko'k yorug'likni kuchli yutib, uni uzunroq to'lqin uzunliklarida (masalan, ko'rinadigan yoki infraqizil (IR)) qayta nurlantiradi. Agar IRda qayta nurlantiruvchi QDlar tanlansa, panel ko'rinadigan spektrda shaffof bo'lib qoladi. Masalan, kremniy kvant nuqtalari yoki ayrim karbon QDlari UV ni yutib, 800–900 nm atrofida IR spektrda nurlantirishi mumkin. Bunday materiallar ko'zni aldovchi shaffof LSC panellarini yaratishda ishlatilgan – ular ko'rinishda tiniq bo'lib, IRni chetlarga yo'naltiradi. Mashhur misollardan biri UbiQD kompaniyasining "Wendow" mahsuloti bo'lib, u issiqxonalar uchun mo'ljallangan oynada floresan kvant nuqtalaridan foydalanadi va 2023-yil tijoratlashtirish uchun rejalashtirilgan [9]. Ular o'z prototiplari ~80% ko'rinadigan shaffoflikni saqlaganini va ozgina soya berganini, hamda har kvadrat metrda bir necha vatt ishlab chiqarganini bildirgan.



9-rasm. Kvant nuqtali(Quantum Dot-Based) asosidagi Shaffof quyosh elementlari

Shaffof elektrod orqali o'tgan yorug'lik fotosensitiv Kvant nuqta (**quantum dot**) qatlamiga tushishi natijasida electron-hole pairs (e^-/h^+) hosil bo'ladi. Agar hosil bo'lgan zaryad tashuvchilar bir-biridan ajralib, o'ziga tegishli elektrodlariga yetib borsa, ushbu jarayon elektr tokini generatsiya qiladi. (<https://cen.acs.org/articles/91/i38/Powerful-Dot-Solar-Energy.html>)

Kvant nuqtali quyosh elementlari (to'g'ridan-to'g'ri PV qurilma sifatida) ham QD qatlamini juda yupqa qilish orqali yarim shaffof bo'lishi mumkin. Masalan, ko'rinadigan va IR spektrlarda yutuvchi PbS (qo'rg'oshin sulfidi) kvant nuqtalari plyonkasi shunday qalinlikda sozlanishi mumkinki, u ko'rinadigan yorug'likning bir qismini o'tkazadi. Biroq, ko'pgina QD PV tadqiqotlari yutilishni maksimal darajada

oshirishga qaratilganligi sababli, to'liq shaffof variantlar kam uchraydi. Qiziqarli yondashuvlardan biri bu kolloid kvant nuqtali tandem elementlaridir: bunda keng tarmoqlanish oralig'iga ega QD qatlam (ko'rinadigan spektrga shaffof, UV ni yutadi) tor bandgapli QD qatlami (IRga shaffof, ko'rinadiganni yutadi) bilan qavatlanadi. Nazariy jihatdan bunday struktura ko'p UV va IR nurlarni elektrga aylantirish bilan birga, shaffof ko'rinishni ham ta'minlashi mumkin.

Namunalar va samaradorlik: Adabiyotlarda ba'zi QD asosidagi LSClar yuqori shaffoflik va o'rtacha quvvat hosil qilganligi qayd etilgan. Yuqorida ta'kidlanganidek, bir tahlilga ko'ra, shaffof nurlantiruvchi kontsentrator (ehtimol organik bo'yoqlar yoki QDlardan foydalanilgan) 86% ko'rinadigan shaffoflikka, ammo <1% samaradorlikka erishgan[1]. Agar QDlar ishlatilgan bo'lsa, ular ko'rinadigan yorug'likni yutmaslik uchun tanlangan bo'lishi mumkin, shuning uchun shaffoflik juda yuqori bo'lgan. Boshqa tomondan, ozgina rang berishga ruxsat berilsa, QD-LSC samaradorligi oshirilishi mumkin: tadqiqotchilar CdSe/CdTe QDlari polimerga qo'shilgan qurilmalarda ~3–4% samaradorlik va ~50% shaffoflikka (biroz rangli ko'rinish) erishganini ko'rsatgan[13].

QD asosidagi shaffof PV panellar issiqxonalarda ham sinovdan o'tkazilgan. Masalan, kremniy QDlar bilan doplangan LSC panellar ishlatilgan issiqxona ventilyator va sensorlar uchun energiya ta'minlab, ko'rinadigan yorug'likni deyarli butunlay o'simliklarga o'tkazgan. Bunday QD oynalar hatto o'simliklar o'sishi uchun optimal to'lqin uzunliklarini (ya'ni, PAR spektrini) o'tkazishga sozlanishi mumkin, qolgan spektr esa elektrga aylantiriladi[5][6].

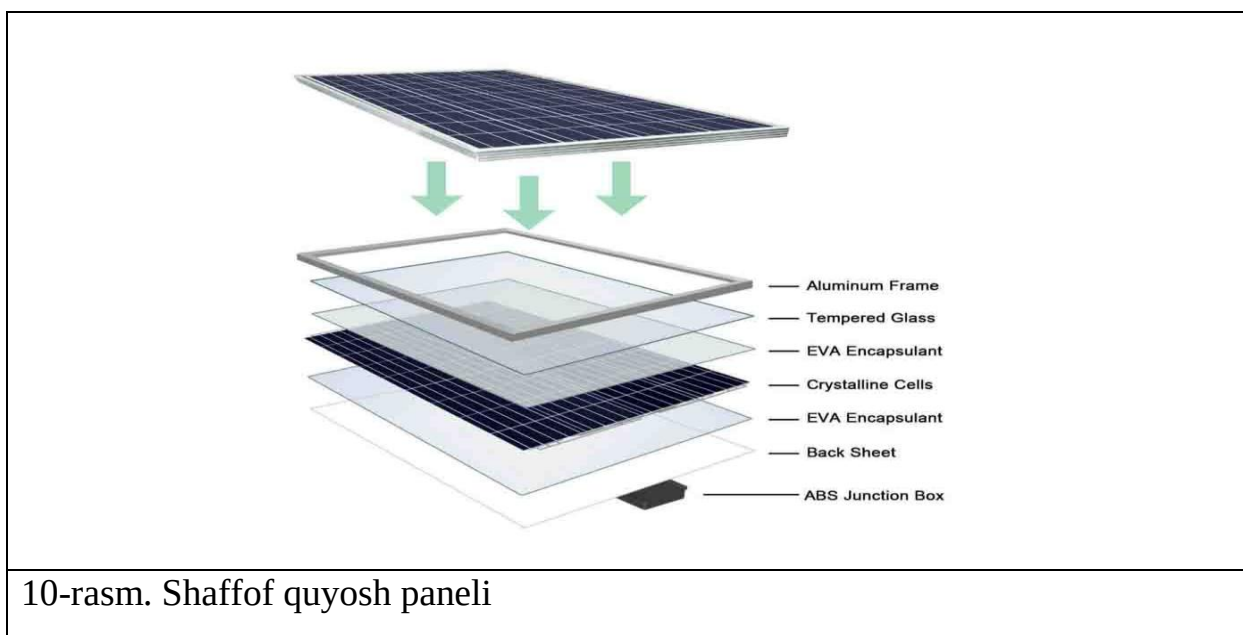
QD texnologiyasining afzalliklari orasida so'rilishni sozlash imkoniyati (QD hajmi/turini tanlash orqali) va noorganik QDlar uchun yuqori barqarorlik mavjud (masalan, kremniy yoki karbon asosli QDlar ancha chidamli va toksik bo'lmagan bo'lib, organik bo'yoqlar singari fotobuzilishga uchramaydi). Bundan tashqari, ayrim sharoitlarda QDlar ko'p eksiton generatsiyasini (ya'ni, bitta yuqori energiyali foton bir nechta elektron-teshik juftlarini hosil qilishi) ko'rsatishi mumkin, bu tok hosil qilishda ekzotik imkoniyat bo'lsa-da, uni shaffof kontekstdagi amalda tatbiqi hozircha nazariy.

QDlar bilan bog'liq muammolar shundaki, ko'p samarali QDlar (masalan, kadmiy yoki qo'rg'oshin asosli) toksik yoki tartibga solinadigan moddalar hisoblanadi, shuning uchun ularni iste'mol oynalarida ishlatish uchun yaxshilab muhrlash talab qilinadi. Bundan tashqari, o'z-o'zini yutish (ya'ni, qayta nurlantirilgan yorug'likning boshqa QDlar tomonidan yana yutilishi) LSC panellarning hajmini cheklashi mumkin; yangi QD kimyoviy tarkiblari yutilish va nurlantirish spektrlari ustma-ustligini kamaytirishga yo'naltirilmoqda.

Xulosa qilib aytganda, kvant nuqtali shaffof quyosh elementlari ko'p jihatdan nurlantiruvchi kontsentratorlar bilan mos keladi. Ular shaffof PV uchun materialga asoslangan innovatsion yondashuvni ifodalaydi. To'g'ri nanokristallarni tanlab, shunday oyna yaratish mumkinki, u biroz rangli yoki deyarli rangsiz bo'lib ko'rinsa ham, UV ni IR ga aylantirib, energiya yig'adi. Nanotexnologiyalar taraqqiyoti bilan, shaffof PV oynalarning quvvat chiqishini oshiruvchi, QD asosidagi samaraliroq qoplamalar paydo bo'lishi mumkin.

Shaffof Kristall Kremniy va Barcha-Orqa-Kontaktli (All-Back-Contact) Quyosh Elementlari

Kristall kremniy (c-Si) tabiiy holda shaffoflik uchun qulay material emas — standart kremniy plastinka (wafer) silliq va ko‘rinadigan yorug‘likning asosiy qismini yutadi. Shunga qaramay, muhandislar c-Si ni qisman shaffof modullarga kiritish yo‘llarini topdilar va yaqinda neytral rangga ega, yuqori samaradorlik ko‘rsatgan yarim shaffof kremniy elementlari yaratildi. Bunda ikki asosiy uslub mavjud: geometrik shaffoflik va ilg‘or element dizayni (masalan, barcha kontaktlar orqada joylashgan mikroelement massivlari).



10-rasm. Shaffof quyosh paneli

Geometrik shaffoflik odatdagi kremniy quyosh elementlaridan foydalangan holda, ularni yorug‘lik o‘tishi mumkin bo‘lgan tarzda joylashtirish yoki ishlov berish orqali amalga oshiriladi. Misollar quyidagilarni o‘z ichiga oladi:

- **Elementlarni juda ingichka bo‘laklarga yoki kichik mikroelementlarga kesish** va ular orasida yorug‘lik o‘tadigan bo‘shliqlar qoldirish. Bunday qurilmalar ba‘zan “quyosh plitkalari” yoki “quyosh panjaralari” deb ataladi. Umumiy modul to‘rga o‘xshab ko‘rinadi. Ilgari ko‘plab binoga integratsiyalashgan fotoelektrik (BIPV) mahsulotlari shu yondashuvdan foydalangan: masalan, har bir oynaning orasida o‘nlab mayda monokristall elementlar joylashgan fasad panellari. Agar, masalan, maydonning 50% i elementlar bilan, qolgan 50% i esa shaffof oynadan iborat bo‘lsa, modul taxminan 50% shaffoflikka ega bo‘ladi. Samaradorlik esa opak modulnikining yarmiga yaqin bo‘ladi (faqat yarim maydon faol bo‘lganligi sababli). Shu tarzda 50% shaffoflikda ~10% modul samaradorligiga erishish mumkin (agar kremniy elementlarning o‘z maydonida samaradorligi 20% bo‘lsa)[8].

- **Yupqa kremniy plastinkalarga zich naqshda mikroteshiklar qazish** orqali yorug‘lik o‘tkazish. Ayrim tadqiqotchilar “elak shaklidagi” kremniy quyosh elementlarini ishlab chiqishga uringanlar. Bunda asosiy muammo — elektr uzluksizligini saqlab qolish va teshik chetlarida rekombinatsiyani kamaytirish.
- **Juda yupqa kremniy plastinkalardan foydalanish**, chunki ular kamroq yorug‘lik yutadi. Standart 180 μm qalinlikdagi kremniy plastinka ko‘rinadigan yorug‘likning $\sim 90\%$ ni yutadi (ya‘ni, opak), lekin bir necha mikrometr qalinlikdagi plyonka ko‘proq yorug‘likni o‘tkazishi mumkin. Biroq, kremniyning ko‘rinadigan spektrdagi yutilish koeffitsiyenti juda yuqori bo‘lib, hatto 10 μm qalinlikdagi kremniy ham ko‘pchilik fotonlarni yutadi — shuning uchun qalinlikni kamaytirishning o‘zi yetarli shaffoflik bermaydi, agar juda yupqa qilinsa esa samaradorlik keskin kamayadi.

Yangi yondashuvlardan biri bu Toliq orqa kontaktli (All-Back-Contact) (ABC) ya‘ni barcha kontaktlari orqa tomonida joylashgan shaffof kristall kremniy quyosh elementidir. 2024-yilda Koreyadagi UNIST tadqiqot guruhi tomonidan hisobot berilgan ushbu ilg‘or dizayn kristall kremniy plastinkadan, barcha metal kontaktlar va tok o‘tkazuvchi liniyalar orqa tarafda joylashgan shaklda foydalanadi. Modul yig‘ilganda old tomoni oddiy kremniy va kapsulyatsiyalovchi qavatdan iborat bo‘ladi — bu o‘zi shaffof emas, ammo ehtimol juda yupqa elementlar yoki qisman shaffoflik beruvchi texnikalar qo‘llangan. Asosiy yangilik shundaki, yakuniy modul neytral rangli va oynaga o‘xshab shaffof ko‘rinishga ega bo‘lib, an‘anaviy metall kontaktlar yoki panjara chiziqlarisiz bo‘ladi[53].

UNIST guruhi ushbu shaffof c-Si elementlari uchun 15.8% maksimal samaradorlik va o‘rtacha 20% ko‘rinadigan yorug‘lik o‘tkazuvchanligini (AVT) qayd etdi[11][10]. 16 sm^2 o‘lchamdagi mini-modulda ketma-ket ulangal 4 ta element yordamida 14.7% samaradorlik va $\sim 20\%$ shaffoflikka erishilib, bevosita quyosh nuri ostida smartfonni zaryadlashga muvaffaq bo‘lindi[56].

20% shaffoflik nisbatan past bo‘lishi mumkin (bunday panel kuchli soyali oyna kabi ko‘rinadi), ammo bu kristall kremniyda amalga oshirilgani muhim — bu esa boshqa shaffof texnologiyalarga nisbatan yuqori samaradorlik va barqarorlikni ta‘minlaydi. Bundan tashqari, orqa kontaktlar (masalan, oraliqli orqa kontaktlar) tufayli old tomonda soya tushish yo‘qoladi va kafolatli estetik ko‘rinish bilan chiroyli modul hosil bo‘ladi. “Neytral rangli” tavsifi bu element yorug‘likni kuchli rangga kiritmasligini, ya‘ni yutilmay qolgan yorug‘lik spektral jihatdan muvozanatli ekanini anglatadi (ehtimol, rangli akslarni yo‘qotish uchun antirefleksiv (AR) qoplama qo‘llanilgan).

Bu ABC yondashuvi yangi imkoniyatlarni ochadi: kremniy texnologiyasini qisman shaffof va estetik jihatdan jozibali shaklda qayta ishlash. Hozirda bu yondashuv 20% shaffoflikda bo‘lsa ham, bu fasadlar yoki ko‘kalamzorli tomrlar uchun yetarli bo‘lishi mumkin. $\sim 15\%$ samaradorlik bilan bunday panellar quyosh nurida har m^2 da ~ 150 Vt quvvat bera oladi[11] — bu oddiy modullarning taxminan yarmi, ammo shaffoflik qo‘shilgan foyda sifatida.

UNIST guruhi, shuningdek, oynadagi elementlarni ketma-ket ulab, modullarni “tovushni sozlash” imkoniga ega bo‘lganini ko‘rsatdi, ya‘ni shaffof 16

sm² moduldan 10 V chiqish voltajiga erishildi[11] — bu esa konsepsiyaning modullashtirilgan va kengaytirilishi mumkinligini ko‘rsatadi.

UNIST dizaynidan tashqari boshqa kristall asosidagi shaffof mahsulotlar ham ishlab chiqilmoqda. Masalan, ayrim startaplar juda yupqa kremniy quyosh elementlarini oynaga siyrak tarmoq shaklida joylashtirmoqda. Boshqa g‘oya — polikristall yoki mikro-kristall shaffof plyonkalar (garchi ular ko‘proq yupqa plyonka texnologiyasiga o‘xshasa-da). Har ikki tomonida shaffof o‘tkazuvchan oksid kontaktlari bo‘lgan HIT (heterokechuvchi ichki qavatli) quyosh elementlari ham yetarlicha yupqa qilinsa, qisman shaffof bo‘lishi mumkin.

Xulosa qilib aytganda, kristall kremniy asosidagi shaffof quyosh elementlari klassik va zamonaviy texnologiyalarning tutashgan nuqtasidir: u kremniy PV ning yuqori samaradorlik va barqarorlik afzalliklarini saqlab qoladi, lekin noan‘anaviy struktura va qadoqlash orqali o‘zining opakligini yengib o‘tadi. Bu toifa hozirda to‘liq emas, balki qisman shaffof yechimlarga e‘tibor qaratmoqda (chunki kremniyning tarmoqlanish oralig‘i ko‘rinadigan spektrni to‘liq yutadi, shuning uchun to‘liq shaffof bo‘lishi imkonsiz). Bular rangli oynaga ruxsat berilgan joylarda yoki konstruktiv mustahkamlik talab etilgan holatlarda ideal yechimdir (kremniy mexanik mustahkamlikni ham ta‘minlaydi). Yaqinda taqdim etilgan ABC neytral rangli element bu yo‘nalishdagi katta yangilik bo‘lib, shaffof formatda standart panellarning samaradorligini takrorlaydi[10]. Keyingi bobda aynan shu ABC texnologiyasi batafsil tavsiflanadi, chunki u eng ilg‘or shaffof quyosh elementlaridan biridir.

Tol‘liq-Orqa-Kontaktli (ABC) Shaffof Quyosh Elementlari

Shaffof fotoelektrik (PV) texnologiyalaridagi eng hayajonli so‘nggi yutuqlardan biri bu — barcha-orqa-kontaktli shaffof kristall kremniy quyosh elementidir. Yuqorida ta‘kidlanganidek, ushbu dizayn kremniyda shaffoflikka erishishda ikkita asosiy muammoni hal qiladi: metall kontaktlarning ko‘rinishi va kremniyning optik xossalari. Barcha elektr kontaktlarini elementning orqa tomoniga joylashtirish orqali old sirt butunlay oynaga o‘xshab, metall qoplamalarsiz ko‘rinadi. Bu darhol estetikani va shaffoflikni oshiradi, chunki panjara chiziqlari yoki shinalar (busbar) ko‘zdan yo‘qoladi [10].

Ammo, kremniy plastinka odatda yorug‘likni o‘tkazmaydi — unda qanday qilib shaffoflikka erishiladi? Bu savolning aniq tafsilotlari texnik jihatdan murakkab (va mualliflik huquqlari bilan himoyalangan), biroq taqdim etilgan qurilmalar o‘rtacha ko‘rinadigan yorug‘lik o‘tkazuvchanligiga (AVT) 20% ga erishgan, ya‘ni ko‘rinadigan yorug‘likning 1/5 qismi o‘tadi. Ehtimol, kremniy plastinka qisman o‘yilgan, yupqalashgan yoki mikroskopik ochilishlar bilan naqshlangan bo‘lishi mumkin. “Neytral rangli” termini esa shuni anglatadiki, o‘tayotgan yorug‘lik kuchli rangga ega emas — demak, element spektr bo‘yicha teng taqsimlangan ochilishlarga ega (masalan, juda ingichka faol qatlam yoki mayda oynachalar kabi bo‘shliqlar), bu esa spektr bo‘ylab kuchli yutilish cho‘qqilarisiz ishlaydi.

UNIST tadqiqotida qayd etilgan **samarsiz modullashtirish (seamless modularization)** ham muhim omil hisoblanadi [11]. Odatda, bir nechta quyosh

elementlarini ketma-ket ulash uchun metall lenta (ribbon) va elementlar orasida soya tushishini oldini oluvchi bo'shliqlar talab qilinadi. Shaffof modullarda esa bular ko'rinib qoladi. UNIST jamoasi esa, bunday kontaktlar yoki bo'shliqlarsiz, bir xil oynavand sirt ustida elementlarni monolit tarzda ketma-ket ulash usulini ishlab chiqqan [11]. Ehtimol, bu lazerli naqsh berish yoki yangi turdagi qirralarda joylashgan busbarlardan foydalanishni o'z ichiga olgan. Natijada, "saamarsiz" shaffof quyosh moduli hosil qilingan — ya'ni butun oynavand modul bir tekis, bir butun ko'rinishda bo'ladi. Amaliy sinovda, 4 ta elementdan iborat modul 16 sm^2 yuzada 10,0 V kuchlanish va 235 mVt quvvat ishlab chiqardi (to'liq quyosh nurlanishida) [11]. Ular hatto bu modul yordamida displey oynasi orqali smartfonni zaryadlashga muvaffaq bo'lishdi, bu texnologiyaning kelajakdagi ko'rinishli qurilmalarga integratsiyasi mumkinligini namoyish qiladi [11].

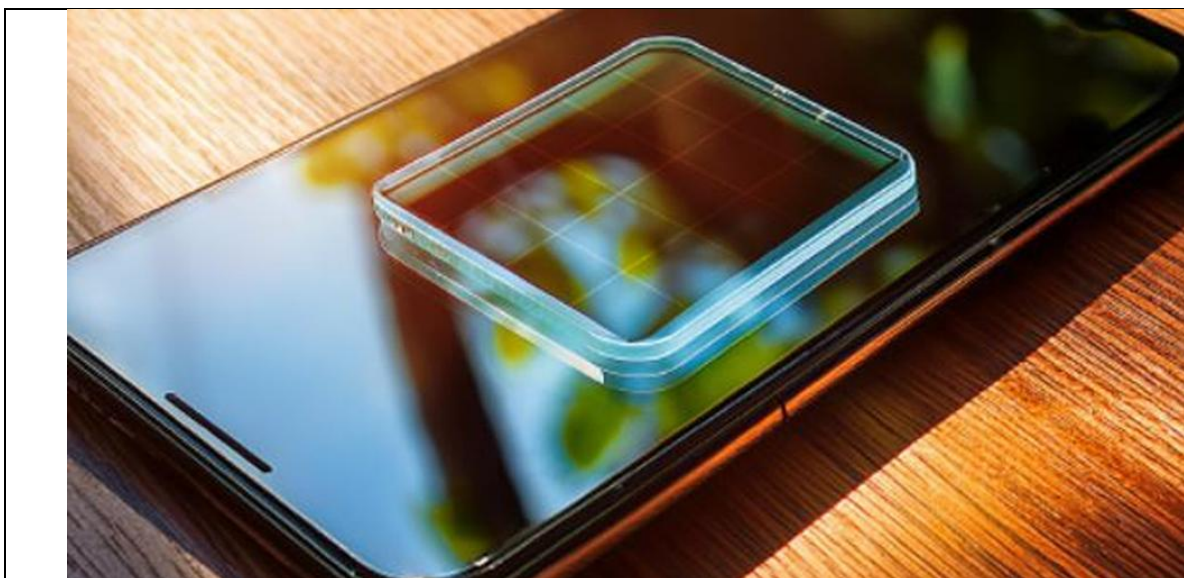
Nazariy jihatdan, ABC dizayni berilgan shaffoflik darajasida maksimal samaradorlikka erishishni ta'minlaydi: old kontaktlarning optik yo'qotilishini bartaraf etadi va yorug'likni samarali tuzoqqa olish imkonini beradi. Kirayotgan barcha yorug'lik yoki ingichka kremniy sohalarda yutiladi, yoki to'liq o'tadi — kontaktlar hech narsa to'smasligi sababli. Kremniyning energetik tarmoqlanish oralig'i (bandgap) 1,12 eV bo'lib, u $\sim 1100 \text{ nm}$ (yaqin IR) to'lqin uzunligigacha yuta oladi, bu butun ko'rinadigan spektrni qamrab oladi. Shunday ekan, har qanday ko'rinadigan shaffoflik, albatta, ba'zi fotonlarning o'tishiga yo'l qo'yadi. 20% AVT dagi 15,8% samaradorlik esa shuni ko'rsatadiki, element ko'rinadigan spektrning katta qismini yutadi (AVT pastligidan), lekin yutgan qismini juda samarali elektrga aylantiradi. Agar xuddi shu yondashuvda 50% AVTga erishilsa, samaradorlik shunga mutanosib ravishda ($\sim 8\text{--}10\%$) kamayishi mumkin edi. Biroq, bu darajadagi modullar ko'plab amaliyotlarda foydali bo'lishi mumkin.

ABC elementlari **yuqori texnologiyali ishlab chiqarishni** talab qiladi: oraliqli orqa kontaktlar (IBC) allaqachon yuqori darajadagi texnologiyalardan biri bo'lib (masalan, SunPower kompaniyasining premium panellarida ishlatiladi), biroq ular opak hisoblanadi. IBC ni qisman shaffoflik bilan birlashtirish ehtimol mikro-ishlab chiqarish bosqichlarini (fotolitografiya yoki lazerli mikro-teshik ochish) o'z ichiga olgan. Shuningdek, element yuzasining katta qismi ochiq bo'lgan holatda oqimni samarali yig'ish ham muhim masala: elektrondan orqa kontaktlargacha yetib borish uchun oqim yo'llari puxta dizaynga ega bo'lishi kerak. 2024-yilgi tadqiqot shuni ko'rsatdiki, bu muammolarni hal etish mumkin va bu tijoratga chiqariladigan shaffof kremniy PV uchun yo'l ochadi.

Amaliy nuqtayi nazardan, ABC shaffof moduli binolarning fasadlarida ishlatilishi mumkin bo'lib, biroq qoramtir oynaga o'xshash ko'rinish bilan sezilarli elektr ishlab chiqaradi. Avtomobil ishlab chiqaruvchilar esa ularni quyosh tomlari yoki yon oynalarga integratsiyalashlari mumkin — bunday joylarda biroz soyali oyna maqbul hisoblanadi. Kremniy asosida bo'lgani sababli, bu modullar uzoq muddatli barqarorlik (30 yillik xizmat muddati) va ekologik xavfsizlikni ta'minlaydi. UNISTdagi professor Seo jamoasi ushbu texnologiyaning tijoratga tez chiqishini ta'minlashda sanoatning mavjud kremniy ishlab chiqarish salohiyatidan foydalanishi mumkinligini ta'kidlaydi [11].

Shuni eslatib o'tish kerakki, bu yerda "ABC" atamasi "All-Back-Contact" (barcha kontaktlar orqada) degan ma'noni anglatadi; u "Always Be Cool" yoki boshqa qisqartmalar bilan adashtirilmasligi kerak. Quyosh panellari ishlab chiqarishda, ABC atamasi har ikki kontakti orqa tomonda joylashgan har qanday elementga nisbatan qo'llaniladi; bu yerdagi yangilik esa — uni shaffoflik kontekstida qo'llashdir.

Xulosa qilib aytganda, ABC shaffof quyosh elementlari an'anaviy quyosh samaradorligi va zamonaviy shaffoflik talablarini birlashtiruvchi texnologik ko'prikdir. Ishlab chiqarish jarayonlari murakkabligi sababli ular dastlab qimmatroq bo'lishi mumkin, biroq ularning yuqori samaradorligi premium arxitektura loyihalari yoki elektron qurilmalarda qo'llanilishini oqlashi mumkin. Tadqiqotlar davom etar ekan (2024-yildagi PNAS maqolasi shunchaki boshlanishi), AVT oshirilgan, lekin ikki xonali samaradorlikni saqlab qolgan yangi versiyalar paydo bo'lishi mumkin. Kelajakda 10% samaradorlik va 50% shaffoflikka ega kremniy panel — bu tasavvur emas, balki bosqichma-bosqich innovatsiyalar orqali erishilishi mumkin bo'lgan real maqsaddir.



11-rasm. Janubiy Koreyaning UNIST universiteti tomonidan ishlab chiqilgan kichikto'liq orqa kontakli (**all-back-contact**) shaffof quyosh elementi (smartfon ustida ko'rsatilgan). Barcha metall elektrodlar orqa tomoniga joylashtirilganligi tufayli qurilma **shisha ko'rinishiga o'xshash** tashqi ko'rinishni namoyish etadi. Bunday elementlar taxminan **15% samaradorlik** va **20% ko'rinadigan shaffoflikka** erishgan bo'lib, ularning modul ko'rinishdagi namunalari elektron qurilmalarni to'g'ridan-to'g'ri quvvatlantirishi mumkin [65]. Rasmda shaffof quyosh elementi moduli smartfon ekraniga qo'yilgan holda aks etgan bo'lib, iste'molchi elektronikasiga integratsiya qilish imkoniyatlarini ko'rsatadi.

Tandem va Gibrid Quyosh Tizimlariga Integratsiya

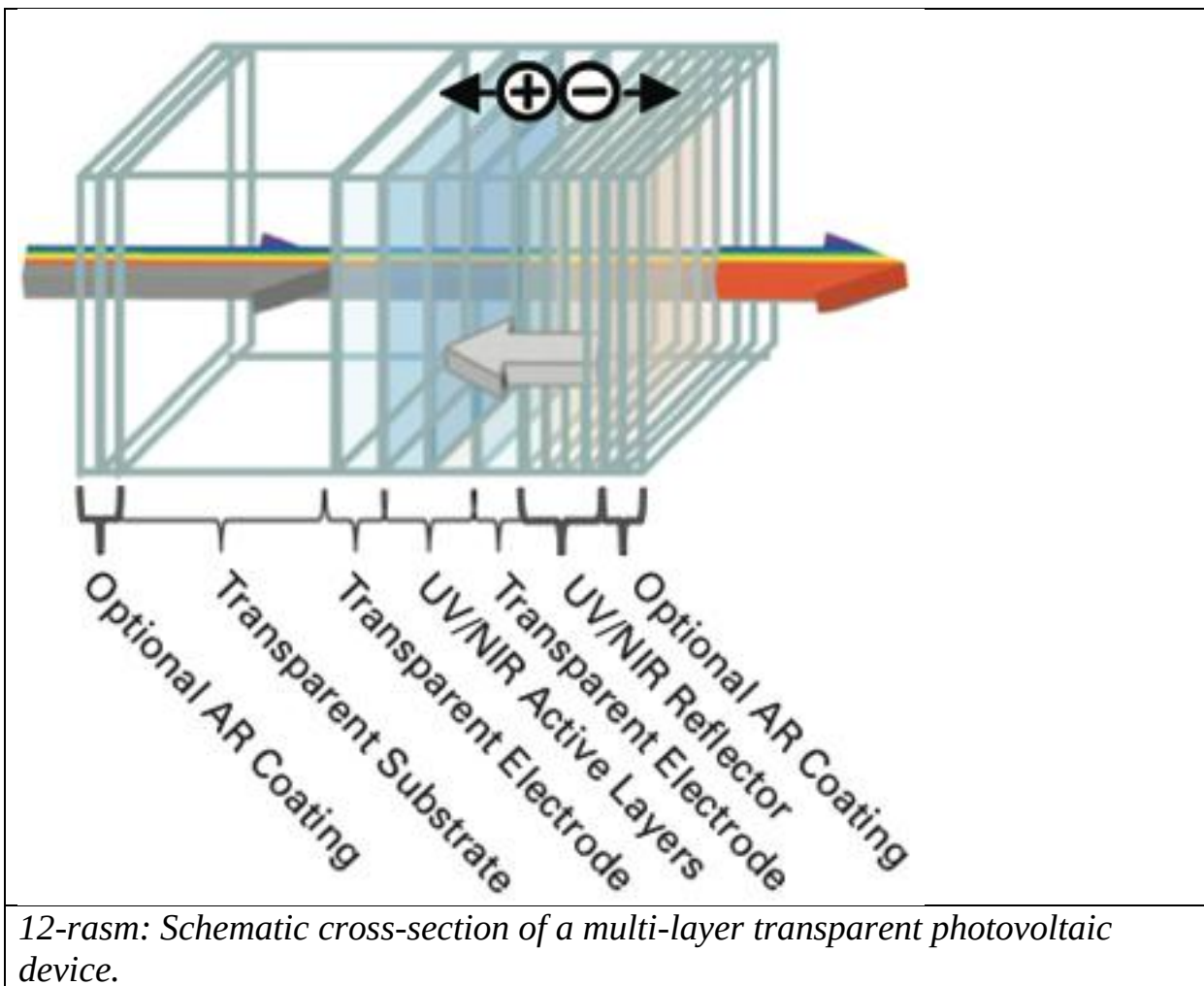
Shaffof quyosh elementlari faqat mustaqil qurilmalar sifatida emas, balki tandem konfiguratsiyalari va gibrid energiya tizimlariga integratsiyalangan holda ham energiyani maksimal darajada samarali ishlatish imkonini beradi. Tandem (ko'p uzelli) quyosh elementi odatda yuqori energiyali (katta tarmoqlanish oralig'iga ega) elementni past tarmoqlanish oralig'iga ega element ustiga joylashtirish orqali ishlaydi, bu orqali har bir qatlam spektrning turli qismini yutadi. Shaffof yoki yarim shaffof elementlar tandem tizimlarida yuqoridagi qatlam sifatida ishlatilishi uchun tabiiy nomzodlardir, chunki ular qisqa to'liqlinli yorug'likni yutadi va qolganini quyi qatlamlarga o'tkazadi.

Muvaffaqiyatli misollardan biri bu — perovskit/kremniy tandemi: yarim shaffof perovskit qatlami (tarmoqlanish oralig'i $\sim 1.7\text{--}1.8$ eV) 1.12 eV ga ega bo'lgan kremniy elementi ustiga joylashtiriladi. Perovskit yuqori energiyali ko'rinadigan va UV fotonlarini elektr energiyasiga aylantiradi, kremniy esa (opak bo'lganligi sababli) perovskit orqali o'tgan qizil va infraqizil (IR) nurlarni yutadi. Bi va boshqalar tomonidan olib borilgan tadqiqotda, perovskit/Kremniy ikki uchta tandem qurilmasi yaratilgan bo'lib, unda perovskit qatlamining qizil spektrdagi shaffofligi $\sim 50\%$ bo'lgan va umumiy tandem samaradorligi 29% atrofida bo'lgan. Ushbu qurilmada perovskit qatlamining o'zi yarim shaffof holatda 7% atrofida mustaqil samaradorlikka ega bo'lgan, lekin u kremniy elementga ko'k va yashil spektrdagi fotonlarni yutib, qo'shimcha energiya kiritgan.

Ushbu yondashuv boshqa kombinatsiyalarga ham tatbiq etilishi mumkin: masalan, yarim shaffof CIGS elementi perovskit ustiga, yoki DSSC elementi kremniy ustiga joylashtirilishi mumkin.

Bino va oynavand ilovalar uchun, bir nechta qatlamdan iborat gibrid quyosh oynalari tasavvur qilinishi mumkin: ultrabinafsha (UV) nurlarni yo'naltiruvchi shaffof lyuminessent qatlam + infraqizil (IR) to'liqlinlarni elektr energiyasiga aylantiruvchi yarim shaffof ingichka plyonkali element. Ikkilamchi PV qatlami yordamida energiyani to'liqroq yig'ish uchun ikki oynali oynavand PV tizimlar ishlab chiqilgan: tashqi oyna sirtida shaffof PV qoplama, ichki oynada esa qo'shimcha qatlam joylashgan bo'ladi. Shaffof quyosh elementlari ko'pincha past kuchlanish ishlab chiqaradi, shuning uchun tandem konfiguratsiya kuchlanishni amaliy foydalanish darajasiga olib chiqishga yordam beradi (xuddi ketma-ket ulangan elementlar kabi).

Qatlamli tuzilishlarning vizual sxemalari bu integratsiyalarni tasvirlashda foydalidir. Masalan, quyosh tomonga qaragan qatlamlar ketma-ketligi quyidagicha bo'lishi mumkin: shaffof o'tkazuvchi oksid, shundan so'ng shaffof perovskit elementi (UV va ko'rinadigan spektrning qismini yutadi), shundan keyin shaffof oraliq elektrod, va eng pastda kremniyli heterouzelli element. Bunday tandemning sxematik ko'ndalang kesimi odatda shu tarzda ko'rsatiladi.



12-rasm: Schematic cross-section of a multi-layer transparent photovoltaic device.

Tandemdan tashqari, gibridd tizimlar — shaffof PV ni boshqa funksiyalar bilan birlashtirishni anglatadi. Masalan, shaffof quyosh elementlarini elektroxromik (aqlli oyna) texnologiyasi bilan integratsiyalash bo'yicha tadqiqotlar olib borilmoqda. Aqlli oyna o'zining rangini foydalanuvchi istagiga ko'ra o'zgartirishi mumkin; u bilan birgalikda shaffof PV elementlarini joylashtirish, ushbu rang o'zgarishini quvvatlantirish uchun o'z-o'zini quvvatlovchi tizim hosil qiladi. Hatto ayrim tajriba qurilmalari shunday perovskit materiallar asosida yaratilganki, ular muayyan sharoitda shaffof holatdan rangli holatga o'tadi — bu esa “quyoshga moslashuvchi oynalar” deb ataladi.

Yana bir gibridd konsepsiya bu — shaffof PV + issiqlik energiyasi yig'ish tizimi. Oynalar orqali kirgan yorug'lik ichkarida issiqlikka aylanadi. Shaffof PV elementi infraqizil nurlarni yutib, elektrga aylantirish orqali ichki issiqlik yukini kamaytirishi mumkin (bu holatda u past emissiyali (low-E) qoplama sifatida ham ishlaydi). Fotovoltaik-issiqlik gibridd oynalari (PVT) da hatto ortiqcha issiqlikni tashqariga chiqarish uchun ichki suyuqlik kanallari o'rnatilishi mumkin. Bu murakkab dizayn bo'lishiga qaramay, bir vaqtning o'zida elektr ishlab chiqarish va quyosh issiqligini nazorat qilish orqali binoning umumiy energiya samaradorligini oshiradi.

Qishloq xo'jaligiga mo'ljallangan agrivoltaika ilovalarida esa, shaffof quyosh elementlaridan foydalanish — gibridd quyosh-qishloq xo'jaligi tizimi shaklida

amalga oshiriladi. Bunda “gibrid” — ikki xil generator emas, balki quyosh energiyasi ishlab chiqarishni o‘simlik yetishtirish bilan birlashtirishdir. Masalan, ClearVue oynasi yoki DSSC asosidagi och-yashil panellar issiqxona tomlari sifatida ishlatiladi: ular elektr ishlab chiqaradi va ayni paytda o‘simliklar uchun kerakli fotosintetik nurlarni (PAR) o‘tkazadi [6]. Ba’zi panellar UV nurlarni filtrlaydi (ular o‘simliklarga foyda keltirmaydi va zararli bo‘lishi mumkin), lekin o‘simliklar uchun foydali yorug‘likni o‘tkazadi — bu esa yer resurslaridan yanada samarali foydalanish imkonini beradi.

Xulosa qilib aytganda, shaffof quyosh texnologiyalari tizim integratsiyasida juda moslashuvchan. Ular an’anaviy quyosh elementlarini tandemda to‘ldirishi, aqlli oynalarda ko‘p funksiyani bajara olishi, va boshqa tizimlar (masalan, qishloq xo‘jaligi yoki issiqlik nazorati) bilan birgalikda ishlashi orqali umumiy energiya samaradorligini oshiradi. Texnologiya yetilayotgani sari, biz yangi ijodiy kombinatsiyalarni ko‘ramiz — masalan, shunday oynalar paydo bo‘lishi mumkinki, ular nafaqat elektr ishlab chiqaradi, balki yorug‘lik o‘tishini faol boshqaradi (komfort uchun) va hatto ingichka qatlamli akkumulyator orqali energiyani saqlaydi. Shaffof PV — bu moddalar fizikasi, optika va arxitektura muhandisligi chorrahasida joylashgan haqiqiy ko‘p sohalararo innovatsiyadir.

Shaffof Quyosh Elementlarining Samaradorligi va I–V Xususiyatlari

Shaffof quyosh elementlarini tahlil qilish va solishtirish uchun, an’anaviy quyosh elementlariga nisbatan qo‘llaniladigan asosiy fotovoltaiik tenglamalar va ko‘rsatkichlardan foydalaniladi, biroq shaffoflik omili qo‘shimcha hisobga olinadi. Muhim ishlash parametrlariga quyidagilar kiradi: ochiq zanjir kuchlanishi (V_{OC}), qisqa tutashuv oqim zichligi (J_{SC}), to‘ldirish koeffitsienti (FF) va quvvat aylanish samaradorligi (PCE). Quyosh elementi yoritilgan holatda ko‘rsatadigan tok–kuchlanish (I – V) xususiyatlari odatda Shockley diod tenglamasi yordamida (fotoishlab chiqarilgan tokni inobatga olgan holda) ifodalanadi.

$$I(V) = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Bu yerda I_{ph} — foto-generatsiyalangan tok ($V = 0$ da u qisqa tutashuv toki I_{sc} ga teng), I_0 — diodning qorong‘ulikda to‘yinganlik toki, n — idealik koeffitsienti (faktor), R_s va R_{sh} — ketma-ket va shunt (paralel) qarshiliklar, qolgan belgilar esa odatdagi ma’noga ega (q — elektron zaryadi, k — Boltsman doimiysi, T — harorat). Ideal element (qarshiliklar e’tiborga olinmasa) uchun I – V (tok-kuchlanish) egri chizig‘i asosan dastlabki ikki had orqali belgilanadi. Ochiq kontakt kuchlanishi V_{OC} esa tok $I = 0$ bo‘lgan holatda yuz beradi va quyidagicha aniqlanadi:

$$V_{OC} \approx \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right)$$

Shaffof quyosh batareyalarida ochiq kontakt kuchlanishi (V_{OC}) odatda bir xil materialdan tayyorlangan shaffof bo‘lmagan (opak) batareyalarnikiga yaqin bo‘ladi, chunki V_{OC} har bir yutilgan foton hisobiga hosil bo‘lgan kuchlanishga bog‘liq, lekin

yutilgan fotonlar soniga emas. Masalan, bo‘yoq sezgir (DSSC) yoki perovskitli batareyalar shaffof bo‘lsin yoki bo‘lmasin, V_{OC} odatda 0.8–1.0 V diapazonida bo‘ladi — shaffoflik asosan fototo‘qimadan o‘tuvchi tok (I_{ph}) ni kamaytiradi, chunki kamroq fotonlar yutiladi[5]. Aslida, shaffof dizaynlarda V_{OC} ni yuqori saqlash strategiyalaridan biri spektral selektivlikdir: yuqori energiyali fotonlarni (masalan, ultrabinafsha (UV)) yutish, odatda yuqoriroq V_{OC} ni hosil qiladi (chunki V_{OC} yutilgan fotonlar energiyasiga yoki mos energiya farqiga proportsional ravishda ortadi). Shu sababli, faqat UV nurlarini yutadigan shaffof element kengroq energiya farqiga ega bo‘lishi mumkin va butun spektrni yutadigan elementga nisbatan yuqoriroq kuchlanish hosil qilishi ehtimolga yaqin.

Qisqa tutashuvdagi tok zichligi (J_{SC}) — nol kuchlanishda birlik yuzaga to‘g‘ri keladigan tok — quyosh spektrining qancha qismi yutilganiga bevosita bog‘liq. Masalan, agar shaffof batareya ko‘rinadigan yorug‘likning X% qismini o‘tkazsa, demak u (100–X)% qismini (shuningdek, UV/IR sohalarida yutilgan nurni) yutadi. J_{SC} ni hisoblashda tashqi kvant samaradorligi (EQE) spektri bilan quyosh spektrining ko‘paytmasi integral olinadi. Misol uchun, agar element 400 nm dan kichik va 700 nm dan katta bo‘lgan fotonlarni yutsa, lekin oraliqda hech narsa yutmasa, EQE bu sohalarida taxminan 80% bo‘lishi mumkin, ko‘rinadigan diapazonda esa nolga teng. Buni AM1.5 spektriga nisbatan integrallash orqali J_{SC} qiymati olinadi. Bu J_{SC} odatdagi shaffof bo‘lmagan kremniy elementlarniki bilan (taxminan 40 mA/cm²) solishtirganda ancha past bo‘ladi — faqat bir necha mA/cm² atrofida bo‘lishi mumkin, bu yutilish diapazoni qanchalik torligiga bog‘liq. Shu sababli, ko‘p hollarda shaffof elementlarning chiqish toki kam bo‘ladi va amaliy qo‘llanishda ular ketma-ket ulanib, kuchlanish yig‘iladi.

To‘ldiruvchi koeffitsient (Fill Factor, FF) asosan qurilmaning qarshiliklari va diod sifati bilan belgilanadi. Bu bevosita shaffoflik bilan bog‘liq emas, biroq juda past tok qiymatlari ba’zi parazitarni kuchaytirishi mumkin. Sifatli ishlab chiqilgan shaffof element odatiy elementlardek yuqori FF ga ega bo‘lishi mumkin (masalan, 70–80%). Masalan, Ubiquitous Energy kompaniyasining organik elementlari 9.8% samaradorlikka erishgan holda yaxshi FF namoyish qilgan, bu esa ularning diod sifati va kontaktlarining yaxshi ishlashini ko‘rsatadi (5).

Quvvat o‘zgartishi samaradorligi (Power Conversion Efficiency, PCE) quyidagicha aniqlanadi:

$$PCE = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{in}}$$

Bu yerda P_{in} — tushayotgan quyosh quvvati (standart sharoitda taxminan 1000 Wt/m²). Shaffof elementlarda PCE ni qanday maydon va qanday quyosh nurlanishiga nisbatan aniqlash muhim. Aksariyat ilmiy maqolalar PCE ni quyosh energiyasining umumiy oqimiga nisbatan hisoblab beradi, hatto uning katta qismi qurilmadan o‘tib ketayotgan bo‘lsa ham. Ba’zilar PCE ni faqat yutilgan ko‘rinadigan yorug‘lik bo‘yicha hisoblab berishni (masalan, “ko‘rinadigan yorug‘lik bo‘yicha quvvat samaradorligi” deb atashni) taklif qilganlar, ammo odatda standart aniqlovdan foydalaniladi, bu esa yutilmagan nur uchun qurilmani penalizatsiyalaydi.

Masalan, 10% samaradorlikka ega shaffof element 1000 Vt/m^2 quyosh nurlaridan 100 Vt/m^2 quvvat hosil qiladi, hatto bu 1000 Vt/m^2 nurlanishning katta qismi qurilmadan o'tib ketgan bo'lsa ham.

Yana bir nazariy jihat — bu shaffoflik va samaradorlik o'rtasidagi muvozanatdir. Agar $T(\lambda)$ yorug'likning o'tish spektri, $A(\lambda)$ esa yutilish spektri bo'lsa (bu yerda R — aks ettirish, odatda AR (aks ettirishga qarshi) qoplama bilan kichik bo'ladi), unda har bir to'lqin uzunligi λ bo'yicha quyidagi muvozanat yuzaga keladi: $A(\lambda)$ yutilishning oshishi oqimni oshiradi, lekin ayni λ da yorug'likning o'tishini kamaytiradi. AVT (o'rtacha ko'rinadigan o'tkazuvchanlik) ni hisoblash uchun inson ko'zining sezuvchanligi (fotopik javob) va $T(\lambda)$ ni ko'paytirib integrallash mumkin, xuddi shunday, $A(\lambda)$ va quyosh spektri $\text{solar}(\lambda)$ ni ko'paytirib oqimni aniqlash mumkin. Shaffof fotoelementlarni loyihalash ko'pincha aynan mana shu spektral selektivlikni optimallashtirish bilan bog'liq.

Ba'zi ilmiy maqolalarda yorug'likdan foydalanish samaradorligi (LUE, Light-Utilization Efficiency) deb ataluvchi baholovchi ko'rsatkich kiritilgan bo'lib, bu samaradorlik va shaffoflikni ko'paytirish orqali umumiy foydalilikni o'lchaydi (masalan, bino oynalari uchun ikkalasi ham muhim). Masalan, 8% samaradorlik va 50% shaffoflikka ega elementning LUE ko'rsatkichi 4% samaradorlik va 80% shaffoflikka ega element bilan bir xil bo'lishi mumkin. Ilovaga qarab, ba'zan LUE maksimal bo'lishi afzalroq bo'ladi, oddiy samaradorlik emas.

Bundan tashqari, ko'p o'tishli (multi-junction) yoki lyuminescent tizimlarda, odatiy yagona diod tenglamasi barcha hodisalarni to'liq aks ettira olmasligi mumkin (masalan, lyuminescent konsentratorlarda chetga joylashtirilgan elementlarga optik konsentratsiya ta'siri bo'ladi). Biroq soddalashtirish maqsadida har bir PV o'tish nuqtasi umumiy I–V (tok-kuchlanish) ko'rinishiga amal qiladi.

Shu kabi standart tenglamalar shaffof elementlarni modellashtirishda qo'llaniladi, faqat yorug'likning yutilgan qismi hisobga olinadi. Amaliy qurilma tavsifi uchun ko'pincha elementning spektral o'tkazuvchanligi va spektral tashqi kvant samaradorligi (EQE) o'lchanadi. Yorug'lik ostida IV egri chiziqdan VOC, ISC, FF, PCE kabi parametrlarga erishiladi. Bundan tashqari, o'rtacha ko'rinadigan o'tkazuvchanlik (**average visible transmittance (AVT)**) quyidagicha rasmiy tarzda aniqlanadi: bu yerda $\Phi_{\text{vis}}(\lambda)$ — inson ko'zining yorug'likka sezuvchanligi (yorug'lik sezgirligi funksiyasi) bo'lib, u $T(\lambda)$ bilan ko'paytiriladi va ko'rinadigan spektr bo'yicha integrallanadi. Ushbu og'irlikli o'rtacha qiymat shuni hisobga oladi-ki, inson ko'zi yashil (taxminan 555 nm) to'lqin uzunligiga ko'proq sezgir; shuning uchun, agar element biroz qizil yorug'likni to'sib qo'ysa, u ko'proq yashilni o'tkazadigan elementga qaraganda yuqoriroq AVTga ega bo'lishi mumkin:

$$\text{AVT (400–700 nm)} = \frac{\int_{400}^{700} \Phi_{\text{vis}}(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{700} \Phi_{\text{vis}}(\lambda) d\lambda}$$

bu yerda $\Phi_{\text{vis}}(\lambda)$ — yorug'likning o'tish spektrida $T(\lambda)$ ni tortilgan tarzda og'irliklovchi inson ko'zining yorug'lik sezuvchanligi funksiyasi (luminozlik funksiyasi) hisoblanadi. Ushbu og'irliklangan o'rtacha qiymat inson ko'zi yashil

(~555 nm) to'liqin uzunligiga qizil yoki binafsha rangga qaraganda ko'proq sezgirligini inobatga oladi. Shuning uchun, agar bir fotoelement ozgina qizil yorug'likni to'sa, u ayni miqdordagi yashilni to'sadigan elementga qaraganda yuqoriroq AVTga (ko'rinarli shaffoflikka) ega bo'lishi mumkin.

Xulosa qilib aytganda, shaffof quyosh elementlari (TSC) samaradorligi bo'yicha nazariy asoslar an'anaviy fotovoltaik tenglamalarga tayanadi, faqat yutilish va o'tish spektral taqsimotiga alohida e'tibor qaratiladi. Shaffof elementlarning samaradorligi u qancha qismini quyosh spektridan foydalanishi bilan chegaralanadi. Agar element umumiy foton energiyasining faqat X foizini o'zlashtirsa, u holda uning maksimal nazariy samaradorligi bu X% miqdorning shu tarmoqqa mos Shockley–Queisser chegarasi bilan ko'paytmasiga teng bo'ladi. Shu sababli, to'liq shaffof (ko'rinadigan nurlarni o'tkazadigan) elementlar nazariy jihatdan 10–15% atrofida samaradorlikka ega bo'lishi mumkin, holbuki an'anaviy elementlar 20% dan oshadi. (1)–(3)-tenglamalar hali ham amal qiladi, faqat u yerga qo'yiladigan qiymatlar (ISC va boshqalar) selektiv yutilishga bog'liq holda o'zgaradi.

Shuningdek, Shockley–Queisser chegarasining moslashtirilgan holatlarini eslatib o'tish mumkin: berilgan tarmoqli oralig'i (bandgap) va spektral soha uchun bu chegara o'zgaradi. Masalan, faqat 400 nm dan kichik to'liqin uzunliklarini yutadigan element (bandgap ~3.1 eV) nazariy jihatdan AM1.5 sharoitida 5–6% samaradorlikka ega bo'ladi, holbuki <700 nm ni yutadigan (~1.8 eV) element 20% gacha yetishi mumkin. Shaffof elementlar ko'pincha yuqori tarmoqli oralig'iga ega elementlar kabi harakat qiladi (agar ular ko'rinadigan spektrdan qochsa), shuning uchun ularning nazariy maksimumi pastroq bo'ladi. Ko'p qavatli shaffof dizaynlar (masalan, UV va IR uchun alohida shaffof elementlarni ustma-ust joylashtirish) ushbu spektral tarmoqlarning umumiy samaradorligiga yaqinlashishi mumkin.

Ishlashni loyihalash va bashorat qilish uchun tadqiqotchilar yuqoridagi tenglamalar bilan birga optik modellarni ham qo'llaydi. Masalan, transfer matritsa usuli (transfer matrix method) yordamida shaffof ko'pqatlamli elementning kvant samaradorligini modellashtirish mumkin. Yaqinda olib borilgan tadqiqotlarda PVA/NaI qatlamlari va amorf kremniy asosida dopingning shaffof elementlar kvant samaradorligiga qanday ta'sir qilishi hisoblangan. Bunday nazariy modellar qatlamni yupqalashtirish orqali qanday qilib oqim kamayishini yoki reflektor qo'shish orqali ikkilamchi yutilishni kuchaytirishni ko'rsatib beradi.

Xulosa sifatida aytish mumkinki, shaffof quyosh elementlari xuddi odatdagi diod I–V bog'lanishlariga amal qiladi, lekin ularning fototoklari ataylab shaffoflik kiritilgani uchun pastroq bo'ladi. VOC, ISC, FF va samaradorlik (PCE) uchun tenglamalar an'anaviy elementlardagidek ishlatiladi, AVT esa shaffoflikni o'lchovchi qo'shimcha parametr sifatida qo'shiladi. Bu yondashuvlar turli texnologiyalarni adolatli taqqoslash va eng maqbul kuch chiqishi hamda yorug'lik o'tkazuvchanligi muvozanatini aniqlashga imkon beradi.

Turli Shaffof Quyosh Elementi (TSC) Texnologiyalarining Solishtirma Ishlash Ko'rsatkichlari

Turli TSC (shaffof quyosh elementi) texnologiyalarining solishtirma samaradorligi

Shaffof quyosh texnologiyalari samaradorlik va shaffoflik darajasi bo'yicha sezilarli farqlarga ega. Quyida biz asosiy TSC turlari uchun odatiy ishlash ko'rsatkichlarini umumlashtiruvchi taqqoslama jadvalni taqdim etamiz. Jadvalda quvvat aylantirish samaradorligi (PCE), o'rtacha ko'rinadigan shaffoflik (AVT) hamda har bir texnologiyaning vakil namunalariga xos odatiy kuchlanish/tok xarakteristikallari keltirilgan.

1-jadval. Shaffof Quyosh Elementi Texnologiyalarining Taqqoslanishi – Foydalanish Samaradorligi, Shaffoflik va Muhim Parametrlar.

Texnologiya va Misol	PCE (Samaradorlik)	O'rtacha Ko'rinadigan Shaffoflik (AVT)	Odatdagi VOC (V)	Izohlar (JSC zichligi va boshqalar)
Shaffof Lyuminescent Quyosh Konsentratori (TLSC) – masalan, MSU 2014 prototipi[1]	~1%	~86% (to'liq shaffof)	– (chetidagi kremniy elementlar)	UV va IR ni yutadi, IR ni chetlarga qayta nurlantiradi. Juda yuqori shaffoflik; tok chekka elementlar orqali yig'iladi. Yaxshilangan dizaynlar ~5–10% PCE ni 50–70% AVT da maqsad qilmoqda[1][5]. Ru asosidagi bo'yoqdan foydalanadi (to'q sariq rang). JSC ~15–20 mA/cm ² . Tijoriy DSSC oynalari odatda 3–5% PCE, 50% AVT bilan turli ranglarda. Ikki tomonlama dizaynlar har ikki tomondan nurdan foydalanadi.
Bo'yoqqa sezuvcha quyosh elementi (DSSC) – TiO ₂ bilan bosilgan laboratoriya elementi[30]	9.2%	~60% (yarim shaffof, sarg'ish)	~0.8 V	

Texnologiya va Misol	PCE (Samaradorlik)	O‘rtacha Ko‘rinadigan Shaffoflik (AVT)	Odatdagi VOC (V)	Izohlar (JSC zichligi va boshqalar)
Perovskit yarim shaffof element – Univ. Antioquia 2014[35]	6.4% – 7.3%	29% – 22% (ikki variant)	~0.9–1.0 V	CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskit, juda yupqa metall elektrod bilan. Yuqori shaffoflik varianti pastroq PCE berdi. Yangi perovskit tandemlar: ~12% (faqat yuqori qatlam) ~50% AVT bilan, 25%+ tandem samaradorligida ishlatilgan. UV+IR uchun organik yutuvchilar. Newport laboratoriyasi tomonidan sertifikatlangan[5].
Organik/Polimer shaffof PV – Ubiquitous Energy rekordi 2020[22]	9.8% (kichik maydonli element)	~50% (tahminiy, yuqori shaffoflik)	~1.0 V	Kutilayotgan mahsulot: ~7% modul samaradorligi, 50%+ AVT bilan[5]. Avvalgi MIT elementi: 2% PCE, 70% AVT[4]. JSC odatda ~5 mA/cm ² 70% AVT da.
Kvant nuqtali LSC (QD-TSC) – masalan, ClearVue Gen2 Glass[5]	~3% (modul, ~30 W/m ²)	~70% (yuqori shaffoflik)	–	Si/QD zarrachalari oynada, IR ni chekkadagi c-Si yo‘lakchalarga yuboradi. Har bir 1.2×1.1 m oyna ~30–33 W (~3% eff) ishlab chiqargan[5].

Texnologiya va Misol	PCE (Samaradorlik)	O‘rtacha Ko‘rinadigan Shaffoflik (AVT)	Odatdagi VOC (V)	Izohlar (JSC zichligi va boshqalar)
Qisman shaffof kristalli kremniy – masalan, 50% qoplamali BIPV fasad paneli	~10% (modul)	~50% (yorug‘)	~0.6 V har bir element uchun	Keyingi avlod ~5% PCE ga yaqinlashmoqda. VOC chekka elementlarga bog‘liq (masalan, 36 elementli seriyada 18 V). Standart c-Si elementlar (20% eff) faqat yarim maydonni qoplaydi. Seriyali ulangan elementlar modul kuchlanishini beradi (masalan, 36 element uchun 20 V). Ko‘rinadigan to‘r shakli, rangli ko‘rinish. Mustahkam, ammo dizayn cheklangan[4]. Interdigitatli orqa kontaktli c-Si, mikrostrukturaviy shaffoflik bilan. Past shaffoflikda yuqori samaradorlik[10].
Kristalli kremniy ABC (All-Back-Contact) – UNIST 2024[55]	15.8% (element), 14.7% (modul)	20% (neytral tus)	0.64 V har bir element uchun	16 cm ² modul (4 ta element seriyada) 10 V, 235 mW ishlab chiqargan[11]. Kelajakda yuqoriroq shaffoflik bilan yirik modullar yaratilishi mumkin.

Manbalar: Ishlash samaradorligi haqidagi ma'lumotlar so'nggi ilmiy adabiyotlar va hisobotlardan tuzilgan: IntechOpen boblari[1], PV Magazine maqolalari[42][55], kompaniyalar press-revizlari hamda akademik nashrlar[5][6]. Bu qiymatlar eng yaxshi holat yoki e'tiborga molik natijalarni ifodalaydi; amaliy tijorat mahsulotlarida samaradorlik odatda pastroq bo'ladi.

1-jadvaldan biz aniq tendensiyalarni ko'ramiz: TLSC va QD-LSC texnologiyalari eng yuqori shaffoflikka erishgan (70–80% dan yuqori), ammo hozircha ular eng past samaradorlikka ega (bir necha foiz atrofida). Aksincha, kristalli yarimo'tkazgichlarga tayanadigan yondashuvlar (kremniy yoki tandemdagi perovskit) ikki xonali samaradorlikka chiqishi mumkin, biroq bu ko'rinishda sezilarli tus (20–50% AVT) evaziga amalga oshiriladi. DSSC va organiklar oraliq holatda joylashgan bo'lib, o'rtacha 5–10% samaradorlikni o'rtacha shaffoflik bilan taqdim etadi.

Kuchlanish va tok xarakteristikalari haqida eslatib o'tish lozim: to'liq shaffof konsentrator tizimlarida (TLSC, QD-LSC) kuchlanish odatda chekkadagi kremniy elementlari orqali hosil qilinadi – masalan, katta TLSC oynasi ~5 V chiqara oladi (agar 10 ta kichik kremniy element ~0.5 V dan ketma-ket ulanganda), tok esa oyna yuzasiga va lyuminofo samaradorligiga mutanosib bo'ladi. Boshqa tomondan, yupqa qatlamli shaffof elementlar (DSSC, perovskit, OPV) pastroq tok zichligini ishlab chiqaradi, shuning uchun ular amaliy foydalanish uchun odatda ketma-ket ulanadi. Masalan, Ubiquitous Energy kompaniyasining shaffof oynalari ko'p sonli kichik shaffof element segmentlarini ketma-ket ulash orqali bitta panelda yuqori kuchlanishga erishadi[72]. Bunday modulli dizayn prototiplarda ko'rinadi – oyna chetidagi shinalar ketma-ket ulangan shaffof elementlar zanjirlarini bog'laydi.

Samaradorlik va shaffoflik o'rtasidagi muvozanat muhim solishtirma mezon hisoblanadi. Ba'zi tadqiqotchilar har xil texnologiyalar uchun PCE va AVT o'rtasidagi bog'liqlikni chizib ko'rsatishgan: $AVT \rightarrow 100\%$ bo'lsa, $PCE \rightarrow 0\%$ bo'ladi. Maqsad – bu grafikda “tirsak nuqtasi”ni topishdir, ya'ni muhim samaradorlik maqbul shaffoflikda saqlanadigan nuqta. Bino oynalari uchun odatda ~50% AVT minimal hisoblanadi (aksariyat arxitektura oynalari shundoq ham 50% yoki undan kam bo'ladi). Shunda perovskit va organiklar haqiqatdan ~5–10% samaradorlikka erisha oladi, bu juda istiqbolli. Agar oyna 50% shaffoflikda 10% samaradorlikni berolsa – bu juda jozibali bo'ladi (ayrim kompaniyalar aynan shunga yaqin natijalarga erishayotganini da'vo qilishmoqda). Transport vositalari yoki kichik qurilmalar uchun esa pastroq shaffoflik maqbul bo'lishi mumkin (masalan, telefon ekranida ~30–40% AVT yetarli). Bunday holatlarda ABC kremniy elementi kabi yechimlar 20% AVT bilan ham yetarlicha ko'rish imkonini va elektr hosil qilishni ta'minlaydi.

I–V egri chiziqlariga kelsak, shaffof elementlar shaklan standart elementlarga o'xshash bo'ladi, ammo qisqacha tutash toki (ISC) pastroq bo'ladi. Masalan, shaffof DSSC odatdagi DSSC ga qaraganda vertikal o'qni (tok o'qini) pastroq kesib o'tadi. Agar qurilma sifati yaxshi bo'lsa, FF (to'ldirish faktori) va V_{OC} atrofidagi nishab o'xshash bo'lib qoladi. Adabiyotlarda DSSC ning turli ishlab chiqarish usullari uchun I–V chiziqlari ko'rsatilgan. Umuman olganda: DSSC $V_{OC} \sim 0.7$ V, ISC bir necha mA/cm²; OPV $V_{OC} \sim 0.9–1.2$ V (donorga bog'liq) va I_{SC} ham shunga yaqin;

perovskitlarda $V_{OC} \sim 1$ V (1.6–1.7 eV band oralig'i), agar u juda shaffof bo'lmasa, yuqoriroq tok hosil bo'ladi; kremniy $V_{OC} \sim 0.6$ V bo'ladi va tok faqat faol yuzaga bog'liq.

Barqarorlik va kengaytirish imkonini ham solishtirish kerak. Kremniy asosidagi va noorganik yupqa qatlamli yondashuvlar (masalan, ClearVue oynasi yoki ABC-Si) odatdagi PV panellaridek 20–30 yillik umrga ega bo'ladi. DSSC va organiklar esa tarixan qisqaroq umrga ega (bo'yoqning buzilishi yoki kislorod kirishi tufayli), ammo yaxshi qoplama bilan ba'zilar 5–10 yilgacha real sharoitda ishlashi mumkin. Perovskitlar esa ayniqsa UV va issiqlik ta'sirida barqarorlik muammosiga ega – bu shaffof elementlar uchun muammo, chunki ular aynan UV ni yutadi. Shu sababli maxsus kapsulalar va UV-filtrlovchi qoplamalar qo'llaniladi (hatto ayrim dizaynlar UV ni perovskitdan himoya qiladigan va shu bilan birga lyuminescent qatlarga uzatadigan qoplamalardan iborat).

Xulosa qilib aytganda, hozircha hech bir texnologiya yuqori samaradorlik va yuqori shaffoflikni birlashtira olmayapti, ammo mavjud yondashuvlar qo'llanilishiga qarab tanlov imkonini beradi. 1-jadval hozirgi holatni umumlashtiradi: agar eng shaffof ko'rinish kerak bo'lsa, TLSC/LSC mos; yuqori quvvat kerak bo'lsa va biroz tusga toqat qilinsa, kremniy yoki perovskit yechimlari afzal. Bugun ~5% PCE ga 50% AVT bilan (organik, DSSC, perovskit orqali), ~10% PCE ga 30% AVT bilan (perovskit yoki kristalli) yoki ~1–3% PCE ga 90–100% AVT bilan (LSC) erishish mumkin. Bu ko'rsatkichlar loyiha muhandislari va me'morlar uchun amaldagi shaffof quyosh elementlari imkoniyatlarini belgilab beradi.

Amaliy tatbiqi va foydalanish Imkoniyatlari

Shaffof quyosh batareyalari (Transparent Solar Cells, TSCs) passiv bo'lgan yuzalarni energiya manbaiga aylantirish orqali keng qo'llash imkonini yaratadi. Quyida ushbu texnologiyalar qo'llanilayotgan yoki rejalashtirilayotgan asosiy sohalar hamda ularning afzalliklari muhokama qilinadi:

- **Binoga Integratsiyalashgan Quyosh Batareyalari (BIPV – Oynalar va Fasadlar):** Eng muhim ilovalardan biri arxitektura oynalarida qo'llanilishidir. Zamonaviy binolarda ko'p miqdorda shisha maydon mavjud (oynalar, fasad panellari, tom oynalari). Ushbu yuzalarni elektr ishlab chiqaruvchi shaffof panellar bilan almashtirish orqali binolar tashqi ko'rinishini o'zgartirmasdan vertikal quyosh fermalariga aylantirish mumkin. Shaffof quyosh panellari binoning energiya ehtiyojining muhim qismini ta'minlay oladi (ayrim hisob-kitoblarga ko'ra, yuqori darajada shishalangan binolarda bu ko'rsatkich 40% ga yetishi mumkin[2]). Ular infraqizil (IR) filtratsiyasi orqali sovitish yukini ham kamaytiradi. **Ubiquitous Energy** va **ClearVue** kabi kompaniyalar xavfsizlik standartlariga mos keluvchi, ammo quyosh energiyasini ham ishlab chiqaruvchi tijorat va turar-joy oynalarini ishlab chiqmoqda. "Net-zero" (energiya jihatdan neytral) binolar bunday oynalarni tomdagi quyosh panellari bilan birga ishlatib, o'z-o'zini energiya bilan ta'minlay oladi. Estetik moslashuvchanlik ham muhim afzallikdir: DSSC yoki organik PV oynalari turli tustarda (sariq, ko'k, yashil) ishlab chiqilishi mumkin. Tarixiy yoki badiiy binolar uchun esa ko'rinishni saqlab qoluvchi shaffof PV qoplamalar ishlatilishi mumkin (masalan, muzey tomidagi shisha oynaga shaffof qoplama qo'llash).

- **Avtomobil va Transport Sohalar:** Transport vositalarida katta shisha yuzalar mavjud – old oynalar, tom oynalari, yon oynalar – bu yuzalar odatda faqat issiqlikni ichkariga o'tkazadi. Avtomobillarda shaffof quyosh panellari batareyani sekin quvvatlantirishi yoki yordamchi tizimlarga quvvat ta'minlashi mumkin. Masalan, **Toyota** shaffof quyosh tom panellari bilan tajriba o'tkazgan. To'liq shaffof old oynani ishlab chiqish murakkab (yoritilish va xavfsizlik talablari tufayli), biroq yarim shaffof tom oynalari amaliy yechim bo'lishi mumkin. **Audi** va **Hyundai** quyosh panelli avtomobil tomlarini ko'rsatgan (ular kristalli yoki noaniq yupqa qatlamli elementlar edi). Haqiqiy shaffof PV yordamida har qanday avtomobil oynasi elektr manbaiga aylanishi mumkin. Bu yechimlar avtobuslar, poyezdlar (poyezd oynalari elektron tizimlar uchun energiya ishlab chiqaradi), hattoki samolyot va sun'iy yo'ldosh panellari (shaffoflik zarur bo'lmagan, lekin vazn muhim bo'lgan joylarda) uchun ham qo'llanilishi mumkin. Shuningdek, **issiqlxonalar** ham transportga yaqin yo'nalishda ko'rib chiqiladi – ular shaffof struktura bo'lgani uchun, PV panellari o'simliklarga zarar yetkazmasdan o'rnatilishi lozim. Bu yerda shaffof quyosh panellari (xususan, UV/IR ni yutib, PAR ni o'tkazuvchi) ideal yechim bo'ladi: **agrivoltaik issiqlxonalar** ham elektr ishlab chiqaradi, ham o'simlik o'sishini ta'minlaydi. **ClearVue** kompaniyasining Avstraliyadagi dala sinovlari issiqlxonadagi PV oynalari umumiy energiya ehtiyojining 40% ini qoplaganini ko'rsatdi[10].

- **Iste'mol Elektronikasida:** Eng qiziqarli sohalardan biri – qurilmalar ekranlariga shaffof batareyalarni integratsiya qilishdir. Smartfon, planshet, e-kitoblar, noutbuklar ekranlariga shaffof PV qatlami qo'shilishi mumkin. Bu qurilmaning muhit yoritilishidan o'z-o'zini quvvatlantirishini yoki batareya umrini uzaytirishini ta'minlaydi. Masalan, OLED ekranga ega telefon shaffof PV bilan qoplangan bo'lsa, u quyosh yoki xonadagi yorug'likda asta-sekin quvvatlanishi mumkin. Ba'zi **Kindle** prototiplari ekran ramkasida quyosh quvvatiga ega bo'lgan, shaffof PV bo'lsa, butun ekran bo'yicha qo'llanishi mumkin. Bunda asosiy muammo – ekran sifati yomonlashmasligi kerak. Reflektiv displeylar yoki ikki qatlamli LCD texnologiyalari bilan yaxshi integratsiya mumkin. Boshqa misol: aqlli soatlar – displey ustiga joylashtirilgan shaffof PV yoki AR ko'zoynaklar linzalaridagi PV qoplama orqali elektronika quvvatlanadi. Ushbu ilovalar yuqori shaffoflikni (90% gacha) talab qiladi, lekin past quvvatli qurilmalar uchun bu yetarli bo'ladi.

- **Tashqi Makon va Infratuzilma:** Shaffof PV kutilmagan joylarda ham qo'llanilishi mumkin. Avtobus bekatlari panellari, shaffof panelli billboardlar, shaffof yo'l belgilarida PV plenklar ishlatilishi mumkin. Masalan, shahar yoritgichlarida – ustun yoki chiroq qopqog'i shaffof PV bo'lishi mumkin, u kunduzi batareyani zaryadlab, kechasi LEDni yoqadi. Shuningdek, shahar dehqonchiligi va vertikal issiqxonalar ham shaffof PV yordamida energiya tejamkorligini oshirishi mumkin.

- **Estetik va Ko'p Funktsiyali Arxitektura Elementlari:** Shaffof PV faqat oynalar bilan cheklanmaydi. U atrium tomlari, shisha pol panellari yoki elektr manbaiga aylanishi mumkin bo'lgan ichki dizayn qismlarida qo'llanilishi mumkin. Smart fasadlar shaffof PV, sensorlar va displeylarni birlashtirgan bo'lishi mumkin. Masalan, binoning tashqi devori elektr ishlab chiqaradi va shu bilan birga LED ekran sifatida ham ishlaydi. **Physee** kabi kompaniyalar PV bilan birga atrof-muhit sensorlarini ham o'z ichiga olgan "aqlli oynalar"ni ishlab chiqarmoqda[1].

Asosiy afzallik – bu **maydon samaradorligi**: shaffof PV allaqachon mavjud va boshqa funktsiyani bajarayotgan sirtlardan foydalanadi. Bu, ayniqsa, tom maydoni cheklangan shahar hududlarida muhim. Bino fasadlari esa juda ko'p, ular optimal burchakka ega bo'lmasligi mumkin, lekin baribir quyosh nuri oladi – ayniqsa oynali minoralarda.

Lekin joriy etish masalalari ham mavjud:

- **Rekonstruksiya vs Yangi Qurilish:** Yangi binolarda shaffof PV ni o'rnatish osonroq, chunki elektr tarmog'i, inverterlar va ozgina yuqori boshlang'ich xarajatlar oldindan rejalashtiriladi. Mavjud oynalarga PV qo'shish qiyinroq, lekin imkonsiz emas; yupqa PV plyonka yoki laminatlar mavjud oynalarga yopishtirilishi mumkin.

- **Tarmoq Integratsiyasi va Saqlash:** Quyosh energiyasining beqarorligi sababli, ko'plab oyna panellari energiya ishlab chiqarganida, uni tarmoqqa uzatish yoki saqlash mexanizmlari zarur. Telefon kabi qurilmalarda esa bu oddiy – batareya zaryadlovchi zanjir bilan bog'lanadi.

- **Mustahkamlik va Texnik xizmat:** Arxitektura va avtomobil ilovalarida shaffof PV ob-havo, UV, harorat tsikllariga bardoshli bo'lishi kerak. Ko'plab

texnologiyalar (masalan, organiklar va perovskitlar) hali uzoq muddatli sinov bosqichida. Laminatsiyalangan oynalarda kapsullash ularni himoya qilishi mumkin. Tozalash ham muhim: iflos oynalar shaffoflik va PV chiqishini pasaytiradi. O‘z-o‘zini tozalovchi qoplamalar qo‘llanishi mumkin.

- **Me‘yoriy Talablar va Xavfsizlik:** Strukturaviy oynalarga har qanday o‘zgartirishlar tartibga solinadi (mustahkamlik, yong‘inga chidamlilik, h.k.). Shaffof PV panellari ham shu standartlarga javob berishi kerak. Elektr xavfsizligi ham ta‘minlanishi lozim (PV qatlamlari to‘g‘ri izolyatsiyalangan bo‘lishi kerak). Ko‘plab mahsulotlar aktiv PV qatlamini ikki qavatli shisha orasida joylashtirib, ichki foydalanuvchi uchun xavfsizlikni ta‘minlaydi.

- Shunga qaramay, ushbu texnologiyaga oid sinov loyihalari allaqachon konsepsiyaning amalda ishlashini tasdiqlamoqda. Masalan, 2017-yilda Michigan universiteti Michigan Shtat Universiteti (MSU) tomonidan ishlab chiqilgan shaffof luminessent quyosh kontsentratorlarini (TLSC) binolar oynalariga o‘rnatdi va ularning real sharoitdagi samaradorligini sinovdan o‘tkazdi (binodagi odamlar ularni deyarli sezmagani). Niderlandiyada esa **Physee** kompaniyasi ofis binosida PowerWindow oynalarini o‘rnatdi — bu shaffof panellar bo‘lib, chetlariga joylashtirilgan quyosh batareyalari bir necha vatt quvvat ishlab chiqaradi va quyosh nuri asosida shamollatishni boshqaruvchi sensorlarni quvvatlantiradi. Bunday dastlabki joriy etishlar shuni ko‘rsatadiki, hatto kichik quvvat hissa (masalan, bir bino o‘z oynalaridan 50 kW quvvat olsa) yillik yoritish va iqlim nazorati yuklamasini sezilarli darajada kamaytirishi mumkin.

- Transport vositalariga nazar tashlasak, 2019-yilda **Toyota** Yaponiyada **Prius** modelini quyosh panelli tom bilan taklif qildi (bu panellar 12V akkumulyatorni zaryadlay olgan). Garchi bu panellar noaniq (ya‘ni shaffof bo‘lmagan) bo‘lgan bo‘lsa-da, kelajak avlod avtomobillari shaffof quyosh tom oynalari bilan jihozlanishi mumkin — bu esa yo‘lovchilarga osmon manzarasidan bahramand bo‘lish imkonini beradi. Ba‘zi tajriba asosidagi quyosh avtomobillari (masalan, **Lightyear**) old oyna yuqori qismiga yarim shaffof quyosh panellari o‘rnatishni ko‘rib chiqdi (bu joyda haydovchi ko‘rish talab qilmaydi). Transport infratuzilmasida esa London va Dubayda joylashgan avtobus bekatlarida allaqachon yarim shaffof quyosh panellari yoritish va axborot displeylarini quvvatlantirish uchun ishlatilmoqda.

- Noyob bo‘lgan bir qo‘llash sohasi — bu kosmik kemalar va sun‘iy yo‘ldoshlar: ular odatda elektr energiyasi uchun quyosh panellaridan foydalanadi, lekin ba‘zida optik asboblari yoki sensorlar ochiq ko‘rish maydoniga ega bo‘lishi kerak. Shaffof quyosh batareyalari teleskop yoki sensor korpusini qoplab, quvvat ishlab chiqarish bilan birga yorug‘likning katta qismini asbobga o‘tkazishi mumkin — bu holatda kosmik apparat yuzasining cheklangan maydonida ikki funktsiyani birlashtirishga erishiladi. Bundan tashqari, estetik loyihalar uchun ham qo‘llanilishi mumkin: masalan, Xalqaro kosmik stansiyadagi **“cupola”** (kuzatuv oynasi) ustiga shaffof PV qoplama qo‘llanilsa, bu ozroq bo‘lsa-da, qo‘shimcha quvvat ishlab chiqarishi mumkin (garchi XKS allaqachon katta quyosh panellariga ega bo‘lsa-da).

- Xulosa qilib aytganda, shaffof quyosh batareyalari universal quyosh energiyasidan foydalanish imkonini beradi — bu texnologiya osmono‘par binolardan tortib smartfon ekranlarigacha bo‘lgan yuzalarni elektr manbaiga

aylantiradi. Ular dizaynerlarga tabiiy yorug'lik va ko'rish qulayligi bilan elektr ishlab chiqarishni birlashtirish imkonini beradi. Samaradorlik va xarajatlar yaxshilanishi bilan bu texnologiyalarning joriy etilishi kengayishi kutilmoqda. Kelajakda quyidagilar odatiy holga aylanishi mumkin: har bir yangi bino PV oynalar bilan quriladi, har bir avtomobil to'xtash joyida o'zini zaryadlaydi, va shaxsiy gadjetlar ko'rinmas PV texnologiyalari orqali muhitdan energiya oladi — bu esa hech qanday ko'rimsiz panellar yoki zaryadlovchisiz energiya muammosini hal etadi.



13-rasm: **ClearVue** kompaniyasining shaffof quyosh oynalari o'rnatilgan issiqxona. Devorlarda va tomda ko'rinayotgan shisha panellar tashqi ko'rinishi jihatidan oddiy shishalardan deyarli farq qilmaydi — ular taxminan **70% shaffoflikni** saqlagan holda, quyosh nurlaridan **elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi fotovoltaik funksiyani** o'z ichiga oladi [24]. **Avstraliyadagi Murdoch universitetida o'tkazilgan ikki yillik sinov** davomida ushbu quyosh oynalari har kvadrat metrga taxminan **30 Vt** quvvat ishlab chiqardi va shamollatkichlar hamda atrof-muhitni nazorat qiluvchi tizimlarni elektr bilan ta'minladi, shu bilan birga o'simliklar o'sishi uchun zarur yorug'likni yetarli darajada o'tkazdi. Bu holat **qishloq xo'jaligida shaffof quyosh texnologiyalarini qo'llash imkoniyatini** namoyon qiladi — ya'ni ular **bir vaqtning o'zida panoh, yorug'lik va energiya manbai** bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Muammolar, Cheklovlar va Kelajak Yo'nalishlari

Shaffof quyosh batareyalari (TSC) ko'plab imkoniyatlarni taqdim etsa-da, texnologiyani keng tijoratlashtirish sari harakatlanishda yechilishi kerak bo'lgan bir

qator muhim muammolar mavjud. Quyida biz asosiy cheklovlar va ularni bartaraf etishga qaratilgan ilmiy-tadqiqot yo'nalishlarini ko'rib chiqamiz:

- **Samaradorlik va Shaffoflik o'rtasidagi muvozanat:** Yuqorida ta'kidlanganidek, yuqori shaffoflik va yuqori quvvat ishlab chiqarish o'rtasida tabiiy murosaga ehtiyoj bor. Hozirgi shaffof PV texnologiyalarining aksariyati an'anaviy xira panellar samaradorligiga yetolmaydi. Ayniqsa, energiyaga talab yuqori bo'lgan sohalarda qo'llanishi uchun, shaffof elementlarning samaradorligi oshirilishi zarur. Kelgusidagi yo'nalishlarga quyidagilar kiradi: ko'p-qavatli shaffof panellar (spektrning turli qismlarini yutuvchi qatlamlar ustma-ust joylashtiriladi), yorug'likni boshqarish strukturasi (masalan, ko'rinadigan yorug'likni o'tkazib, IR nurlarni ushlab qoluvchi fotonik strukturalar). Shuningdek, spektal tanlovli oynalar va filtrlar orqali IR nurlarni qayta yutishga yoki UVni boshqa qatlamga (masalan, luminescent qatlamga) yo'naltirish taklif qilinmoqda[4]. **"Kvant bo'lish"** konsepsiyasi ham istiqbolli: bitta yuqori energiyali UV fotonni ikki past energiyali IR fotonga aylantirib, ko'rinadigan yorug'likni yutmasdan tok hosilini ikki baravar oshirish mumkin (bu maxsus fosforlar yoki kvant nuqtalari yordamida amalga oshiriladi).

- **Materiallar barqarorligi va xizmat muddati:** Eng istiqbolli shaffof PV materiallari (organiklar, perovskitlar, bo'yoqlar) ko'pincha atrof-muhit omillariga (kislorod, namlik, UV) ta'sirida yemiriladi. Masalan, **organik polimerlar fotoyemirilishga, perovskitlar esa parchalanish va qo'rg'oshin chiqarishga** moyil. Quyosh mahsulotlarining odatiy 20+ yillik xizmat muddatiga yetkazish bu boradagi asosiy muammo. Ayniqsa, shaffof panellar UV yutishga qaratilgani uchun, ular aynan zararkunanda nurlanishga ta'sirchan bo'ladi. **Ko'p qatlamli himoya qoplamalari, UV filtrli ustki qatlamlar** (bu esa ba'zi UV energiyasini yo'qotishi mumkin – samaradorlik va barqarorlik o'rtasida muvozanat zarur) muhim rol o'ynaydi. Yoki **yanada barqaror materiallar** kerak bo'ladi. DSSC bo'yoqlarida, fotoyemirilishga bardoshli **yangi metall komplekslar va organik bo'yoqlar** ishlab chiqilmoqda. Organik PVda **to'liq fullerensiz qabul qiluvchilar** va UVga chidamli polimerlar paydo bo'lmoqda. Perovskit sohasida esa barqarorlikni oshirish bo'yicha qizg'in izlanishlar ketmoqda – **2D/3D gibrid perovskitlar, qo'shimchalar (masalan, Cs, Rb) bilan doplash**, hamda **o'zini-o'zi tuzatuvchi kapsulyatsiya texnologiyalari**.

Yana bir barqarorlik omili – **issiqlikka chidamlilik**. Quyosh ostida oynalar qiziydi; quyosh batareyasi esa harorat almashinuvida ishlay olishi lozim. Ba'zi shaffof panellar (perovskit yoki suyuq elektrolitli DSSC) **ekstremal issiqlik yoki sovuqqa** bardosh berolmasligi mumkin (elektrolitlar muzlashi yoki kengayishi mumkin). Kelajakda har xil iqlim uchun mo'ljallangan shaffof PV dizaynlari ishlab chiqilishi zarur (masalan, **qattiq elektrolitli DSSC, keng haroratli materiallar, mukammal muhrlash**).

- **Ishlab chiqarish va masshtablash:** Ko'plab yuqori samarali shaffof elementlar hali ham **laboratoriya usullarida** (spin-qoplama, termal bug'latish) yaratilmoqda. Bularni katta o'lchamli ishlab chiqarishga o'tkazish, ayniqsa deraza o'lchamidagi panellar uchun, murakkab. Roll-to-roll bosma texnologiyalari (organik va perovskitlar uchun), katta o'lchamli purkash yoki slot-die qoplama, hamda **shaffof elektrodlar uchun yuqori tezlikdagi sepish (sepish)** usullarini moslashtirish zarur.

Silliqlik juda muhim — shaffof oynada minimal dog‘ yoki notekislik sezilarli ko‘rinadi. ABC kremniy elementi uchun esa **mikron darajadagi ishlov berish** kerak bo‘ladi. Bu dastlab qimmatga tushadi. Biroq yutuqlar kuzatilmoqda: masalan, **Saule Technologies** kompaniyasi siyoh-purkash orqali perovskit plyonkalarni ishlab chiqmoqda (hozircha shaffof emas, lekin texnologiya o‘tkazilishi mumkin). **Heliatek** esa organik plyonkalar uchun roll-to-roll liniyalarni qurdi. Kelajakda shaffof PV qoplamalarni **bug‘lanish orqali oynaga surishtirish** (xuddi Low-E qoplamalar kabi) ehtimoldan xoli emas. Narx omili ham muhim: **indiy** (ITO uchun) yoki **telluriy** kabi kamyob materiallar massaviy ishlab chiqarishda to‘siq bo‘lishi mumkin. Shu sababli **uglerod nanotubalari, grafen, o‘tkazuvchan polimerlar** kabi alternativalar bo‘yicha izlanishlar olib borilmoqda.

• **Elektr integratsiyasi va ulanishlar:** Deraza ramkasi ichidagi shaffof modullardan elektr olish uchun **ko‘rinmas yoki estetik simlar** kerak. Odatda, shaffof panellar ramkaga joylanadi va simlar deraza bo‘ylari (mullion) ichida yashiriladi. Masalan, **Physee** kompaniyasining PowerWindow dizaynida shisha chetida kichik quyosh panellari va **mikroinvertorlar** yoki **DC konvertorlar** mavjud. Yopishtiriladigan (retrofit) filmlar uchun esa juda ingichka simlar yoki **shaffof o‘tkazuvchan yopishtirgichlar** kerak. Katta o‘lchamli PV panellarda esa **ITO** kabi shaffof elektrodlar **yuqori qarshilikka** ega bo‘lib, metall panjaralarsiz katta yuzadan tokni yig‘ish murakkab. Ayrim yechimlar: **deyarli ko‘rinmas panjara, deraza chegara chiziqlariga mos tushuvchi naqshlar**, yoki **kichik kichik segmentlar** yaratish. **UNIST’ning seamless moduli** bunga misol bo‘la oladi — aqlli naqshlash orqali bu muammoni bartaraf etish mumkin[11]. Kelajakda, hattoki **simsiz quvvat uzatish** (masalan, PV qoplamasi oynani tutgan ramka bilan induktiv ulanish orqali) ham amalga oshishi mumkin – bu hozircha nazariy, ammo printsiptial jihatdan mumkin.

Optik tiniqlik va estetika: Shaffof PV tizimlarining vizual talablar va kutilyotgan ko‘rinishga javob berishini ta’minlash ularni ommaviy qabul qilish uchun muhimdir. Har qanday xira tus, rang o‘zgarishi yoki oynadagi aks ettiruvchi effektlar muammo tug‘dirishi mumkin. Masalan, ayrim shaffof quyosh qoplamalari nozik tus (masalan, binafsha yoki to‘q sariq) hosil qilishi mumkin. Ba’zi me’morlar bunday ranglarni ma’qul ko‘rishlari mumkin, lekin odatda neytral ko‘rinish talab qilinadi (shuning uchun “neytral rangli” kremniy elementi alohida ta’kidlanadi[11]). Aks ettirishni kamaytirish uchun aks ettirmaydigan qoplamalar ham zarur; shaffof qurilmalarda qatlamlar soni ortgani sari aks ettirish ortib, oynada "oyna effekti" yuzaga kelishi mumkin. Shu sababli kelajakdagi tadqiqotlar ko‘rsatkichlar indeksiga mos qatlamlar va nano tuzilmalarga qaratiladi. Shuningdek, vaqt o‘tishi bilan oynaning turli qismlari har xil tusga o‘zgarib qolishi ham mutlaqo nomaqbul hisoblanadi. Demak, rang barqarorligini saqlab qolish ham muhim. Shuningdek, chang yoki oynalar orasida to‘plangan namlik amaliyotda ko‘rinish va samaradorlikka salbiy ta’sir qilishi mumkin; buni minimallashtirish uchun mukammal muhrlash va ehtimol, o‘z-o‘zini tozalovchi gidrofobik qoplamalar kerak bo‘ladi.

Energiya ishlab chiqarish va iqtisodiy samaradorlik: Shaffof panellar bir birlik maydondan kamroq energiya hosil qilganligi sababli, ularning iqtisodiy samarasiga erishish uchun ko‘proq vaqt ketishi mumkin. Agar shaffof PV deraza

narxini ancha oshirsa, foydalanuvchilar bunday xarajatni oqlaydimi yoki yo‘qmi – deb o‘ylab ko‘rishadi. Biroq bu yerda “qiymatni birlashtirish” (value stacking) mavjud: shaffof PV ba’zi deraza qoplamalari (masalan, IRni qaytargan low-E qoplama yoki tuzilma plyonka) funksiyalarini bajargan holda, elektr ham hosil qiladi. Shunga qaramay, janubga qaragan fasadda 50% shaffof PV yillik qancha energiya ishlab chiqarishi mumkinligi va bu qanday qilib bino energiyasi iste’molini kamaytirishini ko‘rsatadigan dalillarga ehtiyoj bor. Dastlabki tadqiqotlar shuni ko‘rsatmoqdaki, oynalari ko‘p binolar shaffof PV yordamida tomda mavjud PV panel qoplay olmaydigan hududni to‘ldirishi mumkin[2]. Bu ikkala usulni birlashtirib, “nol energiyali” (net-zero) binolarga erishish mumkin. Agar binoga o‘rnatilgan quyosh panellari uchun kodeks orqali ball berilsa, bu texnologiyaning ommalashuvini tezlashtiradi.

Me‘yoriy va bozor qabul qilinishi: Har qanday yangi binoga o‘rnatiladigan texnologiya singari, shaffof PV ham tegishli me‘yor va standartlarga muvofiq bo‘lishi lozim. Ayni paytda, IEC va UL tashkilotlari bino-integratsiyalangan PV (BIPV), jumladan PV oynalar uchun standartlar ishlab chiqmoqda. Shaffof PV modullar xavfsizlik sinovlaridan o‘tishi kerak (masalan, ba’zi hududlarda dovulga bardoshlilik, yong‘inga chidamlilik va h.k.). Tashqi ko‘rinishdagi yorug‘lik ifloslanishi yoki estetik jihatlar haqida ham xavotirlar bo‘lishi mumkin — masalan, binoning tashqi tomondan ko‘ringan panellari biroz rangli bo‘lsa, shaharsozlar yoki mulk egalari shubhalar paydo bo‘lishi mumkin. Ommaviy qabul qilinishiga erishish uchun bu derazalarning oddiy derazalardek ko‘rinishi va ishlashini namoyish etuvchi pilot loyihalar muhim bo‘ladi. Quruvchilarni shaffof PVni foyda keltiruvchi texnologiya sifatida tushunishlariga yordam beradigan ta’lim va targ‘ibot ham kerak.

Kelajak yo‘nalishlari:

- **Materiallar innovatsiyasi:** Shaffof PV uchun maxsus yangi materiallar yaratilmoqda. Masalan, qo‘rg‘oshinsiz perovskitlar (zaharlilik muammosini bartaraf etish uchun), kengroq tarmoqli oraliqli materiallar (ko‘proq shaffoflik uchun), yoki organik–noorganik gibridlar (noorganik barqarorlikni organik moslashuvchanlik bilan birlashtiradi). Shuningdek, og‘ir metallsiz kvant nuqtalari (masalan, uglerod nuqtalari, yoki qo‘rg‘oshinni qamrab olgan perovskit nanokristallar) tadqiq qilinmoqda. LED lampalarida ishlatiladigan fosforlar singari materiallar ham TLSC’lar uchun barqaror UV–IR konvertorlar bo‘lishi mumkin.
- **Tandem va ko‘p-qavatli qurilmalar:** Kelajak dizaynlaridan biri – tandem shaffof element. Masalan, shaffof DSSC yoki perovskit ustki qatlam sifatida, tagida esa boshqa organik qatlam bo‘lishi mumkin – har biri spektrning turli qismini yutadi. Har ikkala qatlam ozroq yorug‘lik o‘tkazadi, lekin jami samaradorlik ortadi. Allaqachon 30% dan ortiq samaradorlikka erishgan yarim shaffof perovskit + kremniy tandemlar mavjud. Agar tagdagi qatlam ham biroz shaffof (masalan, teshikli kremniy yoki shaffof substratda CIGS)

bo'lsa, bu usul 15–20% samaradorlikka ega bo'lgan shaffof tandemga aylanishi mumkin.

- **Moslashuvchan shaffoflik (Dinamik PV):** Kelajakning konseptual g'oyasi – ikki rejimda ishlovchi PV oynalar. Masalan, elektroxromik PV gibridlari: quyosh kuchli bo'lsa, oynani qorong'ilab, ko'proq energiya yutadi va elektr ishlab chiqaradi; quyosh kuchsiz bo'lsa yoki ko'proq tabiiy yorug'lik kerak bo'lsa, oynani yana shaffof holatga o'tkazadi. Shuningdek, issiqlik bilan rangini o'zgartiruvchi perovskitlar (termo-xromik) yoki PV nanohissalar harakatini boshqaruvchi mikrofluidik yondashuvlar (nazariy bosqichda).
- **Energiya saqlash bilan integratsiya:** Qurilmalar va binolar uchun shaffof PV dan to'liq foydalanish uchun, akkumulyator yoki superkondensatorlar bilan integratsiya zarur. Masalan, deraza ramkasida yoki chetlarida joylashgan shaffof batareya tun davomida yoritish uchun energiyani saqlashi mumkin. Ba'zilar hattoki shaffof akkumulyatorlar (ITO kabi shaffof elektrodlar va organik elektrolitlar bilan) va shaffof PV'ni bir modulli yig'ma qurilma sifatida birlashtirish g'oyasini ilgari surmoqda – bu esa o'zini-o'zi quvvatlaydigan “energiya oyna”sini yuzaga keltiradi.

Xulosa: Shaffof quyosh batareyalari uchun kelajak yo'li – bu materialshunoslik, qurilma muhandisligi va me'moriy integratsiya bo'yicha ko'p yo'nalishli sa'y-harakatlarni talab qiladi. Asosiy cheklovlar — samaradorlik pastligi va barqarorlik muammolari — faol ravishda tadqiq qilinmoqda va sekin-asta yaxshilanishlar ro'y bermoqda. Taqqoslash uchun: 1950-yillardagi kremniy batareyalari ~6% samaradorlikka ega edi, hozir esa ular 26% dan oshdi. Shaffof PV texnologiyasi nisbatan yangi (~10–15 yillik rivojlanish), biroq ayrim turlari allaqachon 10% ga yaqinlashmoqda. Ilmiy-tadqiqotlar davom etsa, keyingi 10 yil ichida 15–20% samaradorlikka ega o'rtacha shaffoflikka erishish mumkin – bu esa texnologiyani yangi qurilishlarda va maishiy qurilmalarda ommaviy bo'lishiga olib keladi.

Kelajak manzarasi shunday: har bir deraza yoki fasad paneli jimjit energiya ishlab chiqaradi, avtomobillar oynasidan quyosh nuri o'tganida o'zini quvvatlaydi, gajetlar esa atrof yorug'ligidan energiya olib, zaryadsiz uzoq ishlaydi – bularning barchasi odatdagi shaffof oynadek ko'rinadigan, ammo “ko'rinmas” quyosh batareyalari orqali amalga oshadi. Hozirgi muammolarni hal etish — mana shu istiqbolni ro'yobga chiqarish yo'lida eng muhim omil bo'ladi. Hozirgacha erishilgan yutuqlar — 1% samaradorlikdagi demo elementlardan 10% samarali qurilmalargacha va muvaffaqiyatli sinov o'rnatmalar — shuni ko'rsatadiki, shaffof quyosh panellari yaqin kelajakda barqaror energiya tizimining ajralmas qismiga aylanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Tulshi Shiyani, **“Transparent Solar PV Panels,”** in *Solar PV Panels - Recent Advances and Future Prospects*, IntechOpen, 2023. (DOI: 10.5772/intechopen.110062) – Overview of transparent solar panel technologies, including generations of solar cells and spectral considerations[1].
2. MIT Energy Initiative News, **“Transparent solar cells,”** MIT News Office, June 17, 2013. – Describes the development of transparent organic solar cells at MIT, absorbing UV and IR while transmitting visible light. Includes schematic diagram and spectral response of transparent vs conventional cell[4].
3. Richard Lunt et al., **“Transparent solar technology represents 'wave of the future',”** *Nature Energy* (as reported by MSUToday), Oct. 2017. [2] – Study analyzing the potential of highly transparent solar cells and estimating that combining transparent PV on windows with rooftop PV could nearly meet U.S. electricity demand. Noted >5% efficiencies achieved for highly transparent cells and prospects for ~100% of demand with improvements[2].
4. Ian Clover, **“Heliatek breaks efficiency record for 40% transparent organic cells,”** *PV Magazine*, 25 March 2014.[7] – Report on Heliatek’s achievement of 7.2% efficiency on organic solar cells with 40% light transparency (60% absorption). Demonstrates partially transparent OPV for BIPV use, noting opaque record 12% vs 7.2% at 40% transparency.
5. Eric Wesoff, **“Ubiquitous Energy’s clear solar windows harvest UV and IR light — an update,”** *PV Magazine USA*, 9 April 2020.[5] – Covers Ubiquitous Energy’s progress with transparent organic photovoltaic windows, including a world-record 9.8% efficient fully transparent cell and plans for commercial products (~7–10% efficient, ~50% transparent). Discusses selective absorption of UV/IR and challenges for commercialization[5].
6. Patrick Jowett, **“Scientists design all-back-contact transparent solar cell,”** *PV Magazine*, 16 Sept 2024.[10] – News on the UNIST all-back-contact transparent crystalline silicon solar cell. Reports 15.8% PCE at 20% AVT for a c-Si cell, 14.7% for a 16 cm² module, and demonstration of smartphone charging. Highlights the aesthetic and modular integration achieved by rear contacts and seamless series connection.
7. J. Jaramillo et al., **“High efficiency single-junction semitransparent perovskite solar cells,”** *Energy & Environmental Science* 7, 2968 (2014). (Referenced in user text) – Achieved ~6.4% PCE at 29% transparency and 7.3% at 22% by evaporated CH₃NH₃PbI₃ perovskite with thin Au electrode. Introduced tandem concept with semi-transparent perovskite over silicon/CIGS for higher combined efficiency.
8. Tristan Rayner, **“ClearVue releases results from first long-term study of clear solar glass,”** *PV Magazine*, 18 Aug 2023.[24][25] – Documents field performance of ClearVue transparent solar windows in a greenhouse: ~30–33

W/m² output with ~70% VLT, offset ~40% of energy costs. Notes improved Gen3 product with ~5% overall efficiency targeted. Demonstrates durability and function in agrivoltaic context[6].

9. K. B. O'Regan and M. Grätzel, “**A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films,**” *Nature* **353**, 737 (1991). – *Classic paper on DSSC. While not about transparency, it's the foundational work for dye solar cells which later were adapted to semi-transparent forms.* (Referenced for historical context.)
10. **IntechOpen Review (Daud et al.),** “A review of transparent solar photovoltaic technologies,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews* (2018) – *Summarizes nine transparent PV techs since 2007 with ≥20% transmission. Reported values: TLSC 86% T and <1% eff, DSSC 60% T and ~9% eff, etc[1]. Highlights material/process challenges and need for more research under real conditions.* (Referenced via user document content.)

[1] (PDF) Transparent Solar PV Panels

https://www.researchgate.net/publication/369044184_Transparent_Solar_PV_Panels

[2] Transparent solar technology represents 'wave of the future' | MSUToday | Michigan State University

<https://msutoday.msu.edu/news/2017/10/transparent-solar-technology-represents-wave-of-the-future>

[4] Transparent solar cells | MIT Energy Initiative

<https://energy.mit.edu/news/transparent-solar-cells/>

[5] Ubiquitous Energy's clear solar windows harvest UV and IR light — an update – pv magazine USA

<https://pv-magazine-usa.com/2020/04/09/ubiquitous-energys-clear-windows-harvest-uv-and-ir-light-an-update/>

[6] ClearVue releases results from first long-term study of clear solar glass – pv magazine International

<https://www.pv-magazine.com/2023/08/18/clearvue-releases-results-from-first-long-term-study-of-clear-solar-glass/>

[7] Heliatek breaks efficiency record for 40% transparent organic cells – pv magazine International

https://www.pv-magazine.com/2014/03/25/heliatek-breaks-efficiency-record-for-40-transparent-organic-cells_100014600/

[8] Solar Glass Could Convert The Windows Of Every Building Into ...

<https://www.forbes.com/sites/scottsnowden/2020/07/29/solar-glass-windows/>

[9] Transparent solar panels will soon become a window of energy and ...

<https://www.ubiqd.com/posts/transparent-solar-panels-will-soon-become-a-window-of-energy-and-light-in-your-home>

[10] Scientists design all-back-contact transparent solar cell – pv magazine International

<https://www.pv-magazine.com/2024/09/16/korean-scientists-design-15-8-efficient-all-back-contact-transparent-solar-cell/>

[11] New Study Unveils All-Back-Contact Neutral-Colored Transparent Crystalline Silicon Solar Cells Enabling Seamless Modularization UNIST News Center | UNIST News Center

<https://news.unist.ac.kr/new-study-unveils-all-back-contact-neutral-colored-transparent-crystalline-silicon-solar-cells-enabling-seamless-modularization/>

[12] Thin-film photovoltaic cells (in orange) are deposited as a naturally... | Download Scientific Diagram

https://www.researchgate.net/figure/Thin-film-photovoltaic-cells-in-orange-are-deposited-as-a-naturally-translucent-layer_fig3_369044184

[13] From MSU, solar technology with a clear advantage

<https://www.lansingstatejournal.com/story/news/local/campus/2014/09/30/msu-solar-technology-clear-advantage/16479693/>

IX Bob

9. SHAMOL ENERGIYASI

Kirish

Shamol turbinasi – bu harakatlanayotgan havo (shamol)ning kinetik energiyasini avval mexanik energiyaga, soʻngra generator orqali elektr energiyasiga aylantiruvchi elektromechanik tizimlardir. Ular zamonaviy Shamol energiya aylanturuvchi Tizim (Shamol Energy Conversion Systems (WECS)) tarkibining asosiy elementlari hisoblanadi.

Ularning ishlash prinsipi aerodinamika va elektromagnit induksiya qonunlariga asoslanadi. Shamol Yer yuzasining Quyosh tomonidan notekis qizdirilishi natijasida bosimlar farqi yuzaga kelib, havo massalarining siljishi hosil boʻlgani uchun vujudga keladi. Ushbu tabiiy harakatning bir qismini ushlash orqali insonlar yonilgʻi yoqmasdan barqaror elektr energiyasi ishlab chiqarishi mumkin.

Rivolanish tarixi

Shamol energiyasi qadimgi oddiy shamol tegirmonlaridan boshlab, bugungi kunda koʻp-megavattli turbinalargacha rivojlandi. Dastlabki shamol tegirmonlari (don yanchish va suv chiqarish uchun) ming yillar avval paydo boʻlgan, biroq elektr energiyasi ishlab chiqarish 19-asr oxirida boshlangan.

Birinchi elektr-generatsiya qiluvchi shamol turbinasini (12 kW) **C. F. Brush** 1888-yilda qurdi, undan soʻng **Poul la Cour** 1889-yilda Daniyada oʻz generatorini yaratdi [1]. Bu ilk turbinalar yogʻoch yoki metall parraklarga ega boʻlib, ishonchliligi past edi (masalan, 1941-yildagi 1.25 MW quvvatli poʻlat parrakli turbina bir necha soat ichida ishdan chiqqan).

Haqiqiy yutuq 1957-yilda Daniyada ishlab chiqilgan **Gedser turbinasiga** (3-blade, 200 kW) toʻgʻri keladi: u shisha tolali kompozit parraklardan foydalanib, 11 yil davomida deyarli texnik xizmat koʻrsatmasdan ishlagan [1].

1970-yillardagi neft inqirozidan soʻng shamol energetikasi tez surʼatlarda rivojlandi. 2000-yillarga kelib turbinalar quvvati keskin oshdi (masalan, quruqlikdagi turbinalarda >3 MW) va dengizda undan ham yiriklari paydo boʻldi [2].

Bugungi kunda shamol energetikasi yirik qayta tiklanuvchi manbaga aylangan. Masalan:

- 2024-yilga kelib global shamol quvvati ~1,136 GW ga yetgan [3],
- Daniya elektr energiyasining yarmidan koʻpini shamoldan oladi [3],
- Yirik loyihalar mavjud: Xitoy ~520 GW, AQSh ~155 GW oʻrnatilgan quvvat bilan yetakchi hisoblanadi [4].

Shamol energetikasining evolyutsiyasi

1. Qadimgi shamol tegirmonlari (milodiy 7-asr)

- **Fors shamol tegirmonlari:** Eng qadimgi maʼlumotlarga koʻra Seiston (hozirgi Eron) hududida milodiy 700-yilda paydo boʻlgan. Bu vertikal oʻq

atrofida aylanadigan shamol tegirmonlari asosan don yanchish va suv chiqarish uchun ishlatilgan.

2. Yevropa shamol tegirmonlari (11-asr)

- **Horizontal o'qli tegirmonlar:** Yevropada joriy etilgan bo'lib, shamol yo'nalishiga burila oladigan bosh qismi tufayli samaradorligi yuqori bo'lgan.

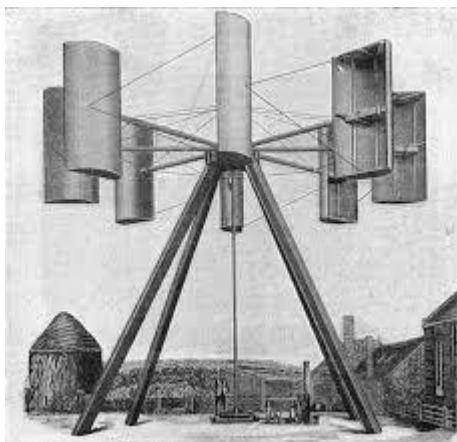
3. Amerika ko'p-parrakli shamol tegirmonlari (19-asr)

- **Suv chiqarish:** 19-asr o'rtalarida Amerika Midwest hududida ko'p-parrakli shamol tegirmonlari keng tarqaldi, ular asosan yer osti quduqlaridan suv chiqarish uchun ishlatilgan.

Elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi birinchi turbinalar

4. James Blyth turbinasi (1887)

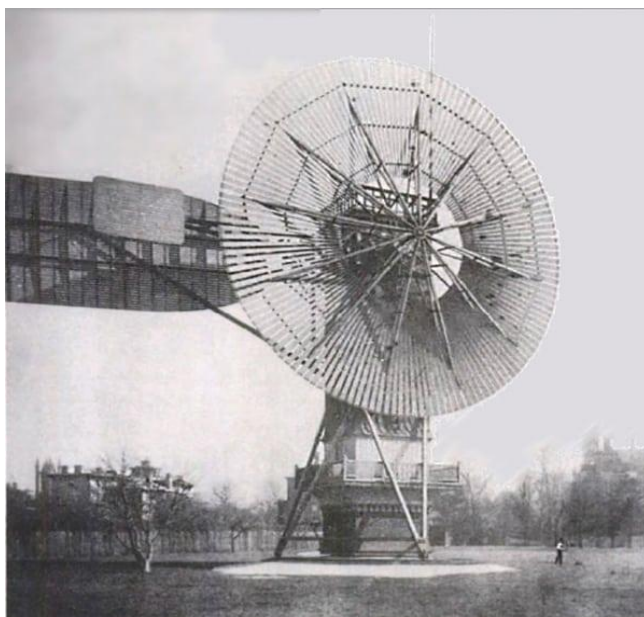
- **Joylashuvi:** Marykirk, Shotlandiya (1-rasm)
- **Innovatsiya:** Tarixdagi birinchi elektr ishlab chiqaruvchi shamol turbinasini qurgan bo'lib, u 10 ta lampani va kichik tokarlik dastgohini quvvatlantirgan.



1-rasm. James Blythning turbinasi (1887)

5. Charles Brush turbinasi (1888)

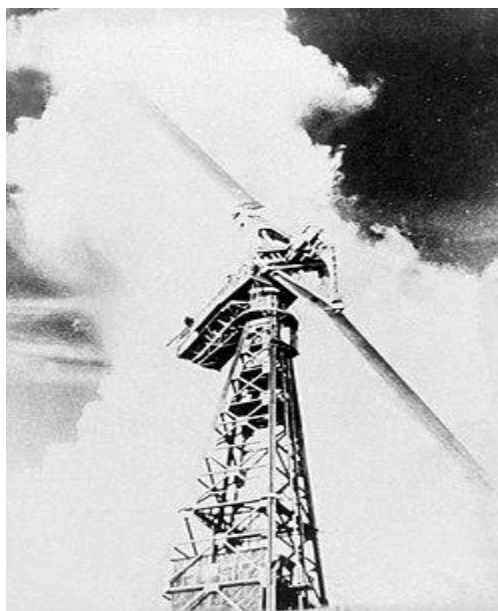
- **Joylashuvi:** Klivlend, Ogayo, AQSh (2-rasm)
- **Dizayn:** 17 metr diametrga ega, 144 parrakli yirik shamol tegirmonini barpo etgan bo'lib, u taxminan **12 kW** quvvat ishlab chiqargan. Ushbu energiya Brushning o'z qarorgohidagi akkumulyatorlarni zaryadlash uchun qo'llanilgan.



2-rasm. Charles Brushning Turbinasi (1888)

6. Smith–Putnam turbinasi (1941)

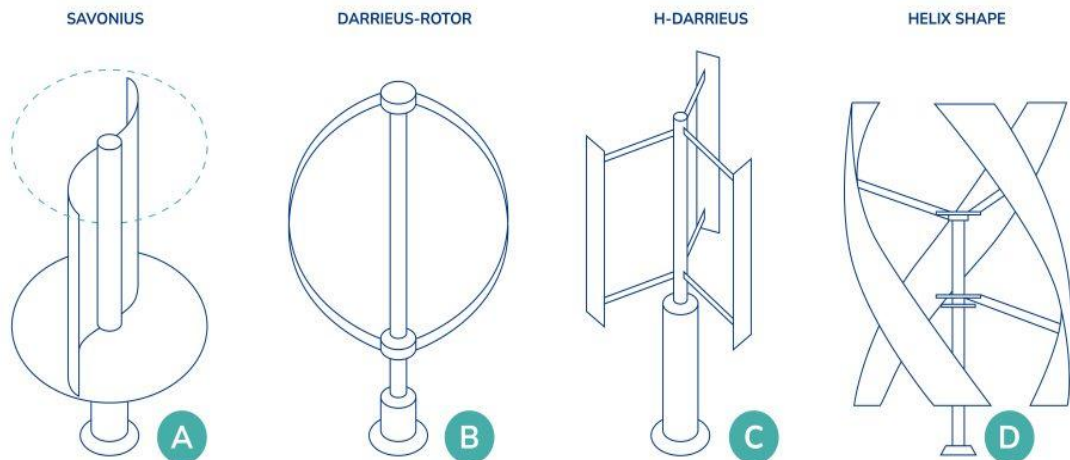
- **Joylashuvi:** Kastlton, Vermont, AQSh (3-rasm)
- **Ahamiyati:** Elektr tarmogʻiga ulangan tarixdagi birinchi **megawatt-scale** shamol turbinasi (1.25 MW). U 1 100 soat ishlagan, biroq parrakning ishdan chiqishi sabab qurilma ekspluatatsiyadan chiqarilgan.



3-rasm. Smith–Putnam Turbinasi (1941)

4-rasmda shamol trubalarining barcha turlari ko'rsatilgan:

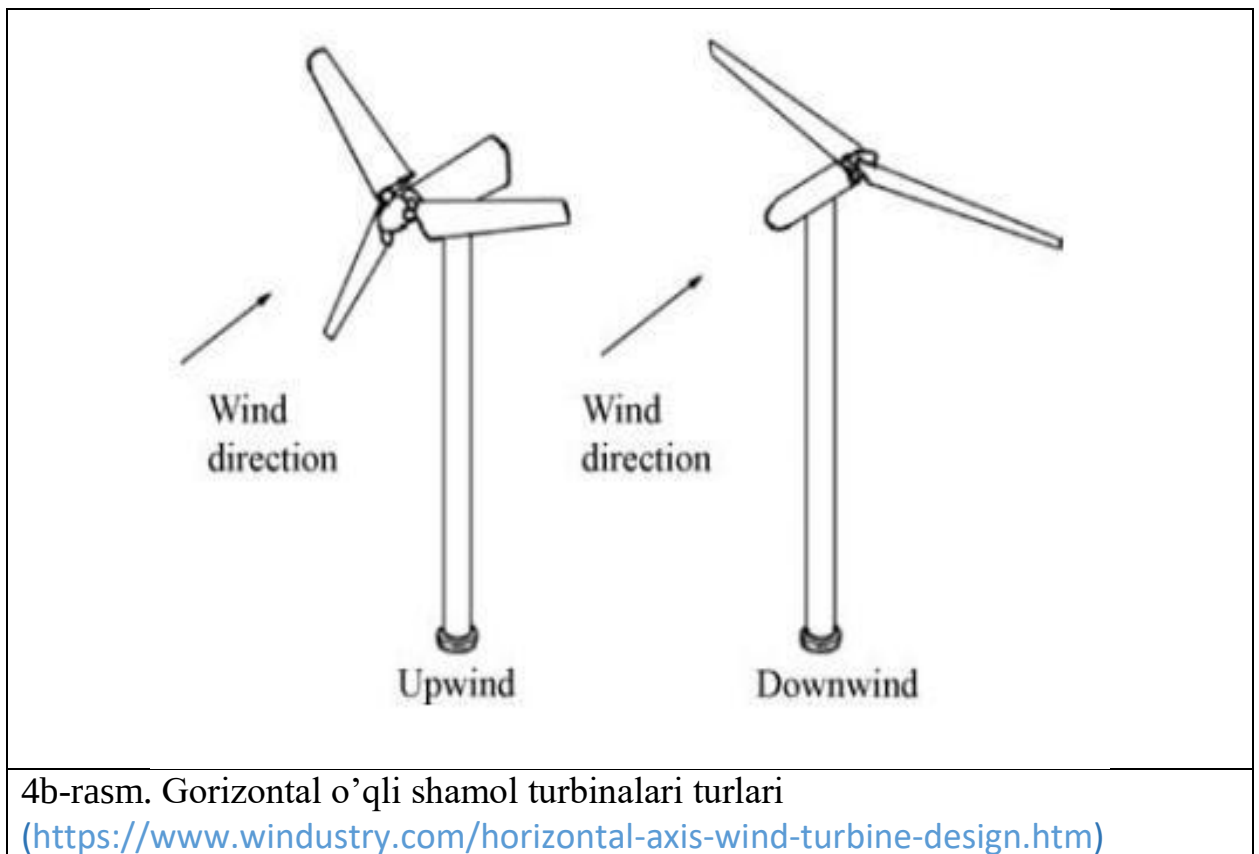
Vertical turbine types



4a-rasm. Vertikal o'qli Shamol turbinalarining turlari

4a-rasmda bir nechta turdagi vertikal o'qli shamol turbinalari (VO'ShT-VAWT) tasvirlangan bo'lib, ular A–D harflari bilan belgilangan:

- **A – Savonius turi:** Bu tortuvchi kuch asosida ishlovchi VO'ShT hisoblanadi. Odatda, shamolni ushlab qoluvchi ikkita yoki undan ortiq yarim silindr shaklidagi "kovaklar"dan iborat bo'ladi; juda sodda konstruksiyaga ega. ([Wikipedia+2pdfs.semanticscholar.org+2](https://www.researchgate.net/publication/312511111))
- **B – Darrieus rotori:** Bu ko'taruvchi kuch asosida ishlovchi VO'ShT bo'lib, egilgan havo-folga shaklidagi Parraklar vertikal o'q bo'ylab o'rnatilgan bo'ladi; ba'zida "tuxum ko'taruvchi" (egg-beater) turi deb ataladi. ([ResearchGate+1](https://www.researchgate.net/publication/312511111))
- **C – H-Darrieus (H-shaklli):** Bu Darrieus turining bir ko'rinishi bo'lib, to'g'ri-vertikal Parraklar yuqori va pastki rotorga gorizontal tutqichlar orqali (H-ramkada) ulanadi.
- **D – Spiral shakl (Heliks):** Bu VO'ShT'ning spiral Parrakli varianti bo'lib (ba'zida Darrieus oilasiga kiradi), unda Parraklar spiral tarzda burilgan bo'lib, bu moment tebranishini yumshatadi va ishlash samaradorligini oshiradi. ([Wikipedia+1](https://www.researchgate.net/publication/312511111))
- Vertikal o'q tufayli ayrim komponentlar (generator, reduktor) ko'pincha yerga yaqin joylashtiriladi, bu esa ayrim amaliyotlarda texnik xizmat ko'rsatishni soddalashtiradi. ([Wikipedia+1](https://www.researchgate.net/publication/312511111))
- Biroq, ular odatiy gorizontal o'qli turbinalarga nisbatan kamroq samaradorlikka ega bo'lib, tijoratda keng tarqalmagan.



A. Shamol oqimi tomoniga (Upwind) va shamol yo'nalishi bo'yicha orqada (Downwind) joylashuv turlari

- **Shamol oqimi tomoniga yo'naltirilgan gorizontal o'qli shamol turbinasining turi (Upwind GO'ShT):** Rotor (Parraklar) shamolga qaragan holda joylashtirilgan bo'ladi (ya'ni, minoraning shamol tomoni). Ko'pgina yirik sanoat turbinalari aynan ushbu dizayndan foydalanadi. (web.kpi.kharkov.ua+2elprocus.com+2)
- **Shamol oqimidan orqada joylashgan gorizontal o'qli shamol turbinasining turi (Downwind GO'ShT):** Rotor minoraning shamol yo'nalishidagi orqa tomonida bo'ladi, ya'ni shamol avval minoradan o'tib, keyin rotorga keladi. Bugungi kunda bu tur yirik miqyosda kamroq qo'llaniladi, biroq u ma'lum konstruktiv va xizmat ko'rsatish afzalliklariga ega. (uomustansiriyah.edu.iq+1)

Asosiy farqlar:

- Shamol yo'nalishiga qaragan dizayn (upwind) rotorning minora soyasidan saqlanishini ta'minlaydi va minoraning shamoldan hosil qilgan beqaror oqimlaridan yuzaga keluvchi tebranuvchi yuklamalarni kamaytiradi. (web.kpi.kharkov.ua)
- Shamol yo'nalishi bo'yicha orqada joylashgan dizayn (downwind) avtomatik ravishda shamolga moslashadi (ya'ni, burilish mexanizmi boshqaruvi

soddalashtiriladi), ammo bu tur minora tomonidan yaratilgan turbulentlik va yuqori charchash yuklamalariga duch keladi. (uomustansiriyah.edu.iq)

Zamonaviy shamol turbinalari rivojlanishi

7. Gedser Shamol Turbine (1957)(5-rasm)

- **Joylashuvi:** Gedser, Daniya
- **Dizayn:** Uch parrakli, 200 kW quvvatli turbina bo'lib, **electromechanical yawing** va **stall control** tizimlariga ega edi. Texnik xizmat ko'rsatmasdan **11 yil** davomida ishlagan va kelajakdagi turbina loyihalariga kuchli ta'sir ko'rsatgan (11).

Gedser Shamol turbinasi, 1957-yilda muhandis **Johannes Juul** tomonidan qurilgan bo'lib, zamonaviy shamol turbinalarining "onasi" sifatida e'tirof etiladi. U ommaviy elektr tarmog'iga bevosita o'zgaruvchan tok (**alternating current**) uzata olgan birinchi yirik va muvaffaqiyatli shamol turbinasi hisoblanadi hamda bugungi kunda ham qo'llaniladigan bir qator muhim konstruktiv tamoyillarni birinchi bo'lib joriy qilgan.



5-rasm. Bjerringbro Energiya Muzeyida hozirgi holatda saqlanayotgan Gedser shamol turbinasi.

8. Shamol Turbina Tizimi(WTS-4 Turbine) (1982)(6-rasm)

- **Joylashuvi:** Medisin Bou, Vayoming, AQSh
- **Innovatsiya:** Dunyodagi 4 MVt quvvatga ega birinchi shamol turbinasi, ikki qanotli konstruksiyaga ega bo'lib, teeter uyasi va quvvat balandligini nazorat qiladi.

“WTS-4” nomlanishi uning **4 megawatt** quvvatga ega **gorizontal o'q boyicha joylashgan** shamol turbina generatori ekanligini bildiradi. “WTS” qisqartmasi **Shamol turbinasi System**, “4” esa uning **4 MW** quvvat ko'rsatkichini anglatadi.

WTS-4 turbinasi 1982-yilda Hamilton Standard tomonidan Vayoming shtatidagi Medisin Bou hududida o'rnatilgan. U AQSh Melioratsiya byurosining shamol energiyasini gidroenergetika tizimlari bilan integratsiyalashuvini o'rganish uchun tizimni tekshirish bo'limi **System Verification Unit (SVU)**) edi. WTS-4 dunyodagi birinchi 4 MVt shamol turbinasi bo'lib, ikki qanotli dizayn edi.

WTS-4 — dunyodagi **birinchi 4 MW shamol turbinasi** bo'lib, ikki parrakli konstruktsiya asosida ishlab chiqilgan.



6-rasm. WTS-4 Turbinasi (1982)(

<https://cowboystatedaily.com/2022/11/10/wyomings-first-wind-turbines-were-novelties-then-sold-for-scrap/>)

9. Vindeby Offshore Shamol Farm (1991)(7-rasm)

- **Joylashuvi:** Vindeby qirg'oqlari, Daniya
- **Yutuq:** Dunyoning birinchi **offshore Shamol farm** kompleksi. Umumiy quvvati 4.95 MW bo'lgan 11 ta turbinadan tashkil topgan.
-



7-rasm. Vindeby Offshore Shamol
Fermasi(https://en.wikipedia.org/wiki/Vindeby_Offshore_Wind_Farm)

Vindeby Offshore Shamol fermasi 1991 yilda Daniyaning Lolland orolidagi Vindeby shahri qirg'og'ida qurilgan dunyodagi birinchi offshor shamol stansiyasi edi. Keyinchalik u 25 yillik faoliyatdan so'ng 2017 yilda foydalanishdan chiqarilgan.

Suzuvchi Shamol Turbina innovatsiyalari

10. HyShamol Prototype (2009)(8-rasm)

- **Joylashuvi:** Karmøy qirg'oqlari, Norvegiya
- **Tafsilot:** Dunyodagi birinchi to'liq masshtabli **floating Shamol turbine** (2.3 MW). Ushbu loyiha chuqur suv hududlarida shamol energiyasi ishlab chiqarishning amaliy imkoniyatlarini isbotlagan.

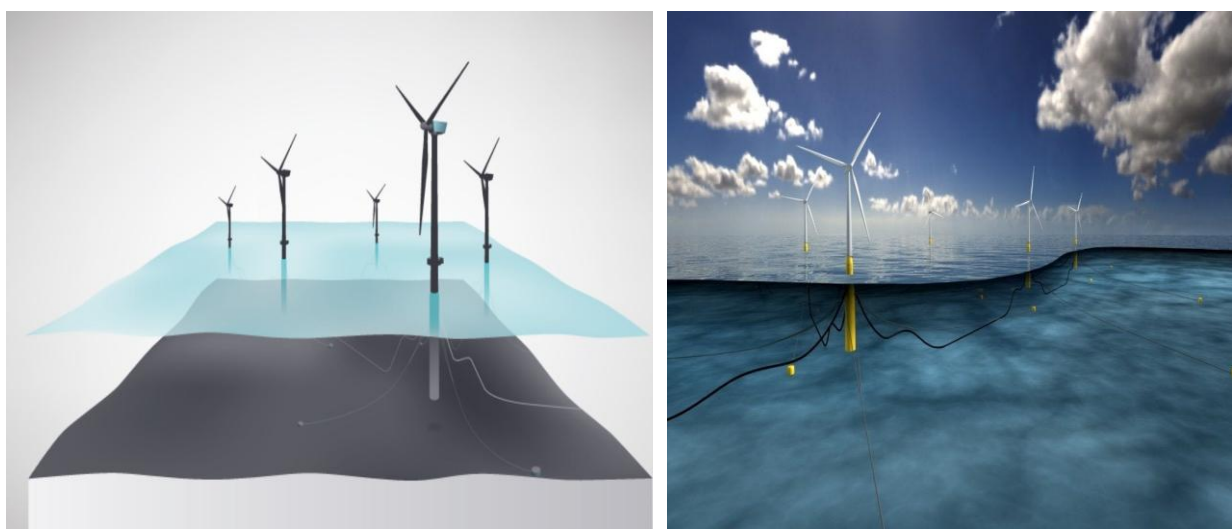


8-rasm. Birinchi to'liq miqyosli suzuvchi shamol turbinasi (2.3 MW)(**Hywind Prototype (2009)**)

2009-yilgi Hywind prototipi Norvegiyaning Karmoy qirg'oqlarida Statoil (hozirgi Equinor) tomonidan ishlab chiqilgan dunyodagi birinchi to'liq miqyosli suzuvchi dengiz shamol turbinasi edi. SPAR suzuvchi qurilmada qurilgan 2,3 MVt quvvatga ega ushbu turbinali suzuvchi shamol turbinalari og'ir sharoitlarga bardosh berib, elektr tarmog'iga muvaffaqiyatli ulanishi orqali **suzuvchi shamol turbinalari** texnologiyasi amalda ishlashi mumkinligini namoyish etdi. Uning muvaffaqiyati keyinchalik Hywind Scotland kabi suzuvchi shamol fermasi loyihalariga yo'l ochdi.

11. Hywind Scotland (2017)(9-rasm)

- **Joylashuvi:** Peterhead qirg'oqlari, Shotlandiya
- **Natija:** Dunyodagi birinchi tijoriy **floating Shamol farm**, beshta 6 MW turbinasidan iborat bo'lib, umumiy quvvati **30 MW**ni tashkil etadi.



9-rasm. Dunyodagi birinchi suzuvchi shamol stansiyasi

Dunyodagi birinchi tijorat suzuvchi shamol stansiyasi Shotlandiyaning Peterhead sohilidan 25 kilometr uzoqlikda joylashgan Hywind Scotland hisoblanadi. U umumiy quvvati 30 MVt bo'lgan beshta 6 MVt turbinadan iborat bo'lib, 2017-yilda ishga tushirilgan. Ferma "Equinor" va "Masdar" qo'shma korxonasi hisoblanadi.

Gorizontol (x)-o'qida: Noan'anaviy HAWT(horizontal-axis wind turbine) lar

ShamolSuzuvchi. Daniyaning Vestas kompaniyasi AQShdagi Principle Power va Portugaliyaning EDP kompaniyalari bilan hamkorlikda Portugaliya qirg'oqlarida **2 MW suzuvchi Shamol turbinani** sinovdan o'tkazishni rejalashtirgan. **ShamolFloat** platformasi to'liqlar va turbina tebranishlarini kamaytirishi hamda **50 metrdan chuqur** suv havzalarida shamol energiyasini samarali yig'ish imkonini berishi aytiladi.



10-rasm. Portugaliya sohilida 2 MVt quvvatga ega suzuvchi shamol turbinasi

Shamol linzasi. Ayni paytda yapon olimlari yana bir o'zgarishni - Shamol linzalari, diametri 112 metr bo'lgan oltita qanotli **gorizontal o'q (HAWT)**ni ko'plab chuqurchalar shaklida joylashtirmoqchi (11-rasm). Kontseptsiya ko'pchilikning e'tirofiga sazovor bo'ldi, chunki u an'anaviy dengiz turbinalariga qaraganda to'rt-besh baravar ko'proq quvvat ishlab chiqarishga qodir - garchi uning konstruktori, 2010 yilda Yokogamada qayta tiklanadigan energiya xalqaro ko'rgazmasida turbinani ochgan Kyushu universiteti professori Yuji Ohya, u, ayniqsa, Yaponiyadan tashqarida ishlab chiqarilgan bo'lishi aniq emasligini tan oldi.



11-rasm. **Shamol linzalari.** Dengizda o'rnatish uchun qoplangan gorizontal o'qli shamol turbinasi

Ushbu noan'anaviy HAWT ning eng so'nggi reen Karnatsiyasi - diffuzorli shamol turbinasi deb ham ataladi - FloDesign Wind turbine Corp.ning "reaktiv dvigatel" prototipi (12-rasm). Mikser ejektor sifatida tanilgan aerokosmik

texnologiyani integratsiyalashgan holda, prototip oldingi dizaynlarga qaraganda ancha kichikroq bo'lib, Parraklarni shamol yo'nalishiga moslashtirishni osonlashtiradi.



12-rasm. Reaktiv dvigatel prototipi. Massachusetts shtatida joylashgan FloDesign aerokosmik texnologiya kompaniyasi reaktiv dvigatel texnologiyasiga asoslangan holda havoni tez aralashadigan girdobni yaratish uchun naqshlarga yo'naltiradigan yopilgan turbinani ishlab chiqmoqda.

Vertical (Y) o'qi bo'yicha: Darrieus va Savonius VAWT(vertical-axis wind turbine)

Umuman olganda, VAWTlar ikkita asosiy dizayndan biridan kelib chiqadi: 1931 yilda Georges Darrieus tomonidan patentlangan liftga asoslangan VAWT, yuqori va pastda birlashtirilgan ikki yoki uchta kavisli yoki to'g'ri Parraklardan foydalanadi va o'rtada troposkeinda tashqariga egiladi (13-rasm) va Finnivo SJ22 tomonidan yaratilgan tortishga asoslangan VAWT dvigateli, SJ12. rotor uchun ikkita S shaklidagi Parrakni ishlatadi.



13-rasm. **Darrieus.** Frantsuz muhandisi Jorj Darrieusning 1931 yilda ishlab chiqarilgan vertikal o'qli shamol turbinasi dizayni - tuxum qoqib yuboruvchiga o'xshash - zamonaviy davrda qayta paydo bo'ldi.

Darrieus dizaynining yana bir mashhur varianti, H-rotor dizayni yoki Giromill ham dengizda sinovdan o'tkazilmoqda. Technip - Norvegiyada Hywind suzuvchi turbinalarini ishga tushirish uchun Siemens va Statoil bilan ishlagan frantsuz firmasi frantsuz hamkorlari Nénuphar, Converteam va EDF Energies Nouvelles bilan sanoatdan oldingi prototipni sinab ko'rish uchun Vertiwind loyihasini ishga tushirdi (14-rasm).



14-rasm. **Vertiwind.** Frantsiyaning Technip kompaniyasi va hamkorlari Nénuphar va EDF Energies Nouvelles, shu jumladan, Darrieus H-rotor dizaynini dengizda sinovdan o'tkazadigan loyihani boshladilar.

Yaqinda Buyuk Britaniyaning Energetika Texnologiyalari Instituti (ETI) an'anaviy dengiz turbinalariga munosib alternativ sifatida VAWTlardan foydalanishni ma'qulladi. ETI ular hatto o'lchamlari 10 MVtlik VAWT aerogeneratori bo'lsa ham texnik, iqtisodiy va ekologik jihatdan rivojlanish

mumkinligini tasdiqladi,. Aerogenerator ekvivalent HAWT balandligining yarmiga teng bo'lib, uning og'irligi strukturaning tagida to'plangan (15-rasm).



15-rasm Aerogenerator. Britaniyaning "Wind Power" turbinasi ishlab chiqaruvchisi 10 MVt quvvatga ega vertikal o'qli suzuvchi shamol turbinasini ishlab chiqmoqda.

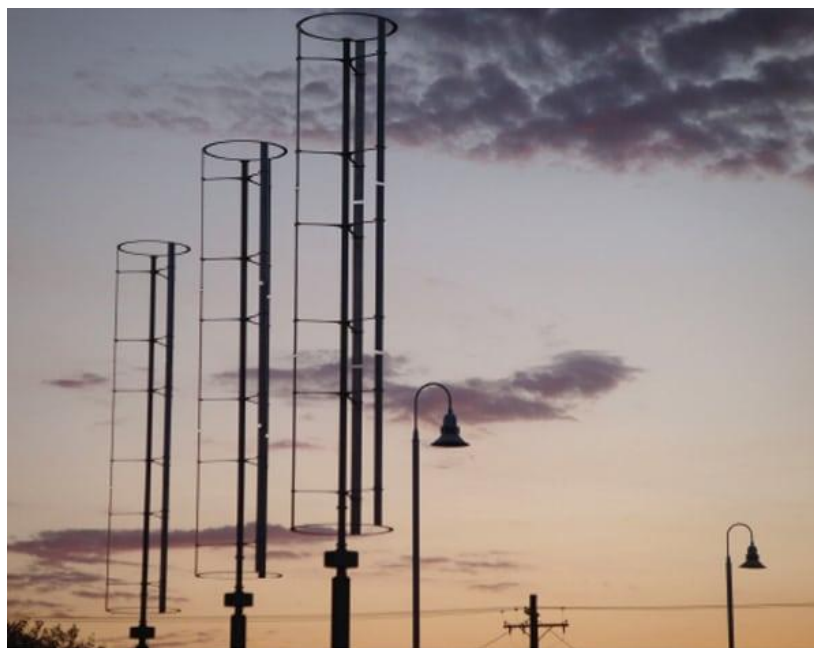
Deyarli suzuvchi vertikal Parraklar (16-rasm) hatto yengil shabadada ham (1,5 m/s gacha) ozgina qarshilik bilan aylanadi. Bu quvvat ishlab chiqarish va qurilmaning ishlash muddatini oshiradi, dedi Guanchjou energetika tadqiqot instituti (Xitoy Fanlar akademiyasi qoshidagi) va manfaatdor tomonlar Guangzhou Zhongke Hengyuan Energy Science & Technology Co., Ltd. tadqiqotchilari 2006 yilda turbinani taqdim etganlarida.



16-rasm Maglev. Xitoylik ishlab chiquvchilar 2006 yilgi Shamol quvvati Osiyo ko'rgazmasida magnit levitatsiyali shamol turbinasini namoyish qilganlarida, bu shamol texnologiyasi evolyutsiyasidagi yutuq sifatida e'tirof etildi. Texnologiya

bugungi kunda Shenzhendagi ko'cha chiroqlarini quvvatlantirish uchun ishlatiladi va 300 Vt dan 1 kVt gacha bo'lgan diapazonlarda mavjud.

VAWTlar kichik shamol bozorida ham o'z o'rnini topmoqda. Bir misol, Giromill, Windspire Energy kompaniyasining balandligi 30 fut, kengligi 4 fut bo'lgan Windspire (17-rasm), yiliga o'rtacha 11 mil / soat shamolda yiliga 2000 kVt / soat ishlab chiqarishi mumkin. Windspire Milliy qayta tiklanadigan energiya laboratoriyasining (NREL) mustaqil sinov loyihasining bir qismi edi, ammo NREL 2009 yil yanvar oyida, VAWT ishga tushirilgandan bir yil o'tgach, "turbina komponentlari nosozliklari" tufayli sinovni to'xtatdi. Windspirening ta'kidlashicha, sinov modeli uning "eng dastlabki ishlab chiqarish birliklaridan" biri bo'lgan va shundan beri u turbinani yaxshilagan. NREL granti orqali kompaniya yangi turbinani Kichik shamolni sertifikatlash kengashi tomonidan e'lon qilingan standartlarga muvofiq sinovdan o'tkazishni va sertifikatlashni rejalashtirmoqda - mustaqil organ o'tgan yili kichik shamol turbinasi ishlab chiqaruvchilarining ishlash va xavfsizlik sertifikatiga arizalarini qabul qila boshladi.



17-rasm Windspire. Nevada shtatida joylashgan Windspire kompaniyasining Giromill qurilmasi shamol vertikal havo plyonkalariga qarshi esganda quvvat ishlab chiqaradi va bu ularning aylanishiga olib keladi.

Ikkinchi turdagi VAWT - Savonius - silindrni markaziy tekislik bo'ylab ikkita yarmiga kesib, so'ngra ikkita yarim silindrsimon sirtini kesish tekisligi bo'ylab yon tomonga siljitish orqali hosil bo'lgan rotordan foydalanadi, shunda kesma "S" harfiga o'xshaydi. Savonius turbinasining zamonaviy misollaridan biri Helix Wind-dan Helix tizimidir (18-rasm). Shamol esganda (soatiga 10 milgacha past tezlikda) uzun spiral qanotlar har tomondan shamolni ushlaydi va uni turbinaga majbur qiladi. Turbina va generator majmuasi hozirda UL ro'yxati uchun sinovdan o'tkazilmoqda, bunda turbina barcha davlat qayta tiklanadigan energiya dasturlari doirasida chegirmalar bilan olish huquqiga ega bo'ladi.



18-rasm. Spiral. Kaliforniya firmasining Helix Wind tizimi Savonius, tortishga asoslangan vertikal o'qli shamol turbinasidir.

Raqobatbardosh bozorda tortishish uchun boshqa VAWT ishlab chiqaruvchilari HAWT kamchiliklarini bartaraf etishni tanladilar. Buyuk Britaniyaning "screvolution" kompaniyasining ta'kidlashicha, odamlar va binolarga yaqin muhitda shamol turbinalariga bo'lgan talabni oshirish uchun mo'ljallangan qr5, spiral VAWT yiliga 7500 kVt/soat ishlab chiqarishda shovqin va tebranishlarni deyarli yo'q qiladi (19-rasm). Hozirgacha Buyuk Britaniya, Avstriya va Germaniya bo'ylab 100 dan ortiq turbinalar o'rnatilgani xabar qilingan.



19-rasm. Sokin inqilob. Londonda joylashgan sessiz revolutionning qr5 VAWT shovqin va tebranishlarni bartaraf etish uchun mo'ljallangan.

Havo turbinalari

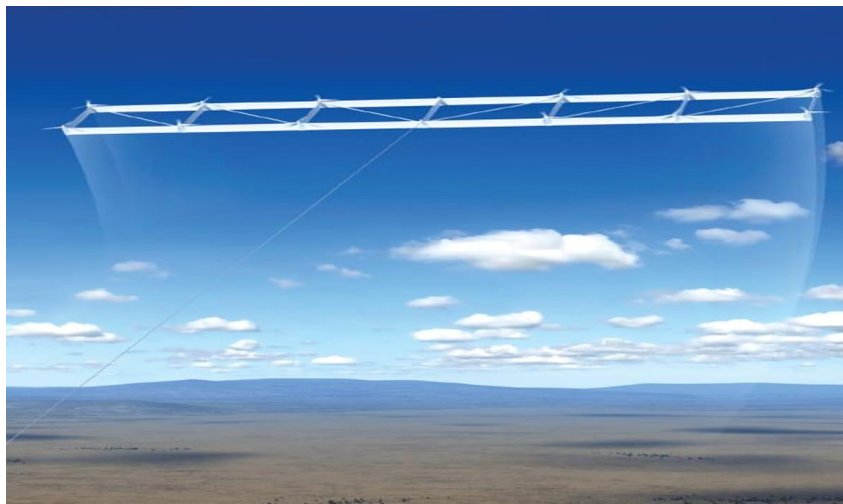
Shu bilan birga, shamol turbinasi dizayni ham butunlay yangi yo'nalishda - osmonga qarab ko'tarilmoqda. Yuqori balandlikdagi troposfera shamollarida taxminan 870 TVt quvvat salohiyati mavjudligi va qirq yillik g'oya nihoyat texnik jihatdan amalga oshirilishi mumkinligi haqidagi takliflardan kelib chiqqan holda, butun dunyo bo'ylab bir nechta ishlab chiquvchilar (jumladan, tadqiqot laboratoriyalari va xususiy sanoat) shamol energiyasidan foydalanish uchun uchurtma kabi atributlardan foydalanadigan prototiplarni sinovdan o'tkazmoqda. Kontseptsiya haqiqatga shunchalik yaqinki, Federal Aviatsiya ma'muriyati havo turbinalarini 600 metrdan past balandliklarda parvoz qilish uchun cheklovchi cheklovlarni o'rnatdi.

Ko'zga ko'ringan misollardan biri KiteGen(Kite-varrak; Gen- generator so'zining qisqartirmasi) elektr stansiyasi (20-rasm), u bir nechta "Varraklarni boshqarish moslamalari" ni o'z ichiga oladi, ular oldindan belgilangan parvoz yo'li bo'ylab bir qator "kuchli uchirtmalar" ni boshqaradi. KiteGen odatda "karusel" yoki "poya" konfiguratsiyasida joylashtirilgan. Modulli yondashuvlar ishlab chiquvchilarga 0,03 evro/kVt/soatdan kam ishlab chiqarilgan energiya xarajatlari bilan 100 MVtgacha bo'lgan stansiyalarni qurishga imkon beradi, deydi KiteGen.



20-rasm. KiteGen. Italiyaning KiteGen kompaniyasining “karusel” yoki “poya” konfiguratsiyasida joylashgan elektr uchargichlari elektr stansiyasiga ulanadi va oldindan belgilangan parvoz yo'li bo'ylab uchadi.

Joby Energy boshqa yondashuvni qo'llaydi. U 30 kVt quvvatga ega tizimni sinovdan o'tkazmoqda (21-rasm). U turbinalar qatorini qo'llab-quvvatlaydigan ko'p qanotli uchurtmaga o'xshaydi. Uchurtmaning vertikal uchish kuchi turbinaga ulangan motor generatorlari tomonidan ta'minlanadi va yo'nalish uning aylana yo'lda uchishini ta'minlash uchun rotor tezligini differentsial ravishda sozlaydigan kompyuter tizimi tomonidan boshqariladi.



21-rasm . Joby. Kaliforniyadagi Joby Energy kompaniyasi 30 kVt quvvatga ega ko'p qanotli uchurtmani baholamoqda, shu bilan birga 100 va 300 kVt quvvatga ega tizimlarni loyihalash va qurish bilan birga. Rejalar 500 dan 2000 futgacha bo'lgan dastlabki tijorat tizimlarini parvoz qilish va 2012 yilda tijorat tizimlarini ishlab chiqarishni boshlashdir.

Germaniyada Festo (pnevmatik va elektr avtomatlashtirish texnologiyasini ishlab chiqaruvchi) 24 kvadrat metrgacha avtonom boshqariladigan uchurtma qanoti bo'lgan Aerois Enerkite tizimini o'rganmoqda.

Gollandiyada, Ampyx Power Plane tizimi prototipi, parvoz paytida yerdagi generatorni harakatga keltirish uchun vintni bo'shatib qo'yadigan planer samolyoti aslida 10 kVt quvvatga ega bo'ldi. Tizim TU Delft universitetining Laddermill loyihasining bir qismidir. 2010 yil aprel oyida Laddermill tizimini sinovdan o'tkazishda erishilgan maksimal quvvat 20 kVtni tashkil etdi.

Shveytsariyada akademik tadqiqotchilar koalitsiyasi (jumladan, Shimoliy-G'arbiy Shveytsariya amaliy fanlar universiteti, Shveytsariya Federal texnologiya instituti Tsyurix va Shveytsariyaning Materiallarni sinash va tadqiq qilish federal laboratoriyalari) yuqori balandlikdagi shamol energiyasini baholamoqda.

Hatto Xitoy ham mazkur yo'nalishga kirib kelmoqda, Guangdong provinsiyasida yuqori balandlikdagi shamol energetikasini tadqiqot qilish markazini tashkil etmoqda. U yerda Foshan shahrida 1 MVt quvvatga ega havo shamol energiyasi tizimini qurish rejalashtirilmoqda.

Dizaynlar faqat uchurtmalar va samolyotlar bilan cheklanmaydi. Kaliforniyadagi Magenn Power kompaniyasi 600 dan 1000 futgacha balandlikda gorizontal o'qda aylanadigan gely bilan to'ldirilgan shamol turbinasidan iborat bo'lgan MARS havodagi shamol energiyasi tizimini ishlab chiqdi (22-rasm). MARS aylanishi, shuningdek, MARS barqarorligini ta'minlab, qo'shimcha ko'tarishni ta'minlaydigan "Magnus effekti" ni yaratadi.



22-rasm. MARS. Magenn Power kompaniyasining geliy bilan to'ldirilgan MARS shamol turbinasi o'chirilishi va qayta joylashishi mumkin. U soatiga 4 mildan 50 milgacha bo'lgan shamol tezligida ishlashga qodir.

Boshqa turbinalar

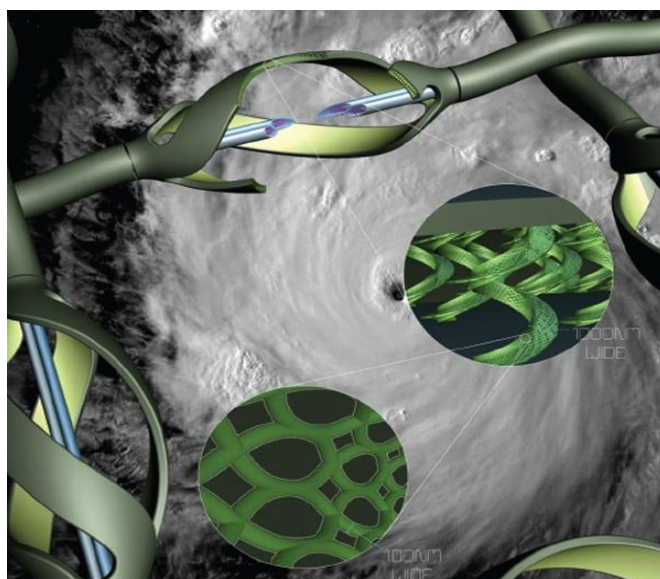
Boshqa turbinalar assortimenti, odatda HAWT va VAWT tizimlarining gibridlari mavjud va rivojlanmoqda. Dunyo bozorida, masalan, oldingi va orqa qanotlari bilan shamolni ushlaydigan yuqori torkli, olti qanotli turbinali Loopwind Shamol turbinasi mavjud. Yaponiyalik ishlab chiquvchilarning ta'kidlashicha, dizayn Loopwing-ga VAWT tomonidan duchor bo'lgan moment-nomutanosiblikdan xalos bo'lishga imkon beradi va pervanel turiga qaraganda markazdan qochma kuchdan kamroq ta'sirlanadi. Ular, shuningdek, turbina nafaqat shamol tezligida 1,6 m/s gacha aylanishini, balki shamol tuneli sinovlarida (shamol tezligi 8 m/s) 40% dan ortiq quvvat koeffitsientiga ega ekanligini ta'kidlaydilar.

"G'ayrioddiy" tushunchalar orasida kattaroq va yuqori ambitsiyaga ega me'moriy shamol turbinalari mavjud. Shamol turbinalarini osmono'par binolarga birlashtirish bo'yicha bir qancha takliflar ilgari surildi. Masalan, Dubaydagi 600 metr balandlikdagi Anara minorasi ulkan shamol turbinasiga o'xshab ko'rinishga mo'ljallangan edi. Bu rejalar 2009-yilda bekor qilindi, ammo boshqalari haqiqatga aylantirmoqda. O'tgan yili Londonda 113,5 million funt sterlinglik Strata Tower binosi qurilishi yakunlandi (23-rasm). Bu bino tomonidan ishlatiladigan quvvatning o'ndan bir qismini (yiliga jami 50 MVt/soat) mazkur binoga o'rnatilgan uchta besh qanotli turbinalar orqali ta'minlanadi.



23-rasm . London minorasi. Londonning Elephant and Castle mahallasidagi Strata Tower 43 qavatli, balandligi 147 metr bo'lgan bino bo'lib, uchta besh qanotli o'rnatilgan shamol turbinasiga ega.

Boshqa tushunchalar binolarning "biologik" tashqi ko'rinishini o'z ichiga oladi. "NanoVentSkin" ixtirochisi Agustin Otegui binoning tashqi qatlamiga mayda, biologik o'zini-o'zi tiklaydigan shamol turbinalarini kiritadi (24-rasm). "Tuzilmaning tashqi qoplamasi organik fotoelektrik qoplama orqali quyosh nurini yutadi va uni nano-tolalarga uzatadi, bu tolalar esa nano-simlar ichida joylashgan bo'lib, har bir panelning oxirida joylashgan saqlash bloklariga energiyani yetkazadi. Har bir paneldagi turbina ularning uchlarida tuzilma bilan aloqa qiladigan joylarda yuz beradigan kimyoviy reaksiyalar orqali energiya hosil qiladi. Har bir turbina aylanishida bu jarayon uchun qutblangan organizmlar mas'ul hisoblanadi."



24-rasm. Turbina terisi. Dizayner Agustín Oteguining NanoVent Skin kontseptsiyasi energiya ishlab chiqarish uchun binolarni qoplashi mumkin bo'lgan kichik bio-turbinalarga ega.

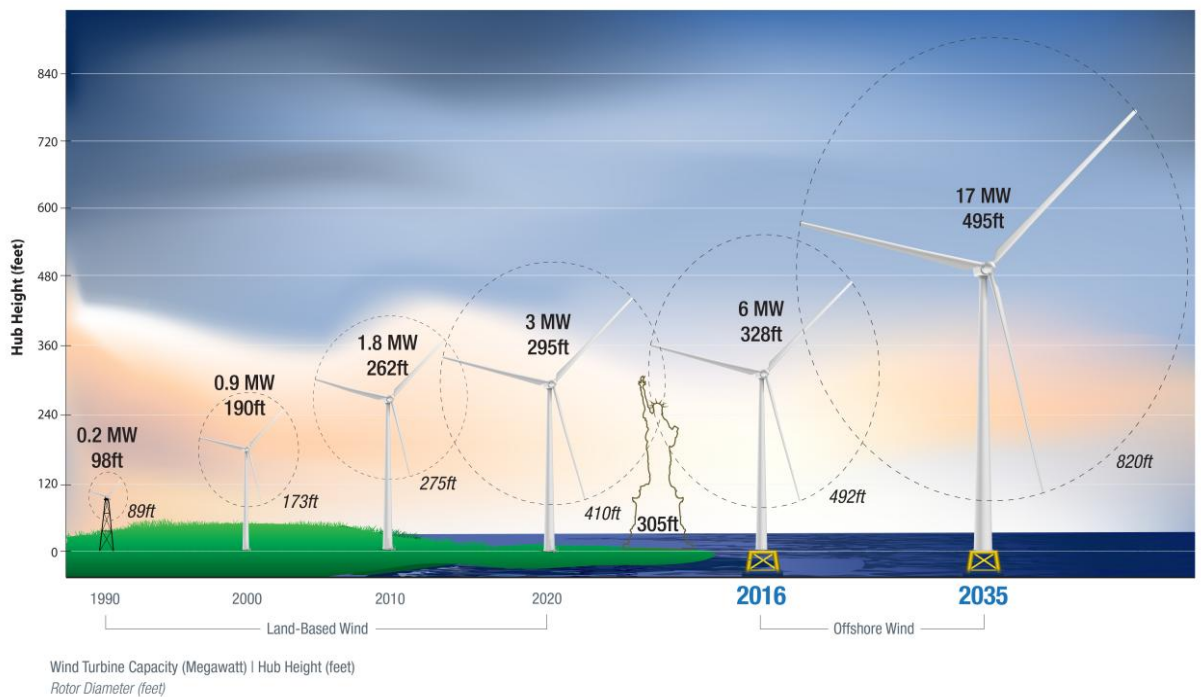
Turbina turlari

Shamol turbinalari asosan rotorning yo'nalishi va o'rnatish joyi bo'yicha tasniflanadi. Ikkita asosiy dizayn **gorizontal o'q li shamol turbinalari** (HAWT) va **vertikal o'qli shamol turbinalari** (VAWT) turbinalari bo'lib, ularning har biri quruqlikda yoki dengizda joylashtirilishi mumkin.



25-rasm. HAWT - Gorizontal o'qli shamol turbinalari

Zamonaviy katta turbinalar ko'pincha gorizontal eksa dizaynidan foydalanadi [5]. HAWT da rotor o'qi gorizontal va shamolga qaragan (25-rasmga qarang). Lift printsipli bo'yicha ishlaydi. Tijorat HAWT odatda ikki yoki uchta Parrakqa ega (uch Parrakli dizaynlar muvozanat va samaradorlik uchun eng keng tarqalgan). Asosiy xususiyatlarga quyidagilar kiradi: - Yuqori samaradorlik: HAWTlar aerodinamik ko'tarish printsipli bo'yicha ishlaydi va shamol energiyasining ~40-50% ni egallashi mumkin [3][5] (Betz chegarasiga 59,3% [10] ga yaqinlashadi). Ular tezlikka nisbatan kichik Parraklar bilan yuqori tezlik nisbatlarida ishlaydi va yuqori quvvat ishlab chiqaradi. - Yaw nazorati zarur: Rotor shamolga qaraganligi sababli, HAWTlar minoradagi nacelleni shamolga aylantirish uchun yaw mexanizmini talab qiladi. - Ta'mirlash bilan bog'liq qiyinchiliklar: qo'zg'alish tizimi (vites qutisi, generator) baland minoraning tepasida joylashgan, shuning uchun xizmat ko'rsatish uchun ko'pincha kranlar kerak bo'ladi. Zamonaviy minoralar balandligi 100+ m bo'lishi mumkin [2]. - Joylashtirish: HAWTlar odatda kuchliroq shamollarga kirish uchun baland minoralarda joylashgan (masalan, markazning o'rtacha balandligi qirg'oqdan >100 m [2]) (26-rasm), bu xarajatlarni oshiradi, lekin shamol tezligini oshiradi.



26-rasm. Vaqt o'tishi bilan turbina balandligi va Parraklar uzunligi ortib borayotganining tasviri.

Bundan farqli o'laroq, vertikal o'qli turbinalar rotor mili vertikalga ega. Mashhur turlarga Savonius (drag-asosli) va Darrieus (ko'tarishga asoslangan) dizaynlari kiradi. Bular o'ziga xos xususiyatlarga ega: - Savonius (VAWTni orqaga tortuvchi kuch)(27-rasm): Ikki yoki undan ortiq qoshiqdan (yarim silindrlardan) iborat. U osongina o'zidan-o'zi harakatga keladi (shamol yo'nalishi ahamiyatsiz), lekin samaradorligi past (quvvat koeffitsienti $C_p \approx 0,15-0,20$) [5][7]. Ko'pincha oddiylilik va ishonchlilik kabi husisiyatlari samaradorlikni yo'qotishdan ustun bo'lib, kichik o'lchamdagi yoki maxsus ilovalar (masalan, ventilyatsiya sovutish) uchun ishlatiladi [12] . - Darrieus (ko'taruvchi VAWT): Ko'pincha "tuxum urish" shaklida (troposkein). U HAWT kabi liftda ishlaydi va yuqori C_p ($\sim 0,35-0,4$) [5] [7] ga yetishi mumkin , lekin odatda o'zidan-o'zi ishga tusha olmaydi va katta o'zgaruvchan yuklarni boshdan kechiradi. Generator yerga o'rnatiladi (osonroq texnik xizmat ko'rsatish) va ko'p yo'nalishli shamolni ushlab turish YAWga bo'lgan ehtiyojni yo'q qiladi [5]. Biroq, VAWTlar odatda solishtirma o'lchamdagi HAWTlarga qaraganda kamroq quvvat oladi [8] [5] .



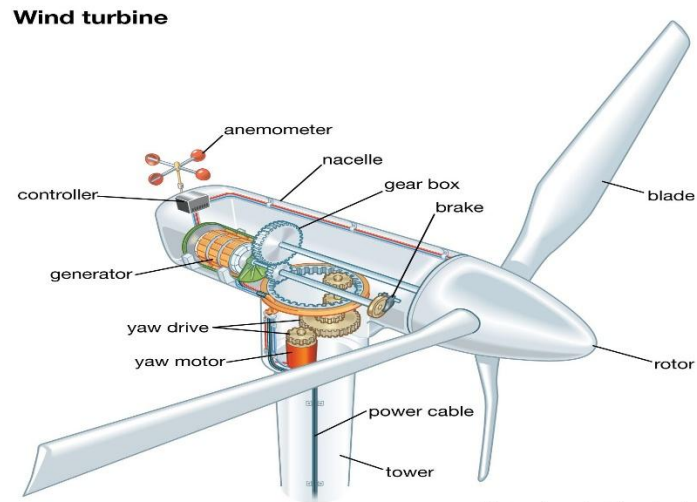
27-rasm. VAWT - Vertikal o'qli shamol turbinalari. Savonius - VAWT ning yana bir turi

Masshtab: VAWTlar foydali miqyosda kamdan-kam qo'llaniladi (28-rasm). Aksariyat tijorat turbinalari HAWT hisoblanadi. VAWT kichik shahar inshootlari yoki eksperimental tizimlar uchun keng tarqalgan. Ularning past samaradorligi va muhandislik muammolari (masalan, Darrieus Parraklaridagi stressni o'zgartirish [9]) keng tarqalgan foydalanishni cheklaydi [9].



28-rasm. VAWT - Vertikal o'qli shamol turbinalari. Bu Darrieus shamol turbinasi tasviri.

Shamol turbinasi komponentlari



29-rasm. Gorizontaal o'qli shamol turbinasining ichki tuzilishi(https://dishcuss.com/post/C40E4D974269979E369C1264009DE70D9CD83850/A57D545CAC8F0246D32A46757AFC6B186AD45750?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera)

29-rasmda zamonaviy gorizontaal o'qli shamol turbinasining ichki tuzilishi ko'rsatilgan. Har bir etiketli komponent shamol energiyasini elektr energiyasiga aylantirishda o'ziga xos rol o'ynaydi.

1. **Parrak** - shamoldan kinetik energiyani ushlaydi. Uning havo plyonkasi shakli ko'tarilish hosil qiladi, bu esa rotorning aylanishiga olib keladi. Odatda shisha tolali yoki uglerod tolasidan tayyorlanadi.
2. **Rotor** - Parraklarni milga bog'laydigan aylanadigan qism. Shamol kinetik energiyasini mexanik aylanishga aylantiradi.
3. **Nacelle** - asosiy komponentlarni (vites qutisi, generator, tormoz, boshqaruvchi) o'z ichiga olgan korpus. Ularni ob-havodan himoya qiladi.
4. **Vites qutisi** - aylanish tezligini 10-60 rpm (rotor) dan taxminan 1000-1800 rpm (generator) ga oshiradi. Ba'zi turbinalar o'rniga to'g'ridan-to'g'ri qo'zg'atuvchi tizimlardan foydalanadi.
5. **Tormoz** - rotorni favqulodda vaziyatlarda yoki texnik xizmat ko'rsatish vaqtida to'xtatadi. Shlangi, mexanik yoki aerodinamik bo'lishi mumkin.
6. **Generator** - elektromagnit induksiya orqali mexanik aylanishni elektr energiyasiga aylantiradi.
7. **Nazoratchi** - turbinani avtomatik ravishda ishga tushiradi va to'xtatadi, qadam burchagini boshqaradi va yuqori shamol tezligida ortiqcha yuklanishni oldini oladi.
8. **Anemometr** - shamol tezligini o'lchaydi va qachon boshlash yoki to'xtash kerakligini hal qilish uchun ma'lumotlarni tekshirgichga yuboradi.
9. **Yaw Drive va Yaw Dvigatel** - Nacelleni shamol yo'nalishiga qaratib aylantirib, samaradorlikni oshiradi.

10. **Minora** - balandlikda (60-150 m) turbinani qo'llab-quvvatlaydi. Shamol yuklariga qarshilik ko'rsatish uchun temir yoki betondan qilingan.

11. **Quvvat kabeli** - ishlab chiqarilgan elektr energiyasini minora bo'ylab transformator va elektr tarmog'iga o'tkazadi.

12. **Yo'nalishni boshqarish mexanizmi** - yo'nalishni silliq sozlash uchun yaw motorini nacelle asosiga ulaydi.

Shamol turbinasi ishlashi fizikasi

Shamol turbinalari shamolning kinetik energiyasini mexanik, keyin esa elektr energiyasiga aylantiradi. Jarayon quyidagi zanjir bo'yicha amalga oshiriladi:

Shamol → Rotor → Mil → Generator → Elektr

Samaradorlik aerodinamik, mexanik va elektr omillariga bog'liq. Faraday qonunida aytilishicha, o'tkazgich magnit maydon bo'ylab harakat qilganda elektromotor kuch (EMF) induksiya qilinadi.

Shamol energiyasini konvertatsiya qilishning asosiy tamoyillari

Shamol energiyasi - bu harakatlanuvchi havoning kinetik energiyasi:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Shamolda mavjud quvvat:

$$P_{wind} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2)$$

bu erda ρ = havo zichligi ($\approx 1,225 \text{ kg/m}^3$), A = rotorning supurilgan maydoni (πr^2) va v = shamol tezligi (m/s). E = turbinaning samaradorligi. Quvvat shamol tezligi kubi bilan ortadi. Kattaroq quvvat olish:

- a) Rotor radiusining ortishi (r) kattaroq supurilgan maydonga olib keladi (ρ);
- b) Turbina balandligining oshishi pastroq zichlikdagi havoga (ρ) va yuqori shamol tezligiga (v) kirish imkonini beradi.

Betz chegarasi

Shamoldan energiya olishning maksimal nazariy samaradorligi 59,3% ni tashkil qiladi, bu Betz chegarasi sifatida tanilgan. Amalda, zamonaviy turbinalar 40-50% samaradorlikka erishadi.

Aerodinamik kuchlar

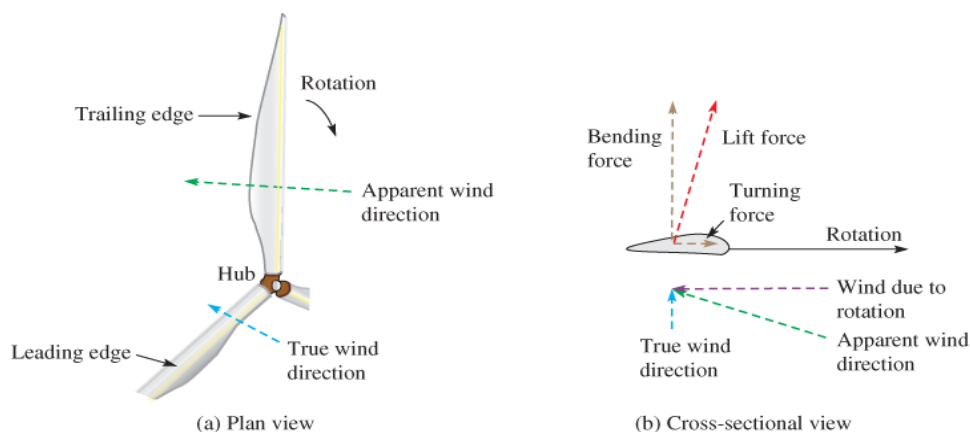
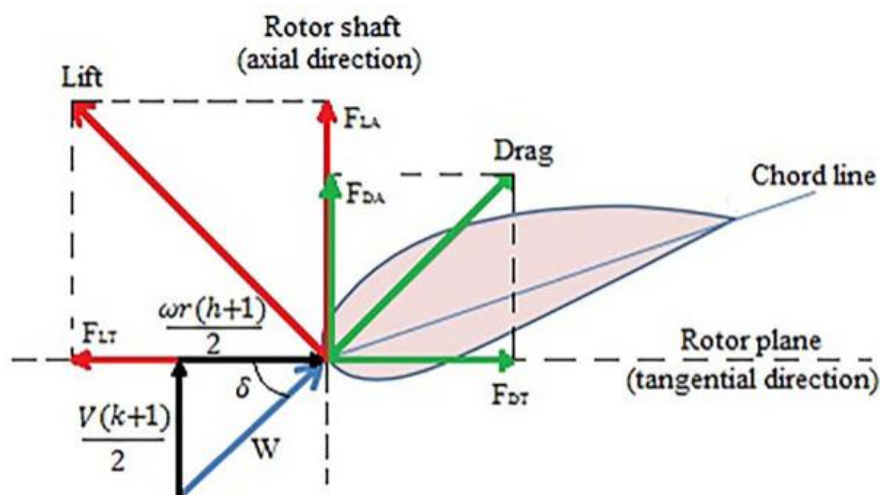
Parrak qismidagi ko'tarish kuchi (30-rasm):

$$L = \frac{1}{2}C_L\rho Av^2 \quad (3)$$

Parrak qismidagi kuchni torting (30-rasm):

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad (4)$$

Parraklar tortishni kamaytirish va ko'tarishni maksimal darajada oshirish uchun mo'ljallangan. Ko'tarish va tortish nisbati aerodinamik samaradorlikni belgilaydi.



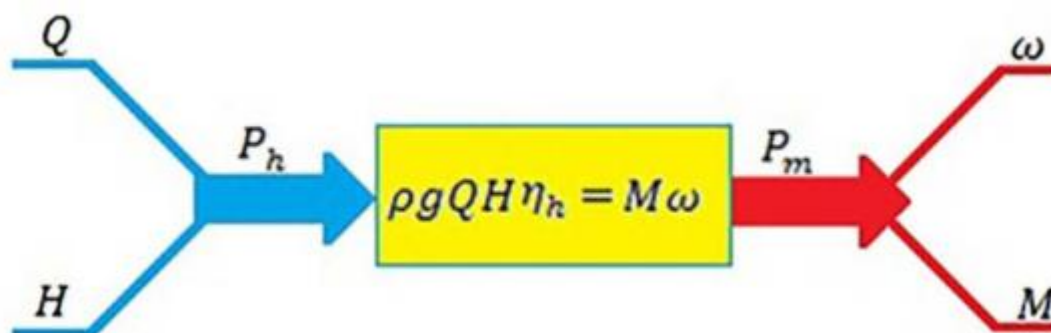
30-rasm. Parrak kesimidagi kuch va tezlik komponentlari (DOI: 10.1051/mateconf/201711210017).

Rotorning samarali dizayni uchun aerodinamik ishlash muhim ahamiyatga ega. Aerodinamik lift - bu turbina tomonidan ishlab chiqarilgan quvvat ishlab chiqarish uchun mas'ul bo'lgan kuch va shuning uchun tegishli dizayn yordamida ushbu quvvatni maksimal darajada oshirish juda muhimdir. Parrakning harakatiga qarshilik ko'rsatadigan chidamli tortish kuchi ham ishqalanish natijasida hosil bo'ladi, uni minimallashtirish kerak.

Aerodinamik hisoblar uchun ishlatiladigan metodologiya Blade Element Momentum Method hisoblanadi. Rotorning asosiy komponentlari Parraklardir [11, 12, 13]. Ular shamol kuchini foydali quvvat ishlab chiqarish uchun zarur bo'lgan momentga aylantiradigan qurilmalardir.

Turbina - suyuqlikning gidravlik energiyasini mexanik energiyaga aylantiradigan gidravlik mashina. Shlangi energiyaning (H yuk va oqim Q) mexanik

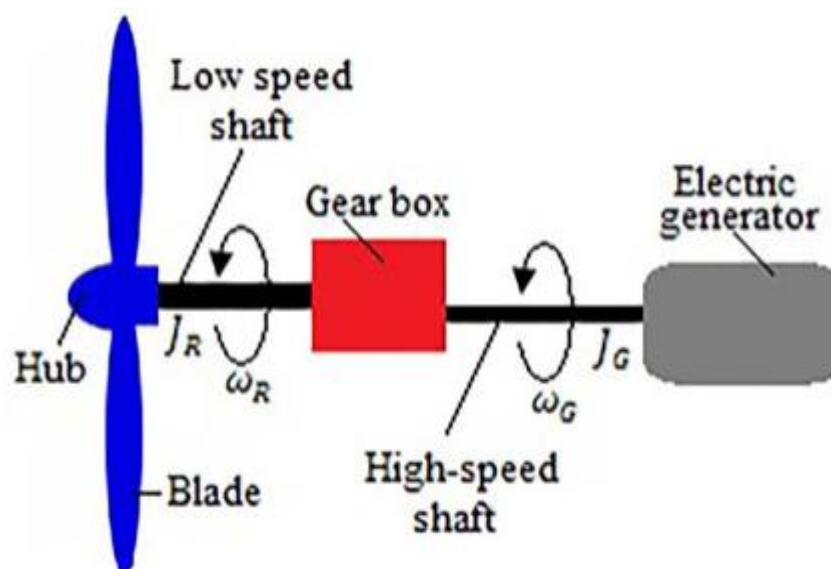
energiyaga (moment M va burchak tezligi ω) aylanishini ko'rsatadigan blok-sxema 31-rasmda ko'rsatilgan.



31-rasm. Turbinada energiya almashinuvinin blok-sxemasi(DOI: 10.1051/mateconf/201711210017).

Shamol turbinalari uchun kinematik zanjir

Energiyani konvertatsiya qilish zanjiri to'rtta quyi tizimga (32-rasmda ko'ratilgan) tashkil etilgan: aerodinamik quyi tizim, asosan, qanotlardan tashkil topgan turbina rotoridan va Parraklar uchun tayanch bo'lgan turbina uyasidan iborat; qo'zg'atuvchi poezd, odatda quyidagilardan iborat: past tezlikli mil - turbinali markaz bilan birlashtirilgan, tezlikni ko'paytiruvchi va yuqori tezlikli mil - elektr generatorini boshqaradigan.



32-rasm. Harakatlanuvchi turbina diagrammasi. (DOI: 10.1051/mateconf/2017112100 17)

32-rasmda keltirilgan diagramma tahlilidan so'ng muvozanat tenglamalarini yozishimiz mumkin:

$$M_R - M_{GBi} = J_R \frac{d\omega_R}{dt} + B_R \cdot \omega_R \quad (5)$$

$$M_{GBe} - M_G = J_G \frac{d\omega_R}{dt} + B_G \cdot \omega_G \quad (6)$$

Bu

yerda:

- B_R va B_G rotor va generator tizimidagi doimiy ishqalanishdir
- M_R rotor momenti;
- M_{GBi} Tishli mexanizm box qutisining boshlanish momenti;
- M_{GBe} Tishli mexanizm box qutisining oxirigacha bo'lgan momentidir
- M_G oxirigacha generator momentidir ;
- J_R rotorning inersiya momenti;
- J_G generatorning inersiya momenti;
- ω_R - asosiy milning aylanish tezligi;
- ω_G generatorni ishga tushirishgacha bo'lgan aylanish tezligi.

(5) natijadan:

$$\frac{d\omega_R}{dt} = \frac{M_R - M_{GBi} - B_R \cdot \omega_R}{J_R} \quad (7)$$

n qanotli shamol turbinasi uchun rotorning inersiya momenti [15] quyidagicha ifodalanadi:

$$J_R = n \cdot m \cdot r_i^2 \quad (8)$$

Bu erda n - Parraklar soni, m - bitta Parrakning massasi va r - Parraklarning og'irlik markazining radiusi. (7) va (8) munosabatlarni tahlil qilib, quyidagi xulosaga kelish mumkin: rotorning inersiya momentini kamaytirishning ahamiyati, shuning uchun uning inertial massasi, to'g'ridan-to'g'ri asosiy milning aylanish tezligini oshirishga olib keladi, shuning uchun elektr stantsiyasining past tezlikli shamolida tezroq ishga tushishga imkon beradi.

Inertsia momentini kamaytirishning mumkin bo'lgan usullaridan biri Parraklarning og'irligini kamaytirishdir. Shamol turbinasi Parraklari yog'ochdan metallgacha bo'lgan turli xil materiallardan tayyorlangan. Turbinaning qanotlari uchun asosiy konstruktiv dizayn talablari quyidagilardan iborat: haddan tashqari yuklarga qarshilik ko'rsatish uchun kuchli bo'lishi kerak, minora bilan to'qnashuvning oldini olish uchun qattiq bo'lishi kerak, xarajatlarni va ishga tushirishni minimallashtirish uchun iloji boricha yengil bo'lishi kerak va rezonansning oldini olish uchun qattiq va yengil bo'lishi kerak.

1-jadval. Uch hil material uchun parrak massasi

Material	Po'lat	Alyuminiy	Epoksi uglerod
Parrak massasi (Kg)	685.37	241.85	139.69

Elektr energiyasi ishlab chiqarish va tarmoqqa ulanish

Generator o'zgaruvchan tokni ishlab chiqaradi, bu chastotada farq qilishi mumkin. Konverter va invertorlar kabi quvvat elektronikasi tarmoqqa ulanish yoki batareyani saqlash uchun chiqishni barqarorlashtiradi.

Samaradorlik va quvvatni tartibga solish

Quvvat koeffitsienti (C_p):

$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{wind}}$$

Zamonaviy turbinalar C_p ga 0,4 dan 0,5 gacha erishadi.

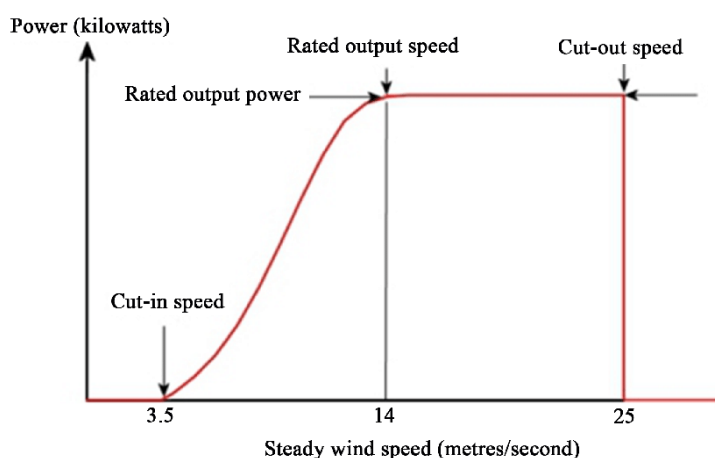
Turbinaning quvvat egri chiziqlari

Kesish tezligi (Cut –in speed) ($\approx 3-4$ m/s), **nominal tezlik (rated output speed)** va **o'chirish tezligi (cut-out speed)** (≈ 25 m/s) ko'rsatilgan quvvat egri chizig'i mavjud (33-rasm).

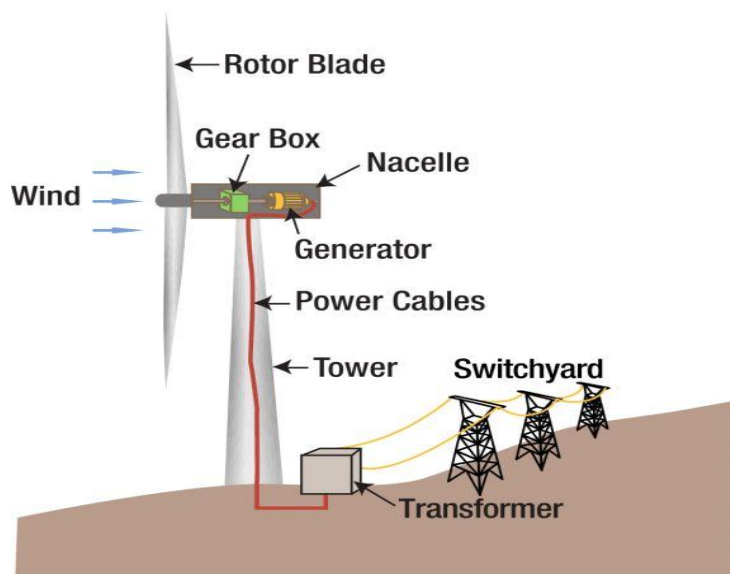
Kesish tezligi: quvvat ishlab chiqarilmaydigan tezlik

Nominal shamol tezligi: quvvat nominal quvvatning 100% bo'lgan tezlik

O'chirish tezligi : rotor va haydovchi poezdni shikastlanishdan himoya qilish uchun turbinaning o'chadigan tezligi.



33-rasm. Shamol turbinasi uchun quvvat egri chizig'i (Manba: Monnerie et al. (2015))

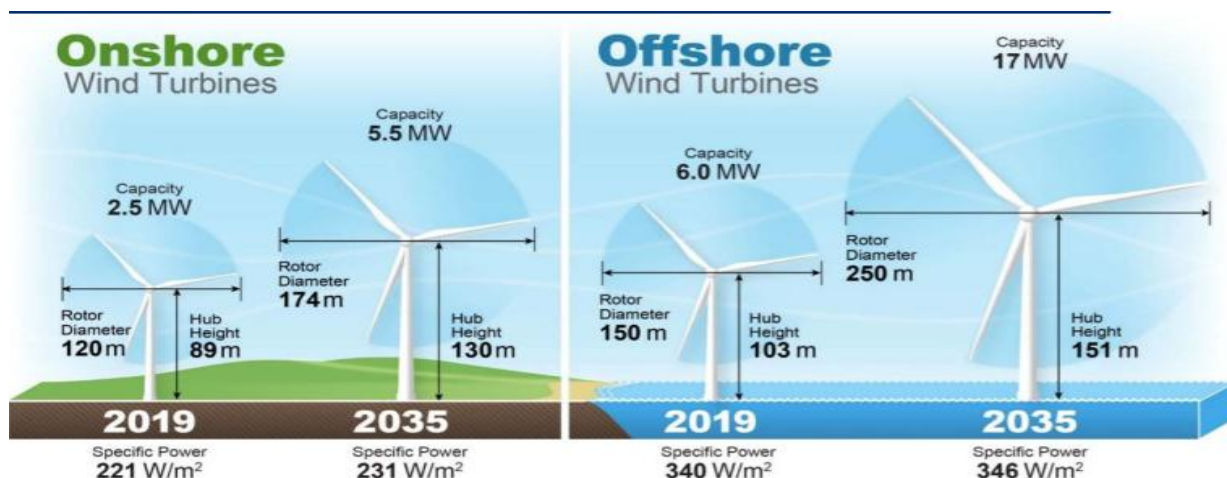


34-rasm. Shamol turbinasi ishlash jarayoni

Ushbu sxema (34-rasm) energiyani tabiiy shamol oqimidan foydalanish mumkin bo'lgan elektr energiyasiga **aylantirish jarayonini aniq ko'rsatib beradi**, shamol turbinasi o'rnatilishi ichidagi **aerodinamik, mexanik va elektr tizimlari o'rtasidagi o'zaro aloqani ta'kidlaydi**.

Quruqlik va dengiz

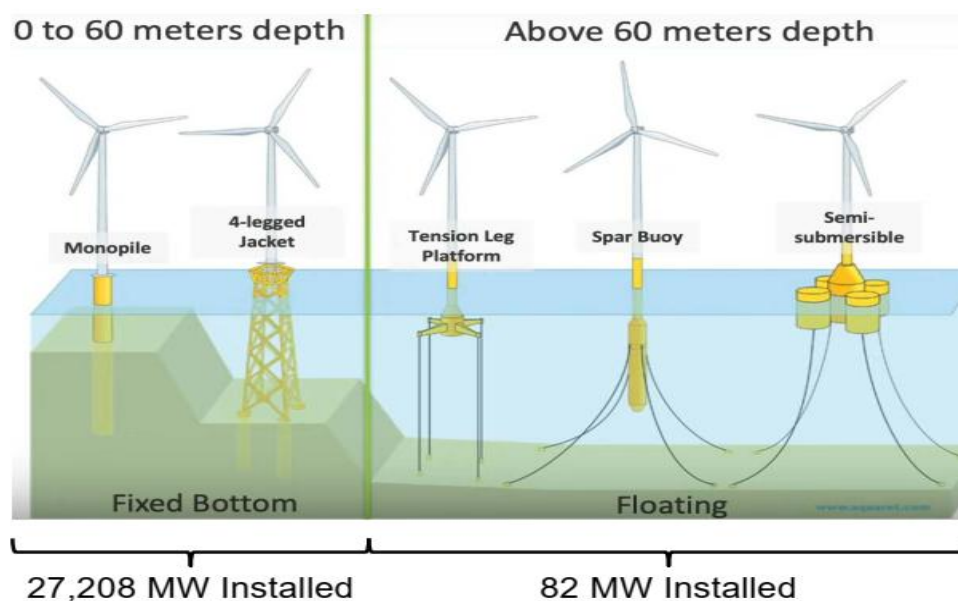
Shamol turbinasi quruqlikda yoki dengizda o'rnatilishi mumkin (35-rasm). Quruqlikdagi (Onshore) turbinalar odatda kichikroq (1–5 MVt) va har bir kVt uchun arzonroq, lekin yerdan foydalanish cheklovlari, turbulentlik va past o'rtacha shamol tezligi kabi to'siqlar bn “kurashadi”. Offshore turbinalar (rasmga qarang) odatda juda katta (8–15+ MVt) va mustahkam poydevorlarga yoki suzuvchi platformalarga o'rnatiladi.



35-rasm. Quruqlikdagi va dengizdagi shamol turbinalari uchun joriy va prognoz qilingan xususiyatlar (Rasm: Lourens Berkeley milliy laboratoriyasi)

Offshore shamol kuchliroq, barqarorroq shamollardan (yuqori quvvat omillari) foyda keltiradi. Misol uchun, yangi offshor loyihalar 2050 yilga kelib 60% quvvat omilidan oshishi mumkin[3]. Offshor loyihalar quruqlikdagi mojarolardan qochadi va ko'pincha yuqori rentabellikka ega, lekin ular yuqori xarajatlarga (poydevor, texnik xizmat ko'rsatish, uzatish) va og'ir dengiz sharoitlariga duch keladi. Asosiy qarama-qarshiliklarga quyidagilar kiradi: - **Quruqlik:** Qurilish narxining pastligi, kirishni osonlashtiradi. O'rtacha quvvat koeffitsienti ~30–40% (masalan, AQShda ~34% [10]). Nominal o'lchamlar odatda 2-5 MVt [3] . - **Offshore:** Yuqori rentabellik (CF ~ 40–50+%), lekin xarajat summasi ancha yuqori. Poydevorlar to'lqinlarga / korroziyaga qarshi turishi kerak. Turbinaning o'rtacha hajmi kattaroq (odatda bugungi kunda 8–15 MVt [3]). Misol uchun, GE Haliade-X (12 MVt, 220 m rotor) offshor modelidir. - **Suzuvchi va qo'zg'almas:** Ko'pchilik dengizda (≤ 50 m chuqurlikda) qattiq yakka ustunli yoki karkasli poydevoridan foydalanadi; chuqurroq suvlar suzuvchi turbinalarni talab qiladi (faollik bilan rivojlanayotgan soha).

Mustahkam o'rnatilgan va suzib yuruvchi dengizdagi (Offshore) Shamol turbinalari



36-rasm. 2020-yil fevral holatiga ko'ra o'rnatilgan quvvatlari bilan qattiq tubi va suzuvchi dengiz shamollari uchun inshootlar (*Manba: Musial (2021)*)

60 m dan ortiq suv chuqurligida suzuvchi tuzilmalar yanada tejamkor bo'lishi mumkin. "Dengizdagi shamol resurslarining ~80% chuqurligi 60 m dan oshiq suvlarda joylashgan. Suzuvchi shamol ob'ektlarni qirg'oqdan uzoqroqda, yaxshi shamol resurslari bilan joylashtirish imkonini beradi. Suzuvchi shamol texnologiyasi 2024 yildan boshlab foydali miqyosda keng qo'llanilishi kutilmoqda.

Rotor Parraklari

Funktsiya: Shamol energiyasini tortib oling va uni aylanish harakatiga aylantiring.

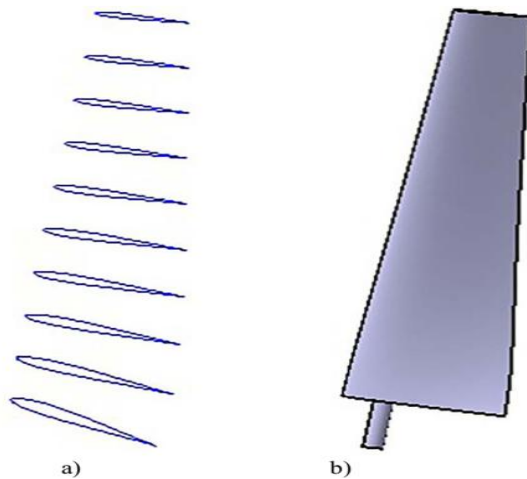
Izoh: Parraklar samolyot qanotlari kabi ishlaydi - yuqori va pastki yuzalar orasidagi havo bosimi farqi tufayli ko'tarilish hosil qiladi.

Odatda soni: 2-3 Parrak (zamonaviy turbinalar odatda muvozanat va samaradorlik uchun 3 ta).

Materiallar: shisha tolali poliestar, uglerod tolali kompozitlar.

Parrak dizayni va materiallari

Parraklar shamol energiyasini olish uchun juda muhimdir. Zamonaviy Parraklar uzun, nozik havo plyonkalari bo'lib, ular ildizdan uchigacha buriladi, shunda hujum burchagi oraliq bo'ylab optimal bo'ladi. Ular rotor tezligini va quvvatini tartibga solish uchun **pitch nazorati** (har bir Parrak o'z o'qi atrofida bir oz aylanishi mumkin) bilan aerofolga kesmalarini (samolyot qanotlariga o'xshash) o'z ichiga oladi. Bugungi kunda odatiy Parraklar ~ 20 m (kichik turbinalar) dan 100+ m gacha (eng katta dengiz rotorlari) oralig'ida. Uzunroq Parraklar ko'proq maydonni supuradi (kuch $\propto$ supurilgan maydon), lekin qattiq va engil bo'lib qolishi kerak.



37-rasm. Shamol turbinasi parragi (a -bo'limlarda profil sxemasi; b - 3D model).

Muayyan vaziyat uchun, xususan, o'rtacha shamol tezligi uchun, $V = 7 \text{ m/s}$ va rotordiametri $D = 5,8 \text{ m}$, aerodinamik Parrakni hisoblash amalga oshirildi. Bunday sharoitda 37.a-rasmda ko'rinib turganidek, Parrakni o'nta bo'limda hisoblab chiqdi. 37.b-rasmda keltirilgan Parrakning 3D modeli Catia dasturi yordamida o'nta qismni birlashtirgan holda olingan. Shamol turbinasining dinamik va mexanik xususiyatlarini o'zgartirishning boshqa usuli - Parrakdan yasalgan materialni o'zgartirishdir [13] .

38-rasmda shamol turbinasi kanadı geometriyasi va aerodinamik dizayni ko'rsatilgan .

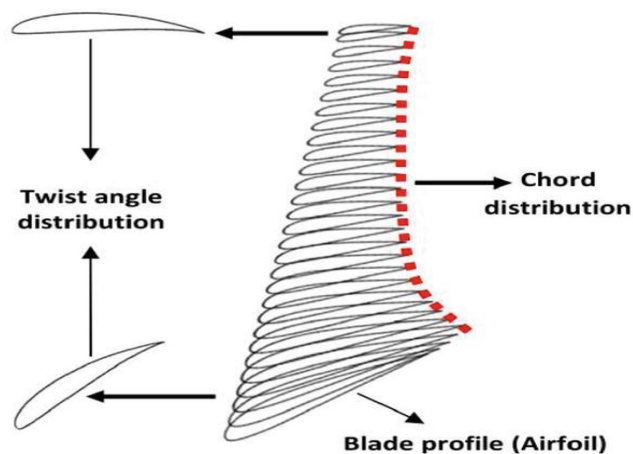
Parrak tekis emas - aerodinamik ishlashni optimallashtirish uchun uning uzunligi bo'ylab burilish burchagi va akkord taqsimoti mavjud.

Burilish burchagi taqsimoti: Parrak o'ralgan bo'lib, har bir qism keladigan shamolni hujumning to'g'ri burchagida kutib oladi. Baza kattaroq burilish burchagiga ega, uchi esa kichikroq.

Akkord taqsimoti: Akkord uzunligi (Parrakning kengligi) muvozanatni ko'tarish va tortishni kamaytirish uchun ildizdan uchigacha kamayadi.

Parrak profili (havo pardasi): Parrakning har bir kesimida rotorning aylanishiga olib keladigan liftni hosil qiluvchi havo plyonkasi shakli mavjud.

Umuman olganda, ushbu dizayn Parrak uzunligi bo'ylab optimal aerodinamik samaradorlikni saqlab, shamoldan maksimal energiya olishni ta'minlaydi.



38-rasm. Shamol turbinasi qanotining geometriyasi va aerodinamik dizayni

Parraklar uchun materiallar rivojlandi : dastlabki shamol tegirmonlari yog'ochdan foydalangan, dastlabki turbinalar po'latni sinab ko'rishgan (1941 yilda boboning dastasi mashinasi [1]), ammo muvaffaqiyatsizliklar shisha tolali kompozitlarga olib keldi. 1960-yillardan boshlab Parraklar **tola bilan mustahkamlangan polimerlardan** (odatda shisha tola/epoksi) ishlab chiqarila boshlandi [1] . Zamonaviy katta Parraklar ko'pincha og'irlikni qo'shmasdan qattqlikni oshirish uchun uglerod tolali armaturalarni (shpaklarda) o'z ichiga oladi [1] . Tabiiy tolalar (bambuk, zig'ir) xarajat yoki eko-foydalar uchun o'rganilgan [1] . Xulosa: - **Havo pardasi shakli**: Parraklar hisoblash asboblari tomonidan ishlab chiqilgan aerodinamik optimallashtirilgan profillarga ega. Ular uzun va torayib ketgan bo'lib, shamol tezligiga nisbatan optimal burchakni ushlab turish uchun burama. - **Parraklar soni**: Ko'pchilik HAWTlar uchta Parrakdan foydalanadi. Ikki Parrakli dizaynlar mavjud (biroz arzonroq, ammo shovqinli) va bitta Parrakli dizaynlar kamdan-kam uchraydi (muvozanat bilan bog'liq muammolar). Uch Parrakli to'plamlar yumshoqroq kuch momenti va past tebranish imkonini beradi [5] . - **Kompozit konstruktsiya**: Parraklar epoksi qatroniga o'rnatilgan shisha tolali (yoki uglerod) mato qatlamlaridan iborat. Qattqlik uchun qatlam ko'pik yoki balsa yadro qismlarini o'z ichiga olishi mumkin. Natijada kuchli, yengil tuzilma paydo bo'ladi. - **Sinov**: Parraklar yillar davomida tsiklik shamol yuklanishiga bardosh berish uchun keng qamrovli statik va charchoq sinovlaridan o'tadi.

Ishlab chiqarish usullari

Shamol turbinasi komponentlari maxsus sanoat jarayonlari yordamida quriladi:

- **Parrakni ishlab chiqarish**: Katta Parraklar ikki qobiqli qoliplarda ishlab chiqariladi. Quruq tolali matolar (shisha yoki uglerod) qolipga yotqiziladi, ko'pincha strukturaviy yadrolari bo'lgan bir necha qatlamlarda. Keyin qatron vakuum ostida infuz qilinadi (Vakuum-yordamli qatron o'tkazmalari, VARM) [1] . Ushbu vakuumli infuzion usuli yuqori tolali tarkib va kam bo'shliqlarni beradi. Shu bilan bir qatorda, prepreg (oldindan singdirilgan) tolalar ba'zan yuqori ishlash uchun ishlatiladi (masalan, Vestas tomonidan) [1] . Qadimgi

usullar (masalan, nam qo'l yotqizish) asosan avtomatlashtirilgan infuziya bilan almashtirildi. Qattiqlashgandan so'ng, ikkala yarmi shpak (ildiz) va qobiq (etakchi / orqa tomon) bo'g'inlarida bir-biriga bog'lanadi. Rivojlanayotgan texnologiyalar avtomatlashtirilgan tolalarni joylashtirish va segmentlangan Parrakni yig'ishni (engil tashish uchun) o'z ichiga oladi [1].

- **Minora konstruksiyasi:** Minoralar odatda silindrsimon po'lat quvurlardir (ba'zan beton yoki gibrid). Bo'limlar tashish chegaralarini oldini olish uchun joyida po'lat plitalar (spiral yoki uzunlamasına payvand) prokat va payvandlash yo'li bilan hosil qilinadi [2]. Oxirgi innovatsiyalar o'z ichiga spiral payvandlash usullarini (masalan, Keystone Engineering) va hatto 3D-bosma po'lat minora asoslarini o'z ichiga oladi [24].
- **Nacelle/drivettrain:** Nacelleda Tishli mexanizm qutisi (agar mavjud bo'lsa), generator, burilish moslamasi va elektronika mavjud. Tishli mexanizm qutilari (ko'pincha spiral spur) va generatorlar (ikki marta oziqlanadigan induksiya yoki sinxron) ixtisoslashgan ishlab chiqaruvchilar tomonidan yig'iladi. To'g'ridan-to'g'ri qo'zg'aluvchan (tishli bo'lmagan) turbinalar texnik xizmat ko'rsatishni kamaytirish uchun katta doimiy magnit generatorlardan foydalanadi.
- **Yig'ish:** Parraklar markazga biriktirilgan (ba'zan murvatli ildiz ulanishlari orqali). Rotor boshi, generator va elektronika kran bilan ko'tariladi va minora tepasiga o'rnatiladi. Joyda ishga tushirish moslashtirish va sinovni o'z ichiga oladi.

Hozirda ishlab chiqarish yuqori darajada sanoatlashgan. Yirik zavodlar (masalan, Vestas, Siemens Gamesa, GE) yiliga yuzlab Parraklar va turbinalar ishlab chiqarishi mumkin. Davomli ilmiy-tadqiqot ishlari yengilroq materiallarni, yaxshi yopishtiruvchi birikmani va qayta ishlanishini (masalan, termoplastik qatronlar) qidiradi [1].

Shamol turbinalarini konstruksiyalash va qurish

1. O'rtacha shamol tezligi > 5 m/s bo'lgan saytni tanlang.
2. Temir-beton poydevorni qurish.
3. Minorani yig'ing va o'rnatish.
4. Naselni va rotorni o'rnatish.
5. Elektr va boshqaruv tizimlarini ulang.
6. Xavfsizlik va tarmoqqa ulanish tizimlarini sinab ko'ring.



39-rasm. Shamol turbina konstruksiyasi

(https://www.dolcera.com/wiki/index.php?title=Different_Types_and_Parts_of_a_Horizontal_Axis_Wind_Turbines&mobileaction=toggle_view_desktop)

Ishlash va samaradorlik

Shamoldagi mavjud quvvat quyidagicha ifodalanadi $P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3$, bu erda ρ - havo zichligi, A - rotorning supurilgan maydoni va v shamol tezligi. Turbinaning haqiqiy chiqish quvvati P_{out} formulasi $P_{shamolning}$ quvvatini quvvat koeffitsienti C_p ko'paytmasi teng. Betz qonuni maksimal nazariy C_p 59,3% [6] ga belgilaydi, ammo haqiqiy mashinalar bundan pastroq. Zamonaviy katta HAWTlar optimal uchish tezligi nisbatlarida [3] $C_p \approx 0,40-0,50$ ga erishishi mumkin, ya'ni ular shamol kinetik energiyasining qariyb yarmini oladi. Amalda, C_p Parakk dizayni va shamol tezligiga bog'liq; qarshilik kuchi(drag)ga-asoslangan Savonius rotorlari faqat $\sim 0,15-0,20$ [7] ga etadi, liftga asoslangan dizaynlar (HAWT, Darrieus) esa 0,45 ga yaqinlashishi mumkin [3].

Shunday qilib, **samaradorlik** quyidagicha hisoblanadi

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{wind}} = C_p \times \eta_{generator}$$

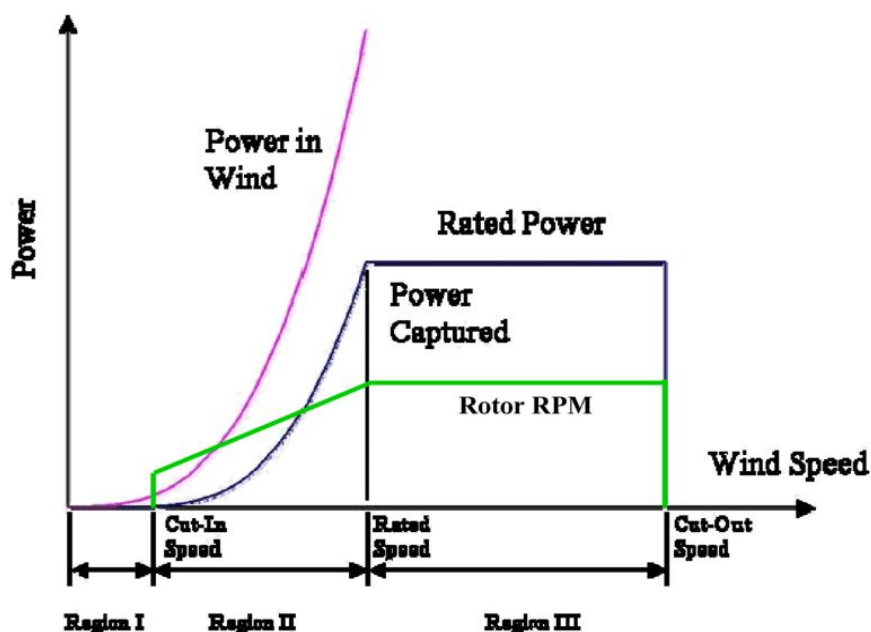
bu erda $\eta_{generator}$ ($\sim 90-95\%$) haydovchi(drivetrain) va generatoridagi elektr yo'qotishlarni tashkil qiladi. Masalan, 100 m² rotorli ($A \approx 7850$ m²) 12 m/s shamolda turbina $P_{shamol} \approx 7,0$ MVtga ega. $C_p=0,45$ va 90% generator samaradorligi bilan $P_{out} \approx 2,8$ MVt. Ishlab chiqaruvchilar ma'lum bir shamol tezligida (masalan, 12-15 m/s) "nominal quvvat" kabi qiymatlarni keltiradilar.

Shamol turbinasi quvvat egri chizig'i bilan tavsiflanadi (chiqish va shamol tezligi). Asosiy nuqtalar qatoriga kirish (ishlab chiqarishni boshlash uchun past tezlik, $\sim 3-4$ m/s), **nominal** (yuqori chiqish tezligi) va o'chirish(cut-out) (yuqori tezlikda o'chirish, ~ 25 m/s) kiradi. Kesish(Cut-in) va nominal(rated) o'rtasida quvvat (P) v^3 bilan taxminan ko'tariladi. Butun yil davomida o'rtacha ishlab chiqarish (imkoniyat koeffitsienti) mahalliy shamol taqsimotiga bog'liq; tipik

quruqlikdagi CF 25-40%, dengizda ~ 40-50% [3] [10] . (Kontekst uchun quyosh PV quvvati omillari ancha past bo'ladi - 2024 yilda ~ 17% [10] - chunki quyosh mavjudligi o'zgaruvchan va faqat kunduzi hisoblanadi.)

Turi bo'yicha xarakterli samaradorlik va qiymatlar: - Savonius VAWT: $C_p \approx 0,15-0,20$ [7] .O'z-o'zidan ishga tushirish; xarajat va ishonchlilik samaradorlikdan ko'ra muhimroq bo'lgan kichik quvvat (masalan, hisoblagichlar, buylar) uchun ishlatiladi [5] . - Darrieus VAWT: $TSR \approx 4$ [8] da $C_p \approx 0,35-0,40$ (yaqin ko'tarilish chegarasi) . O'z-o'zidan boshlanmaydi; asosan eksperimental yoki niche foydalanish. - 3 Parrakli HAWT: $C_p \approx 0,40-0,50$ (cho'qqi) [3] , odatiy zamonaviy yordamchi mashinalar. - 2 Parrakli HAWT: biroz pastroq C_p (~ 0,35–0,45) va ko'proq shovqin/muvozanat, lekin arzonroq narx. - Offshore HAWT: shunga o'xshash C_p , lekin barqaror shamollar tufayli yuqori CF (~ 50%) [10] .

Kuchlanish-tok xususiyatlari: Quyosh panellaridan farqli o'laroq, shamol turbinalari sinxron yoki induksion generatorlar orqali o'zgaruvchan tok elektr energiyasini ishlab chiqaradi. Turbinaning elektr quvvati o'rnatilgan I-V egri chizig'i emas, balki quvvat elektronikasi tomonidan boshqariladi. Buning o'rniga, *quvvat egri chizig'i* yoki shamol tezligi va quvvat munosabatlaridan foydalaniladi (40-rasm). (Agar kichik turbina DC generatorini boshqarsa, qattiq Parrak sozlamalarida I-V egri chizig'ini chizish mumkin, ammo bu kommunal tizimlarda kam uchraydi.)



40-Rasm. Shamol tezligi egri chizig'iga nisbatan odatdagi quvvat chiqishi.

Turbinaga misollar va taqqoslashlar

2-jadvalda shamol turbinasining turli texnologiyalari ko'rsatilgan. Masalan, bugungi kunda quruqlikdagi kommunal turbinalar ko'pincha ~100 m rotorli 2–4 MVt quvvatga ega, dengizdagi (offshore) turbinalari esa ~200+ m rotorli [2][3] bilan 10 MVt dan oshadi. DOE ma'lumotlariga ko'ra , 2023 yilda o'rtacha yangi AQSh turbinesi 3,4 MVt quvvatga ega bo'lib, rotor diametri 133,8 m [2] - bu 20 yoshli

mashinaning rotor maydonidan taxminan 4,4 baravar ko'p. Kattaroq rotorlar sezilarli darajada ko'proq shamolni (quvvat $\propto$ maydoni) ushlaydi, bu esa o'sishga turtki bo'ldi: 2023 yilda AQShning yangi turbinalarining 98% rotorlarining diametri ≥ 115 m bo'lgan [2].

2-jadval. Shamol turbinasining turli texnologiyalari

Turi	Nominal quvvat	Rotor diametri	Odatda quvvat koeffitsienti (C_p)	Eslatmalar
Quruqlikdagi HAWT (3 Parrakli)	$\sim 2000 \text{ kVt}$ (2 MVt)	$\sim 100 \text{ m}$	$\sim 0,45$	Standart zamonaviy dizayn. Mashina misoli: 3 qanotli gorizontaal eksa shamol turbinasi. Imkoniyatlar koeffitsienti (CF) $\sim 30\text{-}35\%$. Qishloq yoki qishloq xo'jaligi saytlarida qo'llaniladi. Past tezlik nisbati aerodinamik samaradorlikni pasaytiradi ($\sim 0,3\text{-}0,4$).
Kichik HAWT	$\sim 10\text{-}20 \text{ kVt}$	$\sim 5\text{-}10 \text{ m}$	$\sim 0,35$	Katta offshor mashinalari, juda yuqori rentabellik. Qulay saytlarda sig'im omili $\sim 45\text{-}60\%$.
Offshore HAWT	$\sim 12\,000 \text{ kVt}$ (12 MVt)	$\sim 220 \text{ m}$	$\sim 0,50$	Vertikal eksa Savonius turi. Oddiy va arzon, ammo past aerodinamik samaradorlik. Mart ilovalarida vertikal o'q Darrieus turi. Savoniusga qaraganda yuqori samaradorlik, lekin keng miqyosda kamroq tarqalgan.
VAWT (Savonius)	$\sim 1\text{-}10 \text{ kVt}$	$\sim 2 \text{ m}$	$\sim 0,15\text{-}0,20$	
VAWT (Darrieus)	$\sim 50\text{-}500 \text{ kVt}$	$\sim 20 \text{ m}$	$\sim 0,40$	

Nominal quvvat : Bu turbinaning dizayndagi shamol yoki ish sharoitida nominal chiqishi.

Rotor diametri : Parraklarning supurilgan maydonining diametri (HAWT uchun) yoki ekvivalent supurish yo'li (VAWT uchun). Kattaroq diametr, odatda, ko'proq shamol maydoni va potentsial ko'proq quvvatni anglatadi.

Odatda C_p : quvvat koeffitsienti, turbina rotori chiqaradigan mavjud shamol energiyasining ulushi sifatida aniqlanadi. Nazariy maksimal (Albert Betz/Betz chegarasi) taxminan 0,593 ni tashkil qiladi. Haqiqiy mashinalarda aerodinamik, mexanik va boshqaruv yo'qotishlari tufayli odatdagi qiymatlar past bo'ladi.

Eslatmalar : Kontekstni ta'minlaydi: turi umumiy, qanday shamol joyi sharoitlari qo'llaniladi va har qanday tipik quvvat omili yoki maxsus fikrlar.

Ushbu solishtirilgan turbine texnologiyalari shuni ko'rsatadiki, kattaroq turbinalar (dengizda) yanada optimallashtirilgan Parraklar tufayli yuqori quvvatga va ko'pincha yuqori C_p ga ega. Barcha holatlarda, reduktor / generator ($\sim 5-10\%$) va elektr tizimlaridagi yo'qotishlar tufayli haqiqiy quvvati biroz kamroq bo'ladi.

Shamol va quyosh: samaradorlik va narx

Shamol va quyosh qayta tiklanadigan energiya tizimlarida raqobatlashadi va bir-birini to'ldiradi. Energiyani olish nuqtai nazaridan, shamol turbinalari (quruqda) shamol energiyasining $\sim 50\%$ ni elektr energiyasiga aylantiradi[8], quyosh PV panellari esa quyosh nurining $\sim 15-22\%$ ni aylantiradi (tijorat kristalli kremniy panellari uchun). Biroq, bu foizlarni to'g'ridan-to'g'ri solishtirish mumkin emas, chunki turli xil manbalar mavjud. Ko'proq mos keladigan ko'rsatkich **sig'im omilidir** : shamol turbinalari odatda ko'plab mintaqalarda quyosh PV ga qaraganda yuqori quvvat omillariga ega. Masalan, 2024-yilda quruqlikdagi shamol uchun global tortish quvvati koeffitsienti $\sim 34\%$ ni tashkil etgan va 2024-yilda kommunal quyosh PV uchun $\sim 17\%$ edi [10], bu shamol tez-tez kechayu kunduz esayotganini, quyosh esa faqat kunduzi ishlab chiqarishini aks ettiradi.

Xarajat va ishlash nuqtai nazaridan , quruqlikdagi shamol odatda yangi elektr energiyasining eng arzon manbalaridan biridir. Qayta tiklanadigan energiya manbalari xalqaro agentligi (2024 yil ma'lumotlari) ma'lumotlariga ko'ra, elektr energiyasining global o'rtacha tenglashtirilgan narxi (LCOE) quruqlikdagi shamol uchun taxminan \$ **0,034/kVt/soatni** va foydali quyosh energiyasi uchun **0,043 dollar/kVt/soatni tashkil qilgan**[10]. Offshore shamol turbinasi ishlab chiqaradigan elektr energiyasini tan narxi qimmatroq ($\sim \$0,079/\text{kVt/soat}$), lekin mazkur narxi yaxshilanmoqda. Shunday qilib, shamol va quyosh ko'p bozorlarda ko'pincha ananaviy yoqilg'i ishlab chiqarishdan ko'ra arzonroqdir.

Asosiy omillarni solishtirish:

- **Energiya rentabelligi:** Shamol turbinalari (ayniqsa, dengizda) shamol paytida doimiy ravishda katta miqdorda energiya yetkazib berishi mumkin; quyosh faqat kunduzgi yorug'likda ishlab chiqaradi. Ularning avlod profillari ko'pincha bir-birini to'ldiradi.

- **Yerdan foydalanish:** ikkalasi ham maydon talab qiladi; shamol fermalari maydon talab qiladi (turbinalar $\sim 5-10$ rotor diametrlari oralig'ida), lekin yer ko'pincha qishloq xo'jaligi uchun ishlatilishi mumkin. Quyosh fermalari doimiy joy yoki tomlarni talab qiladi.

- **Atrof-muhitga ta'siri:** ikkalasi ham kam emissiyaga ega; shamol turbinalari jim (shovqinligi $\sim 35-45$ dB 350 m [3]) va ba'zi qushlar/ko'rshapalaklar to'qnashuvi xavfini tug'diradi. Yaroqlilik muddati tugaganda shamol (ayniqsa Parraklar) turbinalari va quyosh panellari qayta ishlash uchun doimiy muammo hisoblanadi.

Nihoyat, ilg'or quyosh texnologiyalariga e'tibor bering: **geterojunction (HJT) kremniyli elementlar** — fotovoltai (PV) innovatsiyalar orasida yetakchi o'rin egallaydi va laboratoriyada $\sim 26-27\%$ atrofida rekord samaradorlikka erishgan. HJT quyosh energiya texnologiyasiga tegishli bo'lsa-da, u quyosh elementining energiya

aylanish samaradorligini qanday yuqoriga o'sayotganini namoyish etadi — bu esa shamol energiyasini yig'ish bilan bog'liq fundamental samaradorlik bo'shligini biroz toraytirgan. Amaliyotda esa shamol va quyosh energiyalari o'rtasida tanlov qurilma joylashuvi (shamolli yoki quyoshli maydon), tarmoq ehtiyojlari va iqtisodiy sharoitlarga bog'liq.

Foydalanilgan adabiyotlar:

- Mishnaevsky Jr., L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). *Materials for Wind Turbine Blades: An Overview*. *Materials* (Basel), 10(11), 1285.[1]
- U.S. Department of Energy, EERE. (2024). *Wind Turbines: The Bigger, the Better*. (Accessed 2024).[2]
- REN21. (2025). *Renewables Global Status Report 2025*. Paris: REN21 Secretariat. (See Wind Power Trends)[4].
- Betz, A. (1920). *Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren*. *Zeitschrift für Windenergie*, 13, 307–309. (See English summary, Wikipedia *Betz's law*)[6].
- Savonius, S. (1926). *Rotor adapted to be driven by wind or flowing water* (U.S. Patent 1,697,574). (Vertical-axis Savonius turbine design).[7]
- Trepka, J. (2016). *Wind Energy*. Kirkwood Community College (Open Textbook). (See Chapter on HAWT vs VAWT)[5].
- Center for Sustainable Systems (CSS), Univ. of Michigan. (2024). *Wind Energy Factsheet*. Ann Arbor, MI. (Latest data on U.S. wind capacity, CF, etc.)[3].
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025). *Renewable Power Generation Costs in 2024 – Executive Summary*. Abu Dhabi: IRENA. (Cost and CF data)[10].
- T.M. Asif, P. K.Yadav, IJESRT 4 (8), 326-332 (2015)
- T. Chuamvarasart, C. Chantharasenawong, S. Wongkittirat, ACEM14, 10 (2014)
- T. Nitin, N.D. Mittal, A. Siraj, IJAER 1, 500-507 (2010)
- V. M. Kumar, B. N. Rao, Sk. Farooq, IJAER 11 (6), 4491-4499 (2016)
- I. Curtu, I.Teşulă, M.D. Stanciu, P. Piscoi, A. Savin, Pro Ligno 11, 157-164 (2015)

[1] Materials for Wind Turbine Blades: An Overview - PMC

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5706232/>

[2] Wind Turbines: the Bigger, the Better | Department of Energy

<https://www.energy.gov/eere/articles/wind-turbines-bigger-better>

[3] Wind Energy Factsheet | Center for Sustainable Systems

<https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/wind-energy-factsheet>

[4] GSR 2025 | Wind Power

<https://www.ren21.net/gsr-2025/technologies/wind-power/>

[5] HAWT vs. VAWT – Wind Energy

<https://kirkwood.pressbooks.pub/windenergy/chapter/chapter-3-hawt-vs-vawt/>

[6] Betz's law - Wikipedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law

[7] Savonius wind turbine - Wikipedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Savonius_wind_turbine

[8] Comparison of the efficiency of various wind turbines – horizontal/vertical axis – Smart Servo Home

<https://smartservo.org/wind-turbine-efficiency-comp-en/>

[9] Darrieus wind turbine - Wikipedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine

[10] Renewable power generation costs in 2024 - Executive summary

<https://www.irena.org/->

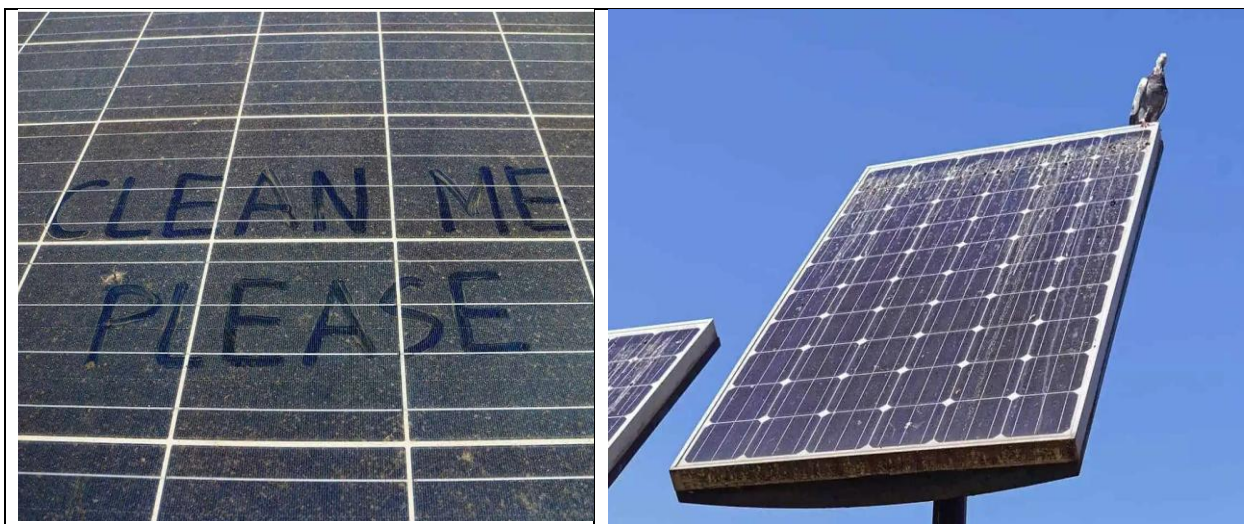
[/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_Summary_2025.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_Summary_2025.pdf)

[18] https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/history-wind-energy?utm_source=chatgpt.com

10. PV TIZIMLARIDA QUYOSH PANELLARIGA TEXNIK XIZMAT KO'RSATISH VA MONITORING

10.1. Quyosh panellarini tozalash

Quyosh panellarini tozalash muhim texnik faoliyat bo'lib quyosh panellarining ifloslanish tufayli samaradorlikni yo'qotishlarini kamaytirish qaratilgan. Kirlanish deganda, tushayotgan quyosh nurlarini to'sib qo'yadigan yoki tarqatadigan va shu bilan elektr energiyasiga o'tish uchun mavjud yorug'likni kamaytiradigan fotovoltaik (PV) modullar yuzasida chang, loy, qush axlati va boshqa qoldiqlarning to'planishi tushuniladi [1]. Hatto kichik miqdordagi chang ham ko'rinishni kamaytiradigan notoza avtomobil old oynasiga o'xshash o'lchovli ta'sirga ega bo'lishi mumkin [1]. Tuproqning quyosh panellari samaradorligiga ta'siri atrof-muhit sharoitlariga qarab keng miqyosda bo'lishi mumkin: odatda yillik energiya yo'qotishlari taxminan 5% ni tashkil qiladi, ammo ko'plab ish faoliyatini baholashda yo'qotishlar yomg'irli iqlim sharoitida 2% dan qurg'oqchil, changli hududlarda 20-25% yoki undan ko'pni tashkil qilishi mumkin [1]. Haddan tashqari holatlarda (masalan, tez-tez chang bo'ronlari bo'lgan cho'l muhitlarda) ifloslanish energiya ishlab chiqarishni keskin qisqartirishi mumkin - tadqiqotlar cho'l hududlarida energiya olishning 20-50% ga kamayganini va hatto og'ir hodisalar paytida samaradorlikning ~80% gacha pasayishini isbotlashgan.. Shubhasiz, panelni ifloslanishiga qarshi chorlar ko'rilmasa vaqt o'tishi bilan Quyosh panellari tizimining ish faoliyati jiddiy ravishda buzilishi mumkin.



1-Rasm. Quyosh paneling changli va no toza holati. Manba: Aurora Solar

Nazariy ma'lumot: ifloslanish va samaradorlikni yo'qotish

Quyosh nuri quyosh batareyasiga tushganda, panel oynasidagi har qanday shaffof bo'lmagan material yorug'likni susaytiradi. Optik nuqtai nazardan, chang va loy

fotovoltaik elementlarga yetib boradigan quyosh nurlanishini kamaytiradigan filtrlovchi qatlam hosil qiladi [1]. Effekti shisha qoplangan qismi yoki panel yuzasiga o'tirgan chang tufayli tushayotgan yorug'likning bloklangan qismiga taxminan proporsionaldir, garchi ifloslanish bir xil bo'lmasa, u chiziqli bo'lishi mumkin. Masalan, to'liq teng taqsimlangan yupqa chang plyonkasi butun panel bo'ylab yorug'likni ma'lum foizga kamaytirishi mumkin, bu esa to'g'ridan-to'g'ri ishlab chiqarishni xuddi shunday foizga qisqartirish degani. Boshqa tomondan, ifloslanish joylashib olgan shaffof bo'lmagan nuqta (masalan, qushlarning axlati) bir elementdagi oqimni blokirovka qilish va potentsial ravishda aylanib o'tish diodlarini faollashtirish orqali chiqishga nomutanosib ravishda ta'sir qilishi mumkin, bu esa butun elementlar qatorining hissasini kamaytirishi mumkin [1]. Qanday bo'lmasin, ifloslanish yo'qolgan energiyaga aylanadi.

Fotovoltaik tizimlarda ifloslanish omili $S(t)$.

Quyosh paneli yuzasidagi chang va loy tushayotgan quyosh nurini bloklaydi. Tuproq omili $S(t)$ fotovoltaik elementlarga o'z vaqtida etib kelgan yorug'lik ulushi t sifatida aniqlanadi. Boshqacha qilib aytadigan bo'lsak, $S = 1$ panel butunlay toza bo'lganda (yorug'lik yo'qolmasa) va $0 < S < 1$ ba'zi quyosh nurlari ifloslanish (chang, gulchang va boshqalar) bilan to'sqinlik qilganda. Misol uchun, agar og'ir chang qatlami yorug'likning 10% ni to'sib qo'ysa, u holda $S \approx 0.90$. PV ishlash modellarida, $S(t)$ hodisa nurlanishini yoki element oqimini oddiygina o'lchash orqali ishlatiladi $S(t)$. Shunday qilib, elementlardagi samarali nurlanish $S(t) \cdot I_{\text{yorug'liknini tushushi}}$ va panelning quvvat chiqishi $S(t)$ toza bo'lsa, taxminan ikki baravar ko'pdir.

$S(t)$ ning vaqt o'tishi bilan o'zgarishi

Tuproq(ifloslanish) omili $S(t)$ chang to'planishi tufayli vaqt o'tishi bilan kamayadi. Odatda $S(t)$ tozalash yoki yomg'irdan keyin darhol 1 (yoki 1 ga yaqin) da boshlanadi va keyin quruq, changli davrlarda asta-sekin tushadi. Bu xarakterli *arra tish* profilini yaratadi: quruq afsun paytida ifloslanish to'planadi va $S(t)$ tushadi (ko'pincha vaqt o'tishi bilan taxminan chiziqli), so'ngra yomg'ir yoki tozalash hodisasi 1 $S(t)$ [33] ga yaqin "qayta tiklanadi". Amalda ko'pgina modellar tozalash oralig'ida doimiy ifloslanish tezligini nazarda tutadi. Masalan:

$$S(t) = 1 - \alpha t \text{ ma'lum bir nisbat uchun } \alpha$$

lekin ba'zilar eksponensial parchalanishdan foydalanadi [33]. Masalan

$$S(t) = e^{-kt}$$

Asosiy nuqta shundaki, $S(t)$ odatda bosqichma-bosqich kamayadi (tozalashlar orasida silliq, keyin tozalaganda sakrab turadi).

Panelning chiqishiga ta'siri

PV panelining oqimi (va shuning uchun quvvat) uning elementlariga tushadigan yorug'lik bilan taxminan proporsional bo'lgani uchun, pastroq $S(t)$ to'g'ridan-to'g'ri

pastroq quvvatni anglatadi. Aslida ifloslanish *nisbati* ko'pincha quyidagicha aniqlanadi

$$SR(t) = \frac{E_{\text{soiled}}}{E_{\text{clean}}} = S(t),$$

Bu yerda E energiya yoki nurlanish. Shunday qilib, agar $SR = 0.90$, panel mukammal toza panel energiyasining 90% ni ishlab chiqaradi (10% yo'qotish). Ekvivalenti, **ifloslanishning** yo'qolishi $1 - S(t)$. Misol uchun, 0,95 ifloslanish koeffitsienti mavjud yorug'likning 5% yo'qolishiga (tuproq yo'qolishiga) to'g'ri keladi va ko'pincha $S(t)$ buni hisobga olish uchun barcha ishlash hisob-kitoblarini oddiygina ko'paytiradi. PV vattlarda yoki Sandia's PV ommaviy modeli kabi tijorat modellarida panel tekisligi nurlanishini ifloslanish omiliga (SF) ko'paytiriladi, shunda chiqish to'g'ridan-to'g'ri shkalasi bilan o'zgaradi $S(t)$. Qoida tariqasida, hatto bir necha foizga tushish ham S yillik energiya hosildorligini sezilarli darajada kamaytirishi mumkin. Misol uchun, NREL ma'lumotlari 0,95-0,98 atrofida insolatsiyaga asoslangan ifloslanish nisbati bo'lgan ko'plab saytlarni ko'rsatadi, bu esa ifloslanish uchun taxminan 2-5% o'rtacha yillik energiya yo'qotilishini nazarda tutadi [36]. Muxtasar qilib aytganda, bloklangan yorug'likning har qanday qismi darhol chiqish yo'qotilishining bir xil qismiga aylanadi.

Modellashtirish tenglamalari

Tahlilchilar ba'zan oddiy tenglamalar yozadilar $S(t)$. Asosiy model α changning doimiy cho'kish tezligini qabul qilishi mumkin, bu $S(t) = 1 - \alpha t$ tozalashlar o'rtasida (chiziqli pasayish) yoki $S(t) = e^{-kt}$ (eksponensial). Fizikaga asoslangan yanada murakkab modellar S paneldagi to'plangan chang massasi ω bilan bog'liq. Masalan, HSU (Gumboldt shtati) ifloslanish modeli empirik formuladan foydalanadi:

$$S = 1 - 0.3437 \operatorname{erf}(0.17\omega^{0.8473})$$

Bu yerda ω yuzaga to'g'ri keladigan chang massasi va erf - xatolik funktsiyasi [35]. Ushbu formulada ω o'sib borishi bilan S tekis tushadi va ω qiymati tozalash orqali nolga teng bo'lsa, $S = 1$ ga qaytadi. Aniq formuladan qat'i nazar, har qanday PV modelidagi $S(t)$ roli bir xil: ifloslanish natijasida yo'qolgan yorug'lik qismini hisoblash uchun tushayotgan yorug'likka (yoki modul oqimini) ko'paytiriladi.

Tozalashdan so'ng darhol $S(t) = 1$ (100% yorug'lik o'tkazuvchanligi); chang to'planishi bilan $S(t)$ kamayadi. Empirik tadqiqotlar o'ta toza muhitda kuniga 0,01% gacha bo'lgan ifloslanishning to'planish tezligini o'ta changli sharoitda kuniga 0,5% gacha o'lchadi [1]. Bu shuni anglatadiki, har kuni tozalashsiz panel ishlab chiqarilgan mahsulotning bir foizini yo'qotishi mumkin, ammo haftalar va oylar davomida bu yo'qotishlar kuchayadi. Taxminan chiziqli to'plashni nazarda tutadigan bo'lsak, soddalashtirilgan model $S(t) = 1 - \alpha t$ bo'lishi mumkin (t kun va kichik α uchun), lekin haqiqatda yotqizish chiziqli bo'lmagan va ob-havoga bog'liq bo'lishi mumkin. Qanday bo'lmasin, ifloslanish tufayli **buzilish darajasi** o'ziga xosdir. Misol uchun, bitta ma'lumot to'plami AQShning turli joylarida kuniga 0,03-0,15%

atrofida ifloslanish darajasini aniqladi, ammo Yaqin Sharq cho'lida kuniga taxminan 0,5% ni tashkil qiladi [1].

Changlanish va quvvat chiqishi o'rtasidagi munosabatlarga ob-havo hodisalari ham ta'sir qiladi. Yomg'ir tabiiy tozalash mexanizmi sifatida ishlashi mumkin. Qisqa muddatli kuchli yomg'ir bo'shashgan changning katta qismini yuvib, $S(t)$ ni qisman tiklashi mumkin. Doimiy yomg'ir yog'adigan hududlar (masalan, tropik yoki mo'tadil iqlim) ko'pincha past o'rtacha ifloslanish yo'qotishlarini ko'rsatadi (ehtimol yiliga $\sim 2\%$), chunki tabiat davriy tozalashni ta'minlaydi [1]. Aksincha, uzoq vaqt quruq mavsum va chang yuqori bo'lgan hududlarda (masalan, Yaqin Sharq, Shimoliy Afrikaning qismlari va boshqalar) panellar bir necha oy davomida tozalanmasa, doimiy to'planish va yuqori yo'qotishlarni ko'rishi mumkin [1]. Yomg'irning o'zgaruvchanligi mavsumiy naqshlarni keltirib chiqaradi: masalan, Janubiy Kaliforniya PV tizimlari quruq yozda yuqori ifloslanish yo'qotishlarini ko'rsatdi, qishki yomg'irdan keyin tushadi [1]. Xulosa qilib aytganda, ifloslanishning nazariy ta'siri PV modulining qopqoq oynasining o'tkazuvchanligini pasaytirish va shu bilan elementlardagi nurlanish yutulishini va natijada paydo bo'ladigan oqimni pasaytiradi. U *parazit yutuvchi va aks ettirishga qarshi* qatlam hosil qiladi. Ushbu qatlamni tozalash orqali olib tashlash panellarni optimal yorug'lik kiritishiga yaqinroq tiklaydi.

Tozalash chastotasi, shartlari va unumdorligining pasayishi

Kir asta-sekin to'planganligi sababli, tozalash chastotasi texnik xizmat ko'rsatishni rejalashtirishda asosiy e'tibor hisoblanadi. Maqsad katta yo'qotishlarni oldini olish uchun tez-tez tozalash orqali energiya rentabelligini (va daromadni) maksimal darajada oshirishdir, lekin tozalash uchun texnik ishlar tez-tez olib borilishi kerak emas. Chunki texnik xizmat ko'rsatish xarajatlari quyosh panellari ishlashidan tushadigan daromadlardan qimmatga tushishi. Agar biz ΔE bilan tozalashlar orasidagi ifloslanish tufayli yo'qolgan energiyani va C tozalash hodisasining narxini (yoki harakatini) belgilasak, optimallashtirilgan jadval bu omillarni muvozanatlashtiradi. Optimal tozalash oralig'ining nazariy modellari ko'pincha ifloslanish to'planishini vaqt o'tishi bilan taxminan chiziqli deb hisoblaydi va keyin tozalashdan keyin qayta tiklanadi. Milliy qayta tiklanadigan energiya laboratoriyasi (NREL) tomonidan tavsiflangan oddiy modellardan biri ifloslanishning barqaror o'sishini nazarda tutadi va masalan, yillik yo'qotish 1,9% ni (agar hech qachon tozalanmagan bo'lsa) yig'adigan tizim yo'qotishni yiliga bir marta tozalash bilan $\sim 1,5\%$, yiliga ikki marta tozalash bilan $\sim 1,3\%$ va yiliga 3 marta tozalash bilan $\sim 1,2\%$ gacha cheklashi mumkinligini aniqladi. Daromadning pasayishi aniq - ma'lum bir nuqtadan tashqari, qo'shimcha tozalash o'rtacha ifloslanish darajasida faqat sezilarli bo'lmagan yaxshilanishga olib keladi.

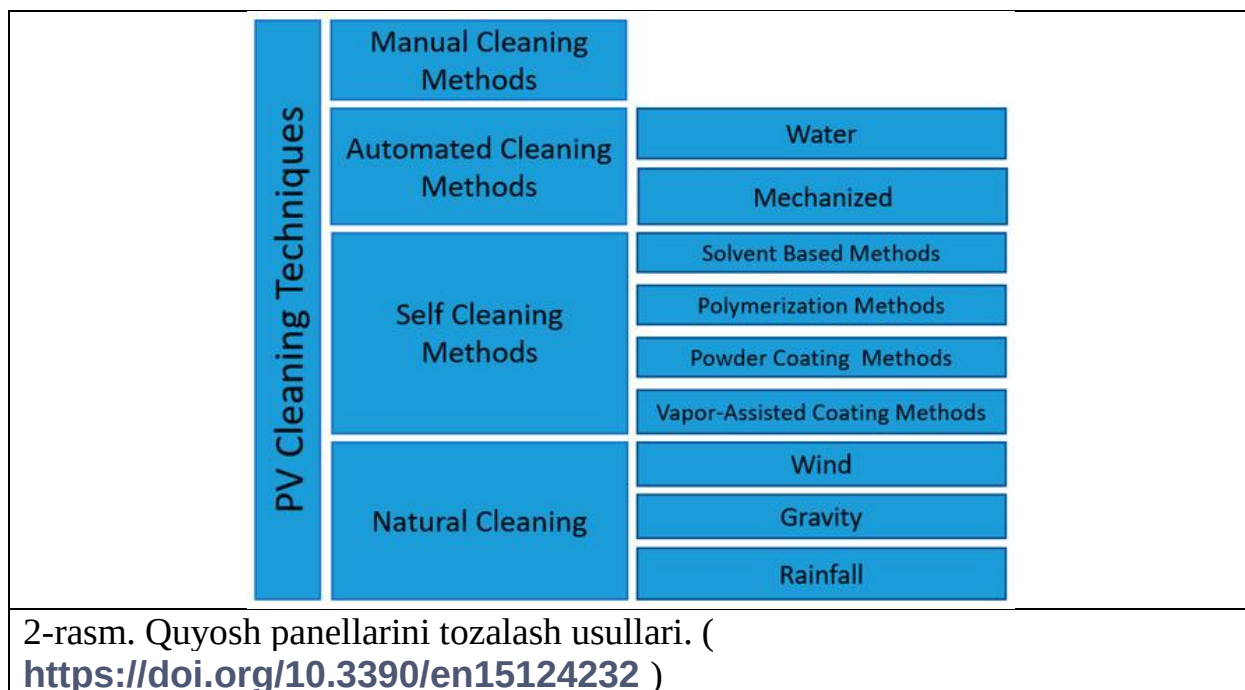
Empirik jihatdan optimal tozalash chastotasi chang va yomg'ir kabi mahalliy sharoitlarga bog'liq. Ba'zi muhitlarda *oylik* tozalash maqbul bo'lishi mumkin, boshqalarda esa *har chorakda* yoki hatto *yiliga ikki marta* tozalash kifoya qiladi. Yaqin sharq (Falastin) iqlimi bo'yicha o'tkazilgan tadqiqot mavsum bo'yicha turli xil optimal tozalash davrlarini aniqladi - masalan, quruq yoz oylarida har oyda tozalash kafolatlangan, nam oylarda esa ikki oylik jadval yetarli edi [1]. Odatda, quruq

mavsumda va chang yuqori bo'lgan cho'l yoki qishloq xo'jaligi hududlarida tez-tez tozalash talab etiladi, yomg'irli yoki toza muhitda panellar uzoqroq davom etishi mumkin. Ko'pgina PV operatorlari hech bo'lmaganda yillik tozalashni (ko'pincha gulchanglar mavsumidan keyin yoki changli yozdan keyin yoki yuqori insolyatsiya mavsumi oldidan) asosiy reja sifatida belgilaydilar. Changli joylarda yuqori qiymatli yoki kommunal miqyosdagi qurilmalar, agar iqtisod imkon bersa, har oy yoki hatto haftada bir marta tozalanishi mumkin.

Tozalashni amalga oshirish uchun maqbul sharoitlar ham muhimdir. Panellarni erta tongda, tushdan keyin yoki bulutli kunlarda tozalash tavsiya etiladi - asosan quyosh kam bo'lganda yoki yo'q bo'lgan payt [1]. Buning bir necha sabablari bor: (1) panellar o'sha paytlarda sovuqroq bo'ladi, shuning uchun salqin suvdan termal zarba minimallashtiriladi; (2) kuchli peshin quyoshi suvni tezda bug'lashi va cho'kindi yoki chiziqlar qoldirishi mumkin; va (3) juda issiq bo'lmaganda ishchi xavfsizligi va qulayligi yaxshilanadi. Panellar salqin bo'lganda tozalash haroratning keskin o'zgarishi tufayli oynaning yorilishining oldini olishga yordam beradi (issiq panelga suv quyish shisha sirtining tez qisqarishiga olib kelishi mumkin). Bundan tashqari, elektr xavfsizligi uchun tozalash vaqtida panellar ideal holda quvvatsizlantirilishi (tizim o'chirilgan) bo'lishi kerak [1].

Tozalashsiz ish unumdorligining pasayishi muvozanatga erishilgunga qadar davom etadi (masalan, og'ir chang oxir-oqibat to'yingan bo'lishi mumkin, shunda shamol to'planganidek, ba'zilarini tez uchirib ketadi). Ammo amalda uzoq vaqt davomida ishlash sezilarli darajada pasayadi. E'tiborsizlik holatlari bo'yicha real dunyo ma'lumotlari keskin pasayishlarni ko'rsatadi: bir manbaning qayd etishicha, tozalashsiz ikki oydan keyin samaradorlik yo'qotishlari $\sim 6,5\%$ ga yetadi va agar ko'p oylarga qoldirilsa, kuchli ifloslangan/changli muhitda 20% dan ortiq yo'qotiladi [4]. Shunday qilib, tozalash nafaqat kosmetik vazifa, balki yo'qolgan samaradorlikni tiklash uchun juda muhimdir. Tozalashdan so'ng darhol panellar ko'pincha ifloslanishni yo'qotish foizini olib tashlashga mos keladigan quvvat chiqishining o'sishini ko'rsatadi.

2-rasmda PV panellari uchun ishlatiladigan asosiy tozalash usullari ko'rsatilgan, robotli tozalash esa avtomatlashtirilgan usul yoki mustaqil asosiy usul deb hisoblanishi mumkin.



Yomg'irni tozalash vositasi sifatida: Tabiiy yog'ingarchilik panellarni qisman tozalashi mumkin. Yengil yomg'ir faqat loyni qayta taqsimlashi mumkin (yoki undan ham yomoni, loy chiziqlarini hosil qiladi), ammo kuchli yomg'ir ko'pchilik bo'shashgan zarralarni yuvishi mumkin. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, yillik yog'ingarchilik tuproqdagi yo'qotishlarning bir qismini yumshata oladi - masalan, Yevropa tahlillaridan biri vaqti-vaqti bilan yomg'irni tozalash panellari bilan bog'liq bo'lgan energiya ishlab chiqarishda yillik 2-10% o'sishini aniqladi [1]. Biroq, kamdan-kam yog'adigan hududlarda faqat yomg'irga tayanish xavflidir. Xulosa qilib aytganda, sayt operatorlari panellari qanchalik tez ifloslanishini baholashlari va shunga mos ravishda tozalashni rejalashtirishlari kerak. Ba'zilar tozalash qachon iqtisodiy jihatdan asosli ekanligini aniqlash uchun sensorlar yoki ma'lumotlar tendentsiyalaridan foydalanadilar - masalan, ifloslangan mos yozuvlar elementsini toza bilan solishtirish.

Inson resurslaridan foydalanib qo'lda tozalash usullari

Qo'lda tozalash eng oddiy usuldir: inson ishchilari panel yuzalarini jismonan tozalashadi, odatda oddiy asbob-uskunalarini yordamida. Kichik o'rnatishlar uchun (turar-joy tomlari, kichik tijorat panellari) qo'lda tozalash keng tarqalgan va tejamkor hisoblanadi [1]. Asosiy qo'lda tozalash jarayoni *yumshoq* materiallar va yumshoq texnikani o'z ichiga oladi: masalan, oynani artib olish uchun yumshoq mato, shimgich yoki suv bilan cho'tkadan foydalaniladi. Qattiq jism asbob-uskunalaridan (metall qirg'ichlar, po'lat jun, qattiq jism skrab yostiqlari) saqlanish juda muhim, chunki ular shishani yoki uning aks ettirishga qarshi qoplamasini tirnashi mumkin. Chizishlar nafaqat shaffoflikni pasaytiradi, balki oynada stress konsentratorlarini ham yaratishi mumkin. Ishlab chiqaruvchilar va o'rnatuvchilar ko'pincha faqat qattiq

jism bo'lmagan asboblardan foydalanishni tavsiya qiladilar - masalan, mikrofiber matolar, yumshoq cho'tkalar yoki tozalagichlar-va *yumshoq* tozalash eritmalari [1].

Qo'lda tozalash uchun odatiy tozalash eritmasi oddiy toza suv yoki yumshoq detarjenli suvdur. Qattiq kimyoviy moddalar bo'lmasa, hatto ho'jalikda oyna yuvish vositalaridan ham foydalanish mumkin. Misol tarkibi suvdagi yumshoq sovun va sirka aralashmasidir [1], ular kirni eritishga yordam beradi, lekin qoplamalarga nisbatan yumshoq. Suv sifati muhim ahamiyatga ega: *deionizatsiyalangan* yoki distillangan suvga afzallik beriladi, chunki qattiq suv (minerallarga boy) quriganida mineral konlarni (suv dog'lari yoki shkalasi) qoldirishi mumkin [1]. Bu qoldiqlarning o'zi vaqt o'tishi bilan o'tkazuvchanlikni kamaytirishi yoki hatto kimyoviy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Agar suv kranidan olinga suv ishlatilsa, ko'pincha qoldiqlarni olib tashlash uchun panellarni silkitib quritgan ma'qul.

Ishqalanish chang zarralarini oynaga tegizmasligi uchun qo'lda tozalashda, odatda, birinchi navbatda, bo'shashgan changni (ba'zan quruq ro'molcha yoki puflagich yordamida) *yuvib yoki tozalaydi*. Qattiq loy (masalan, qushlarning axlati yoki shirasi) suv bilan yumshatib, keyin plastik pichoq yoki mato bilan muloyimlik bilan qirib tashlashi mumkin. Bosimli suvdan foydalanish mumkin, lekin ehtiyotkorlik bilan - yuqori bosimli elektr yuvish vositalari odatda tavsiya etilmaydi, chunki ular suvni panel muhrlariga majburlashi yoki mikro yoriqlarga olib kelishi mumkin; foydalanilsa, bosim cheklanishi kerak (masalan, bitta ishlab chiqaruvchi <70–100 Pascal/in² taklif qiladi) [1]. Tozalashdan keyin har qanday sovun qoldiqlarini yaxshilab chayish kerak, chunki quritilgan sovun chiziqlari ish faoliyatini pasaytirishi mumkin.

Qo'lda tozalash xavflaridan biri o'qitilmagan xodimlar tomonidan yuzaga kelishi mumkin bo'lgan zarardir. Panellar ustida yurish (tom panellari uchun) xavfli va elementlarni yorib yuborishi mumkin; zinapoyalardan foydalanish yoki panellarga yetib borish xavfsizlik uchun xavf tug'diradi. Bundan tashqari, noto'g'ri texnika (masalan, issiq panelni sovuq suv bilan tozalash) modulga zarar etkazishi mumkin. Shunday qilib, qo'lda tozalash oddiy va kam investitsiya talab qilsa -da , uni ehtiyotkorlik bilan bajarish kerak. Quyosh fermalari ko'pincha texnik xodimlarni o'qitadi yoki professional tozalash xizmatlarini yollaydi. Uy tizimlari uchun egalar panellarni yiliga bir necha marta bog'shlangi yordamida panellarga suv sepib va yumshoq cho'tka bilan foydalanib tozalashlari mumkin (agar mavjud bo'lsa) yoki tomga kirish qiyin bo'lsa, mutaxassislarni yollashlari mumkin. Modul ishlab chiqaruvchilari [1] ta'kidlaganidek, uy-joy tizmi uchun panellarni qo'lda tozalash chastotasi quruq iqlim sharoitida yiliga bir yoki ikki marta tez-tez bo'ladi.

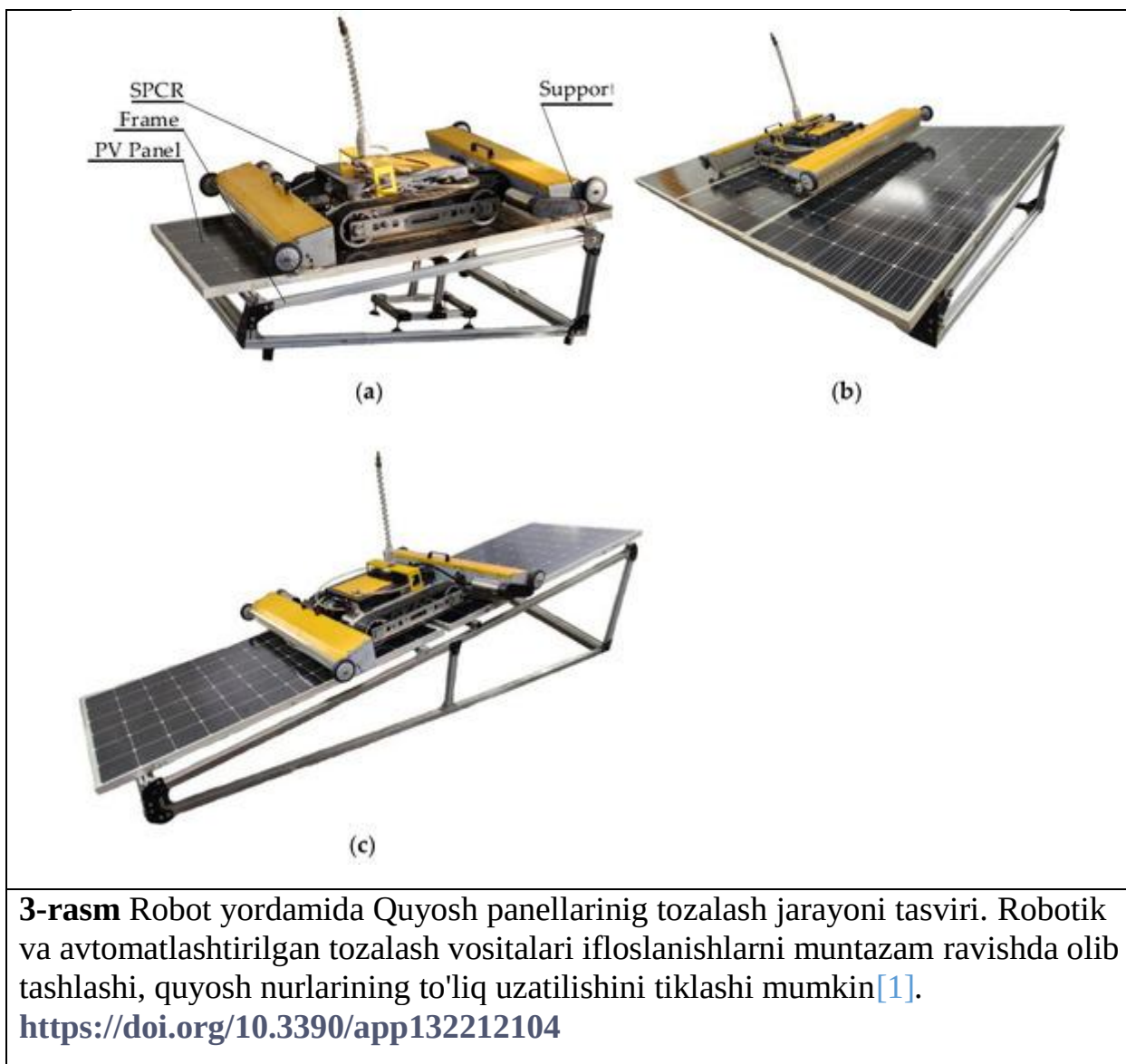
Xulosa qilib aytadigan bo'lsak, qo'lda tozalash, ayniqsa kichikroq PV tizimlari uchun foydali usul bo'lib qolmoqda. U moslashuvchanlikni taklif qiladi (faqat kerak bo'lganda tozalaydi) va minimal jihozlarni talab qiladi. Biroq, minglab panellari bo'lgan yirik kommunal miqyosdagi quyosh fermalari uchun har bir panelni shlang va cho'tka bilan qo'lda yuvish ko'p mehnat talab qiladi va qimmatga tushadi. Bu yerda avtomatlashtirilgan usullar jozibador bo'ladi.

Avtomashtirilgan va ilg'or tozalash usullari

Katta fotovoltaiq qurilmalar uchun ko'p sonli modullarni kamroq inson mehnati bilan samarali tozalash uchun **avtomashtirilgan tozalash usullari** ishlab chiqilgan. Bularga robot tozalagichlar, statsionar sprinkler tizimlari va hatto *o'zini o'zi tozalaydigan* sirt texnologiyalari kiradi. Har bir usul nazariy afzalliklari va amaliy jihatlariga ega:

- **Robotik tozalash tizimlari:** Bu avtonom yoki yarim avtonom robotlar bo'lib, ular sirtini tozalash uchun quyosh panellari bo'ylab harakatlanadi. Robotik tozalagichlar *suvga asoslangan* (suv purkash va cho'tka bilan tozalash) yoki *suvsiz* (quruq cho'tka yoki mikrofiber roliklar yordamida) bo'lishi mumkin. Suvsiz robotli tozalash, ayniqsa, suv tanqis bo'lgan qurg'oqchil hududlarda qadrlanadi; changni tozalash uchun yumshoq cho'tkalar yoki havo puflagichga tayanadi [1]. Robotlar panel qatorlari bo'ylab harakatlanish uchun mo'ljallangan bo'lishi mumkin (ba'zan relsga o'rnatiladi yoki yopishish va harakatlanish uchun panel ramkalaridan foydalanish). Ishlab chiqarishni to'xtatmaslik va panellar salqin bo'lganda ishlash uchun ular odatda tunda yoki erta tongda ishlaydi. Katta afzalligi - bu katta hajimli ishni bajarishidir: robotlar to'plami insonning minimal aralashuvi bilan o'n minglab panellardan iborat butun quyosh fermasini muntazam ravishda tozalashi mumkin. Tadqiqotlar shuni ta'kidlaydiki, robot tozalash hozirda keng ko'lamlı quyosh O&M uchun eng ko'p talab qilinadigan texnologiyalardan biridir [1] . Suvga asoslangan robotlar to'liq tozalashni ta'minlaydi (sirdagi loy yoki qush axlati uchun kerak), lekin suv sarfiga olib keladi; suvsiz robotlar suvni tejaydi va tozalash xarajatlarini kamaytiradi [2] . Amalda, kompaniyalar qo'lda yuvish o'rniga robot tozalagichlardan foydalangan holda suvni sezilarli darajada tejash (75% kamroq suv tartibida) haqida xabar berishdi [1] .

Robotik tizimlar odatda aylanadigan cho'tkalar yoki artgichlar yordamida har bir panel qatori bo'ylab harakatlanadi. Ba'ziları batareyalar bilan quvvatlanadi (elektr stantsiyasi orqali qayta zaryadlanadi, ehtimol o'zi quyosh energiyasi bilan ishlaydi) va relslar yoki mashinani ko'rish orqali boshqariladi. Nazariy *optimallashtirish* shundan iboratki, robotlar o'rnatishdan keyin minimal qo'shimcha xarajat bilan juda yuqori ish faoliyatini saqlab qolish uchun tez-tez (hatto har kuni) tozalashlari mumkin. Shu bilan birga, robotlarning kapital xarajatlarini va ularga texnik xizmat ko'rsatishni (motorlar, cho'tkalarni almashtirish va boshqalar), shuningdek, panellarni tirmalmasligini hisobga olish kerak. Ko'pchilik yumshoq cho'tkalardan foydalanadi, ammo vaqt o'tishi bilan hatto nozik cho'tkalar ham asta-sekin qoplamalarni shilishga olib kelishi mumkin - shuning uchun robot ishlab chiqaruvchilari shishaga nisbatan qattiqlikni minimallashtiradigan cho'tkalarni sinab ko'rishadi va ishlab chiqishadi. **3-rasmda** PV modullaridan changni muloyimlik bilan tozalashda ishlaydigan robot tozalash moslamasining misoli ko'rsatilgan.



- Avtomatlashtirilgan suv purkagichlari:** Bu yondashuv quyosh panelini sepish tizimi bilan yuvilishi mumkin bo'lgan katta avtomobil old oynasi kabi ko'rib chiqiladi. panellar bo'ylab (ko'pincha har bir panel yoki qatorning yuqori qismida) suv purkagich manbachalari o'rnatiladi. Dasturlashtirilgan jadval bo'yicha (yoki loyni aniqlaydigan sensorlar tomonidan ishga tushiriladi) tizim panellar ustiga purkash uchun suvni yetkazib beradi va changlarni yuvish uchun samarali "sun'iy yomg'ir" yaratadi [2]. Sepishni tozalash kechasi yoki erta tongda rejalashtirilishi mumkin. Afzalligi - soddaligi va bir xil qamrovi: har bir panel qo'l mehnatisiz suv oladi. Ushbu tizimlar boshidanoq panelga o'rnatilishi mumkin. Biroq, suv sifati muammo bo'lishi mumkin - agar demineralizatsiyalangan suv ishlatilmasa, purkagichlar qattiq suv dog'larini qoldirishi mumkin. Bundan tashqari, suvdan foydalanish iqtisodiy-ijtimoiy ahamiyat kasb etadi; cho'l quyosh fermalarida, suv muammo bo'lgan hududlarda qimmatbaho suv resurslaridan foydalanish xarajat va ekologik nuqtai nazardan to'g'ri kelmaydi. Ba'zi ilg'or texnologiyalar suvni qayta

ishlaydi yoki tozalash maqsadida to'plangan yomg'ir suvidan foydalanadi. Sepishlar panelni to'liq tozalamaydi, shuning uchun juda yopishgan loy faqat suv bilan to'liq olib tashlanishi mumkin emas (ba'zi tizimlar suvga yumshoq yuvish vositasi qo'shadi). Purkagich quvurlariga texnik xizmat ko'rsatish (tiqilib qolgan turbalar, oqishlarning oldini olish) zarur hisoblanadi. Shunga qaramay, kichik va o'rta qurilmalar uchun (aytaylik, 100 kVt quvvatli uyingizda), ayniqsa changli kunlardan keyin yoki haftada bir marta panellarni yuvadigan avtomatlashtirilgan purkagich juda samarali bo'lishi mumkin [2].

- **O'z-o'zini tozalash qoplamalari:** Bular *panel yuzasini* ifloslanishga chidamli qilish uchun texnologik modifikatsiyalardir. Masalan, gidrofobik (suv o'tkazmaydigan) yoki gidrofil (suvni tortuvchi) nanoqoplamalar changni kuchli yopishmasligi yoki yomg'ir bilan osongina yuvilishi uchun shishaga qo'llanilishi mumkin (hidrofobik holatda suv dumalab, kirni olib tashlaydigan tomchilar hosil qiladi; gidrofilida suv nam qatlamni hosil qiladi). Boshqa yondashuvlar changni silkitadigan yoki elektr bilan qaytara oladigan elektrostatik yoki piezoelektrik mexanizmlarni o'z ichiga oladi. Nazariy jihatdan, agar panellar haqiqatan ham o'z-o'zini tozalashi mumkin bo'lsa, bu qo'lda harakat(tashqi aralashuvni) qilishni yo'q qiladi. Biroq, amalda bu yechimlar cheklovlariga ega: qoplamalar UV va ob-havo ta'sirida yomonlashishi mumkin, qayta qo'llash kerak; ular faqat chang to'planishini kamaytirishi mumkin, yo'q qilmaydi. Bundan tashqari, haddan tashqari hidrofobik qoplama yomg'ir kelguncha quruq chang to'planishidan zarra ko'rishi mumkin. Ba'zi tijorat panellari "o'z-o'zini tozalash oynasi" ni reklama qiladi, bu asosan ifloslanishga qarshi qoplamadir, ammo maydon natijalari farq qiladi. MDPI tadqiqoti shuni ta'kidladiki, bunday qoplamalar (Nanofilm va boshqalar) tozalashga bo'lgan ehtiyojni kamaytirishi mumkin, ammo past ishonchlilik yoki qisqa umr(ishlash jarayoni)ga ega bo'lishi mumkin [2]. Shunga qaramay, bu sohada tadqiqotlar davom etmoqda va bunday qoplamalar davriy tozalash bilan birgalikda qo'shimcha strategiya bo'lishi mumkin.

Shuni ta'kidlash kerakki, tabiiy o'z-o'zini tozalashning keng tarqalgan vositalaridan biri bu **egilish burchagi**. Tikroq burchakka o'rnatilgan panellar (masalan, 30-40° gradus egilish) tekis panellarga qaraganda kamroq chang to'playdi va gravitatsiya biroz kirlarni olib tashlashga yordam beradi. Yomg'ir ham egilgan panellarni tozalashda samarali hisoblanadi. Yassi yoki past burchakli panellar (katta tekis tomli yoki kuzatuvchi tizimlarda keng tarqalgan) ko'proq ifloslanishni to'playdi va odatda tez-tez tozalash yoki yaxshi o'z-o'zini tozalash qoplamalarini talab qiladi.

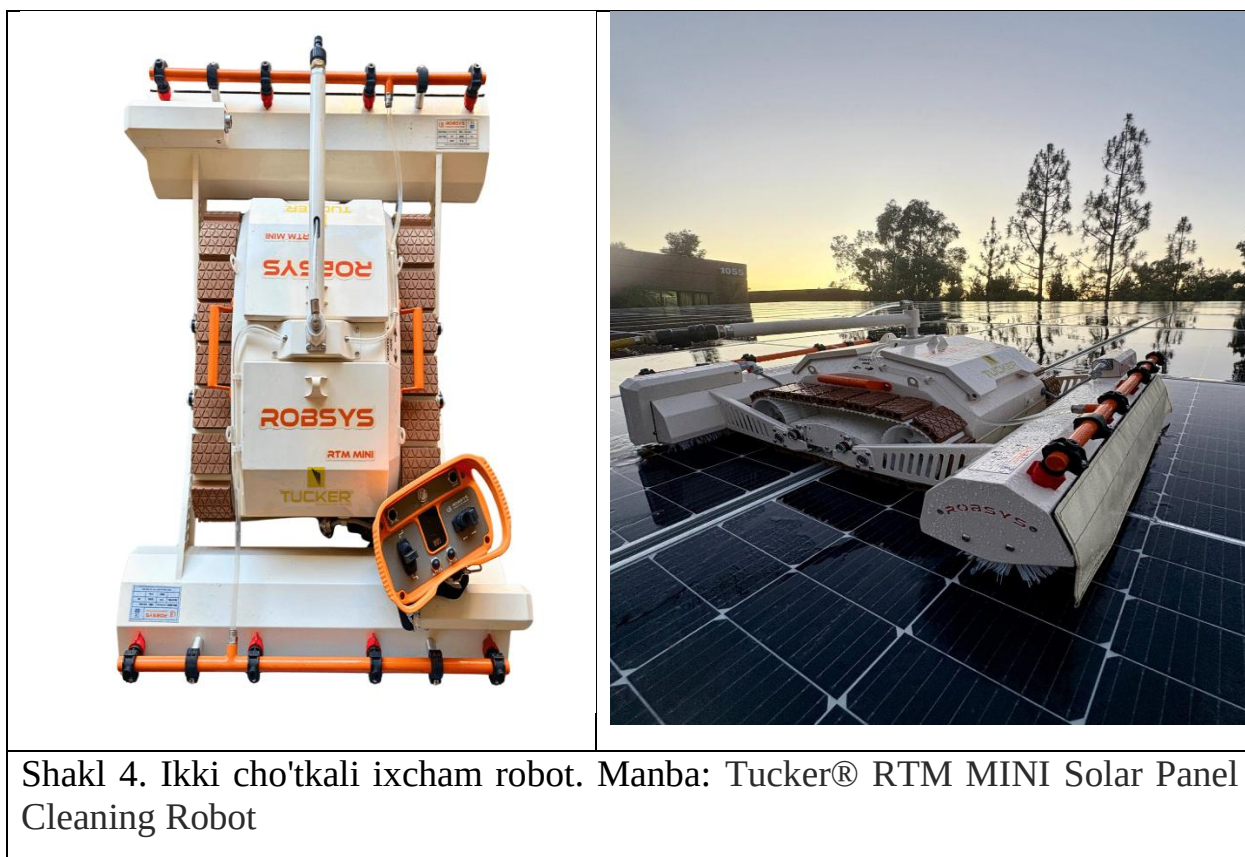
Tozalash texnologiyalari va asboblari

Yuqoridagi usullarni amalga oshirish uchun turli xil **tozalash texnologiyalari** qo'llaniladi:

- **Cho'tkalar va yuvish mashinalari:** An'anaviy qo'l cho'tkalari va yuk mashinalariga o'rnatilgan cho'tkalar ko'plab quyosh fermalarida qo'llaniladi. Masalan, cho'tkasi cho'zilishi mumkin bo'lgan traktorga o'xshash transport vositalari quyosh panellari qatorlari bo'ylab harakatlanishi, ko'cha supurgi yoki avtomobil yuvish cho'tkasi kabilardan foydalangan holda panellarni tozalash va yuvishi mumkin. Ular yerga o'rnatilgan katta panellarni operatorlar brigadasi bilan

birgalikda nisbatan tez tozalab olishi mumkin. Cho'tkalar odatda tirnalishni oldini olish uchun yumshoq neylon yoki shunga o'xshash materialdan tayyorlanadi. Moylash va kirni tozalash uchun cho'tkalar oldindan suv yoki tozalash eritmasi surtuladi(sepish orqali). Tirnalish xavfi yumshoq cho'tkalar va zararlarni olib tashlash uchun doimiy suv oqimi bilan nazorat qilinadi. Bunday tizimlar yordamida bir kunda bir necha MVt panellarni tozalashi mumkin . Ular qatorlar orasidagi tekis kirishni va panellarni noto'g'ri joylashtirish yoki shikastlamaslik uchun ehtiyotkorlik bilan ishlashni talab qiladi.

- **Robotik tozalagichlar:** Yuqorida aytib o'tilganidek, maxsus robotlar mavjud. Misol uchun, ba'zi robotlar qatorning yuqori chetida joylashib, spin mikrofiber roliklarga ega bo'lib, ular panel bo'ylab pastga harakat qilganda panelni tozalaydi, keyin keyingi qatordagi panelga o'tadi. Boshqa dizaynlarga temir yo'l orqali boshqariladigan robotlar yoki hatto dronga o'xshash sudraluvchilar kiradi. **E'tiborga molik misol** - ba'zi yirik quyosh parklarida ishlatiladigan suvsiz robot tozalagichlar, ular kechasi changni tozalaydi va tozalovchi suv sarfini keskin kamaytiradi [5] . Ushbu robotlar ko'pincha markaziy boshqaruv tizimi tomonidan boshqariladigan guruhlarda ishlaydi va qatordan qatorga o'tish orqali butun quyosh maydonini tozalashi mumkin. Ba'zilar hatto quyosh energiyasi bilan ishlaydilar va kun davomida quvvatlanadilar. 4-rasmda PV panellarini tozalash uchun mo'ljallangan ixcham ikki cho'tkali robotning fotosurati ko'rsatilgan; bunday robotlar kuniga sezilarli panel maydonini qamrab olishi mumkin (bitta mahsulot har kuni bitta birlik tomonidan tozalangan 1 MVtgacha panellarni talab qiladi) [6] .



Shakl 4. Ikki cho'tkali ixcham robot. Manba: Tucker® RTM MINI Solar Panel Cleaning Robot

- **Suv oqimlari va purkagichlar:** Ruxsat etilgan purkagich tizimlariga nafaqat yuqoridagi purkagichlar, balki panellarning pastki qismini yuvadigan *panel ostidagi* purkagichlar ham kiradi (odatda ishlash uchun kerak emas, lekin ikki yuzli panellarda ikkala tomon ham muhimdir). Vaqti-vaqti bilan kirni tozalash uchun yuqori bosimli turbalar o'rnatilishi mumkin, ammo tekis qoplamani ta'minlash uchun ehtiyotkorlik bilan dizayn kerak. Ba'zi tizimlar panel bo'ylab yuqori bosimli purkagichni harakatga keltiradigan robot qo'llardan foydalanadi.
- **Dronlar:** Yangi paydo bo'lgan kontseptsiya yuqoridan panellarni tozalash uchun purkagich yoki cho'tkalar bilan jihozlangan dron samolyotlaridan foydalanishdir. Dronlar erishish qiyin bo'lgan qurilmalarga (masalan, baland tomlar yoki ayvonlardagi quyosh panellari) yetib borishi mumkin. Biroq, foydali yuk (suv idishi) cheklovlari va barqarorligi kabi jihatlar drondan foydalanishni qiyinlashtiradi va bu hali keng tarqalmagan.

Qanday texnologiya bo'lishidan qat'iy nazar, suv ishlatilsa, suv sifatini nazorat qilish juda muhimdir. Ko'pgina yirik korxonalar tozalash tizimlarini ta'minlash uchun suvni tozalash (teskari osmos yoki deionizatsiya qurilmalari) ni ishlatadilar. Bu *mineral dog'lar* muammosini oldini oladi, agar jiddiy bo'lsa, quyosh nurini to'sishda chang kabi yomon bo'lishi mumkin. Bundan tashqari, ishlatiladigan har qanday tozalash vositalari panelga zarar bermasligini tekshirish kerak. Qattiq kimyoviy moddalar (kuchli gidroksidi yoki kislotalar) shishani yirtib tashlashi yoki ramkalar va muhrlarni korroziyaga olib kelishi mumkin, qattiq jisimli tozalash vositalari esa aks ettirishga qarshi qoplamani olib tashlashi mumkin. Shunday qilib, ishlab chiqaruvchilar ko'pincha qabul qilinadigan tozalash suyuqliklarini (odatda ketmaydigan dog'lar uchun faqat suv va ehtimol izopropil spirti) belgilaydilar [3] .

Tozalash robotlari va qurilmalari panellarni shikast yetkazlamaslik uchun mo'ljallangan bo'lishi kerak. Misol uchun, juda og'ir robot oynaga yoki o'rnatishga bosim o'tkazishi mumkin. Ko'pgina robotlar o'z vaznini taqsimlaydi va nisbatan yengildir (ba'zilar biriktirilishi uchun assimilyatsiya yoki magnit muftadan foydalanadilar). Xavfsizlik blokirovkalari ham mavjud - masalan, robotlar panellarda bo'lganida harakatni kuzatishni o'chirib qo'yish, robot tozalash paytida kuzatuvchining harakatlanishiga yo'l qo'ymaslik (agar kuzatuvchilarda ishlatilsa).

Avtomatlashtirish nuqtai nazaridan tozalashni zavodning ish jadvali bilan birlashtirish muhim ahamiyatga ega. Ko'pgina avtomatlashtirilgan tizimlar har qanday elektr xavfini oldini olish va ishlab chiqarishga xalaqit bermaslik uchun tunda ishlaydi. Bundan tashqari, tungi tozalash panellarning sovuqroq ekanligini anglatadi va ko'pincha shudring kirni yumshatgan (tozalashni osonlashtiradi) bo'ladi.

Tozalash xavfi: tirnalish, suv va shikastlanish

Tozalash zarur bo'lsa-da, to'g'ri bajarilmasa, quyosh modullari uchun potentsial xavflarni ham keltirib chiqaradi:

- **tirnalish va chizilish:** Doimiy tozalash, ayniqsa noto'g'ri asboblardan bilan tozalash shisha sirtini asta-sekin eskirishi mumkin. Zamonaviy quyosh panellari ko'pincha yorug'lik o'tkazuvchanligini yaxshilash uchun oynada aks ettirishga qarshi

(Anti Reflector) qoplamaga ega. Ushbu qoplama nisbatan nozik va qo'pol aloqa bilan tirlangan yoki eroziyalangan bo'lishi mumkin. Tirnovchi cho'tkalar yoki tozalovchi prokladkalardan foydalanish yillar davomida to'planib, shishaning xiralashishiga olib keladigan mikro tirlalishlarni yaratishi mumkin. Hatto changning o'zi ham qattiq jism bo'lishi mumkin (kichik qum zarralarini) - changli panelni quritish *shishani* silliqqlash kabidir. Shuning uchun tozalash vaqtida avval yumshagan kirlarni yuvish va moylash vositasi sifatida ko'p miqdorda suv ishlatish tavsiya etiladi. Tirnamaydigan tozalash asboblari va yumshoq bosim tozalash qoidasi hisoblanadi [3]. Qo'llanma sifatida panellarda metall buyumlar yoki qattiq jism kukunlardan foydalanmaydi. Avtomatlashtirilgan cho'tkalar har kuni ishlatilsa, ularning cho'tkalari yuzlab tsikllardan keyin ham tirlalmasligi uchun yetarlicha yumshoq bo'lishi kerak.

- **Suv bilan bog'liq muammolar:** Suvdan foydalanish mineral konlar (muhoqama qilinganidek, tozalangan suvdan ideal foydalanish) va suvning potentsial kirishi bilan bog'liq muammolarni keltirib chiqaradi. Quyosh panellari ob-havoga chidamli bo'lishi uchun mo'ljallangan, ammo yuqori bosimli suv oqimlari suvni tirqishlrga yoki kabeldagi mikro bo'shliqlarga yuborishi mumkin. Vaqt o'tishi bilan bu namlikning kirib kelishiga, korroziya yoki elektr nosozliklarga olib kelishi mumkin. Shuning uchun bosimli yuvish yumshoq bo'lishi kerak. Bundan tashqari, panellarda qolib ketgan suv (ko'lmaklar) changni o'ziga tortadi yoki mazkur ko'lmakchalar elementlarda termal stressni keltirib chiqaradigan paneln ustida muzlashga olib kelishi mumkin (garchi bular kichik muammolar bo'lsa ham). Tozalashdan keyin panellar qoldiqsiz nisbatan tez qurisa yaxshi bo'ladi. **Suv harorati** ham muammo keltirib chiqaradi: issiq panelga juda sovuq suv quyish shishani tezda sovutib, elementlar issiq bo'lib, shisha yorilishi mumkin (termal zarba). Shunday qilib, atrof-muhit haroratidagi suvdan foydalaniladi yoki tozalash uchun kunning salqin vaqti tanlaniladi [12].

- **Kimyoviy zarar:** Agar noto'g'ri tozalash eritmaları ishlatilsa (masalan, ammiak asosidagi yuqori konsentratsiyali shisha tozalagichlar yoki erituvchilar), ular panel materiallari bilan reaksiyaga kirishishi mumkin. Ammiak ba'zan aks ettirishga qarshi qoplamalar yoki orqa qatlam materiallariga zarar etkazishi mumkin. Xuddi shunday, kuchli gidroksidi shishani o'yib yuborishi mumkin. Odatda yumshoq sovuqli eritmalar yoki ishlab chiqaruvchi tomonidan tasdiqlangan tozalagichlardan foydalanish tavsiya etiladi [3]. Hatto sirka (zaif sirka kislotasi) kabi zararsiz ko'rinadigan moddalar ham uzoq muddatli ta'sirni oldini olish uchun faqat yuqori darajada suyultirilgan shaklda qo'llaniladi.

- **Strukturaviy va elektr shikastlanishi:** panellardagi jismoniy bosim xavfli. Panelga suyanish yoki qadam qo'yish elementlardagi mikro yoriqlarga olib kelishi mumkin, bu esa ishlashni doimiy ravishda kamaytiradi. Shuning uchun, tozalagichlar panellarga og'irlik qilmasligi kerak. Uzoq cho'zilgan ustunlar kabi asboblarda modullarga chiqmasdan yerdan yoki yo'lakdan tozalash imkonini beradi [3]. Bunga qo'shimcha ravishda, elektr xavfi mavjud - garchi panellar odatda oynaga tegishi xavfsiz bo'lsa-da, yorilib ketgan panel yoki ochiq sim suv qo'llanilsa, zarba xavfi tug'dirishi mumkin. Yuvish paytida har qanday kuchlanishni bartaraf etish uchun PV tizimini *o'chirish* (yoki hech bo'lmaganda tozalanayotgan qismni

izolyatsiya qilish) eng yaxshi amaliyotdir [3]. Uydagi tizimlari uchun bu panellar oqim o'tkazmasligi uchun inverterni o'chirish va, ehtimol, shaharni o'chirishdan foydalanishni anglatadi. Ishchilar odatda izolyatsiyalangan qo'lqop kiyishadi va katta iplarni tozalashda ehtiyot chorasi sifatida izolyatsiyalangan asboblardan foydalanadilar.

- **Kafolatga ta'siri:** Ko'pgina quyosh panellari kafolatlari tozalash shartlarini belgilaydi. Masalan, bosimli yuvish yoki qattiq jisimli tozalash vositasidan foydalanish, agar panelga zarar yetkazsa, kafolatni bekor qilishi mumkin. Ba'zi kafolatlar aniq metall asboblari va qattiq kimyoviy moddalar oldini olish uchun belgilanadi [7]. Shunday qilib, tavsiya etilgan tozalash usullariga rioya qilish nafaqat panellar uchun yaxshi, balki ishlab chiqaruvchining qoplamasini saqlab qolish uchun ham zarurdir. Tavsiya etilganidan tashqari tez-tez tozalash, agar yumshoq bajarilsa, yaxshi bo'ladi, lekin agar panellarni har kuni qattiq jism birikma bilan jilolasangiz, bu ularning ishlash muddatini qisqartiradi.

- **Robotlarni tozalash xavfi:** Robotlar inson xatolarini kamaytirsada, ular o'zlarining xavf-xatarlariga ega. Agar cho'tka motori ishlamay qolsa, noto'g'ri ishlaydigan robot tiqilib qolishi yoki panellarni tirnashi mumkin. Robotlarning sirg'alib chiqib ketishi va zarar yetkazishi holatlari bo'lgan. Shu sababli, bunday tizimlar qatordan tushib ketmaslik uchun chekkalarni aniqlash va panel qirralarining parchalanishini oldini olish uchun yumshoq bampelerlar kabilarni ishlatish xavfsizlik xususiyatlariga ega. Robotlarning cho'tkalari toza bo'lishini ta'minlash uchun ularga muntazam texnik xizmat ko'rsatish kerak (yog'li yoki iflos cho'tka panellarni surtishi yoki qoldiqlarni qoldirib, issiq nuqtalarni keltirib chiqarishi mumkin).

Xatarlarni kamaytirish uchun ko'plab operatorlar **eng yaxshi amaliyotlarni qo'llaydilar**: avval kichik qismni tozalashni sinab ko'rish, tavsiya etilgan tozalash to'plamlaridan foydalanish (ba'zi modul ishlab chiqaruvchilari tozalash to'plamlari va cho'tka bilan ta'minlaydi yoki tasdiqlaydi), xodimlarni yumshoq texnikaga o'rgatish va tozalashni oqilona rejalashtirishga o'rgatiladi. To'g'ri bajarilganda, tozalash panellarga zarar bermasdan, asosan, barcha ifloslanish yo'qotishlarini tiklashi mumkin. Samaradorlikning o'sishi - juda iflos panellar uchun ishlab chiqarishning o'nlab foizigacha - uni quyosh PV-ga texnik xizmat ko'rsatishning juda qimmatli qismiga aylantiradi [1]. Tozalash foydasiga misol sifatida NREL bir yillik tozalashdan uch yillik tozalashga o'tish o'rtacha ifloslanish yo'qotilishini yiliga ~ 1,9% dan ~ 1,2% gacha kamaytirishi mumkinligini aytdi - bu samaradorlikning sezilarli yaxshilanishi, bu katta zavod uchun kata harajatlarni tejash imkonini beradi.

Toza quyosh panellari = yuqori samaradorlik ekanligi aniq. Zavod operatorlari tozalash xarajatlarini (mehnat, suv, asbob-uskunalar) qayta olingan energiya bilan solishtirishlari kerak. Ko'pgina hollarda, odatiy tozalash rejasi va favqulodda hodisalardan (masalan, chang bo'roni yoki yong'in kulining tushishi) keyin vaqti-vaqti bilan qo'shimcha tozalash optimal hisoblanadi. Robot tozalagichlar va ifloslanishga qarshi qoplamalar kabi texnologik yutuqlar bilan sanoat quyosh nurlarining har bir nurini olish uchun panellarning iloji boricha toza bo'lishini ta'minlashga harakat qilmoqda.

10.2. Quyosh panellari uchun SCADA va IT xizmatlari

Zamonaviy quyosh panellari optimal ishlashi va muammolarga tezkor javob berish uchun IT va SCADA texnologiyalaridan foydalanadigan **monitoring va nazorat tizimlari** bilan jihozlangan . Quyosh kontekstidagi **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) tizimlari operatorlarga** quyosh stansiyasining ishlashini masofadan turib kuzatish, samaradorlik ma'lumotlarini to'plash va qayd qilish, hattoki markaziy interfeysdan uskunalarni (inverterlar, trekerlar, o'chirgichlar va boshqalar) boshqarish imkonini beruvchi apparat va dasturiy infratuzilmani nazarda tutadi [8] . Aslida, SCADA operatorning "ko'zlari va qo'llari" ni PV maydonchasida jismoniy mavjud bo'lmasdan ta'minlaydi. Ushbu bo'limda SCADA arxitekturasini, AT komponentlari va PV monitoringi uchun ishlatiladigan platformalar (jumladan, Sunny Portal, Solar-Log, PVsyst , SMA, SolisCloud kabi misollar) hamda ushbu tizimlarda kiberxavfsizlik va ma'lumotlar yaxlitligi kabi masalalar qamrab olingan.

PV monitoringi uchun SCADA ga umumiy nuqtai nazar

Quyosh PV zavodi uchun SCADA tizimi sayt bo'ylab tarqalgan ko'plab sensorlar va qurilmalarni birlashtiradi va ularning ma'lumotlarini markaziy tizimga yuboradi, u erda ularni vizualizatsiya qilish va biror bir harakat qilish mumkin. Asosiysi, SCADA quyidagilarni o'z ichiga oladi: (1) dala qurilmalaridan ma'lumotlarni yig'ish, (2) bu ma'lumotlarni markaziy stantsiyaga etkazish va (3) inson-mashina interfeysi (HMI) yoki inson operatorlari holatini ko'rib chiqish va buyruqlar yuborish uchun dasturiy platforma [8] . Quyosh zavodida tegishli dala qurilmalari quyosh inverterlari (ular doimiy tokni panellardan ACga aylantiradi va ko'pincha kuchlanish, tok va boshqalar uchun o'rnatilgan datchiklarga ega), ob-havo stantsiyalari (nurlanish, harorat, shamol tezligini o'lchaydi), kombayn qutisi monitorlari, kuzatuvchi kontrollerlari (agar u quyosh kuzatuvchisi bo'lsa), hisoblagichlar (o'lchash moslamalari, o'zgaruvchan tokni o'chirish moslamalari), o'lchash moslamalari va o'chirish moslamalari). Ushbu qurilmalarning har biri ma'lumot ishlab chiqaradi - masalan, inverter o'zining o'zgaruvchan tok chiqishi, doimiy kuchlanish, ichki harorat va boshqalar haqida bir necha soniyalarda xabar berishi mumkin.

PV SCADA ning maqsadi ko'p qirrali [8] :

- **Ishlash monitoringi:** Zavod real vaqtda va jami ravishda qancha energiya ishlab chiqarayotganini kuzatib boradi va uni kutilgan qiymatlar bilan solishtiradi. Bu tizimning optimal ishlashini ta'minlashga yordam beradi. Agar ishlab chiqarish kutilmaganda pasaysa (masalan, simning uzilishi yoki kuchli bulut qoplami tufayli), tizim buni ko'rsatib beradi.
- **Xatolarni aniqlash:** Agar biron bir uskuna ishlamay qolsa yoki oflayn bo'lsa, darhol operatorlarni ogohlantiradi [8] . Misol uchun, agar bitta inverter ishlamay qolsa yoki kuzatuvchi tiqilib qolsa, SCADA signalni ishga keltiradi. SCADA bo'lmasa, nosozlik bir necha kun davomida sezilmay qolishi va energiya yo'qotilishiga olib kelishi mumkin. SCADA, texniklar bilan darhol xabardor qilinadi.

- **Masofadan boshqarish:** SCADA, agar tarmoq operatori ko'rsatmasi bo'lsa, o'chirilgan inverterni qayta o'rnatish, belgilangan nuqtalarni sozlash yoki hatto chiqishni qisqartirish kabi masofaviy operatsiyalarni amalga oshirishga imkon beradi. "Boshqarish nazorati" bu operator SCADA HMI dan dala qurilmalariga buyruqlar yuborishi mumkinligini anglatadi (ushbu qurilmalar ruxsat bergan chegaralar doirasida). Bu quyosh fermalarga oddiy vazifani bajarish uchun tashriflarni oldini oladi .
- **Ma'lumotlarni ro'yxatga olish va tahlil qilish:** SCADA doimiy ravishda ma'lumotlar nuqtalarini qayd qiladi (ko'pincha ishlash ko'rsatkichlari uchun 5-daqiqa yoki 15-daqiqa va hatto ma'lum himoya hodisalari uchun soniyadan past). Ushbu tarixiy ma'lumotlar tendentsiyalarni aniqlash uchun tahlil qilinishi mumkin (masalan, ish faoliyatini bosqichma-bosqich pasaytirish yoki takroriy nosozliklar) [8] . Tahlil shuni ko'rsatishi mumkinki, masalan, har kuni tushga yaqin inverter haddan tashqari qizib ketadi va quvvatni pasaytiradi - bu sovutish tizimini tuzatishni talab qiladi.
- **Avtomatlashtirish va optimallashtirish:** Ba'zi hollarda SCADA shartlarga avtomatik ravishda javob berish uchun dasturlashtirilishi mumkin. Misol uchun, agar birlashtiruvchi joriy nomutanosiblikni aniqlasa (ehtimol, sim o'chirilgan bo'lsa), tizim uni texnik xizmat ko'rsatish uchun avtomatik ravishda belgilashi mumkin. Murakkab sozlamalarda SCADA quvvat oqimini optimallashtirish uchun boshqaruv algoritmlari bilan integratsiyalashishi mumkin, masalan, shartlarga ko'ra batareyani saqlash yoki inverterlardan reaktiv quvvatni boshqarish.
- **Ko'p saytli boshqaruv:** Bir nechta quyosh zavodlariga ega bo'lgan kommunal xizmat yoki texnik va texnik kompaniya o'zining barcha SCADA tizimlarini markazlashtirilgan platformaga bog'lashi mumkin, bu bitta boshqaruv paneliga butun PV qurilmalarini nazorat qilish imkonini beradi.

Kichik tizimlar (turar-joy yoki kichik tijorat) uchun "SCADA" ko'pincha inverter ishlab chiqaruvchisi tomonidan taqdim etilgan bulutga asoslangan monitoring portali bo'lib, to'liq sanoat SCADA emas, lekin u xuddi shunday monitoring rolini bajaradi. Katta kommunal miqyosdagi quyosh fermalari uchun an'anaviy elektr stansiyalardagiga o'xshash, yuqori ishonchlilik, real vaqt rejimida nazorat qilish va tarmoqni boshqarish markazlari bilan integratsiyalashgan holda yanada murakkab SCADA sozlamalari amalga oshiriladi.

Xulosa qilib aytganda, quyosh energiyasidagi SCADA tizimi zavodning **ko'rinishi va boshqarilishini ta'minlaydi** . Barcha komponentlarga uzluksiz ko'z bilan qarash orqali operatorlar hamma narsaning "kutilganidek ishlayotganini" ta'minlashi mumkin [8] va ta'mirlash brigadalarini faqat kerak bo'lganda jo'natishlari mumkin (keraksiz saytga tashrif buyurishdan qochib, vaqt va pulni tejash) [8]. U quyosh fermasini passiv panellar to'plamidan aqlli, interaktiv tizimga aylantiradi.

SCADA arxitekturasida va IT komponentlari

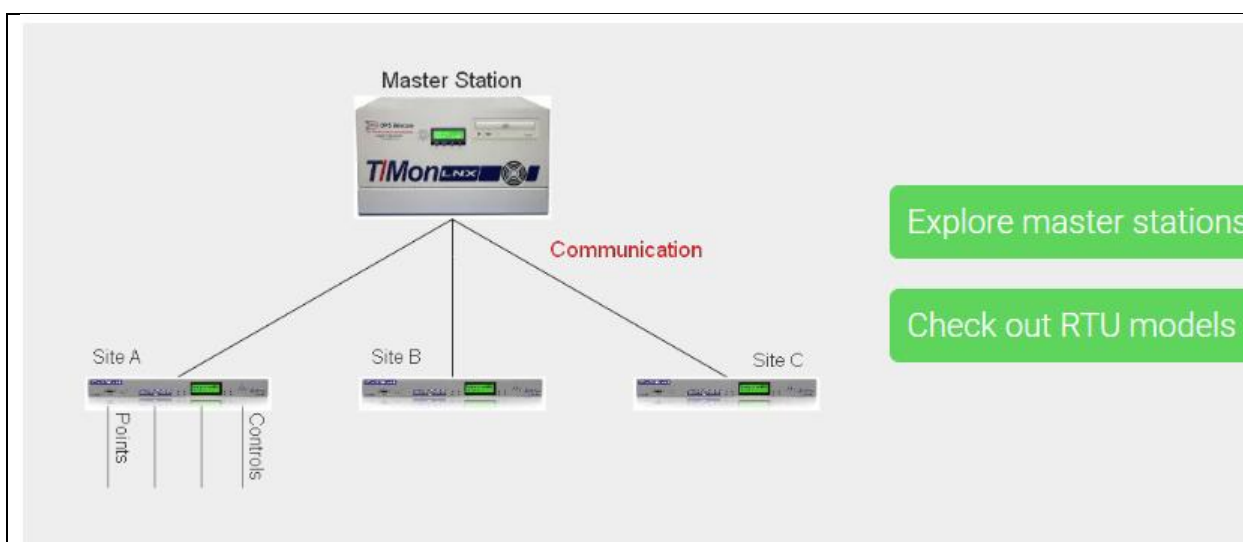
odatiy **SCADA arxitekturasida** quyidagi asosiy komponentlarni o'z ichiga oladi [8]:

- **Datchiklar va qurilmalar:** ular xom ma'lumotlarni yaratadi. PV zavodida birlamchi ma'lumot manbalari inverterlar (doimiy tokning kirishini, o'zgaruvchan tokning chiqishini va boshqalarni o'lchaydigan), simli monitoring birliklari (har bir paneldagi tokni o'lchash), ob-havo sensorlari (piranometr kabi nurlanish sensori, modul harorat sensori, atrof-muhit termometri, shamol uchun anemometr). Har bir sensor/qurilma ko'pincha o'zining o'rnatilgan protsessoriga ega va ma'lumotlarni raqamli ravishda uzatadi.
- **Masofaviy terminal birliklari (RTU) yoki ma'lumotlar jurnali:** Bular dala qurilmalaridan ma'lumotlarni to'playdigan va vositachi sifatida ishlaydigan taqsimlangan birliklardir [8]. Quyosh zavodidagi RTU, masalan, inverter boshqaruv kabinasiga yoki markaziy kommutatorga o'rnatilgan kichik sanoat kompyuteri bo'lishi mumkin. U inverterlar va boshqa sensorlarni aloqa protokollari (masalan, Modbus, CAN avtobusi yoki xususiy havolalar) orqali so'raydi va bu ma'lumotlarni jamlaydi. Ko'pgina zamonaviy PV zavodlarida inverterning o'zi markaziy tizimga ma'lumotlarni jo'natib, bir xil RTU bo'lib xizmat qilishi mumkin. Ammo yirik zavodlarda barcha qurilma ma'lumotlarini birlashtirish uchun alohida RTU yoki SCADA *shlyuzidan* foydalaniladi. RTU boshqaruv buyruqlarini ham bajarishi mumkin: masalan, agar SCADA markazi o'chirish buyrug'ini yuborsa, saytdagi RTU buni qabul qiladi va o'rni ishga tushiradi.
- **Aloqa tarmog'i:** Bu maydonni markaziy *Master stantsiyasiga ulaydi*. Aloqa simli (Ethernet, optik tolali) yoki simsiz (radio, uyali) bo'lishi mumkin. Ko'pgina foydali PV zavodlari inverter va sensorlarni nazorat xonasiga qaytarish uchun optik tolali tarmoqlar yoki Ethernet kabellardan foydalanadi. Kichikroq tizimlar ko'pincha internetdan foydalanadi - masalan, turar-joy PV monitoringi qurilmasi ma'lumotlarni Wi-Fi yoki uyali modem orqali bulutli serverga yuborishi mumkin. Ushbu darajadagi umumiy protokollar orasida **Modbus** (inverter aloqasi uchun quyoshda keng qo'llaniladigan protokol), DNP3 yoki yanada rivojlangan tarmoqqa ulangan aloqa uchun IEC 61850 kiradi. Tarmoq ishonchli va ba'zan deyarli real vaqtda bo'lishi kerak. Ethernet-ga asoslangan LANlar zavodda keng tarqalgan [8], va VPN yoki masofaviy monitoring markazlariga boshqa xavfsiz havola ishlatilishi mumkin. Aloqa tarmog'i ITning bir qismi bo'lib, minimal ma'lumotlar yo'qotilishi va past kechikishni ta'minlash, ayniqsa masofadan boshqarish buyruqlari berilganda muhim ahamiyatga ega.
- **Master Station / SCADA Server(5-rasm):** Bu SCADA dasturiy ta'minoti, ma'lumotlar bazasi va interfeysini boshqaradigan markaziy kompyuter (yoki ortiqcha kompyuterlar). Asosiy stantsiya RTU-lardan ma'lumotlarni oladi, vaqt belgilarini qo'yadi va ularni jurnalga oladi va HMI (inson mashinasi interfeysi) ga taqdim etadi. Shuningdek, u har qanday avtomatlashtirish skriptlarini va signallarni nazoratini boshqaradi. Mahalliy SCADA zavodida Master fermani boshqarish xonasida kompyuter bo'lishi mumkin. Bulutga asoslangan monitoring senariysida "master" aslida ferma qurilmalari hisobot beradigan bulutli serverdir. HMI foydalanuvchi interfeysi - tarixan, zavodning

grafik ko'rinishi (bir chiziqli diagrammalar, diagrammalar va boshqalar) bilan taminlab beruvchi maxsus dasturiy ta'minot **ilovasi** [8] . Bugungi kunda ko'pgina tizimlarda istalgan joydan kirish mumkin bo'lgan web-asoslangan HMI yoki portallar mavjud.

- **Ma'lumotlar bazalari va ma'lumotlar tarixi:** PV zavodlari juda ko'p ma'lumotlarni ishlab chiqarganligi sababli (har bir inverter qandeydir soniyalar ichida o'nlab parametrlar haqida xabar berishi mumkin), SCADA tizimi vaqt seriyali ma'lumotlarni samarali saqlash uchun ma'lumotlar bazasi yoki mavjud *voqeani o'z ichiga oladi*. Bu tendentsiyani tahlil qilish imkonini beradi, masalan, har bir inverterning so'nggi oydagi quvvatini hisoblash, har qanday past ishlayotgan birliklarni aniqlash.
- **Signal tizimi:** SCADA dasturi odatda signalni boshqarish komponentini o'z ichiga oladi. Parametr normal diapazondan chiqib ketganda yoki qurilma nosozlik haqida xabar berganda, signal hosil bo'ladi va jurnalga yoziladi. Bu bildirishnomalarni ishga tushirishi mumkin: monitorga yonib-o'chuvchi signal, elektron pochta xabarlar, texnik xodimlarga SMS va hokazo. Masalan, agar №3 inverter tushda quvvat ishlab chiqarishni to'xtatsa, SCADA buni belgilab qo'yadi va ehtimol O&M guruhiga elektron pochta/SMS yuboradi, shunda ular darhol tekshirishlari mumkin. Signal chegaralarini o'rnatish mumkin (masalan, ishlash koeffitsienti 1 soat davomida 0,8 dan pastga tushsa, ifloslanish yoki soyalanish haqida ogohlantirishni ko'taring).

Soddalashtirilgan arxitektura diagrammasida inverterlar va sensorlarni (seriyali/ethernet orqali) mahalliy SCADA paneliga (ma'lumotlar jurnali) ulangan quyosh panellari ko'rsatishi mumkin, bu esa ma'lumotlarni internet orqali bulutli SCADA platformasiga yuboradi, bu esa operatorlar tomonidan web-boshqaruv panelida mavjud. **5-rasmda** qayta tiklanadigan energiya stansiyasi uchun SCADA aloqasini o'rnatish misoli ko'rsatilgan, bu erda har bir ob'ektdagi masofaviy bloklar ma'lumotlarni markaziy HMI/master stantsiyaga uzatadi.



5-rasm: Quyosh PV zavodi uchun umumiy SCADA arxitekturasi. Dala qurilmalari (inverterlar, hisoblagichlar, ob-havo sensorlari, kuzatuvchi kontrollerlari) masofaviy terminal birliklariga (RTU) yoki to'g'ridan-to'g'ri

aloqa tarmog'iga ulanadi. Ma'lumotlar operatorlar uchun grafik interfeysni ta'minlovchi Master Station/HMI ga keladi [8] . Bosh stantsiya o'z joyida yoki bulutda joylashishi mumkin, bu esa bir nechta quyosh maydonlarini masofadan kuzatish va boshqarish imkonini beradi.(SCADA tizimlari mumkin Yordam Quyosh PV zavodlari)

Haqiqiy ilovalarda ko'plab inverter ishlab chiqaruvchilari RTU sifatida xizmat qiladigan o'zlarining shlyuz qurilmalarini taqdim etadilar. Misol uchun, SMA (yirik inverter ishlab chiqaruvchisi) barcha SMA inverter ma'lumotlarini jamlaydigan va uni Sunny Portalga (SMA monitoring platformasi) [9][10] yuboradigan **Data Manager** yoki eski *Klaster Controllerni taklif qiladi* . Boshqalar esa har bir inverterga Ethernet portini joylashtiradilar va ularning barchasi mahalliy SCADA shaxsiy kompyuteriga hisobot beradilar (6-rasm).



Shakl 6. SCADA kompyuteri (<https://electrical-engineering-portal.com/scada-operation>)

IT xizmatlari, shuningdek, xom ma'lumotlarni foydali ma'lumotlarga aylantiradigan dasturiy ta'minotni ham o'z ichiga oladi. Bunga samaradorlik nisbati, sig'im koeffitsienti kabi KPI (Asosiy samaradorlik ko'rsatkichlari) ni hisoblay oladigan yoki haqiqiy va kutilgan ishlab chiqarishni solishtirishi mumkin bo'lgan tahliliy dasturiy ta'minot kiradi (ehtimol, tsikldagi model yoki simulyatsiya yordamida). Bundan tashqari, ko'pgina SCADA tizimlari texnik xizmat ko'rsatishni boshqarish bilan integratsiyalashishga imkon beradi - masalan, nosozlik yuz berganda texnik xizmat ko'rsatish chiptasi tizimida ish tartibini yaratish.

Kuchli SCADA dizayni, shuningdek, kommunal loyihalar uchun **ortiqcha va ishonchlilikni talab qiladi**. Ko'pincha, monitoring doimo mavjud bo'lishini ta'minlash uchun muhim SCADA havolalari ortiqcha (ikkita aloqa yo'llari, SCADA uskunalari uchun zaxira quvvat manbalari va boshqalar). Axir, agar SCADA

ishlamay qolsa, zavod hali ham quvvat ishlab chiqarishi mumkin, ammo operatorlar uning holatidan bexabar bo'ladi.

Kichikroq tizimlarda (turar-joy/tijorat) arxitektura soddaroq bo'lishi mumkin: inverterni o'zi yoki kichik logger ma'lumotlarni to'playdi va to'g'ridan-to'g'ri Internet orqali sotuvchining bulut xizmatiga yuboradi, bu erda foydalanuvchi tizim ma'lumotlarini ko'rish uchun ilova yoki veb-sayt orqali tizimga kiradi. Bu aslida SCADA xizmatidir, lekin u shunday belgilanmagan bo'lishi mumkin.

Masofaviy monitoring, ma'lumotlarni qayd qilish va ogohlantirishlar

Masofaviy monitoring vakolatli foydalanuvchilar PV tizimining ishlash ma'lumotlariga nafaqat saytdan, balki istalgan joydan kirishlari mumkinligini anglatadi. Bunga odatda SCADA yoki monitoring tizimini internetga ulash orqali erishiladi. Yuqorida aytib o'tilganidek, ko'pgina inverter kompaniyalari bulutli portallarga ega: inverter ma'lumotlarni saqlanadigan va ko'rsatiladigan bulutga yuboradi. Ko'proq moslashtirilgan SCADA uchun operatorlar SCADA ekranlarini masofadan turib ko'rish uchun sayt tarmog'ida VPNga ega bo'lishi mumkin yoki SCADA sayti ma'lumotlarni bulutli ma'lumotlar bazasiga yozma holda berishi mumkin.

Ma'lumotlarni ro'yxatga olish SCADA-ga xosdir - ma'lumotlarni muntazam ravishda yozib olish va saqlash. Quyosh monitoringi uchun odatiy ro'yxatga olish intervallari ishlash ma'lumotlari (energiya, quvvat, nurlanish) uchun 5 yoki 15 minutni tashkil qiladi, chunki bu juda ko'p ma'lumot yuklamasdan tahlil qilish uchun yaxshi ruxsat beradi [10]. Vaqtinchalik yoki batafsil inverter harakatlarini tahlil qilishda elektr o'lchovlari uchun tezroq ro'yxatga olish (soniya yoki pastki soniya) ishlatilishi mumkin, ammo umumiy ishlash uchun 5 daqiqalik o'rtacha ko'rsatkichlar keng tarqalgan. Ushbu jurnallar kunlik ishlab chiqarishni hisoblash imkonini beradi, shuningdek, muammo qachon boshlanganini aniqlash uchun vaqtni orqaga qaytarishga imkon beradi. Misol uchun, agar bitta kombinatda saqlovchi(предохранитель) yongan bo'lsa, uning simdagi toki nolga tushadi; yozilgan ma'lumotlariga qarab, bu qachon sodir bo'lganligini aniqlash mumkin.

Tizim ogohlantirishlari (signallari) O&M uchun juda muhimdir. SCADA quyidagi hodisalar haqida ogohlantirishlar berish uchun sozlanishi mumkin: inverter xatosi yoki oflayn, aloqa nosozligi (agar inverter ma'lumot berishni to'xtatsa, siz aloqa signalini olasiz), past izolyatsiya qarshiligi (yerdagi (tuproq)dagi xatolik haqida ogohlantirish), transformatoridagi yuqori harorat va boshqalar. Shuningdek, past quvvat (agar inverter nurga nisbatan kutilganidan sezilarli darajada kam quvvat ishlab chiqarsa) kabi ishlash signallari quyosh nuri ta'sirida o'rnatilishi mumkin. Ushbu ogohlantirishlar HMI da taqdim etiladi va shuningdek, tayinlangan muhandislarga elektron pochta/SMS orqali yuboriladi. Ko'pgina zamonaviy platformalarda push-bildirishnomalar bilan mobil ilovalar ham mavjud. SCADA ning maqsadi (yaratish g'oyasi) darhol xabardor qilish - SCADA ishlab chiquvchilari ta'rifi bilanidek, biror narsa noto'g'ri ekanligini bilishni xohlasangiz vaqt va daromadni tejab, texnik xodimlarni zudlik bilan jo'natish mumkin muammo yuzaga kelgan joyga jonatish mumkin [8]. Masofaviy monitoring yordamida bitta operator

real vaqt rejimida bir nechta zavodlarni kuzatishi mumkin, bu faqat saytdagi hisoblagichlarni o'qish bilan imkonsiz bo'ladi.

Trend tahlili profilaktik xizmat ko'rsatishda yordam beradi. Misol uchun, unumdorlik nisbati tendentsiyasi (nurlanishga asoslangan haqiqiy AC chiqishi kutilgan natijaga nisbati) asta-sekin pasayishni ko'rsatishi mumkin, bu ifloslanishni ko'rsatishi mumkin - tozalash jadvalini talab qiladi. Yoki oylar davomida asta-sekin ko'tarilgan invertor harorati almashtirishni talab qiladigan tiqilib qolgan havo filtrini ko'rsatishi mumkin. SCADA tizimlari ko'pincha aktivlarni boshqarishni qo'llab-quvvatlash uchun ma'lumotlarni (kundalik hisobotlar, oylik energiya, xato jurnallari) umumlashtirish uchun hisobot vositalarini o'z ichiga oladi. Texniklar ushbu jurnallardan hodisalarni bog'lash uchun foydalanishi mumkin - masalan, nosozliklar tarmoq buzilishlari bilan bir vaqtda sodir bo'ladimi yoki yo'qligini tekshiriladi.

Muvofiqlik va hisob-kitob qilish uchun ishlatiladi. Kommunal miqyosdagi quyosh fermasi uning ishlab chiqarilishi haqida tarmoq operatoriga xabar berishi kerak bo'lishi mumkin; SCADA sotilgan energiya uchun autentifikatsiya qiladigan hisoblagich ko'rsatkichlarini taqdim etadi. Shuningdek, u ba'zan energiya sotib olish shartnomalari mavjudligini (ish vaqti) qayd qilishi mumkin.

Misol uchun, 50 MVt quvvatga ega yirik quyosh fermasini ko'rib chiqaylik: SCADA har bir inverterning chiqishini bir necha daqiqada qayd qiladi. Agar bitta inverter 0 ga tushib qolsa, tizim "Invertor №12 soat 14:05 da ishlamay qoldi" signalini ko'taradi. Operator buni asboblarda panelida ko'radi va ehtimol elektron pochta xabarini oladi. Ular SCADA orqali masofadan turib tiklash buyrug'ini sinab ko'rishlari mumkin. Muvaffaqiyatsiz bo'lsa, ular texnik xizmat ko'rsatish brigadasini joyida tekshirish uchun yuboradilar. Shu bilan birga, SCADA jurnallari ularga inverter qancha vaqt ishlamay qolganligini ko'rish va yo'qolgan ishlab chiqarishni hisoblash imkonini beradi. Jurnallar, shuningdek, o'sha paytda boshqa inverterlarda nosozliklar bo'lganligini ham ko'rsatishi mumkin (bu tashqi sabab bir nechta blokni ishlamay qolgan tarmoq kuchlanishining ko'tarilishimi yoki faqat bitta inverterning ichki xatosimi?). Bu muammolarni bartaraf etishni sezilarli darajada yaxshilaydi.

Zamonaviy PV monitoringning yana bir jihati - **aktivlarni boshqarish tizimlari bilan integratsiya**: ba'zi SCADA yoki monitoring platformalari sizga texnik xizmat ko'rsatish chiptalarini, ehtiyot qismlarni inventarizatsiya qilish va hokazolarni signalizatsiya bilan bog'lash imkonini beradi. Bu IT xizmatlarini boshqarishga o'tadi va ogohlantirish kelgandan so'ng, u hujjatlashtirilishi va hal qilinishini ta'minlaydi.

PV monitoringi uchun dasturiy platformalar va asboblarda

PV tizimlarini monitoring qilish va tahlil qilish ehtiyojlariga xizmat qiluvchi bir nechta dasturiy platformalar va IT vositalari mavjud - ba'zilar sotuvchiga xos, boshqalari uchinchi tomon yoki umumiydir. Quyida ularning asosiy xususiyatlari bilan bir qatorda bir nechta diqqatga sazovor misollar keltirilgan:

- **Sunny Portal (SMA Solar Technology tomonidan):** Sunny Portal dunyodagi eng yirik onlayn PV monitoring platformalaridan biri bo'lib, SMA inverterlaridan foydalanadigan tizimlar uchun mo'ljallangan. Bu turar-joy va

tijorat zavodlari uchun PV tizimi ma'lumotlarini professional boshqarish, monitoring qilish va taqdim etishni ta'minlaydi[11]. Foydalanuvchilar (zavod egalari yoki o'rnatuvchilar) o'zlarining PV tizimini Sunny Portalda ro'yxatdan o'tkazishlari va keyin istalgan joydan internet orqali jonli va yozib olingan ma'lumotlarga kirishlari mumkin. Sunny Portalning asosiy xususiyatlari qatoriga barcha qurilmalarning real vaqt rejimida holati monitoringi, quvvat va energiya rentabelligini vizualizatsiya qilish (kunlik, oylik, yillik ishlab chiqarish grafiklari) va tizim hodisalari haqida ogohlantirishlar kiradi. Bundan tashqari, og'ishlarni tezda aniqlash uchun haqiqiy hosilni kutilgan qiymatlar bilan solishtirish imkonini beradi [10]. Sunny Portal (ayniqsa, *ennexOS* tomonidan quvvatlanadigan yangi Sunny Portal) yuqori aniqlikdagi ma'lumotlarni (5 daqiqalik intervalgacha) va SMA invertorlarining masofaviy parametr konfiguratsiyasini qo'llab-quvvatlaydi [11]. Misol uchun, o'rnatuvchi saytga kirmasdan portal orqali inverter sozlamalarini yangilashi mumkin. Sunny Portalning ko'lami juda muhim: so'nggi ma'lumotlarga ko'ra, u butun dunyo bo'ylab 900 000 dan ortiq ro'yxatdan o'tgan PV tizimiga ega bo'lib, 40 GVt dan ortiq PV quvvatini kuzatgan, bu uning qanchalik keng qo'llanilishini aks ettiradi. U ma'lumotlarga xavfsiz kirishni ta'minlaydi (SMA platformaning ma'lumotlar xavfsizligi uchun ISO/IEC 27001 sertifikatiga ega) va foydalanuvchi rolini boshqarish (egasi va mehmon ko'rinishi) va asosiy hisobot/signal funksiyasi [11] kabi xususiyatlarni taqdim etadi. Xulosa qilib aytganda, Sunny Portal - bu SMA-ga asoslangan tizimlar uchun **yaxlit bulutli SCADA**: apparat (inverterlar, ma'lumotlar menejerlari) o'rnatilgandan va ulangandan so'ng, portal uy energiya tizimidagi ishlash, rentabellik va hatto energiya oqimlarini kuzatish uchun asboblarni panelini taklif qiladi. Bu quyosh monitoringini sezilarli darajada soddalashtiradigan sotuvchi tomonidan taqdim etilgan IT xizmatiga misoldir.

- **Solar-Log (WEB Enerest) monitoringi:** Solar-Log uchinchi tomon PV monitoringi va energiyani boshqarish tizimi bo'lib, u keng ko'lamli inverter brendlari bilan ishlaydi. Solar-Log tizimi odatda invertorlar va hisoblagichlardan ma'lumotlarni to'playdigan, joyida o'rnatilgan apparat ma'lumotlar jurnalini va ma'lumotlar yuklanadigan va ko'rsatiladigan veb-platformani (Solar-Log WEB Enerest) o'z ichiga oladi. Solar-Log ta'kidlaganidek, yaxshi monitoring ilovasi yoki platformasi bir nechta fikrlarni bajarishi kerak: (1) barcha tegishli ma'lumotlarni (ishlab chiqarish, tarmoqqa kirish, o'z-o'zidan iste'mol qilish, tarmoqni tortish va boshqalar) qayd etish, (2) tartibsizliklar yoki nosozliklar haqida operatorni darhol xabardor qilish, (3) rentabellik va tizim holatini tekshirishning oddiy vizualizatsiyasini ta'minlash va (4) ma'lumotlar xavfsizligini ta'minlash [4]. Solar-Log platformasi haqiqatan ham bu hizmatlarni taklif qiladi. U PV tizimining energiya balansini (ishlab chiqarilgan, iste'mol qilingan va tarmoqqa oziqlanadigan energiya miqdori) real vaqt rejimida va yozib olingan [14], ko'pincha chiroyli grafikalar va hatto CO₂ tejash hisoblarini o'z ichiga oladi. U, masalan, inverter ishlamayotgan bo'lsa yoki tizim kutilgan ishlab chiqarishga mos kelmasa, ogohlantirishlarni yuboradi. Solar-Log shuningdek,

ba'zi bir asosiy xatolar tahlilini amalga oshirishi mumkin - ma'lumotlarni taqqoslash orqali qaysi zanjir yoki inverter past ishlashini aniqlash. Yana bir xususiyat portfel monitoringi: o'rnatuvchilar yoki O&M provayderlari Solar-Logning ko'p zavodli imkoniyatlaridan foydalangan holda bir interfeysdan ko'plab saytlarni kuzatishi mumkin. Ma'lumotlar xavfsizligi shifrlangan ma'lumotlarni uzatish va xavfsiz serverlardan foydalangan holda jiddiy qabul qilinadi [14]. Yo'lda o'z tizimining holatini tekshirish uchun Solar-Log-ga veb yoki mobil ilova orqali kirish mumkin. Solar-Log shuningdek, energiyani boshqarish uchun interfeysni taqdim etadi - PV ishlab chiqarishga asoslangan yuklarni yoki saqlashni nazorat qilish. Tasavvur qilish uchun, agar saytda Solar-Log mavjud bo'lsa, foydalanuvchi ilovani ochib, hozirda uning PV tizimi X kVt ishlab chiqarayotganini ko'rishi mumkin, undan Y kVt elektr jihozlarga, Z kVt esa tarmoqqa o'tmoqda; Agar inverter xatosi yuzaga kelsa, ehtimol sababni ko'rsatadigan xabar darhol paydo bo'lib, hal qilishni tezlashtirishga yordam beradi [14]. Shunday qilib, Solar-Log turli xil apparat brendlari o'rtasidagi tafovutni yo'qotadigan va quyosh energiyasi samaradorligini kuzatish uchun yagona IT platformasini ta'minlovchi mustahkam monitoring xizmati bo'lib xizmat qiladi.

- **PVsyst** : Yuqorida aytib o'tilganlardan farqli o'laroq, **PVsyst** real vaqtda monitoring vositasi emas, balki birinchi navbatda dizayn va simulyatsiya dasturidir. Quyosh muhandisligi sohasida tizimni loyihalash, energiya rentabelligini baholash va tahlil qilish uchun keng qo'llaniladi. PVsyst foydalanuvchilarga PV tizimini (komponentlar, joylashuv, ob-havo ma'lumotlari) modellashtirish va kutilayotgan ishlab chiqarishni simulyatsiya qilish imkonini beradi. Texnik xizmat ko'rsatish va monitoring kontekstida PVsyst o'lchangan ma'lumotlarni tahlil qilish uchun ham ishlatilishi mumkin - unda siz zavoddan o'lchangan samaradorlik ma'lumotlarini import qilishingiz va nomuvofiqliklarni aniqlash uchun uni simulyatsiya bilan solishtirishingiz mumkin bo'lgan ma'lumotlarni tahlil qilish vositasi mavjud. PVsyst aslida nazariy ko'rsatkichlar va yo'qotishlarni batafsil taqsimlashni ta'minlovchi oflayn vositadir. Misol uchun, bir yillik ishlagandan so'ng, haqiqiy nurlanish va ishlab chiqarishni kiritish mumkin va PVsyst toza simulyatsiya bilan taqqoslash orqali ifloslanish yo'qotishlarini yoki boshqa samarasizliklarni qayta hisoblashda yordam beradi. Rasmiy hujjatlardan qisqacha tavsif: " *PVsyst - bu to'liq PV tizimlarini o'rganish, o'lchamlari va ma'lumotlarini tahlil qilish uchun shaxsiy kompyuter dasturiy ta'minot to'plami. U tarmoqqa ulangan, mustaqil, nasosli va doimiy tarmoqli PV tizimlari bilan shug'ullanadi va quyosh energiyasi va komponentlar ma'lumotlari uchun keng qamrovli vositalarni o'z ichiga oladi.*" [15]. Keng ma'noda IT-xizmati sifatida PVsyst **mos yozuvlar modeli** sifatida xizmat qilish orqali monitoringni qo'llab-quvvatlaydi - operatorlar ko'pincha undan kutilgan natijalarni bashorat qilish uchun foydalanadilar (ob-havoni hisobga olgan holda), keyin monitoring tizimlari haqiqiy chiqish haqida hisobot beradi. Haqiqiy(real) va kutilganlarni taqqoslash (PVsyst dan) kam ishlashni aniqlashning kuchli usuli hisoblanadi. Bundan tashqari, PVsyst texnik xizmat

ko'rsatishni rejalashtirishda yordam beradi: masalan, tozalash ta'sirini yoki kuzatuvchining ta'sirini simulyatsiya qilishi mumkin va hokazo.

- **SMA (boshqa IT xizmatlari):** SMA, Sunny Portal dan tashqari, **Sunny Home Manager** va **SMA Energy Meter** kabi turli komponentlarni taklif etadi, ular birgalikda uy PV uchun energiya boshqaruv tizimini yaratadi. Quyoshli uy menejeri uydagi barcha energiya oqimlarini (PV ishlab chiqarish, uy iste'moli, tarmoq importi/eksporti) kuzatib boradi va hatto aqlli jihozlarni [16][12] boshqarishi mumkin. U real vaqtda energiya oqimi diagrammalarini taqdim etish va o'z-o'zini iste'mol qilishni optimallashtirish orqali monitoring bilan bog'lanadi. Kattaroq zavodlar uchun SMA ning eski **Cluster Controller** (hozirda asosan **Data Manager** tomonidan almashtirilgan) SCADA yordam dasturi bilan **Modbus** yoki *SunSpec* kabi protokollar orqali integratsiyalasha oladigan SCADA shlyuzi edi. SMA shuningdek, smartfonlarda qulay monitoring qilish uchun Sunny Portal ga ulanadigan **Mobil ilovani (SMA Energy App)** taqdim etadi [12][11].
- **SolisCloud (Ginlong Solis tomonidan):** SolisCloud - Solis inverterlari (mashhur inverter brendi) bilan jihozlangan PV tizimlari uchun zamonaviy bulutga asoslangan monitoring va boshqaruv platformasi. Bu real vaqtda monitoring, aniq ma'lumotlar va signal bildirishnomalarini birlashtiradigan aqlli PV monitoringi va texnik xizmat ko'rsatish tizimi sifatida tavsiflanadi [17]. SolisCloud veb-portali yoki mobil ilovasi orqali foydalanuvchilar o'zlarining quyosh tizimining ishlashi haqida batafsil real vaqt ma'lumotlarini ko'rishlari mumkin: joriy quvvat chiqishi, kunlik / oylik energiya rentabelligi, shuningdek, har qanday ulangan batareyalar yoki yuklarning holati [18]. SolisCloud- ning xususiyatlaridan biri bu juda qulay energiya oqimi diagrammasi bo'lib, u real vaqtda PV panellar, batareya, uy va tarmoq o'rtasida quvvat qanday harakatlanishini ko'rsatadi (rangli strelkalar bilan). Bu foydalanuvchilarga tizim holatini darhol tushunishga yordam beradi. Platforma yozib olingan ma'lumotlarni qayd qiladi va vaqt o'tishi bilan ishlash tendentsiyalarini kuzatish uchun analitik vositalarni taqdim etadi [18]. Shuningdek, u o'rnatuvchilar uchun ko'p saytli boshqaruvni qo'llab-quvvatlaydi, ya'ni o'rnatuvchi o'z mijozlarining barcha Solis inverter tizimlarini bitta boshqaruv panelida kuzatishi mumkin. Ogohlantirishlar va aqlli bildirishnomalarga katta e'tibor beriladi: SolisCloud har qanday inverter nosozliklari yoki g'ayritabiiy ishlash haqida ogohlantirishlar ishlab chiqaradi va ularni foydalanuvchining telefoni yoki elektron pochta-siga yuborishi mumkin, shunda muammolarni tezda hal qilish mumkin [19]. Misol uchun, agar inverter kutilmaganda oflayn rejimga o'tsa, ilova ogohlantirish yuboradi. Shuningdek, u inverter proshivkasini yangilash yoki masofadan turib sozlamalarni o'zgartirish (tegishli ruxsatnomalar bilan) kabi masofadan boshqarish imkoniyatlarini taklif etadi. SolisCloud bir nechta asosiy funktsiyalarni ta'kidlaydi: real vaqtda monitoring, aqlli nosozliklarni aniqlash va ogohlantirishlar, yozib olingan ma'lumotlar va trend tahlillari va oxirgi foydalanuvchilar va professional o'rnatuvchilar uchun foydalanish uchun qulay interfeys. Aslida, bu Solis tizimlariga bag'ishlangan bulutli SCADA. Bu

“birinchi navbatda bulut” ekanligini hisobga olsak, foydalanuvchi ma'lumotlarini himoya qilish uchun kiberxavfsizlik choralari (shifrlash, xavfsiz loginlar) qo'llaniladi. SolisCloud-ning uchinchi tomon xizmatlari bilan integratsiyalashuvi ham mumkin (u energiya boshqaruv kompaniyalari tomonidan ishlatilishi mumkin bo'lgan ma'lumotlarni olish uchun API taklif qiladi) [20]. Xulosa qilib aytadigan bo'lsak, SolisCloud PV ishlab chiqarishni kuzatish, energiyani saqlashni boshqarish va texnik ogohlantirishlarni qabul qilish uchun bir martalik IT platformasi bo'lib xizmat qiladi, bu inverter ishlab chiqaruvchilari o'zlarining apparatlarini to'ldirish uchun murakkab dasturiy ta'minotni qanday taqdim etishlarini ko'rsatadi.

- **Boshqa platformalar:** Bozorda boshqa ko'plab platformalar mavjud – masalan, **SolarEdge** o'zining bulutli monitoringiga ega (modul darajasidagi ishlash ma'lumotlari bilan, chunki SolarEdge optimallashtiruvchilari har bir panel chiqishi haqida hisobot beradi), **Enphase o'z** mikroinverterlari uchun Enlighten'ga ega, **Huawei** FusionSolar monitoringini taklif qiladi va hokazo. Bundan tashqari, **AlsoEnergy's** kabi mustaqil platformalar. **PowerTrack**, **Locus Energy** va **SkySpark** turli saytlardan ma'lumotlarni jamlash va ilg'or tahlillarni amalga oshirish uchun katta portfellar uchun ishlatiladi. Ular ko'pincha boshqaruv panellari, shaxsiy hisobotlarni yaratish va hatto prognozli texnik tahlillarni (nosozliklarni bashorat qilish uchun avtomat o'rganishdan foydalanish) taqdim etadi. Ochiq manbali yoki maxsus SCADA: Ba'zi muhandislik guruhlar o'zlarining quyosh fermalari uchun maxsus asboblarni paneli va boshqaruvlarini yaratish uchun Induktiv avtomatlashtirish (sanoat SCADA-da mashhur) kabi ramkalar yordamida SCADA ni o'rnatadilar [21].

Ushbu dasturiy vositalarning barchasi PV tizimlarining maqsadga muvofiq ishlashini ta'minlash va manfaatdor tomonlarga (uy egalari dan tortib kommunal operatorlarga) aniq ko'rinish va nazoratni ta'minlashga qaratilgan. Ular PV aktivlarini boshqarishning ajralmas qismidir - ularsiz ishlashni xulosa qilish uchun qo'lda o'qish yoki oylik kommunal to'lovlarga tayanish kerak bo'ladi, bu zamonaviy talablar uchun yetarli emas.

AT arxitekturasini: Sensorlar, aloqa va bulutli integratsiya

IT arxitekturasini bir oz ko'proq o'rganish uchun: quyosh monitoringi tizimi ko'pincha tarqatilgan IoT (Internet of Things) qurilmalarini o'z ichiga oladi. Datchiklar (masalan, energiya hisoblagichlari, harorat sensorlari) va inverterlar PV zavodining "Internet of Things" qatlamini tashkil qiladi, ularning har biri ma'lum bir aloqa interfeysiga ega. Aloqa simli bo'lishi mumkin (masalan, inverterlar va loggerlar o'rtasida zanjirli RS485 seriyali liniyalar, Ethernet kabellar, elektr uzatish liniyasi aloqasi) yoki simsiz (inverterlarda Wi-Fi modullari, Zigbee, uyali).

Modbus TCP/IP (Ethernet orqali) yoki **Modbus RTU** (seriyali) kabi protokollar inverter va hisoblagich ma'lumotlari uchun juda keng tarqalgan. Borgan sari **MQTT** (engil IoT protokoli) ba'zi qurilmalar tomonidan brokerlarga ma'lumotlarni nashr qilish uchun foydalanilmoqda (ayniqsa, yangi turar-joy IoT

energiya qurilmalarida). Keyin ma'lumotlar uni birlashtiradigan va bulutga yuboradigan mahalliy shlyuzga o'tishi mumkin. Bulutli tizimlarda ma'lumotlarni serverga uzatish uchun **REST API** yoki **MQTT** yoki hatto **FTP** dan foydalanish mumkin.

Misol uchun, sozlashni ko'rib chiqaylik: Har bir inverter Ethernet orqali saytdagi routerga ulangan. Ushbu router internetni ta'minlaydi (ehtimol 4G uyali aloqa orqali). Invertorlar ma'lumotlarni bulutli serverga yuboradi (ulanishni ochish va vaqti-vaqti bilan ma'lumotlarni yuborish orqali yoki bulut ularni so'roq qiladi). Bulutli server tizimni autentifikatsiya qiladi va ma'lumotlarni ma'lumotlar bazasida saqlaydi. Foydalanuvchi ma'lumotlarni ko'rish uchun veb-interfeys orqali tizimga kiradi. Bu chekka-bulut arxitekturasida bo'lib, ma'lumotlarni yig'ishdan tashqari minimal ishlov berish joyida.

Ko'proq missiya uchun muhim stsenariylarda (yirik zavodlar) arxitektura ikki bosqichli bo'lishi mumkin: mahalliy SCADA (tezkor boshqaruv va tezkor javob uchun) va bulutli replikatsiya (masofadan monitoring va yig'ish uchun). Mahalliy SCADA hatto internet o'chirilgan bo'lsa ham, zavod joyida kuzatilishini va tarmoq buyruqlariga javob berishini ta'minlaydi. Ulanish tugashi bilan markaziy yozuvlarni yangilash uchun bulut sinxronlanadi.

Bunday IT arxitekturalarida kiberxavfsizlik va ma'lumotlar yaxlitligi juda muhim, bu esa keyingi mavzuga olib keladi.

Solar SCADA-da kiberxavfsizlik va ma'lumotlar yaxlitligi

Quyosh PV zavodlari raqamlashtirilgan va ulangan bo'lsa, ular boshqa sanoat boshqaruv tizimlari va energiya infratuzilmasi kabi kiberxavfsizlik muammolariga tobora ko'proq duch kelishmoqda. **Ma'lumotlar yaxlitligi** monitoring tizimi tomonidan taqdim etilgan ma'lumotlarning to'g'riligini va buzilmasligini ta'minlashni, **kiberxavfsizlik esa** tizimni operatsiyalarni buzishi yoki ma'lumotlarni soxtalashtirishi mumkin bo'lgan zararli hujumlardan himoya qilishni anglatadi.

Tarixiy nuqtai nazardan, PV zavodlari nisbatan sodda va ko'pincha tarmoqqa ulanmagan - erta quyosh qurilmalari Internetga ulanmagan mustaqil loggerga ega bo'lishi mumkin edi. O'shanda kiberxavfsizlik xavfi minimal edi. Ammo endi, katta quyosh fermalari zarur quvvat bilan ta'minlangan va masofadan boshqarish mumkin bo'lganligi sababli, hujumchilar ularni turli maqsadlarda nishonga olishlari mumkin. So'nggi yillarda kiberxavfsizlik bo'yicha mutaxassislar qayta tiklanadigan energiya tizimlari (jumladan, quyosh fermalari va akkumulyatorlarni saqlash) himoyalangan bo'lsa, kengroq elektr tarmoqlariga zaif kirish nuqtalari bo'lishi mumkinligini ta'kidladilar [22].

PV SCADA uchun tahdid vektorlari quyidagilarni o'z ichiga oladi:

- **Inverter yoki shlyuzni buzish:** inverterlar proshivka bilan ishlaydi va ko'pincha aloqa modullariga ega. Agar invertorning dasturiy ta'minoti zaiflikka ega bo'lsa (va ko'pchilik Linux-ga asoslangan kontrollerlardan foydalansa), inverterga tarmoq orqali kirish mumkin bo'lsa, xaker undan foydalanishi mumkin [22]. Bir marta ular inverter sozlamalarini o'zgartirishi, uni o'chirishi yoki hatto xavfli ish sharoitlarini keltirib chiqarishi mumkin

(masalan, himoyalaniшни bekor qilish). Aqlli inverterlarni masofadan turib qabul qilish namoyishlari bo'lib o'tdi.

- **SCADA tarmog'iga kirish:** Agar quyosh stansiyasining SCADA tarmog'i izolyatsiya qilinmagan yoki to'g'ri himoya devori bilan o'rnatilmagan bo'lsa, tajovuzkorlar unga (ehtimol korporativ tarmoq orqali yoki zararli dasturlarga ega texnik xizmat ko'rsatish noutbuki orqali) kirib, so'ngra noto'g'ri buyruqlar yuborishi mumkin. Quyosh fermasi nazariy jihatdan uzilishi yoki ishlab chiqarishni to'xtatishga majbur bo'lishi mumkin.
- **Ma'lumotlarni manipulyatsiyasi:** Aniqroq hujum xabar qilingan ma'lumotlarni o'zgartiradi (ma'lumotlar yaxlitligiga hujum). Masalan, zararli dastur muammoni yashirish yoki ishlab chiqarilganidan ko'proq energiya talab qilish uchun ishlab chiqarish ma'lumotlarini soxtalashtirishi mumkin (garchi moliyaviy hisob-kitoblar odatda buzish qiyinroq bo'lgan kommunal hisoblagichlarga tayanadi). Biroq, buzilgan ma'lumotlar operatorlarni noto'g'ri xulosalarga olib kelishi yoki xatolarni o'tkazib yuborishi mumkin. Ma'lumotlar yaxlitligini ta'minlash ma'lumotlarning ruxsatsiz o'zgarishini oldini olish uchun nazorat summalari, xavfsiz protokollar va kirishni boshqarishdan foydalanishni anglatadi.
- **Xizmat ko'rsatishni rad etish (DoS):** Buzg'unchilar SCADA tarmog'ini to'ldirishi yoki inverter aloqasini ortiqcha yuklashi mumkin, bu esa monitoringni yo'qotishi va ehtimol zavodni xavfsiz standart rejimga majburlashi mumkin. Yoki ransomware SCADA serverlarini shifrlashi mumkin, bu esa operatorlarni tizimlarni zaxira nusxalaridan tiklamaguncha samarali tarzda "ko'r qilib qo'yishi" mumkin (xuddi 2021-yilda Colonial Pipeline'ning IT tarmog'i bilan sodir bo'lgan va bu quvurni bilvosita yopishga olib kelgan) [22] .
- **Jismoniy kirish va ichki tahdidlar:** zararli dastur bilan oddiy USB-ni ulash SCADA ish stantsiyasini yuqtirishi mumkin (yadro santrifugalarini nishonga olish uchun USB orqali tarqaladigan Stuxnet- ni eslatadi) [22] . Quyosh saytida insayder yoki buzg'unchi nazariy jihatdan inverter yoki aloqa kabinetidagi Ethernet portiga ulanishi va zararli buyruqlar yoki viruslarni kiritishi mumkin.

Quyosh stansiyalariga kiberhujumlarning oqibatlarini daromadni yo'qotish (agar ishlab chiqarish to'xtatilsa), uskunaning shikastlanishi (o'ta og'ir holatlarda, masalan, himoya vositalarini o'chirib qo'ygan hujumchi inverterlarni haddan tashqari qizib ketishi yoki batareyaning noto'g'ri ishlashiga olib kelishi mumkin) yoki tarmoqning beqarorligi (tasavvur qiling-a, muvofiqlashtirilgan hujum ko'plab yirik quyosh fermalarini to'satdan o'chirib, generatsiyaning pasayishiga olib keladi). Shu sababli, kiberxavfsizlik endi quyosh aktivlari egalari [22] uchun *asosiy tashvish hisoblanadi*, ayniqsa, tarmoqdagi PV quvvati o'sib bormoqda.

Kiberxavfsizlik va ma'lumotlar yaxlitligini oshirish bo'yicha chora-tadbirlar:

Yondashuv ko'pincha *aniqlash-himoya-aniqlash-javob berish-qayta tiklash* tsikli sifatida tuziladi [22]:

- **Aniqlash** : Barcha qurilmalar va mumkin bo'lgan zaifliklarni bilish uchun tizimni tekshiriladi. Bunga barcha tarmoq ulanishlari, ochiq portlar, inverterlar/SCADA va hokazolarda ishlaydigan xizmatlarning inventarini yuritish va har birining xavfini baholash kiradi [22] . Misol uchun, inverterning veb-interfeysi standart paroldan foydalanishini yoki ma'lumotlar jurnali eskirgan OS bilan ishlayotganligini aniqlaydi.
- **Himoya qilish**: himoyani amalga oshirish. Asosiy qadamlardan biri standart hisob ma'lumotlaridan qochishdir - masalan, barcha standart inverter parollarini o'zgartirish, kuchli noyob parollar yoki kalitlardan foydalanish [22]. Tarmoq segmentatsiyasi juda muhim: tavsiya etilgan usullardan biri turli qurilmalar uchun alohida tarmoqlarni yaratishdir, shunday qilib, masalan, bitta buzilgan inverter boshqasi bilan bevosita aloqa qila olmaydi; barcha aloqa filtrlash va xavfsizlik devori trafikni [22] mumkin xavfsiz SCADA shlyuz orqali borish kerak. Zavod perimetrida va hatto quyi tarmoqlar o'rtasida xavfsizlik devorlaridan faqat kerakli trafikka ruxsat berish uchun foydalaning (masalan, inverterlarga faqat SCADA serverining IP bilan bog'lanishiga ruxsat berilishi mumkin va boshqa hech narsa yo'q). Iloji bo'lsa shifrlash yoqiladi - ko'plab zamonaviy tizimlar bulutga ma'lumotlar uchun HTTPS yoki VPN tunnellarini qo'llab-quvvatlaydi; agar yo'q bo'lsa, sayt VPN dan foydalanish ushlashni oldini oladi. Tarmoqqa kirishning jismoniy xavfsizligi (shkaflarni qulflash, kalitlarda port xavfsizligini qo'llash) ruxsatsiz pluginlarning oldini olishga yordam beradi. Shuningdek, barcha dasturiy ta'minot/proshivka dasturlari yangilanganligiga ishonch hosil qiling: ishlab chiqaruvchilar ma'lum zaifliklar uchun yamoqlarni chiqaradilar va proshivkalarni yangilab turish xakerlar foydalanadigan eshiklarni yopadi [22].
- **Aniqlash** : noodatiy xatti-harakatlar uchun hujumni aniqlash tizimlaridan foydalaniladi yoki hech bo'lmaganda tarmoqni kuzatib boriladi[22]. Misol uchun, agar inverter g'alati vaqtda ma'lumotlarni yuborishni boshlasa yoki noma'lum qurilma ulansa, aniqlash tizimlari operatorlarni ogohlantirishi mumkin. Shuningdek, ma'lumotlarning o'zini anomaliyalar uchun kuzatib boriladi – kiberhujum g'alati ma'lumotlar sifatida namoyon bo'lishi mumkin (masalan, salbiy quvvat chiqishi yoki imkonsiz ishlash qiymatlari). Jismoniy taxminlarga mos kelmaydigan ma'lumotlar namunalarini izlash orqali quyosh fermalarida ma'lumotlar yaxlitligi hujumlarini aniqlash uchun mashinani o'rganishdan foydalanish bo'yicha tadqiqot harakatlari mavjud [24] . Bundan ham oddiyroq, "*inverter javob bermayapti*" uchun SCADA signallari bir vaqtning o'zida bir nechta ishlamay qolsa, xizmat ko'rsatishni rad etish hujumiga ishora qilishi mumkin.
- **Javob berish**: Hodisaga javob berish rejasi bor. Agar buzilish aniqlansa, deylik, operator sozlama ruxsatsiz o'zgartirilganligini yoki inverter zararli

dastur mavjudligi sababli noto'g'ri ishlayotganini sezsa, bu qurilmani izolyatsiya qilish (tarmoqdan uzib qo'yish), agar kerak bo'lsa, xavfsiz tarzda qo'lda boshqarishga qaytish (ba'zi zavodlarni mahalliy sifatida ishlatish mumkin) va kiberxavfsizlik bo'yicha mutaxassislarni jalb qilish tartibi bo'lishi kerak [23]. Xuddi shunday muhimi, **Qayta tiklash** rejaları (SCADA konfiguratsiyalarining zahira nusxalari, tizim dasturiy ta'minotini to'liq qayta o'rnatish imkoniyati va boshqalar) minimal ishlay qolish vaqtini ta'minlaydi [23]. Ma'lumotlar yaxlitligi uchun ortiqcha jurnallarni yuritish (masalan, saytda ham, bulutda ham saqlanadigan ma'lumotlar yoki faqat o'qish uchun ma'lumot yozuvchiga ega bo'lish) manipulyatsiya qilingan har qanday ma'lumotlarni tiklashga yordam beradi.

Himoya chorasining aniq misoli masofaviy kirish uchun VPN dan foydalanishdir: operator SCADA zavodini internetda ochiq qoldirish o'rniga, unga kirish uchun xavfsiz tarmoqqa VPN orqali ulanishi kerak, bu esa ta'sir qilishni sezilarli darajada kamaytiradi. Yana bir misol: ba'zi yirik PV saytlari inverter aloqalarida oq ro'yxatni amalga oshiradi - ya'ni inverter faqat ma'lum bir IP-dan yoki saytdagi kontrollerdan buyruqlarni qabul qiladi, shuning uchun tashqi paket e'tiborga olinmaydi.

Tarmoq operatorlari va tartibga soluvchi organlar quyosh va shamol stansiyalari uchun kiberxavfsizlik standartlarini tobora ko'proq talab qilmoqda, ayniqsa ular energiya tizimining muhim qismiga aylangan. AQShda NERC CIP standartlari (tanqidiy infratuzilmani himoya qilish) ma'lum o'lchamlardan yuqori quyosh fermalariga taalluqli bo'lishi mumkin, bu xodimlar uchun fon tekshiruvi, barcha masofaviy kirishni ro'yxatga olish kabi choralarni talab qiladi. Evropada shunga o'xshash ko'rsatmalar paydo bo'lmoqda (ko'pincha ISO 27001 axborot xavfsizligi yoki energiya bo'yicha tarmoq va axborot tizimlari (NIS) direktivasi ostida).

Ma'lumotlarning yaxlitligi, shuningdek, ma'lumotlarning to'g'ri va ishonchliligini ta'minlash bilan bog'liq. Kiberhujumlardan tashqari, ma'lumotlar shovqin yoki xatolar tufayli buzilishi mumkin. Shunday qilib, SCADA tizimlari ko'pincha xatolarni tekshirishni amalga oshiradi (ma'lumotlar paketlari bo'yicha CRC tekshiruvlari, aql bovar qilmaydigan qiymatlarni belgilaydigan tekshirish qoidalari). Bundan tashqari, vaqtni sinxronlashtirish (barcha qurilmalar uchun NTP yoki GPS soatlaridan foydalanish) ma'lumotlar jurnallarida to'g'ri vaqt belgilariga ega bo'lishini ta'minlaydi - hodisalarni tashxislash yoki boshqa tizimlar (masalan, tarmoq hodisalari) bilan bog'lanishda muhim ahamiyatga ega.

Akademik nuqtai nazardan, qiziqarli stsensariy - *noto'g'ri ma'lumotlarni kiritish* : agar xakerlar tizimni aldash uchun nurlanish sensori ko'rsatkichlarini o'zgartirgan bo'lsa, ishlab chiqarish yaxshi bo'lmaganda yaxshi deb o'ylashsa (ba'zi panellarni uzib qo'ygan sabotajni qoplash), operatorlar muammoni tushunmasligi mumkin. Buni yumshatish uchun o'zaro tekshiruvlar qo'llaniladi: masalan, bir nechta nurlanish sensorlarini solishtirish yoki qo'shni o'simliklar ma'lumotlarini anomaliyalarni aniqlash uchun solishtirish.

Xulosa qilib aytganda, PV zavodlari muhim energiya infratuzilmasining bir qismiga aylangani sababli, ularning SCADA va IT tizimlari kiber tahdidlarga qarshi mustahkam bo'lishi kerak. Quyosh sanoati qurilmalarni qattiq lashtirish, xavfsiz

aloqa protokollaridan foydalanish va IT olamining eng yaxshi amaliyotlariga (kirish nazorati, shifrlash, muntazam audit) rioya qilish orqali moslashmoqda. Zavod operatorlari, o'z navbatida, xodimlarni kiberxavfsizlikdan xabardor bo'lish (masalan, noma'lum USB drayverlarni ulamaslik, xavfsiz parollardan foydalanish) bo'yicha o'rgatmoqda [22]. Ushbu sa'y-harakatlarning barchasi quyosh zavodi ma'lumotlari va boshqaruvlarining yaxlitligi, mavjudligi va maxfiyligini ta'minlashga qaratilgan. Ma'lumotlar haqiqatni aks ettirishi uchun yaxlitlik, monitoring/nazorat har doim zarur bo'lganda ishlashi uchun mavjudlik va maxfiy ma'lumotlar (masalan, zavod ishlashi yoki operatsion buyruqlar) ruxsat etilmagan shaxslarga ta'sir qilmasligi uchun maxfiylik. Ularning mavjudligi bilan quyosh SCADA tizimlari tobora bog'langan dunyoda xavfsiz ishlashiga ishonish mumkin.

10.3. IKKI O'QLI QUYOSH KUZATUVCHILARI (TILT VA AZIMUTNI OPTIMALLASHTIRISH)

Quyoshdan energiya olishni maksimal darajada oshirish uchun quyosh panellari osmon bo'ylab quyosh yo'lini kuzatib boruvchi **kuzatuv tizimlariga o'rnatilishi mumkin**. Ikki **o'qli kuzatuvchi** (ikki o'qli kuzatuvchi) quyosh panellarining yo'nalishini gorizont (azimut) va vertikal (egilish/balandlik) o'qlarida moslashtiradigan mexanizm bo'lib, panellar kun davomida va fasllar bo'ylab quyoshga imkon qadar to'g'ridan-to'g'ri qaragan holda qoladi [25]. Ushbu bo'lim quyosh nurlanishining nazariy asoslarini va nima uchun kuzatuv yordam berishini, sobit, bir o'qli va ikki o'qli tizimlar o'rtasidagi farqlarni, ikki o'qli trekerlarning tarkibiy qismlari va boshqarish algoritmlarini, dizayndagi mulohazalar, shu jumladan unumdorlikni oshirish va real hayotda qo'llash va texnik xizmat ko'rsatish muammolarini o'rganadi.

Quyosh nurlanishi va kuzatish zarurati

Quyosh panelining quvvati uning yuzasiga tushadigan quyosh nurining intensivligiga va tushish burchagi kosinusiga (quyosh nurlari va panel perpendikulyarlari orasidagi burchak) mutanosibdir. Quyosh nuri panelga to'g'ridan-to'g'ri tushsa (perpendikulyar yoki 0° tushish burchagi), panel to'liq intensivlikni oladi. Agar quyosh nurlari burchak ostida bo'lsa, samarali maydon kosinus omili bilan kamayadi (Lambertning kosinus qonuni). Misol uchun, agar quyosh panelning normal darajasidan 60° tushish burchagida bo'lsa, panel intensivlikning atigi 50% ni oladi ($\cos 60^\circ = 0,5$). Shuning uchun, **nurlanishni maksimal darajada ushlab turish uchun** panel har doim quyosh harakatlanayotganda to'g'ridan-to'g'ri quyoshga qaragan bo'lishi kerak (tushish burchagi 0).

Ruxsat etilgan egilish tizimida panellar qattiq egilish va yo'nalishda o'rnatiladi (masalan, shimoliy yarim sharda haqiqiy janubga, kenglikka teng burchak ostida yoki yillik ishlab chiqarish uchun optimallashtirilgan). Ushbu qat'iy yo'nalish murosadir - u ma'lum bir fasl uchun quyosh peshinida biroz maqbul bo'ladi, ammo ertalab, kechqurun va boshqa fasllarda burchak idealdan uzoqdir. *Bir o'qli* kuzatuvchilar buni bitta tekislikda harakat qilish orqali yaxshilaydi (odatda

quyoshning kunlik sharqdan g'arbga harakatini kuzatib boradi). Oddiy bir o'qli kuzatuvchida quyosh azimutidan keyin ertalab sharqdan g'arbga aylanadigan panellar bo'lishi mumkin, bunda egilish ma'lum bir burchak ostida o'rnatiladi. Bu quyosh nurlarining har kuni perpendikulyarga yaqinroq tushishini ta'minlaydi, lekin u quyosh balandligining mavsumiy o'zgarishiga moslasha olmaydi. *Ikki o'qli trekerlar ham azimutni (sharq-g'arbga burilish) va balandlikni (yuqoriga/pastga egilish)* [25] sozlash orqali bir qadam oldinga boradi, asosan panelning normal holatini quyosh holatiga (mexanik chegaralar ichida) moslab turadi. Shunday qilib, ikki o'qli kuzatuvchi kunning barcha vaqtida, butun yil davomida maksimal mumkin bo'lgan to'g'ridan-to'g'ri quyosh nurini ushlab turishi mumkin.

To'g'ridan-to'g'ri nurlanishining ortishi. Tiniq osmon ostida quyosh nurlari energiyaning katta qismini tashkil qiladi. Agar panel quyoshga normal bo'lsa, u bu nurning 100% ni oladi; agar egilgan bo'lsa, u kamroq suratga oladi. Kuzatish orqali biz kosinus yo'qotishlarining ko'pini yo'q qilamiz. Shuningdek, diffuz nurlanish (osmondan tarqalgan yorug'lik) mavjud. Diffuz nur har tomondan keladi; qo'zg'almas panel osmon gumbazining ko'rinishiga qarab ma'lum miqdordagi diffuzni ushlaydi, holbuki kuzatuvchi ba'zan ba'zi tarqalgan yorug'likdan uzoqlashishi mumkin (masalan, ertalab kuzatuvchi sharqqa qaraganida, u g'arbiy osmonni kamroq "ko'radi"). Biroq, diffuz komponent odatda aniq kunlarda to'g'ridan-to'g'ri komponentdan ancha kichik bo'ladi, shuning uchun trekerlar birinchi navbatda to'g'ridan-to'g'ri komponentni ushlashni kuchaytiradi. O'ta bulutli kunlarda, yorug'lik asosan tarqalgan va izotrop bo'lsa, kuzatuvchilar kam afzalliklarga ega, chunki quyoshning joylashishi diffuz sharoitlarda ahamiyatsiz - o'sha paytlarda hatto qo'zg'almas panellar ham kuzatuvchi sifatida xuddi shunday tarqalgan nurlanishni oladi.

Astronomik **asosi** quyosh traektoriyasidir: u sharqdan ko'tariladi, g'arbda botadi (azimut kun davomida $\sim 180^\circ$ o'zgaradi) va uning balandlik burchagi erta tongda past, quyosh peshin vaqtida eng yuqori, keyin esa quyosh botganda past bo'ladi. Mavsumiy ravishda peshin vaqtida quyoshning maksimal balandligi yozda balandroq, qishda esa pastroq bo'ladi (Yer o'qining egilishiga teng miqdorda, ya'ni ekvatorning quyosh burchagiga nisbatan $\pm 23,5^\circ$). Yuqori kengliklarda mavsumiy o'zgarishlar juda katta (quyosh qishda juda past, yozda juda baland). Ruxsat etilgan egilish qishki va yozgi quyosh burchaklari uchun maqbul bo'lishi mumkin emas; treker mos ravishda sozlashi mumkin.

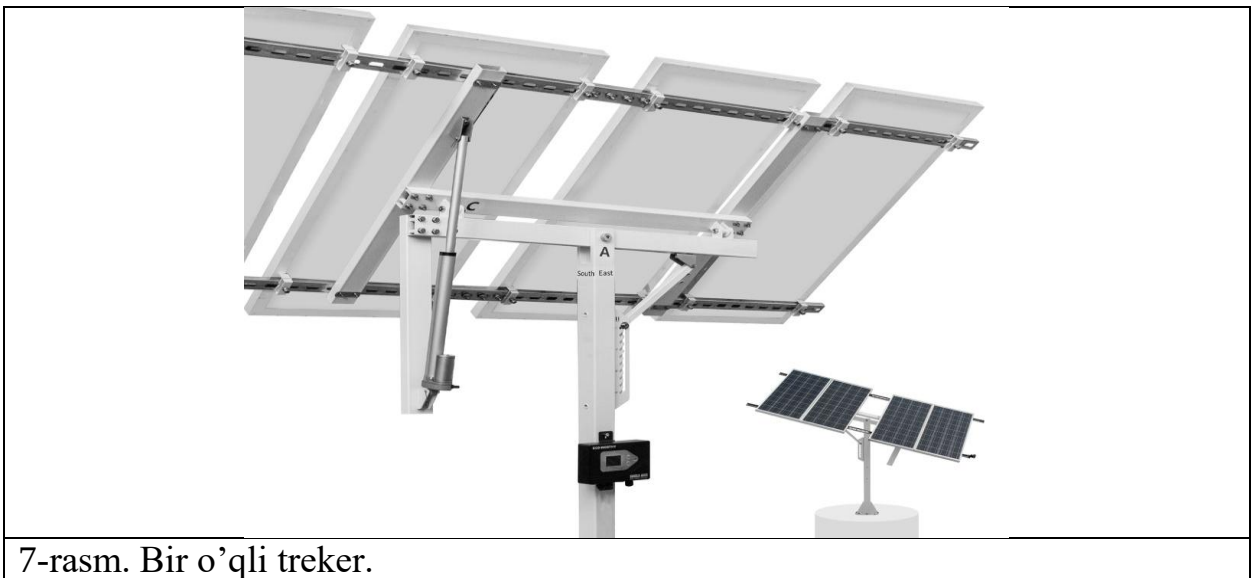
Xulosa qilib aytganda, mavjud nurlanishni ko'proq ushlab turish uchun kuzatish kerak. Potensial daromad to'g'ridan-to'g'ri quyosh nuri ko'p bo'lgan va quyosh osmonning katta qismini kesib o'tadigan joylarda eng yuqori hisoblanadi. Bulutli kunlar ko'p bo'lgan joyda kuzatuvdan olinadigan daromad kamroq bo'ladi. Foyda quyosh ko'proq yuqori yo'lni bosib o'tadigan pastki kengliklarda ham aniqroq bo'ladi (ertalab/kechqurun kuzatuvchi ushlab turishi mumkin bo'lgan sezilarli to'g'ridan-to'g'ri nurlanish mavjud). Juda baland kengliklarda yozda quyosh uzoq soatlar davomida ko'tariladi (trekerlar uni osmon atrofida aylana bo'ylab kuzatishga yordam beradi), lekin qishda quyosh zo'rg'a ko'tarilishi mumkin - kuzatuvchilar o'sha past quyoshni ushlab turish uchun vertikal egilishi mumkin (ba'zi dizaynlar

hatto past burchakli quyoshni tutish uchun "stol ag'dariladi"), ammo chuqur qishda baribir energiya cheklangan.

Ruxsat etilgan va bitta o'qli va ikki o'qli tizimlar

Fixed-Tilt tizimlari: Ular statsionar burchak va yo'nalishda o'rnatilgan panellarga ega. Ular mexanik jihatdan oddiy (harakatlanuvchi qismlar yo'q), bu ularni arzon narxlarda va kam texnik xizmat ko'rsatish imkonini beradi. Nishab odatda yillik energiyani maksimal darajada oshirish uchun tanlanadi (agar cheklanmagan bo'lsa, ko'pincha kenglikka teng) yoki kerak bo'lsa, mavsum uchun optimallashtiriladi (masalan, qishni afzal ko'rish uchun yuqori kengliklarda tik egilishlar). Ruxsat etilgan tizimlar ertalab/kechki quyoshni kamroq oladi, chunki panellar o'sha paytlarda quyoshga qaramaydi va agar egilish etarlicha baland bo'lmasa, qishki peshin quyoshi kamroq. Biroq, siz mahkamlangan panellarni zich qilib o'rashingiz mumkinligi sababli (ular qimirlamaydi, shuning uchun oraliqlar asosan qishning tushida soya bo'lmasligi uchun), ular er maydonidan samarali foydalanishlari mumkin. Samaradorlikni nuqtai nazaridan sobit tizimlar berilgan quvvat uchun 100% da asosiy hisoblanadi.

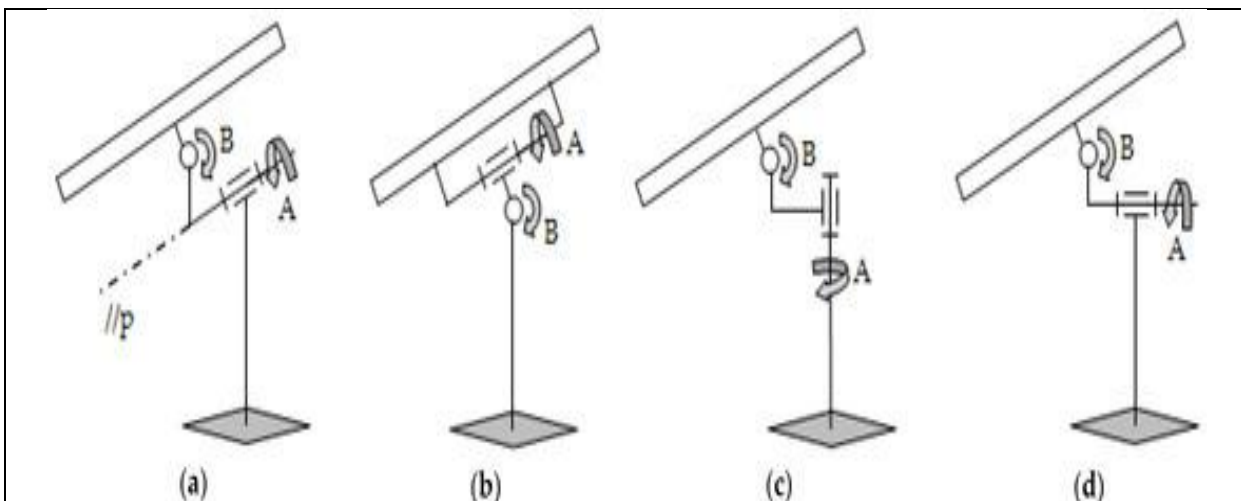
Yagona o'qli kuzatuvchilar (7-rasm): Ular odatda bitta o'q atrofida aylanadi. Umumiy bir o'qli dizayn gorizontal o'q bo'lib, Shimoldan Janubga tekislangan bo'lib, panellar Sharq-G'arbiy yo'nalishda aylanadi (kun davomida sharqdan g'arbga qarab egiladi). Bu ko'pincha *gorizontal bitta eksa kuzatuvchisi (HSAT)* yoki "sharq-g'arbiy kuzatuvchi" deb ataladi . U kunlik harakatni bajaradi, lekin mavsumiy emas (gorizontalgacha nisbatan egilish sobit yoki cheklangan). Yana bir turi vertikal o'qli kuzatuvchi bo'lib, u quyosh azimutini kuzatib borish uchun aylanuvchi patnis (pan) kabi aylanadi, lekin panellarning o'zlari qat'iy egilishda qoladi - bu kunlik harakatni ushlaydi, lekin balandlikni sozlay olmaydi. HSAT yirik quyosh fermalari uchun ko'proq mashhur. U kun bo'yi panellarni taxminan quyoshga qaratib turadi, bir oz kosinus yo'qolishidan tashqari, u quyosh balandligi uchun egilishni moslashtira olmaydi - quyoshli tushda, agar quyosh baland bo'lsa, panel allaqachon gorizontal (tekis) bo'ladi, shuning uchun u yaxshi; erta tongda quyosh sharqda ufqda past bo'ladi - sharqqa qaragan gorizontal o'q kuzatuvchisi hali ham gorizontal ravishda egilib qoladi, bu esa to'g'ridan-to'g'ri quyoshga qaramaydi (shuning uchun erta tongda suratga olish treker tuzilishidagi panellarning qattiq egilish burchagi bilan cheklangan). Ba'zi bir o'qli kuzatuvchilar egilgan (o'q gorizontaldan egilgan) - *egilgan bir o'qli trekerlar* yoki TSAT - bu yuqori kenglikdagi quyoshni ko'proq suratga olish uchun kelishuvdir.



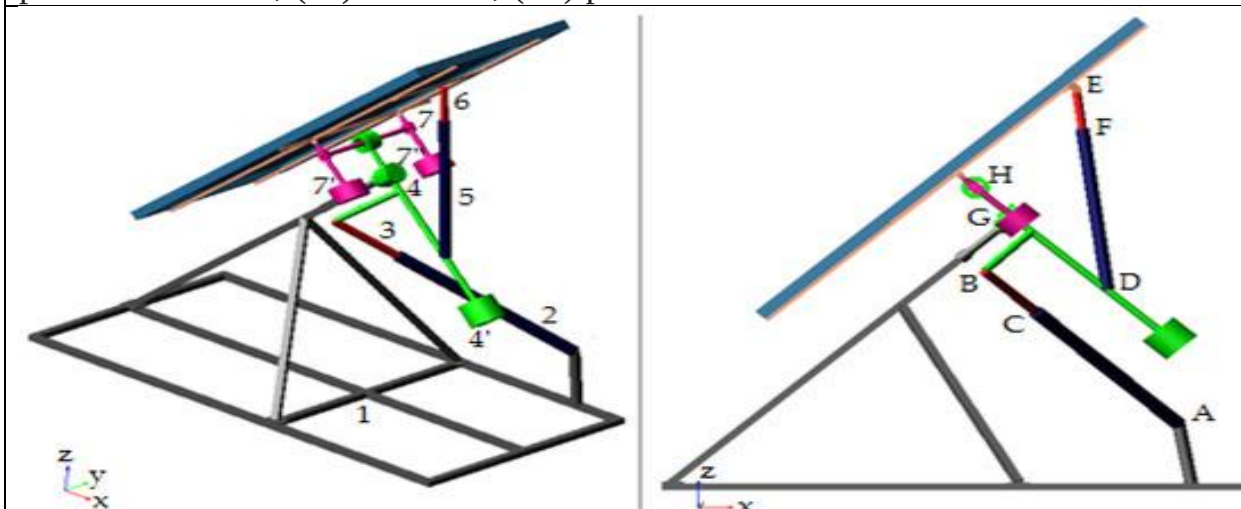
7-rasm. Bir o'qli treker.

Ishlash nuqtai nazaridan, **bitta eksa izdoshlari** energiya rentabelligini sezilarli darajada oshirishi mumkin: sanoat adabiyoti va dala ma'lumotlari sobit egilish bilan solishtirganda yillik energiyani 10% dan 25% gacha oshirish tartibini ko'rsatadi[24]. Ushbu diapazonning yuqori qismi (20-25%) quyoshli iqlim sharoitida pastroq kengliklarda kuzatiladi va pastki qismi (10-15%) yuqori kengliklarda yoki bulutli hududlarda bo'lishi mumkin[24]. Misol uchun, o'rta kenglikdagi saytlar uchun o'tkazilgan tadqiqot shuni ko'rsatdiki, bitta eksa bir holatda optimal ravishda sobit panellarga qaraganda $\sim 36\%$ ko'proq yillik ishlab chiqarishni berdi[25], garchi bu biroz yuqori va ehtimol saytga xos ko'rinadi. Odatdagi ko'rsatkich $\sim 15\text{-}20\%$ ni tashkil qiladi. Qanday bo'lmasin, daromad sezilarli bo'ladi, shuning uchun kommunal loyihalarda bir o'qli trekerlar keng tarqalgan.

Ikki o'qli kuzatuvchilar (8,9-rasm) : Ular kundalik va mavsumiy o'zgarishlarni aniq kuzatishi mumkin. Ular ikkita erkinlik darajasiga ega - ko'pincha bitta eksa (masalan, azimutni aylantirish uchun vertikal qutb) va ikkinchi ortogonal o'q (panelni yuqoriga/pastga burish) sifatida amalga oshiriladi. Ikki o'qli tizimlar panellarni har doim quyoshga *normal yo'naltirishi mumkin (agar cheklanmagan bo'lsa)*. Bu har daqiqada nurlanishni maksimal darajada ushlab turadi. Ruqsat etilgan va ikki o'qning nazariy energiya ortishi joylashuvga bog'liq, lekin tez-tez ko'rsatilgan daromadlar har yili sobit egilishdan 30-40% ko'proq [24][26] va bir o'qdan taxminan 5-15% ko'proq (chunki bitta o'q allaqachon ko'p narsalarni ushlaydi) [27] [28]. Misol uchun, sanoat manbasi qayd etishicha, ikki o'qli kuzatuv barqaror [24] ga nisbatan rentabellikni $>40\%$ oshirishi mumkin . Yana bir manbaning ta'kidlashicha, bir o'qli ma'lum saytlarda o'rnatilgandan ko'ra $\sim 20\%$ va ikki o'qli $\sim 34\%$ berishi mumkin [29]. Asosan, ikki o'q bir o'q o'tkazib yuboradigan energiya so'nggi qismini tiklaydi (asosan qishda va quyosh past balandlikda bo'lgan kunning boshida/kech).



8-rasm. Ikki o'qli kuzatuv mexanizmlarining asosiy turlari: (a) ekvatorial; (b) psevdoekvatorial; (c) azimutal; (d) psevdo-azimutal.



9-rasm. Ekvatorial ikki o'qli kuzatuv tizimining MBS modeli.

Ikki o'qli trekerlar turli dizaynlarda bo'ladi: **Tip-Tilt** turi (panel panelning markazida kesishadigan vertikal va gorizontaal o'qlar atrofida aylanishi mumkin) yoki **Azimut-Balandlik** turi (tovoq antenasi o'rnatish kabi). Umumiy dizaynlardan biri aylana oladigan (azimut) katta ustun (qutb) va tepada (balandlik) egilgan ramkaga o'xshaydi. Bu ko'pincha kichikroq qurilmalarda yoki konsentrlangan fotovoltaik (CPV) tizimlarda kuzatiladi. Bundan tashqari, "ikki o'qli" tizimlar mavjud bo'lib, ular asosan bir o'qli trekerlarning chambarchas bog'langan kombinatsiyasi (masalan, psevdo-dual, bunda bir o'q mavsumiy egilishni yiliga bir necha marta qo'lda, boshqasi esa har kuni sozlashi mumkin). Ammo bu erda biz to'liq avtomatlashtirilgan ikki o'qqa e'tibor qaratamiz.

Qiyosiy xulosa:

- *Xarajat va murakkablik:* Ruxsat etilgan eng oddiy va arzon (dastlabki narxda ham, O&Mda ham). Yagona eksa bir o'q uchun motorlar / aktuatorlarni va boshqaruv tizimini qo'shadi - yuqori xarajat va ba'zi texnik xizmat ko'rsatish (moylash, oxir-oqibat motorni almashtirish). Ikki o'qli aktuatorlar sonini

taxminan ikki baravar oshiradi yoki hech bo'lmaganda ikkita o'qni boshqarish uchun murakkablikni oshiradi va ko'pincha mustahkamroq yordamni talab qiladi (chunki u panelning turli yo'nalishlari va ko'proq dinamik kuchlanishlarga bardosh berishi kerak). Ikki o'qli trekerlar odatda qimmatroq va noto'g'ri ketishi mumkin bo'lgan ko'proq narsalarga ega (shunday qilib, cheklangan maydon yoki CPV tizimlarida energiya olish mutlaqo zarur bo'lmasa, tarixan keng miqyosda kamroq tarqalgan).

- *Yerdan foydalanish:* panellar egilganda bir-biriga soya solmaslik uchun kuzatuvchilar masofani talab qiladi. Bir o'qli kuzatuvchilar odatda o'rnatilgandan bir oz uzoqroqda joylashgan (ayniqsa, agar ular juda ko'p egilgan bo'lsa, siz quyoshning past burchaklarida bir qatorni soya qilishni xohlamaysiz). Ikki o'qli trekerlar ko'pincha ko'proq masofani talab qiladi, chunki ular ko'p burchaklarga yo'naltirilishi mumkin, shu jumladan potentsial uzunroq soyalar. GSES tomonidan olib borilgan tadqiqot yiliga ~ 3 GVt /soat ishlab chiqarish misolini ko'rsatdi, statsionar tizim uchun $\sim 22,257 \text{ m}^2$, bitta o'q uchun $\sim 26,709 \text{ m}^2$ va ikki o'q uchun $\sim 51,395 \text{ m}^2$ kerak bo'ladi - ikki o'q bir xil energiya uchun belgilangan yer maydonidan ikki baravar ko'proq talab qilinadi, oraliq talablari tufayli [24]. Bu asosiy e'tibor: agar er cheklangan bo'lsa, ba'zida ikki o'qli kuzatuvchilarni yoyishdan ko'ra ko'proq qattiq panellarni qo'shish yaxshiroqdir. Biroq, bu misolda, ikki o'qli energiya maqsadiga erishish uchun sezilarli darajada kamroq panellar kerak edi (sabit uchun 5292 modul va 6930 moduli) [24], lekin har bir kuzatuvchiga juda ko'p joy kerak edi. Shunday qilib, agar er juda qimmat bo'lsa, ikki eksa noqulay bo'lishi mumkin; modullar qimmat, lekin er arzon bo'lsa, ikki o'qli kamroq modullardan samaraliroq foydalanish mantiqiy bo'lishi mumkin.
- *Foydalanish holatlari:* Ruxsat etilgan tizimlar ko'pgina kichik o'rnatishlar va xarajatlarni minimallashtirish muhim bo'lgan ko'plab yirik qurilmalar uchun standartdir. Bir o'qli quyoshli hududlardagi foydali quyosh fermalarida juda mashhur (masalan, AQSh, Hindiston, Avstraliyadagi katta quyosh energiyasining aksariyati ertalab va kechki cho'qqilarda ishlab chiqarishni oshirish uchun bir o'qli kuzatuvchilardan foydalanadi, bu ham ko'pincha talabga mos keladi). Ikki o'qli trekerlar ba'zi hollarda qishki ishlab chiqarishni maksimal darajada oshirishga harakat qiladigan yuqori kenglikdagi saytlarda yoki ko'proq konsentrlangan PV (CPV) va quyosh termal (konsentrlangan quyosh energiyasi) da qo'llaniladi, chunki ular mutlaqo to'g'ridan-to'g'ri normal hizalanishni talab qiladi (CPV modullari to'g'ridan-to'g'ri quyosh nuriga muhtoj bo'lgan linzalar/oynalardan foydalanadi). SmartFlower - uy-joy bezaklarida foydalanish uchun mashhur ikki o'qli mahsulot - u gul kabi ochiladi va quyoshni ikki o'qda kuzatib boradi (ixcham maydonda ko'proq energiya ishlab chiqarishni maqsad qilgan). Yana bir kontekst - bu *agrivoltaika* bo'lib, panellar ikki o'qli bo'lib, ba'zida ma'lum vaqtlarda ekinlarni soya qilmaslik uchun panellarni siljitadi.

Ikki o'qli trekerlarning mexanik va boshqaruv komponentlari

Ikki eksa kuzatuvchi tizimi bir nechta mexanik va boshqaruv elementlarini o'z ichiga oladi:

Mexanik Komponentlar :

- **O'rnatish tuzilishi:** Odatda bir yoki bir nechta quyosh panellarini ushlab turadigan mustahkam ramka. Ikki o'qli trekerlar bitta katta panelni (CPV uchun idish shakli kabi) yoki ramkada bir nechta panellarni (fotovoltaik izdoshlarda keng tarqalgan, masalan, qutbdagi 10-20 panelli ramka) ushlab turish uchun mo'ljallangan. Struktura ikki gradusda harakatlanishi kerak: azimut aylanishi (odatda vertikal o'q atrofida) va egilish (gorizontal o'q atrofida). Ba'zi dizaynlarda *gimbalga o'xshash* tartib yoki burilish balandligi (teleskop qanday o'rnatilishi kabi) ishlatiladi.
- **Aktuatorlar:** Dvigatellar yoki aktuatorlar harakatni boshqaradi. Odatda, bitta o'q (azimut) butun yuqori yig'ilishni aylantirish uchun qutbning tagida **aylanadigan haydovchi yoki tishli dvigateldan** foydalanishi mumkin . Boshqa o'q (qiyshash) ko'pincha panel ramkasini yuqoriga va pastga egish uchun **chiziqli aktuator** (elektr piston) yoki vites qutisi bilan aylanadigan aktuatordan foydalanadi [23] . Aktuatorlar shamol yuklarini ko'tarish uchun etarlicha kuchli bo'lishi kerak. Ular odatda sekin harakat qiladilar (to'liq diapazonni bosib o'tish uchun bir necha soatdan ortiq), shuning uchun tezlik muhim emas, lekin moment va ushlab turish kuchi.
- **Rulmanlar va viteslar:** Har bir o'qda silliq aylanish imkonini beruvchi rulmanlar mavjud. Ko'pgina tizimlarda azimut uchun katta burilishli rulmanlar qo'llaniladi. Vites qutilari yoki vintli uzatmalar vosita harakatini panel harakatiga aylantiradi, ko'pincha doimiy quvvatsiz pozitsiyani ushlab turish uchun yuqori vites nisbati bilan (shuning uchun shamol panellarni orqaga surmaydi).
- **Qo'llab-quvvatlash ustuni yoki poydevori:** Ikki o'qli kuzatuvchilar ko'pincha betonga o'rnatilgan bitta po'lat ustunda (poydevor turi uchun). Panellar turli burchaklarda joylashganida, bu ustun nafaqat statik og'irlikni, balki shamolning dinamik kuchlarini ham ko'tarishi kerak. Poydevor egilish va burilishga qarshi turishi kerak. Ba'zi dizaynlarda kattaroq ramkalar uchun truss yoki to'rtta ustunli tayanch ishlatiladi.
- **Shamoldan himoya qilish mexanizmlari:** Kuchli shamollar kuzatuvchilarning dushmanidir. Mexanik jihatdan tizimlar ko'pincha **to'xtash joyiga ega** (masalan, gorizontal yoki shamol profilini minimallashtiradigan ma'lum bir egilishda), ular chegaradan yuqorida shamol aniqlanganda harakatlanadi. Shamolda tebranishlarni oldini olish uchun dizayn amortizatorlar yoki amortizatorlarni o'z ichiga olishi mumkin. Bundan tashqari, anemometrlar (shamol tezligi sensorlari) boshqaruv tizimiga kiradi; Agar shamol, aytaylik, 15 m/s dan oshsa, boshqaruvchi shikastlanish xavfini kamaytirish uchun barcha treklarni darhol joylashtirishga (odatda tekis yoki

shamolga qarab, dizaynga qarab) siljitishi mumkin. Mexanik **to'xtash joylari** yoki tormozlar kuzatuvchining xavfsiz burchaklardan tashqariga chiqishini oldini olish yoki ekstremal hodisalar paytida uni qulflash uchun mavjud bo'lishi mumkin.

- **Kabel va bo'g'inlar:** Moslashuvchan kabel tashuvchilar yoki aylanuvchi bo'g'inlar treker harakatlanayotganda elektr kabellarini panellarga o'tkazadi, bu esa simlarning chalkashmasligini yoki charchamasligini ta'minlaydi. Bular kerak bo'l ob-havoga chidamli .

Boshqarish komponentlari:

- **Tekshirish moslamasi:** Har bir treker yoki har bir trekerlar guruhida ko'pincha mikrokontroller yoki PLC (Programmable Logic Controller) - o'tish burchaklarini belgilaydigan va motorlarni mos ravishda boshqaradigan boshqaruvchi mavjud [30] . Tarqalgan dizaynlarda har bir treker o'zining kichik boshqaruviga ega va sinxronizatsiya yoki monitoring uchun markaziy tizim bilan bog'lanishi mumkin. Tekshirish moslamasi quyosh holatini saqlaydi yoki hisoblaydi va buyruqlar berish uchun uni joriy burchakka (datchiklar yoki kodlovchilardan) solishtiradi.
- **Datchiklar:** Boshqarish uchun sezishning ikkita asosiy yondashuvi mavjud: ochiq tsikl (hisoblash asosidagi) va yopiq pastadir (sensorga asoslangan). Ochiq tsikli tizimda boshqaruvchi kerakli azimut va balandlik burchaklarini hisoblash uchun ma'lum vaqt, sana va joylashuv (qattiq kodlangan yoki GPS orqali olingan bo'lishi mumkin) bilan algoritmdan (astronomik hisoblar) foydalanadi [23] . Keyin u nishonga qachon yetib kelganini bilish uchun vosita enkoderlari yoki joylashuvni qayta aloqa sensorlari yordamida trekerni o'sha burchaklarga o'tkazadi. Bu quyoshni to'g'ridan-to'g'ri kuzatishni talab qilmaydi; u hisob-kitobga ishonadi (bu odatda $<0,01^\circ$ ga juda to'g'ri keladi). Yopiq tsikli tizimda yorug'lik datchiklari qo'llaniladi: ko'pincha kvadrant konfiguratsiyasida (shimoliy, janubiy, sharqiy, g'arbiy datchiklar) joylashtirilgan fotodiodlar yoki fotorezistorlar to'plami yoki bir usulda bo'lgani kabi, yuzlarida sensorlar bo'lgan "radiometrik kub" [31] . Keyin kuzatuvchining boshqaruvchisi panellarni yorug'lik sensori chiqishlari muvozanatlashguncha harakatga keltiradi - quyosh markazlashganini anglatadi [23] . Har bir usul yuqorida aytib o'tilganidek, ijobiy / salbiy tomonlarga ega. Ba'zi ilg'or trekerlar gibridan foydalanadilar: ular astronomik joylashuvni asosiy chiziqli sifatida ishlatadilar va keyin har qanday noto'g'ri hizalanish yoki egiluvchanlikni tuzatish uchun sensorli fikr-mulohazalarni aniq sozlashadi.
- **Joylashuv bo'yicha fikr-mulohazalar:** Agar sof astronomik nazoratdan foydalansangiz ham, haqiqiy burchak haqida fikr-mulohazalarga ega bo'lish juda muhim - bu motorlardagi enkoderlar (burchakni beruvchi aylanuvchi enkoderlar) yoki joriy egilish burchagini beruvchi potansiyometrlar/burilish sensorlari orqali bo'lishi mumkin. Fikr-mulohaza boshqaruvchiga aniq

sozlash imkonini beradi, shuningdek, agar sirpanish sodir bo'lsa, kalibrlash imkonini beradi.

- **Drayvni boshqarish:** boshqaruvchi odatda motor drayverlarini yoki motorlarni har ikki yo'nalishda quvvatlantirish uchun o'rni o'z ichiga oladi. Ba'zi trekerlar shahar motorlaridan, boshqalari esa AC yoki step motorlaridan foydalanadilar. Nozik nazorat qilish uchun step motorlar yoki servo motorlar ideal (ular aniq miqdorni harakatga keltirishi mumkin). Oddiyroq tizimlar chegara tugmasi yoki burchakka erishilgunga qadar ishlaydigan DC motorlardan foydalanishi mumkin. Dvigatelni boshqarishda to'xtab qolishni ham hisobga olish kerak (masalan, agar vosita harakat qilmoqchi bo'lsa, lekin kuzatuvchi bloklangan yoki kuchli shamolda bo'lsa, to'xtash oqimi yuqori bo'lishi mumkin, shuning uchun oqimni cheklash yoki kesish kerak).
- **Markaziy nazorat:** Yuzlab kuzatuvchilarga ega quyosh fermasida markaziy nazorat tizimi ularni asosan shamolda joylashtirish yoki SCADA bilan aloqa qilish uchun muvofiqlashtirishi mumkin. Shuningdek, u orqaga qaytishni ham amalga oshirishi mumkin (bir o'qda orqaga qaytish - quyoshning past burchaklarida to'liq kuzatilmaslik orqali qatorlararo soyalanishni oldini olish strategiyasi; ikki o'q uchun, agar masofa etarli bo'lmasa, qatorlararo soya ham paydo bo'lishi mumkin, shuning uchun kerak bo'lganda shunga o'xshash strategiyadan foydalanish mumkin). Markaziy tizim, shuningdek, ishlash ma'lumotlarini to'plashi mumkin (masalan, har bir kuzatuvchida nurlanish sensori bo'lsa, ular haqiqiy quyosh nurini o'lchash uchun ishlatilishi mumkin va hokazo).

Boshqarish algoritmlari: Ikki o'q uchun asosiy algoritm quyosh burchaklarini hisoblashdan iborat. Quyosh **joylashuvi algoritmi** (SPA) kenglik, uzunlik, sana, vaqt (va ixtiyoriy ravishda atmosfera parametrlari) berilgan, quyoshning azimuti va balandligini yuqori aniqlikka beradigan taniqli aniq algoritmdir. Oddiyroq formulalar (sferik astronomiyaga asoslangan) bir oz kamroq aniqlik uchun ham ishlatilishi mumkin, bu odatda kuzatuvchini tekislash uchun mos keladi. Masalan, bitta formuladan balandlikni olish uchun quyoshning egilishi va soat burchagi ishlatiladi:

$$\sin\alpha = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos H,$$

qayerda α quyosh balandligi, ϕ kenglik, δ quyoshning egilishi, H - soat burchagi. Quyosh azimuti A ni quyidagilardan topish mumkin:

$$\sin A = \frac{\cos\delta\sin H}{\cos\alpha}, \quad \cos A = \frac{\sin\alpha\sin\phi - \sin\delta}{\cos\alpha\cos\phi},$$

kvadrantga qarab ba'zi belgi sozlamalari bilan. Bu tenglamalar Yer-Quyosh pozitsiyasining geometriyasidan kelib chiqadi. Kuzatuvchi boshqaruvchisi asosan ularni amalga oshiradi yoki kutubxonadan foydalanadi. Ko'pgina kontrollerlar har kuni oldindan yuklangan efemer yoki iterativ hisob-kitoblarga ega.

Keyin boshqaruvchi azimut (masalan, "janubdan 85° sharqqa aylantirish ") va balandlik uchun (" 45° gacha egilish") burchak buyrug'ini chiqaradi. U bu buyruqlarni bir necha daqiqada yangilashi mumkin – trekerlar doimiy harakatga muhtoj emas; odatda har 1-5 daqiqada kichik bosqichlarda harakatlanish sezilarli energiya yo'qotmasdan quyoshni samarali kuzatib borish uchun etarli va bu eskirishni kamaytiradi. Ba'zi kuzatuvchilar hatto soatiga bir necha marta diskret qadamlar bilan harakat qilishadi.

Nazorat qilishda muhim: trekerning haddan tashqari oshib ketmasligi yoki tebranmasligini ta'minlash. Ba'zilar burchakka silliq yaqinlashish uchun dvigatelida PID boshqaruvidan foydalanadilar. Boshqalar shunchaki sekin tezlikka ega, shuning uchun bu muammo emas.

Orqaga o'tish (ko'p qatorli o'rnatishlar uchun): Agar ikki o'qli trekerlar bir-biriga yaqin bo'lsa, quyosh past bo'lganda biri boshqasiga soya qilishi mumkin. Orqaga kuzatish algoritmlari qo'shnilarning soyasini kamaytirish uchun trekerlarni ataylab bir oz noto'g'ri sozlash. Bu bitta eksa qatorli o'rnatishlarda ko'proq uchraydi. Ikki o'qli fermalarda ular odatda etarlicha bo'sh joy ajratadilar yoki soyalar minimal bo'lishi uchun joylashadilar. Agar kerak bo'lsa, nazorat qo'shnilarning xabardorligini o'z ichiga olishi mumkin.

Xavfsizlik boshqaruvlari: haddan tashqari aylanishni oldini olish uchun chegara kalitlari (masalan, kabellarni juda uzoqqa burishning oldini olish uchun azimut 270° oraliq'ida cheklangan bo'lishi mumkin va hokazo), egilish chegaralari (agar dizayn ruxsat bermasa, gorizontaldan tashqariga egmaslik uchun). Shuningdek, texnik xizmat ko'rsatish uchun qo'lda boshqaruv elementlari - masalan, texnik kuzatuvchini unga xizmat ko'rsatish uchun ma'lum bir holatga qo'yishi mumkin (va uni harakatlanishini blokirovka qilish).

Quyoshli kundagi nazorat ketma-ketligini tasvirlash uchun: Tongda, agar astronomikdan foydalansangiz, kuzatuvchi quyosh azimutini ko'tarilishidan oldin ham biladi (ufq ostida). Ko'pincha kuzatuvchilar tunda g'arbga qarab "*uxlaydilar*" yoki *tekis joylashadilar*. Ba'zilar quyosh chiqishi uchun oldindan joylashish uchun dasturlashtirilgan (ya'ni tong otishidan oldin sharqiy ufq holatiga o'ting). Keyin quyosh chiqishi bilan u kuzata boshlaydi, azimut bo'ylab harakatlanadi va kun davomida shunga mos ravishda egiladi. Quyosh botganda, quyosh ufq ostida bo'lgandan so'ng, ba'zi trekerlar qayta ishga tushishi mumkin (ertasi kuni ertalab sharqqa qaytib, to'g'ri burchakka o'ting). Boshqalar oxirgi holatda qolishi va keyin orqaga qaytishi mumkin. Turli xil strategiyalar mavjud. Agar kuchli shamol kunduzi bo'lsa, shamol datchiklari barcha kontrollerlarni egilish burchagiga o'tishga undaydi (egiluvchanlikni kamaytirish uchun tekis gorizontal yoki shamol o'tishi uchun ba'zan to'g'ridan-to'g'ri vertikal - optimal burchak burchagi dizaynga qarab farq qilishi mumkin). Shamol pasaygach, ular kuzatishga qaytadilar.

*Gallop*ing oldini olish uchun mustahkam nazorat zarurligini anglatadi . Agar shamol ura va panel tebranishni boshlasa, boshqaruv uni namlashi kerak bo'lishi mumkin (ba'zi trekerlar motorlar yordamida faol dampingga ega, boshqalari faqat mexanik dampingga tayanadi).

Boshqaruvdagi texnik xizmat ko'rsatish jihatlari: Elektronika (kontrollerlar, sensorlar) ob-havoga chidamli bo'lishi kerak (ko'pincha IP65 muhofazasi, keng

haroratga chidamlilik). Ular odatda zavodning o'z kuchidan quvvatlanadi (kichik o'zgaruvchan tok yoki doimiy oqim). Ba'zi mustaqil trekerlar kichik PV panel va batareyaga ega bo'lib, ularning motorlari va kontrollerlarini quvvatlantirish uchun har bir trekerni tarmoqdan mustaqil qiladi - tarmoqdan tashqari yoki oddiyroq simlarni ulash uchun foydalidir.

Quyoshni kuzatish uchun algoritmlar va optimallashtirish

Biz boshqaruvdagi algoritmlarga to'xtalib o'tdik; Bu erda biz quyoshni kuzatish va burchaklarni optimallashtirishning nazariy yondashuvlariga e'tibor qaratamiz:

Astronomik algoritmlar: Ta'kidlanganidek, ular vaqt va joylashuv asosida quyosh o'rnini aniq hisoblashga tayanadi. Quyoshning joylashuvi ikki burchak bilan belgilanadi: quyosh balandligi (yoki zenit 90° - balandlik) va quyosh azimuti. Ikki o'qli kuzatuvchining maqsadi panel normal va quyosh nurlari orasidagi burchakni minimallashtirishdir (ya'ni, bu burchakni 0 da ushlab turing). Boshqacha qilib aytganda, panelning sirt egilishi = quyosh balandligi va panelning kompas yo'nalishi = quyosh azimutini o'rnatish (masalan, panel azimuti 0 = shimoliy yarim sharda janubga qarab). Aksariyat kontrollerlar NOAA ning Quyosh joylashuvi algoritmi yoki hatto $0,01^\circ$ dan yuqori aniqlikka ega oddiy quyosh geometriyasi formulalari kabi e'lon qilingan algoritmlardan foydalanadilar - bu yetarlicha, chunki 1° ning kichik noto'g'ri moslashuvi $\cos 1^\circ \approx 0,9998$, ahamiyatsiz yo'qotishga olib keladi. Ushbu algoritmlar ko'pincha mahalliy vaqtni haqiqiy quyosh vaqtiga (uzunlik va vaqt tenglamasini hisobga olgan holda) aylantirishni, yil kunidan egilish d ni , vaqt bo'yicha H soat burchagini va hokazolarni hisoblashni talab qiladi.

Energiyani to'plashni optimallashtirish uchun cheklovlarni ham hisobga olish kerak: agar quyosh ufqqa juda yaqin bo'lsa, ba'zida trekerlar urning soyalanishi yoki samarasizligi tufayli uni ma'lum bir balandlikdan pastroqda quvib o'tishdan bezovta bo'lmasligi mumkin (ular quyosh $<5^\circ$ balandlikda kuzatilmaydi, chunki chiqish baribir past va diffuz hukmronlik qiladi). Bundan tashqari, ba'zi ikki o'qli trekerlar cheklangan diapazonga ega bo'lishi mumkin (ehtimol ular ma'lum bir nuqtadan tashqariga burila olmaydi). Algoritm ularni nozik tarzda boshqarishi kerak.

Sensorga asoslangan algoritmlar: Agar yorug'lik datchiklari ishlatilsa, algoritm odatda sensor muvozanatiga erishilgunga qadar motorlarni harakatga keltiradi. Buni oddiy proportsional nazorat yordamida amalga oshirish mumkin: masalan, agar sharq sensori g'arbiy sensorga qaraganda ko'proq yorug'likni ko'rsa, ular tenglashguncha sharqqa burang [23]. Xuddi shunday, egilish uchun shimol va janubiy sensorlar uchun. Bir qiyinchilik shundaki, quyosh xiralashganda (bulutli) - sensorlar shovqinli yoki teng bo'lishi mumkin, lekin quyosh aslida markazda emas. Shuning uchun ko'pincha gibrid yondashuv qo'llaniladi: bulutli davrlarda taxmin qilingan holatga qayting yoki umumiy yorug'lik past bo'lsa, agressiv ov qilmang. Kungaboqar **algoritmi** (masalan, kungaboqar eng yorqin nurga aylanadi) intuitiv va to'g'ridan-to'g'ri quyosh sharoitida yaxshi ishlaydi.

Gibrid va ilg'or strategiyalar: Ba'zi tadqiqotlar har biridan foyda olish uchun sensor va hisoblashni birlashtirishni taklif qiladi [32]. Misol uchun, faol sensor astronomik 5° atrofida joylashganidan keyin nozik sozlashi mumkin.

Aniqlik va energiya: Shuni ta'kidlash kerakki, ishora qilishda bir necha daraja xatolik juda kichik energiya yo'qotilishiga olib keladi (3° kosinus 0,9986). Shunday qilib, kontrollerlar har doim juda yuqori aniqlikda bo'lishi shart emas; mukammal hizalanishdan $\sim 2-3^\circ$ oralig'ida bo'lish maksimal nurlanishning $>99\%$ hosil qiladi. Kattaroq omil - qo'pol noto'g'ri hizalanishdan qochishdir (masalan, o'nlab darajalar).

Optimallashtirish masalalari: Algoritm orqaga qaytishni ham ko'rib chiqishi mumkin (ayniqsa, bitta o'qda). Ikki o'q uchun, agar panellar oralig'i cheklangan bo'lsa, ertalab/kechqurun quyoshga to'liq qaramaslik o'rniga (bu keyingi qatorga uzun soya tushiradigan past burchak hosil qiladigan) strategiyani o'z ichiga olishi mumkin, bu esa soya uzunligini kamaytirish uchun bir oz tik turishi mumkin. Bu paneldagi nurlanishning bir qismini yo'qotadi, lekin qo'shni qatorlarda ko'proq energiya olish imkonini beradi - tizim darajasida optimallashtirish. Mustaqil ikki o'qli va yetarli masofaga ega tekis erlarda, odatda, orqaga qaytish kerak emas.

Energiya daromadini baholash: Optimallashtirish tomonida har bir tur uchun bir kun/yil davomida hodisa nurlanishini integratsiyalash orqali kutilayotgan energiya daromadi hisoblab chiqiladi. PVsyst yoki NREL SAM kabi asboblari sobit va kuzatuvni taqlid qilishi mumkin. Yuqorida aytib o'tilganidek, odatdagi ishlash ko'rsatkichlari raqamlari: bitta o'qli $\sim +15-25\%$, ikki o'qli $\sim +30-40\%$ va sobit [24]. Bitta aniq ma'lumot: ikki o'q bir o'qga qaraganda $\sim 20\%$ ko'proq hosil qilishi mumkin, bu allaqachon o'rnatilgandan $\sim 20\%$ ni bergan, shuning uchun taxminan 44% o'zgarmasdan (barcha hollarda emas, balki to'p maydonchasi) [27]. Bu ideal stsensariylar uchun $40-50\%$ mintaqaga mos keladi.

Yon tomonlari: Juda baland kengliklarda (masalan, 65° N), yozda quyosh botmasdan osmon atrofida aylanishi mumkin - ikki o'q uni doimiy ravishda kuzatib boradi (pastga tushmaslik uchun yarim tunda quyoshdan pastroq balandliklarda "aylanish" mumkin). Qishda quyosh juda past yoki yo'q. Yozda u erda daromad juda katta bo'lishi mumkin (chunki janubga yo'naltirilgan sobit panellar shimoliy yo'l quyoshini yaxshi ko'ra olmaydi, lekin ikki o'qli bo'lishi mumkin) - lekin bu joy stsensariy.

Astronomik algoritm misoli: Nazoratchilar ko'pincha quyidagi narsalarni ishlatishadi:

Berilgan kenglik ϕ , uzunlik L .

Joriy sana/vaqtini hisoblang $\rightarrow$ Julian kuni yoki shunga o'xshash.

Quyoshning egilishi δ va vaqt tenglamasini hisoblang E .

Quyosh vaqtini hisoblang = standart vaqt + E tuzatish + $4 \cdot (L - L_{stdz})$ (min).

Hisoblash soat burchagi $H = 15^\circ \cdot (\text{ quyosh vaqti } - 12 \text{ soat})$.

Keyin:

balandlik $\alpha = \arcsin(\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H)$

azimut $A = \arctan2(\sin H, (\cos H \cdot \sin\phi - \tan\delta \cdot \cos\phi))$ (tegishli kvadrant sozlamlari bilan janubga yoki shimolga nisbatan burchak hosil qiladi).

Tekshirish moslamasi azimutni trekerning mos yozuviga aylantirishi mumkin (ba'zi trekerlar 0° azimutni Sharqiy va hokazo sifatida belgilashi mumkin). Keyin

motorlarni mos ravishda harakatga keltiradi. Bu, ehtimol, har daqiqada amalga oshiriladi.

Boshqarish tizimining dizayni: Ikki o'qli kuzatuvchi boshqaruvi asosan 2-kirish-2-chiqish tizimi (kerakli va haqiqiy burchaklar). Oddiy boshqaruv yetarli, chunki u sekin harakat qiladi. Ko'pchilik shunchaki bang-bang-dan foydalanadi (sensor muvozanati yoki burchakka erishilguncha harakatlaning). Boshqalar esa to'xtash uchun kichik xatoliklarga bardoshli yopiq tsikldan foydalanadilar. Past tezlikni hisobga olgan holda, haddan tashqari o'tish kabi dinamik boshqaruv muammolari ahamiyatsiz.

Kuzatuvning quvvat iste'moli: Algoritmalar quvvatni tejash uchun keraksiz harakatni kamaytirish uchun ham ishlab chiqilgan bo'lishi mumkin. Kuzatuvchilar oz miqdorda quvvat sarflaydi (dvigatellar vaqti-vaqti bilan ishlaydi). Odatda, trekerning quvvat sarfi har bir motor uchun yiliga bir necha kVt/soatni tashkil qilishi mumkin, bu qo'shimcha quyosh energiyasidan olingan minglab kVt/soat bilan solishtirganda juda kichikdir. Misol uchun, bitta o'qli kuzatuvchi vosita quvvati uchun beradigan qo'shimcha energiyaning $<0,5\%$ ni iste'mol qilishi mumkin. Ikki eksa ikkita dvigatelga ega, biroz ko'proq foydalanish, lekin hali ham kichik. Dvigatellar doimo tebranmasligi uchun boshqaruv o'lik yo'laklarni (masalan, quyosh oxirgi harakatdan beri $<0,5^\circ$ harakatlansa, hali qimirlamang) amalga oshirishi mumkin.

Tizim dizayni bo'yicha mulohazalar va unumdorlik yutuqlari

Ikki o'qli kuzatuvchi tizimining dizayni tarkibiy, ekologik va iqtisodiy omillarni hisobga olishi kerak:

- **Strukturaviy dizayn:** treker eng kuchli shamollarga bardosh berishi kerak. Muayyan shamol tezligida (masalan, joylashuv kodlariga qarab 100 km/soat yoki undan ko'p) boshqaruv muvaffaqiyatsiz bo'lsa ham struktura omon qolishi kerak. Bu ko'pincha panellar tuklar bo'lishi (tekis bo'lishi) yoki strukturaning yuklarni ko'tarish uchun etarlicha qalin ekanligini anglatadi. Paneli baland bo'lgan ikki o'qli trekerlar katta yelkanlar kabi harakat qilishi mumkin, shuning uchun mustahkam poydevor va materiallar talab qilinadi. Kundalik harakat va shamol tebranishlaridan charchoq yuklanishi hisobga olinadi - ulanishlar mustahkam bo'lishi kerak. Ko'pincha po'lat yoki alyuminiy konstruksiyalar zang bo'lmasligi uchun galvanizli yoki qoplangan.
- **Panel tartibi:** Ta'kidlanganidek, trekerlar orasidagi masofa dizayn o'zgaruvchisidir. Hech bo'lmaganda tanqidiy paytlarda soya bo'lmasligi uchun ular bir-biridan ajratilgan bo'lishi kerak. Ba'zi tartiblar yaqinroq masofani ta'minlash uchun trekerlarni qo'zg'atadi yoki ularni balandroq ko'taradi (lekin baland ustunlar qimmatroq). Er reliefi ham muhim: qiyalikda kuzatuvchilar ehtiyotkor bo'lmasa, pastga tushishi mumkin. Ko'pgina dizaynlar tekis maydonni nazarda tutadi va treklarni panjara ichiga tekislaydi.
- **Energiya rentabelligi va erdan foydalanish:** Agar er cheklovchi omil bo'lmasa va bitta panel uchun maksimal ishlab chiqarishni maqsad qilgan bo'lsa, ikki o'q idealdir. Agar er chegaralangan bo'lsa-da, lekin panellar arzon

bo'lsa, trekerlarda kamroq panellar bilan bir xil energiyani olish uchun bir xil egilishga ega bo'lgan qo'shimcha panellarni qo'shish mumkin. O'zaro kelishuv mavjud: trekerlar o'rnatilgan vatt uchun ko'proq energiya ishlab chiqaradi (ko'tarilish koeffitsienti), bu tarmoqqa ulanish quvvati cheklangan joyda foydali bo'lishi mumkin (har bir MWAC o'zaro bog'liqlik uchun ko'proq MVt soat olasiz). Ayrim kommunal loyihalar shu sababli bitta o'qni tanlaydi: ular ertalab va kechqurun ham o'zlarining invertor quvvatidan maksimal darajada foydalanishlari mumkin. Ikki eksa uchun iqtisod yuqori xarajat va texnik xizmat ko'rsatishni oqlashi kerak.

- **Xizmat va ishonchlilik:** Ko'proq harakatlanuvchi qismlar yuqori texnik xizmat ko'rsatishni anglatadi. Agar kuzatuvchi ishlaymay qolsa, potentsial uzilishlar mavjud (garchi bitta kuzatuvchi ishlaymay qolsa, u butun tizimga emas, balki faqat undagi panellarga ta'sir qiladi - mahalliy ta'sir). Texnik va texnik xizmat ko'rsatish guruhlar trekerlarni tekshirishi, murvatlarni mahkamlashi, viteslarni moylashi, datchik kalibrlanishini tekshirishi va hokazolarni tekshirishi kerak. Vaqt o'tishi bilan **noto'g'ri moslashish xavfi ham mavjud** – masalan, agar enkoder driftsa yoki vites qutisi tishini siljitib qo'ysa, kuzatuvchi o'zi o'ylagan joyni aniq ko'rsatmasligi mumkin. Muntazam kalibrlash yoki havola kerak bo'lishi mumkin. Ba'zi trekerlar vaqti-vaqti bilan **uyni topish** tartibini bajaradi: masalan, kuniga yoki haftada bir marta, pozitsiyani o'qishni qayta kalibrlash uchun ma'lum jismoniy ma'lumotnomaga (chegara tugmasi kabi) o'ting.
- **Ishlash yutuqlari:** Ikki o'qli kuzatuvning nazariy yutug'i deyarli barcha to'g'ridan-to'g'ri normal nurlanishni qamrab oladi. Raqamlarda: Agar kenglikdagi sobit janubga egilgan panel X kVt/soat olishi mumkin bo'lsa, ikki o'qli X va qo'shimcha 30-45% olishi mumkin. Masalan, o'rtacha 5 kVt/soat/m²/kunlik insolyatsiyaga ega bo'lgan joyda ikki o'qli egilishda 6,5-7 kVt/m²/kun atrofida bo'lishi mumkin [26]. Haqiqiy dunyo, ta'kidlanganidek, bir o'qli energiya sobit energiyadan ~1,1-1,3 marta, ikki o'qli-sobit energiyadan ~1,3-1,4 baravar ko'p (ba'zi havolalar 1,5 gacha). To'liq ko'tarilish diffuz fraktsiyaga bog'liq. To'g'ridan-to'g'ri quyoshli cho'lda sobit va kuzatuv o'rtasidagi farq juda katta, chunki juda ko'p to'g'ridan-to'g'ri olish mumkin. Bulutli joyda kuzatish unchalik qo'shimcha natija bermaydi, chunki to'g'ridan-to'g'ri komponent kichikdir.

Shunday qilib miqdorni aniqlashimiz mumkin: butunlay tiniq osmon stsenariysida kuzatuvchi har doim to'g'ridan-to'g'ri normal nurlanish (DNI) komponentini to'liq oladi. Ruxsat etilgan egilgan panel eng yaxshi holatda kun davomida birlashtirilgan hodisa kosinusiga o'xshash narsani oladi. Agar quyosh mavsumiy ravishda azimutda $\pm 75^\circ$ va balandlikda $\pm 23^\circ$ harakat qilsa, belgilangan kosinuslarni yo'qotadi. Bu 30-40% ni tashkil qiladi. To'liq tarqoq stsenariyda, kuzatuvchi va sobit ikkalasi ham (gorizontalda tarqalgan * panelning egilish omili va boshqalar) faqat $\pm 5\%$ farq qiladi, agar mavjud bo'lsa. Shunday qilib, haqiqiy daromad = DNI fraktsiyasi * (1/kosinus yo'qotishlari). Ko'pgina iqlimlarda DNI ulushi jami 60-80% ni tashkil qiladi.

- **Tizim integratsiyasi:** Agar trekerlardan foydalanilsa, har bir qator yoki blok o'z boshqaruviga va quvvat sarfiga ega bo'lishi mumkin - dizaynerlar buni elektr dizaynida hisobga olishadi, ehtimol yordamchi quvvat manbai bilan ta'minlash yoki ularni quvvatlantirish uchun pastga tushiruvchi transformator orqali zavodning chiqishidan foydalanish. Ba'zi kuzatuvchilar, shuningdek, elektr quvvati uzilib qolganda zaxira quvvatga yoki qo'lda saqlashga ega bo'lishi mumkin (shunday qilib, agar tarmoq ishlamay qolsa, lekin bo'ron bo'lsa, ularni xavfsiz joyga ko'chirishingiz mumkin).
- **Inverter o'lchamlariga ta'siri:** Trackerlar ko'proq soat davomida yanada yuqori ishlab chiqarishni ishlab chiqaradi. Ertalab va kech tushdan keyin stasionar tizimdan ko'ra ko'proq quvvat. Bu inverter yuklanishiga ta'sir qilishi mumkin: ko'pincha bitta o'qli tizimlarda DC / AC nisbati (katta o'lchamli nisbat) yuqoriroq bo'ladi, chunki treker ishlab chiqarish egri chizig'ini kengaytiradi, bu esa har bir inverterga kesishsiz ko'proq DC o'rnatish imkonini beradi. Ikki o'q uchun siz xuddi shunday DC/AC nisbatini sozlashingiz mumkin. Ishlash samaradorligi potentsial yuqori quvvat omilini anglatadi, ya'ni 1 MVtlik kuzatuvchi zavodi ~ 1,3 MVt stasionar stansiya kabi ko'proq energiya ishlab chiqarishi mumkin.
- **Haqiqiy dunyo ilovalari:** Bir o'qdan kamroq bo'lsa-da, katta ikki o'qli kuzatuvchi qurilmalar mavjud. Ba'zi e'tiborga molik foydalanish ko'plab tarmoqdan tashqari yoki masofaviy tizimlarni o'z ichiga oladi, bu erda ishlab chiqarishni maksimal darajada oshirish muhim ahamiyatga ega (masalan, minimal panelli telekommunikatsiya minoralarini quvvatlantirish). Bundan tashqari, yuqorida aytib o'tilganidek, konsentrlangan fotovoltaiik (CPV) tizimlari ikki o'qli trekerlarni *talab qiladi*, chunki CPV modullari quyosh nurlarini quyosh batareyalariga qaratish uchun linzalardan foydalanadi - ular quyoshning ~0,5 ° tekisligida bo'lishi kerak yoki ular diqqatni yo'qotadi. Amonix va boshqalar kabi kompaniyalar yuqori DNI mintaqalarida ikki o'qli trekerlarda CPV panellarini qurdilar.
- **Iqtisodiyot:** Tarixan ikki o'qli trekerlar panel narxlari qanday tushib ketganini hisobga olib, standart silikon PV uchun iqtisodiy jihatdan samarali emas deb hisoblangan. Ko'pincha ikki o'qli trekerlarni sotib olishdan ko'ra 30% ko'proq panellarni qo'shish arzonroq edi. Biroq, agar quruqlik yoki makon juda cheklangan bo'lsa (masalan, shahar muhiti yoki quyosh daraxti kontseptsiyasi), ikki o'q cheklangan hududdan maksimal energiya olishga yordam beradi. Bundan tashqari, texnik xizmat ko'rsatish xarajatlari ham bor - 20-25 yil ichida motorlar va viteslarni almashtirish talab qilinishi mumkinligini hisobga olish kerak, bu esa ta'mirlash va ta'mirlash xarajatlariga qo'shiladi. Ishonchlilik yaxshilandi; ko'pgina trekerlar aktuatorlarda 10 yildan ortiq xizmat muddati bilan ishlab chiqilgan, ammo baribir.
- **Iqlim va texnik xizmat ko'rsatish:** Qorli hududlarda trekerlarning afzalligi shundaki, ular panellardan qorni to'kish uchun vertikal ravishda egilib qolishi mumkin (hozirda qattiq panellar etarlicha tik bo'lmasa, qor to'plashi mumkin). Shunday qilib, qishda ikki o'qli trekerlar harakatlanish orqali o'zlarini

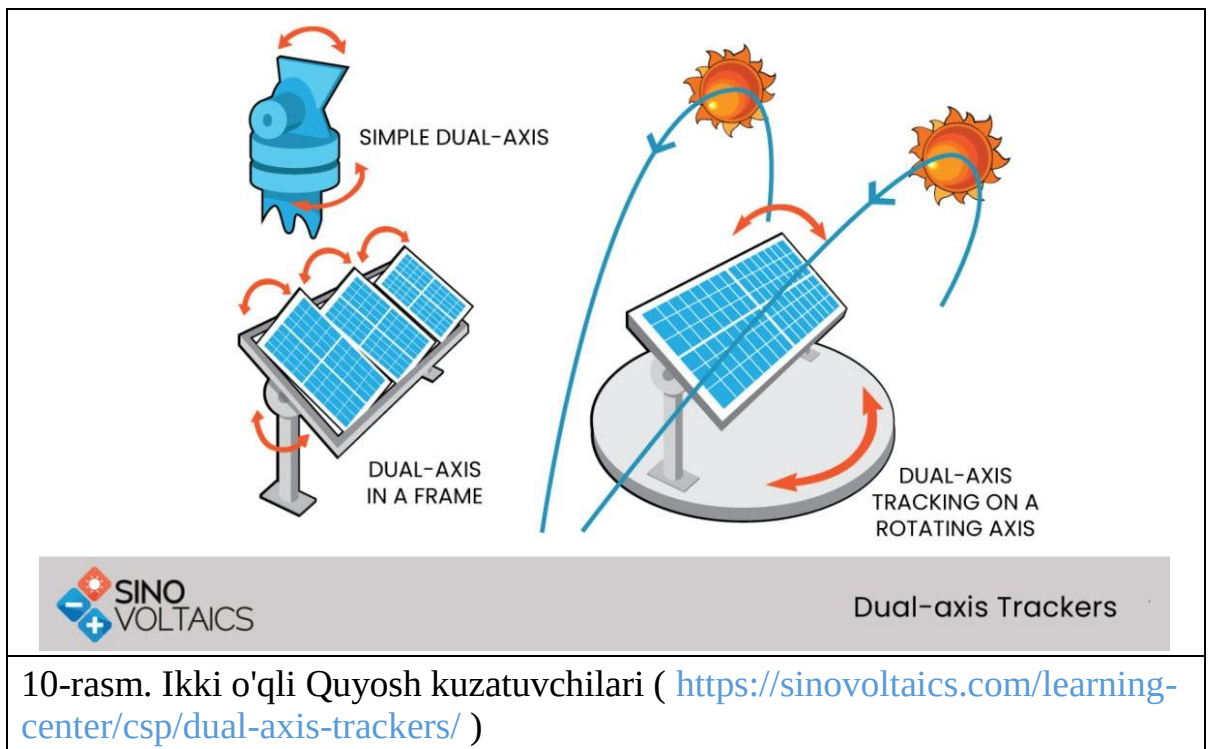
tozalashlari mumkin edi. Ular, shuningdek, qor yog'ishi paytida tekis qolmaslik orqali qor to'planishining oldini olishlari mumkin. Changli joylarda kuzatuvchilar changga yordam bermaydi - aslida tekis joylarda ko'proq chang to'planishi mumkin, lekin ular ko'pincha tunda vertikal ravishda joylashadi, bu esa changning sirpanishiga imkon beradi. Bundan tashqari, vertikal joylashish imkoniyati yomg'ir kelganda yordam berishi mumkin, bu esa yomg'irni yaxshiroq yuvish imkonini beradi.

- **Soya va tarqoq mulohazalar:** Bir oz kamchilik shundaki, gorizontal yo'naltirilgan qo'zg'almas panel butun osmon gumbazidan bir oz tarqalgan yorug'likni ushlab turishi mumkin; quyoshga qaratilgan ikki o'qli kuzatuvchi osmonni kamroq ko'radi (quyosh atrofida) - ammo bu ta'sir unchalik katta emas, chunki quyosh chiqqanda diffuz odatda to'g'ridan-to'g'ridan ancha kamroq bo'ladi va quyosh chiqmaganda (bulutli) trekerlar odatda gorizontal yoki diffuzni ushlash uchun optimal burchakka o'rnatiladi (ba'zi algoritmlar quyosh to'siq bo'lsa, diffuzni optimallashtiradi). To'liq bulutli sharoitda eng yaxshi yo'nalish aslida gorizontal (ko'p osmonni ko'rish uchun); trekerlar past to'g'ridan-to'g'ri yorug'likni aniqlay oladi va diffuz to'plamni maksimal darajada oshirish uchun shunchaki tekislanadi.

Haqiqiy dunyo ilovalari va ikki o'qli kuzatuvchilarga texnik xizmat ko'rsatish

Ilovalar: Ikki o'qli trekerlar turli miqyoslarda mavjud:

- **Kichik o'lchamli (turar-joy/jamoa):** SmartFlower (haykaltarosh 2 o'qli kuzatuvchi) kabi mahsulotlar kichik maydonda maksimal ko'rinish va chiqishni xohlaydigan uylar yoki jamoat inshootlariga mo'ljallangan. Bundan tashqari, ba'zi uy egalari yoki tarmoqdan tashqari qurilmalar quyoshni kuzatib borish va batareyalarni kun davomida doimiy ravishda zaryad qilish uchun ikki o'qli trekerli ustunga bir nechta panellarni o'rnatadilar. Ushbu ilovalar kengaytirilgan quvvat mavjudligini (ertalab va kechqurun) va ba'zan estetik yoki tarbiyaviy jihatini qadrlaydi (quyosh panellarining quyosh bilan harakatlanishini ko'rish qiziqarli bo'lishi mumkin).
- **Tijorat/sanoat:** Uyingizda maydoni cheklangan ba'zi fabrikalar yoki tijorat saytlari, agar tizimli ravishda imkoni bo'lsa, erga yoki tomga ikki o'qli trekerlarni o'rnatgan. Agar energiya narxi yuqori bo'lsa va joy cheklangan bo'lsa, yuqori energiya rentabelligi ROI ni yaxshilashi mumkin.
- **Utility-miqyosi:** Ko'pgina foydali PV bir o'qdan foydalansa-da, ikki o'qli foydali loyihalar mavjud. Ular, odatda, er yetarli darajada ko'p bo'lgan va kenglik o'rta va baland bo'lgan joylarda yoki CPV kabi texnologiya qo'llaniladigan joylarda paydo bo'ladi. Misol uchun, Ispaniya va Italiyada 2010-yillarning boshlarida ba'zi PV zavodlari ikki o'qli trekerlardan foydalanganlar, chunki to'lov tariflari maksimal ishlab chiqarishni mukofotladi va er mavjud edi. Hindistonda bir nechta o'simliklar kichikroq uchastkalardan ko'proq siqish uchun ikki o'qni sinab ko'rdi.



- **Konsentrlangan quyosh energiyasi (CSP) va geliostatlar:** Quyosh issiqlik energiyasida (elektr minoralari yoki Stirling tizimlari kabi) ikki o'qli nometall (geliostatlar yoki idishlar) muhim ahamiyatga ega. Bular ikki o'qli kuzatuvchining bir turi (quyoshni markaziy qabul qilgichga aks ettirish yoki qabul qilgichga qaratish uchun kuzatish). Ushbu maydonlardan olingan saboqlar PV kuzatuvchilarga ham kiradi. Biroq, CSP geliostatlari juda katta bo'lishi mumkin va o'zlarining boshqaruv murakkabliklariga ega (minglab ko'zgularni muvofiqlashtiradi).
- **Agrivoltaics:** Dehqonchilikni ham, energiyani ham optimallashtirish uchun dalalarda ikki o'qli trekerlardan foydalanish bo'yicha tadqiqotlar olib borilmoqda (masalan, ma'lum vaqtlarda ekinlarga ko'proq yorug'lik berish uchun panellarni siljitish). Ikki o'qni hatto ba'zan vertikal yo'naltirish (ekinlarga to'liq quyosh nuri tushishi uchun) yoki kerak bo'lganda soyani ta'minlash uchun dasturlashtirilishi mumkin. Bu dinamik nazorat qilish agrovoltaikada istiqbolli .

Real dunyoda ishlash: Ikki o'qli kuzatuvchi zavodining haqiqiy ma'lumotlari ko'proq "to'rtburchaklar" kunlik ishlab chiqarish egri chizig'ini ko'rsatadi - ertaroq boshlanadi, kunduzi cho'qqisiga chiqadi, lekin tushdan keyin belgilangan darajada keskin pasaymaydi va kunning oxirida cho'ziladi. O'rnatilgan kVt uchun energiya ishlab chiqarish yuqoriroq. Misol uchun, agar statsionar tizim yiliga 1500 kVt/kVt quvvat beradigan bo'lsa, bir xil joyda joylashgan ikki o'q 2000+ kVt/kVt/yil ishlab chiqarishi mumkin. Bu zavodning quvvat koeffitsientini yaxshilaydi (to'liq quvvatda uzluksiz ishlayotganda haqiqiy energiya potentsialga nisbati). Sobit quyosh quvvati 15-20% koeffitsientga ega bo'lishi mumkin; ikki eksa yaxshi quyoshli hududda uni ~20-25% gacha oshirishi mumkin.

Ta'mirlash bilan bog'liq muammolar:

Ikki o'qli trekerlarni saqlash quyidagilarni o'z ichiga oladi:

- **Mexanik tekshiruvlar:** murvatlar tebranish va harakat tufayli bo'shashishi mumkin - muhim murvatlarda (ayniqsa, motorlar, vites qutlari, rulmanli murvatlar va boshqalarni o'rnatishda) davriy momentni tekshirish kerak. Harakatlanuvchi qismlarni (tishli tishlar, aktuator bo'g'inlari) ishlab chiqaruvchining jadvaliga muvofiq moylash (har yili yoki ikki yilda bir marta).
- **Dvigatel/Aktuatorga texnik xizmat ko'rsatish:** Aktuatorlarni tekshirish va ma'lum miqdordagi aylanishlardan keyin vaqti-vaqti bilan almashtirish kerak bo'lishi mumkin. Elektr dvigatellarida cho'tkalar bo'lsa (to'g'ridan-to'g'ri to'g'ridan-to'g'ri to'g'ridan-to'g'ri dvigatellar) ular eskiradi. Ko'pgina dizaynlar endi uzoq umr ko'rish uchun cho'tkasi bo'lmagan motorlar yoki step motorlardan foydalanadi.
- **Sensorni kalibrlash:** Agar quyosh datchiklari ishlatilsa, ular ifloslanishi yoki siljishi mumkin; ularni tozalash va tekshirish kerak. Agar kodlovchilardan foydalansangiz, nol holatini kalibrlash hali ham to'g'ri ekanligiga ishonch hosil qiling. Ba'zida kuchli shamoldan keyin kuzatuvchi biroz sirg'alib ketishi mumkin - boshqaruv tizimi uning o'chirilganligini aniqlashi kerak (ehtimol kutilgan va haqiqiy quyosh sensori o'qishini solishtirish orqali) va qayta kalibrlash imkonini beradi.
- **Elektr ta'minoti:** Harakatlanuvchi tabiat kabelning egiluvchanligini anglatadi - tortish zanjirlaridagi kabellar yuqori egiluvchanlik darajasiga ega bo'lishi kerak, ammo ular hali ham eskirishi mumkin. Kabellarni izolyatsiyaning aşınması yoki kuchlanishi uchun tekshiring. Kabelning azimut o'qi bo'ylab buralishi boshqarilishini ta'minlang (ko'pincha sirpanish halqasi yoki saxiy halqa bilan) - sirpanish halqalari (agar aylanadigan bo'g'in orqali quvvat o'tkazish uchun ishlatilsa) kontaktlari borligi sababli texnik xizmat ko'rsatish yoki almashtirishni talab qiladi.
- **Tozalash va ifloslanish:** Kuzatuvchilar harakat qilgandan keyin kamroq bir xil ifloslanishni to'plashi mumkin. Ammo texnik xizmat ko'rsatish panellarni tozalashni o'z ichiga olishi mumkin, ular har xil burchaklarda kuzatuvchida qiyin bo'lishi mumkin - ko'pincha qo'lda tozalash yoki robotni tozalash uchun trekerga qulay burchakka (gorizontal yoki qulay egilish kabi) buyruq beriladi. Tozalashga yordam berish uchun panel burchagini sozlashingiz yoqimli jihatdir (masalan, yomg'ir kirni yaxshilab yuvib tashlashi uchun pastga egib).
- **Kuzatuvchilarni kuzatish:** SCADA tizimlari ko'pincha treker holatini kuzatib boradi. Agar kuzatuvchi tiqilib qolsa yoki harakatlanmasa (kutilgan vaqtda dvigatelda oqim yo'q yoki pozitsiya haqida fikr o'zgarmasa), signal berilishi mumkin. O&M ekipaji keyin motor ishlamay qolgan yoki biror narsa tiqilib qolganligini biladi. Buni tuzatish juda muhim, chunki tiqilib qolgan kuzatuvchi asosan noto'g'ri burchak ostida sobit panelga aylanadi, potentsial ravishda ko'p energiya yo'qotadi va agar boshqalar boshqacha harakat qilsa,

zo'riqishi mumkin (ba'zi dizaynlarda bir nechta trekerlar drayverni taqsimlaydi, lekin odatda har biri mustaqildir).

- **Ishonchlilik** : Yillar davomida trekerlar qanday tura oladi? Yaxshi dizaynlar yuqori ishonchlilikni namoyish etdi, ammo atrof-muhit rol o'ynaydi. Qum bo'ronlari mexanik qismlarni buzishi mumkin, shuning uchun muhrlanish muhim ahamiyatga ega. Sovuq iqlim aktuatorlarning muzlab qolmasligini ta'minlashni talab qiladi (ba'zilarida isitgichlar mavjud yoki past haroratli moydan foydalanadilar).
- **Dasturiy ta'minot** : Agar muammolar aniqlansa, boshqaruv dasturi yangilanishi kerak bo'lishi mumkin. Agar tarmoqqa ulangan bo'lsa, masofaviy yangilash mumkin. Kiberxavfsizlikni ta'minlash (SCADA bo'limida aytib o'tilganidek, trekerlar ham himoyalanih nuqtasi bo'lishi mumkin, garchi ular odatda maxsus tarmoqda bo'lsa).
- **Nosozlik usullari** : Umumiy ishlamay qolish usullariga quyidagilar kiradi: aktuatorning ishlamay qolishi (bir yoki ikkala o'qda harakatning yo'qolishi, panelni g'alati burchak ostida qoldirishi mumkin - ishlab chiqarishning darhol yo'qolishi va shamol yomon burchakdan kelsa xavf); sensorning ishlamay qolishi (bu noto'g'ri kuzatilishiga olib kelishi mumkin - lekin sensor noto'g'ri bo'lsa, ko'pchilik xavfsiz rejimga o'tadi); aloqa nosozligi (agar bitta kuzatuvchining boshqaruvi markaziy bilan aloqani yo'qotsa, u ichki jadvalda davom etishi yoki muzlatib qo'yishi mumkin - dizaynga qarab - tekshirish kerak); elektr uzilishi (agar tarmoq o'chirilgan bo'lsa, ba'zi trekerlar harakatlanmasligi mumkin - ideal holda ular batareyaning zaxira nusxasiga ega yoki quvvat yo'qolganda xavfsiz holatga o'tishadi).
- **Amal qilish muddati** : Loyiha muddati tugashi bilan (~25 yil) trekerlar katta rekonstruksiya yoki olib tashlanishi kerak bo'lishi mumkin. Panellar 30+ yil xizmat qilishi mumkin, ammo kuzatuvchilar bo'lishi mumkin yoki bo'lmasligi mumkin. Bu foydalanishdan chiqarish yoki qayta quvvatlantirishda murakkablikni oshiradi (yangi modullar bilan almashtirish og'irlik va shamolni qayta hisoblashni talab qilishi mumkin).

Vaziyatni o'rganish: Haqiqiy dunyoda ikki o'qli o'rnatish misoli Frantsiyadagi *Les Mées* quyosh fermasi (ba'zi bo'limlar ikki o'qli bo'lgan deb o'ylayman) yoki Germaniyada turli xil (bu erda yuqori kenglik ikki o'qni to'lov tariflari ostida jozibador qildi). Bular yaxshi samaradorlikni ko'rsatdi, lekin ayni paytda sobit bo'lganlarga nisbatan yuqori texnik va texnik xarajatlarni ko'rsatdi.

Ko'p joylar murakkablik va daromadning yoqimli nuqtasi sifatida bitta o'qni tanladi. Ikki o'q odatda kichik joylarda yoki maxsus yuqori DNI kontekstlarida (masalan, CPV) paydo bo'ladi. Biroq, printsiplar akademik jihatdan muhim bo'lib qolmoqda, chunki quyoshni kuzatish quyosh tutilishini maksimal darajada oshirishning kalitidir va foydalanish vaqtining ortib borishi bilan (masalan, kunning oxirida ishlab chiqarish ba'zi bozorlarda qimmatroq), ikki o'qli bir o'qdan ko'ra ko'proq tushdan keyin energiya etkazib bera olsa (quyoshning pastki qismini ushlab turish uchun egilishni sozlash orqali mumkin) qiziqish uyg'otadi.

Xulosa qilib aytganda, ikki o'qli kuzatuvchilar quyoshni yig'ish uchun yuqori texnologiyali yondashuvni o'zida mujassam etgan: ular panellar va quyosh nuri o'rtasidagi geometrik bog'lanishni maksimal darajada oshirish uchun mexanik va boshqaruv murakkabligini qo'shadilar. Ular mashinasozlik (tuzilmalar va mexanizmlar), boshqaruv tizimlari (quyoshni aniq kuzatish algoritmlari) va iqtisodiy optimallashtirishni (xarajat va daromad) birlashtirgan fanlararo dizayn muammosiga misoldir. Bakalavr darajasidagi muhandislik talabasi uchun ikki o'qli trekerlarni tushunish kinematikani (ikki aylanish erkinligi darajasi), dinamikani (shamol yuklari, inertsia), boshqaruv nazariyasini (quyoshni kuzatish algoritmlari) va fotovoltaik ishlash tahlilini (qanchalik qo'shimcha energiya) o'z ichiga oladi.

Ko'proq texnik xizmat ko'rsatishga qaramay, ikki o'qli kuzatuv kontseptsiyasi har bir panel uchun energiyani maksimal darajada oshirish muhim bo'lgan yoki to'g'ridan-to'g'ri normal moslashishni talab qiladigan texnologiyalar uchun jozibador bo'lib qolmoqda. Texnologiyaning rivojlanishi bilan biz yanada mustahkam va tejamkor kuzatuvchi dizaynlarini ko'rishimiz mumkin, bu esa, agar energiya bozorlari eng yuqori ishlab chiqarishni qo'llab-quvvatlasa, ikki o'qli yanada kengroq qiladi.

Har qanday holatda ham kuzatuv tizimlari, yakka yoki ikkilamchi bo'lsin, mexanik innovatsiyalar panellarning harakatlanuvchi yorug'lik manbai quyosh bilan o'zaro aloqasini yaxshilash orqali **quyosh energiyasi tizimlari samaradorligini qanday oshirishi mumkinligini ta'kidlaydi**. Harakatlanuvchi qismlar va statik soddalik o'rtasidagi kelishuv quyosh fermasini loyihalashda markaziy muhandislik qarori bo'lib qolmoqda.

Adabiyotlar :

- [1] PV tizimining yo'qotishlarini tushunish, 3-qism: Tuproq, qor, tizimning buzilishi | Quyosh Aurora
<https://aurorasolar.com/blog/understanding-pv-system-losses-part-3-soiling-snow-system-degradation/>
- [2] Falastindagi PV panellarini ifloslanish va optimal tozalash chastotasining ta'siri
<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/12/4232>
- [3] Quyosh panellarini tozalash va ularga texnik xizmat ko'rsatish: uy egasi uchun qo'llanma
<https://silfabsolar.com/cleaning-your-solar-power-system/>
- [4] r/solar - Tadqiqot loyihasi - Tozalash menga nima beradi? - Reddit
https://www.reddit.com/r/solar/comments/1ltub7z/research_project_what_does_cleaning_get_me/
- [5] Qanday ajoyib! Quyosh panelini olib yuruvchi #robot #quyosh batareyasini tozalamoqda ...
<https://www.facebook.com/hongkongteatime/posts/how-adorable-a-robot-carrying-a-solar-panel-is-cleaning-the-solar-panel-/812057628087628/>
- [6] Tucker® RTM MINI Quyosh panelini tozalash roboti
<https://tuckerusa.com/products/rtm-series-robot-mini?srsltid=AfmBOoqC8iUx3sQPx6OeaBdzUDjTlPmhXJqnPA3wEmJKzxL6n6K77vST>
- [7] Quyosh batareyasini tozalash: Yangi boshlanuvchilar uchun qo'llanma - Tata Power
<https://www.tatapower.com/blogs/Solar-panel-cleaning--A-beginner-s-guide>
- [8] SCADA tizimlari quyosh PV zavodlariga yordam berishi mumkin
<https://www.dpstele.com/blog/can-scada-system-optimize-solar-pv-plants.php>
- [9] Endi siz SMA qurilmalarini Modbus bilan integratsiya qilishingiz mumkin
<https://www.sma-sunny.com/us/now-you-can-integrate-sma-devices-with-modbus/>
- [10] Sunny Portal ennexOS tomonidan quvvatlanadi | SMA Quyosh
<https://www.sma.de/en/products/energy-management/sunny-portal>
- [11] SMA Sunny Portal • Green Sun Rising Inc.
<https://greensunrising.com/products-services/monitoring/sunny-portal/>
- [12] PV monitoringi ilovasi nima qila olishi kerak
<https://www.solar-log.com/en/news-center/energy-management-blog/solutions/what-a-pv-monitoring-app-should-be-able-to-do-1>
- [13] PVsyst hujjatlari
<https://www.pvsyst.com/help>
- [14] Sunny Home Manager 2.0 | SMA Quyosh
<https://www.sma.de/en/products/energy-management/sunny-home-manager>
- [15] [PDF] SolisCloud Operatsion Manual-UserV1.0.cdr
<https://www.soliscloud.com/SolisCloud%20Operation%20Manual-UserV1.0.pdf>
- [16] <https://solar-display.com/soliscloud-app-10-hidden-features-youre-not-using-yet/>

- [17] Professional foydalanishda Solis Cloud: Solarfox ® displeylari PV monitoringini jamoat joylariga olib keladi - pv jurnali International
<https://www.pv-magazine.com/press-releases/solis-cloud-in-professional-use-solarfox-displays-bring-pv-monitoring-to-public-areas/>
- [18] Soliscloud : Barqaror kelajak uchun quyosh energiyasidan oqilona monitoring
<https://corporatesuccessplan.co.uk/soliscloud-smarter-solar-monitoring-for-a-sustainable-future/>
- [19] Solis - Rewatt Power
<https://rewattpower.com/solis/>
- [20] SCADA nima? Nazorat nazorati va ma'lumotlarni yig'ish
<https://inductiveautomation.com/resources/article/what-is-scada>
- [21] Quyosh stansiyalarida kiberxavfsizlik: quyosh energiyasi manbalarini qanday qilib xavfsiz saqlash kerak — RatedPower
<https://ratedpower.com/blog/cybersecurity-solar-plants/>
- [22] [PDF] Quyosh fermalarida ma'lumotlar yaxlitligiga hujumlarni aniqlash va diagnostika qilish ...
<https://sensorweb.engr.uga.edu/wp-content/uploads/2020/08/li2020detection.pdf>
- [23] Ikki o'qli quyosh kuzatuv tizimi asoslari: Ikki o'qli quyosh kuzatuvchisi
<https://www.solarsquare.in/blog/dual-axis-solar-tracking-system/>
- [24] Kuzatuv - Samaradorliknini oshirishning yana bir varianti - GSES
<https://www.gses.com.au/tracking-systems-yield/>
- [25] [PDF] Ruxsat etilgan bitta va ikki o'qli kuzatuvning ishlashini taqqoslash ...
<https://ases.org/wp-content/uploads/2021/11/Performance-Comparison-of-Fixed-Single-and-Dual-Axis-Tracking-Systems-For-Small-Photovoltaic-Systems-with-Measured-Direct-Beam-Fra>
- [26] Yagona o'q va ikki o'qli quyosh kuzatuvchilari - Shilden
<https://shildenstrut.com/blogs/news/single-axis-vs-dual-axis-solar-trackers/>
- [27] Ikki o'qli quyosh kuzatuvchisi bozorining umumiy ko'rinishi
<https://solarbuildermag.com/featured/overview-of-the-dual-axis-solar-tracker-market/>
- [28] Quyosh kuzatuvchilarining afzalliklari va kamchiliklari - RatedPower
<https://ratedpower.com/glossary/solar-trackers/>
- [29] Qo'lda sozlanishi mumkin bo'lgan qiyosiy texno-iqtisodiy baholash ...
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122006542>
- [30] [PDF] MPC, PID va ANNni birlashtirgan ikki o'qli quyoshni kuzatish texnikasi ...
https://www.jree.ir/article_220669_4d0f6efd588654a5d64ab5d28fd4059c.pdf
- [31] Radiometrik ma'lumotlarga asoslangan ikki o'qli quyosh kuzatuvchisi uchun boshqaruv strategiyasi ...
https://www.epj-pv.org/articles/epjpv/full_html/2023/01/pv230014/pv230014.html
- [32] Ikki o'qli quyosh kuzatuvchisi ish faoliyatini yangi ...
<https://www.pv-magazine.com/2025/09/24/enhancing-dual-axis-solar-tracker-performance-with-new-optimization-techniques/>

[33]

https://iris.uniroma1.it/bitstream/11573/1625157/3/Micheli_Improved%20PV_post-print_2021.pdf

[3 4] Fotovoltaik modulning ifloslanish xaritasi | Fotovoltaik tadqiqotlar | NREL

<https://www.nrel.gov/pv/soiling>

[3 5] HSU Soiling Model – PV Performance Modeling Collaborative (PVPMC)

<https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/1-weather-design-inputs/shading-soiling-and-reflection-losses/soiling-losses/hsu-soiling-model/>

Content:

Kirish.....	
1. Yupqa qatlamli Quyosh elementlari	18
1.1. Har xil turdagi Quyosh elementlari uchun bosib chiqarish texnikasi	35
2. Passivlashtirilgan Emitter va orqa kontaktli (PERC) Quyosh elementlari	55
2.1. Geteroo'tishli Quyosh elementlari	80
3. Ko'p o'tishli Quyosh elementlari	103
4. Ikki tomonli Quyosh elementlari	129
5. Perovskite Quyosh elementlari	158
5.1. Orqa kontaktli(BC) Quyosh elementlari	199
6. Boyoqqa sezgir Quyosh elementlari (Dye-Sensitized solar cells)	219
7. Organik Quyosh elementlari	251
8. Shaffo Quyosh panellari	288
9. Shamol energiyasi	318
10. Quyosh panellarini texnik xizmat ko'rsatish:	
Quyosh panellarini tozalash. SCADA va IT xizmatlari orqali quyosh panellarini boshqarish. Ikki o'qli trekerlar (nishablik va azimut burchagini optimallashtirish) yordamida quyosh panellarining yo'nalishini sozlash	359