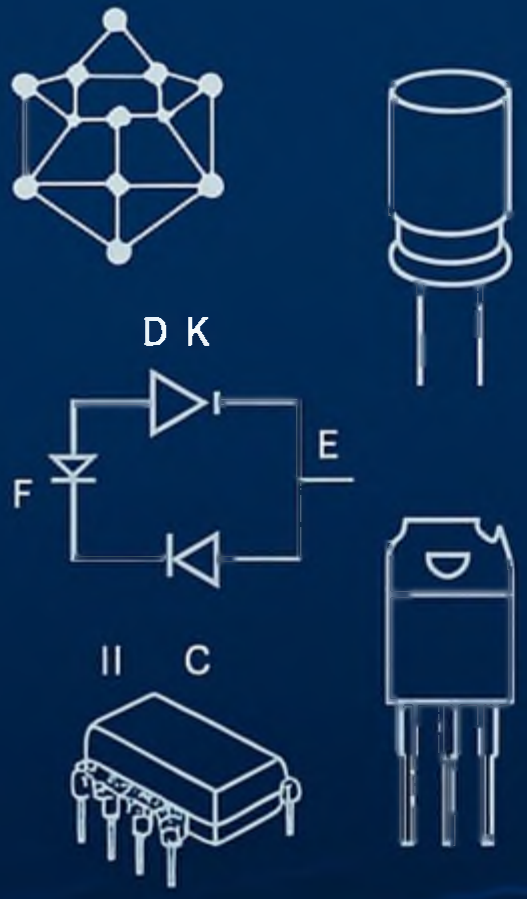
Co-funded by the European Union

DEBSEUz

Q.A. Ismaylov, X.U. Kamalov, M.A. Askarov

ELEKTRON-TEXNIK MATERIALLAR VA ELEMENTLAR



Nukus - 2025

Co-funded by the European Union

DEBSEUz

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY TA’LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

BERDAQ NOMIDAGI QORAQALPOQ DAVLAT UNIVERSITETI

Q.A. Ismaylov, X.U. Kamalov, M.A. Askarov

ELEKTRON-TEXNIK MATERIALLAR VA ELEMENTLAR

Darslik

Nukus – 2025

Ismaylov Q.A., Kamalov X.U., Askarov M.A. **Elektron-texnik materiallar va elementlar: Oliy o‘quv yurtlari uchun darslik.** – Nukus 2025, 147-bet.

Mazkur darslik (101128871-ERASMUS-EDU-2023-CBHE) Yevropa Ittifoqi dasturlari – DEBSEUz “O‘zbekistonda quyosh energetikasi bo‘yicha bakalavrlar uchun maqsadli ta’lim dasturini ishlab chiqish” loyihasi doirasida bajarilgan bo‘lib, unda zamonaviy asbobsozlik, elektrotexnika va radioelektronikada qo‘llaniladigan elektrotexnik materiallar va elementlar haqida asosiy ma’lumotlar berilgan. Darslik zamonaviy elektrotexnika materiallarining asosiy guruhlari: o‘tkazgichlar, dielektriklar, yarimo‘tkazgichlar va quyosh elementlarida qo‘llaniladigan materiallarning umumiy tavsifini beradi. Har bir materiallar guruhining kristall tuzilishidan tortib elektrofizik va optik xususiyatlar, ularda kechadigan hodisalarning fizik tabiati o‘rganilib, materiallarni olish texnologiyasi va ularni elektron qurilmalarda va quyosh elementlarida qo‘llash texnologiyalari yoritilgan.

Darslik oliy ta’lim muassasalari bakalavriat va magistratura yo‘nalishlari bo‘yicha “Qayta tiklanuvchi energiya manbalari”, “Energetika”, “Elektrotexnika” va boshqa tegishli mutaxassisliklar talabalari uchun mo‘ljallangan.

Taqrizchilar:

Kamalov A.B. – Ajiniyoz nomidagi Nukus davlat pedagogika instituti Fizika o‘qitish metodikasi kafedrasi mudiri, fizika-matematika fanlari doktori, professor.

Ataubaeva A.B. – Berdaq nomidagi Qoraqalpoq davlat universiteti Yarimo‘tkazgichlar fizika kafedrasi dotsenti, fizika-matematika fanlari doktori, dotsent.

KIRISH

Zamonaviy texnologik taraqqiyotning ajralmas qismlaridan biri bu – elektron texnika va uning asosini tashkil etuvchi materiallar bo‘lib, texnologiyalar rivoji va raqamli iqtisodiyotga o‘tish jarayonida elektron-texnik materiallar va elementlarning ahamiyati ortib bormoqda. Elektr qurilmalari, mikroelektronika, avtomatlashtirish tizimlari, optoelektronika va quyosh energetikasi kabi yo‘nalishlarning jadal rivojlanishi elektron-texnik materiallarga bo‘lgan talabni yanada oshirmoqda. Shu sababli, talabalarning ushbu sohaga oid nazariy va amaliy bilimlarga chuqur ega bo‘lishi, ularning kelajakdagi muhandislik faoliyatida muhim ahamiyat kasb etadi.

Mazkur darslikda elektron-texnik materiallar va elementlarning fizik xossalari, tuzilishi, ularning turli qurilmalarda qo‘llanilishi haqida tizimli ma’lumotlar bayon etilgan. Darslik bakalavriat va magistraturabosqichida tahsil olayotgan talabalar uchun mo‘ljallangan bo‘lib, ularning materialshunoslik, elektronika, yarimo‘tkazgich texnologiyasi va energetika sohalaridagi bilimlarini shakllantirishga xizmat qiladi.

Elektron-texnik materiallar – bu yarimo‘tkazgichlar, dielektriklar, magnit materiallar, o‘tkazgichlar, o‘tao‘tkazgichlar va boshqa ko‘plab moddalar bo‘lib, ular elektronikaning asosiy tarkibiy qismlarini yaratishda qo‘llaniladi.

Darslik quyidagi asosiy bo‘limlarni o‘z ichiga oladi:

- **Moddalarning tuzilishi haqida asosiy ma’lumotlar** – bu bobda moddalarni tashkil etuvchi zarrachalar, kristall panjaralar, atomlararo bog‘lanishlar va ularning material xossalariga ta’siri tahlil qilinadi.
- **O‘tkazgich materiallaridagi fizik jarayonlar va hodisalar** – elektr o‘tkazuvchanlik mexanizmlari, tok tashilishi, haroratga bog‘liqlik kabi masalalar yoritiladi.
- **O‘tkazgich materiallarining asosiy xossalari va qo‘llanilishi** – mis, alyuminiy kabi metallarning elektr va issiqlik o‘tkazuvchanligi, mexanik xossalari hamda amaliy qo‘llanilishi ko‘rib chiqiladi.
- **Yarimo‘tkazgichli materiallardagi fizik jarayonlar va hodisalar** – yarimo‘tkazgichlarda zaryad tashuvchilar harakati, ichki va tashqi kirishmalar, yarimo‘tkazgichlardagi fotoelektron va optik jarayonlar kabilarga e’tibor qaratiladi.
- **Yarimo‘tkazgichli materiallarning asosiy xossalari, texnologik xususiyatlari va qo‘llanilishi** – kremniy, germaniy va boshqa yarimo‘tkazgichlarning elektr xossalari, ishlab chiqarish texnologiyasi, integratsiyalashgan qurilmalardagi roli yoritiladi.
- **Quyosh elementlari uchun elektron-texnik materiallar** – fotoelektrik hodisa, quyosh elementlari uchun xomashyo tanlovi, ularning samaradorligini belgilovchi omillar tahlil qilinadi.

Darslik talabalarga nazariy bilimlar bilan bir qatorda, ularni amaliy yechimlar bilan uyg‘unlashtirish, ilmiy-texnikaviy muammolarga yechim topish ko‘nikmalarini shakllantirishga xizmat qiladi. Mazkur darslik elektronika va materialshunoslik fanlari kesishmasida zamonaviy ta’lim uchun zarur bo‘lgan metodik vosita bo‘lib xizmat qiladi.

Darslik yuqori texnologiyalar sohasida ishlaydigan mutaxassislar, talabalar hamda elektronika va materialshunoslikka qiziqqan barcha uchun mo‘ljallangan. Unda nazariy bilimlar amaliy misollar, diagrammalar va formulalar bilan qo‘shib berilgan. Talabalar ushbu kitob orqali nafaqat elektron materiallarning ishlash tamoyillarini, balki ularni qanday optimallashtirish va yangi qurilmalar uchun qo‘llashni o‘rganadi.

I BOB. MODDALARNING TUZILISHI HAQIDA ASOSIY MA’LUMOTLAR

Moddalarning tuzilishini o‘rganish — zamonaviy materialshunoslik, fizikaviy kimyo, kvant fizika va boshqa ko‘plab tabiiy fanlar uchun asosiy ilmiy yo‘nalishlardan biridir. Har qanday moddaning fizik va kimyoviy xossalari, uni tashkil etuvchi zarrachalar — atomlar, molekulalar, ionlar va elektronlarning o‘zaro ta’siri va tartibga solingan tuzilishiga bevosita bog‘liqdir. Shu sababli, moddalarning ichki tuzilishini chuqur tahlil qilish, ularning makroskopik xususiyatlarini ilmiy asosda tushunish va yangi materiallarni yaratish imkonini beradi.

Ushbu bobda moddalar tabiatini tushunish uchun zarur bo‘lgan asosiy nazariy bilimlar yoritiladi. Dastlab moddalarning tasnifi va ularni tashkil etuvchi atomlarning tuzilishi, atom yadrosi, elektron qavatlari va energetik darajalari haqida umumiy ma’lumotlar beriladi. Atomlararo o‘zaro ta’sirlar natijasida hosil bo‘ladigan kimyoviy bog‘lanishlarning asosiy turlari — kovalent, ion, metall va vodorod bog‘lanishlari ko‘rib chiqiladi. Ushbu bog‘lanishlar moddaning barqarorligi, elektr va issiqlik o‘tkazuvchanligi, mexanik xossalari kabi ko‘plab parametrlarini belgilaydi.

Bundan tashqari, qattiq jismlarning elektron tuzilishini tushuntirishda keng qo‘llaniladigan zonaviy nazariya elementlari ham muhokama qilinadi. Zonaviy nazariya orqali o‘tkazgichlar, yarimo‘tkazgichlar va dielektriklar o‘rtasidagi farqlar asoslanadi hamda bu nazariya elektronlarning energiya zonalariga joylashuvi va ularning harakatini tushuntirishda muhim vosita hisoblanadi.

Umuman olganda, bu bobda keltirilgan ilmiy asoslar moddalarning tabiati, ularning struktura-xossalari bog‘liqligini tushunishda mustahkam poydevor bo‘lib xizmat qiladi va keyingi boblarda keltiriladigan fizik-kimyoviy jarayonlarni chuqur anglashga zamin yaratadi.

1.1-§. Materiallar tasnifi. Atomlarning tuzilishi

Muhandislikda foydalanish uchun minglab materiallar mavjud. Ko‘pgina materiallar ma’lum bir materialning atom bog‘lanish kuchlariga asoslangan uchta sinfdan biriga kiradi. Ushbu uchta sinf metall, keramika va polimerdir. Bundan tashqari, turli xil materiallarni birlashtirib, kompozitsion material yaratish mumkin. Ushbu sinflarning har birida materiallar ko‘pincha kimyoviy tarkibi yoki ma’lum bir fizik yoki mexanik xususiyatlariga ko‘ra guruhlarga bo‘linadi. Kompozitsion materiallar ko‘pincha birlashtirilgan materiallarning turlari yoki materiallarning bir-biriga joylashishi bo‘yicha guruhlanadi. Quyida materiallarning ushbu to‘rtta

umumiy guruhi doirasida keng tarqalgan materiallar tasnifining ba’zilari ro‘yxati keltirilgan.

Metallar. Barcha elementlarning uchdan ikki qismi va sayyora massasining taxminan 24 foizi metallar hissasiga to‘g‘ri keladi. Metallar mustahkamlik, plastiklik, yuqori erish harorati, issiqlik va elektr o‘tkazuvchanlik, qovushqoqlik kabi foydali xususiyatlarga ega. Davriy jadvaldan ko‘rinib turibdiki, ko‘p sonli elementlar metall sifatida tasniflanadi. Quyida keng tarqalgan metallarning bir nechtasi va ularning odatiy ishlatilishi keltirilgan.

1.1-rasm. Oltin quymalari.

Keng tarqalgan metall materiallar:

• Temir/po‘lat qotishmalari mustahkamlikka oid muhim sohalarda qo‘llaniladi.

• Alyuminiy va uning qotishmalari oson shakllanadigan, oson topiladigan, arzon va qayta ishlanadigan bo‘lgani uchun ishlatiladi.

• Mis va mis qotishmalari ularni foydali qiladigan bir qator xususiyatlarga ega, jumladan yuqori elektr va issiqlik o‘tkazuvchanligi, yuqori egiluvchanlik va yaxshi korroziyaga chidamlilik.

• Titan qotishmalari yuqori haroratda (~1000 °F) qo‘llanilganda, komponent og‘irligini kamaytirishda yoki yaxshi korroziyaga chidamlilik talab etilganda mustahkamlik uchun ishlatiladi.

• Nikel qotishmalari yanada yuqori haroratlarda (~1500-2000 °F) qo‘llash uchun yoki korroziyaga yaxshi chidamlilik talab qilinganda ishlatiladi.

• O‘tga chidamli materiallar eng yuqori harorat (> 2000 °F) uchun ishlatiladi.

1.2-rasm. Metallning turlari.

Metallarni metallmaslardan ajratib turadigan asosiy xususiyat ularning bog‘lanishidir. Metall materiallarda erkin elektronlar mavjud bo‘lib, ular bir atomdan ikkinchisiga osonlikcha o‘tadi. Bu erkin elektronlarning mavjudligi metall materiallarning xossalari uchun bir qator chuqur oqibatlarga olib keladi. Misol uchun, metall materiallar yaxshi elektr o‘tkazuvchanlikka ega, chunki erkin elektronlar metall ichida erkin harakatlana oladi. Metallarning tuzilishi haqida keyinroq batafsil to‘xtalib o‘tamiz.

Keramika. Keramika an’anaviy ravishda “kukunsimon materiallardan tayyorlangan, issiqlik ta’sirida mahsulotlarga aylanadigan va qattiqlik, mustahkamlik, past elektr o‘tkazuvchanlik va mo‘rtlik kabi o‘ziga xos xususiyatlarga ega bo‘lgan noorganik, metall bo‘lmagan qattiq jism” deb ta’riflanadi. Keramika so‘zi yunoncha “keramikos” so‘zidan olingan bo‘lib, “kulolchilik” degan ma’noni anglatadi. Ular, odatda, kristall tabiatda bo‘lib, alyuminiy va kislorod (alyuminiy - Al_2O_3), kalsiy va kislorod (kalsiy - CaO), kremniy va azot (kremniy nitrid - Si_3N_4) kabi metall va metallmas elementlar o‘rtasida hosil bo‘lgan birikmalardir.

Hosil bo‘lish usuliga qarab keramika zich va yengil bo‘lishi mumkin. Odatda ular a’lo darajadagi mustahkamlik va qattiqlik xossalarini namoyon qiladi, biroq ko‘pincha ular tabiatan mo‘rt bo‘ladi. Keramika elektr o‘tkazuvchi materiallar yoki izolyatorlar sifatida ham shakllantirilishi mumkin. Ba’zi keramikalar, masalan, o‘ta o‘tkazgichlar, magnit xususiyatlarini ham namoyon qiladi. Shuningdek, ular metallar va polimerlarga qaraganda yuqori harorat va qattiq muhitga chidamlidir. Keramik materiallarning xossalari keng bo‘lganligi sababli, ular ko‘plab sohalarda qo‘llaniladi.

Keramika sanoatini tashkil etuvchi keng toifalar yoki segmentlarni quyidagicha tasniflash mumkin (1.3-rasm):

• Loydan yasalgan konstruktiv buyumlar (g‘isht, kanalizatsiya quvuri, tom va devor plitkalari, mo‘ri qoplamalari va h.k.)

• Oq matolar (kechki ovqat idishlari, pol va devor plitkalari, elektr chinni va boshqalar)

1.3-rasm. Kermikaning turlari.

• O‘tga chidamli materiallar (metall, shisha, sement, keramika, energiyani o‘zgartirish, neft va kimyo sanoatida ishlatiladigan g‘isht va monolit buyumlar)

• Ko‘zoynaklar (yassi shisha (derazalar), konteyner shisha (butilkalar), presslangan va puflangan shisha (kechki ovqat idishlari), shisha tolalar (uy izolyatsiyasi) va takomillashtirilgan/maxsus shisha (optik tolalar),

• Abrazivlar (tabiiy (granat, olmos va boshqalar) va sintetik (kremniy karbidi, olmos, eritilgan glinozyom va boshqalar) abrazivlar materiallarni silliqlash, kesish, sayqallash, ishqalash yoki bosim ostida portlatish uchun ishlatiladi)

• Sementlar (yo‘llar, ko‘priklar, binolar, to‘g‘onlar va boshqalar uchun).

• Mukammal keramika:

- Konstruktiv (kiyim detallari, biokeramika, kesuvchi asboblar va dvigatel qismlari)
- Elektr (kondensatorlar, izolyatorlar, tagliklar, integral mikrosxemalar paketlari, pezoelektriklar, magnitlar va o‘ta o‘tkazgichlar)
- Qoplamalar (dvigatel qismlari, kesuvchi asboblar va sanoat yeyilish detallari)
- Kimyoviy va ekologik (filtrlar, membranalar, katalizatorlar va katalizatorni qo‘llab-quvvatlash).

Keramik materiallardagi atomlar bir-biri bilan kimyoviy bog‘langan bo‘lib, bu haqda keyinroq to‘xtalib o‘tamiz. Qisqacha aytganda, keramik materiallar uchun eng keng tarqalgan ikkita kimyoviy bog‘lanish kovalent va ion bog‘lanishlardir. Kovalent va ion bog‘lanishlar metall bog‘lanishlarga qaraganda ancha mustahkam va umuman olganda, shuning uchun keramika mo‘rt va metallar cho‘ziluvchandir.

Polimerlar. Polimer qattiq jismni ko‘plab kimyoviy bog‘langan qismlar yoki birliklarni o‘z ichiga olgan material sifatida tasavvur qilish mumkin, ularning o‘zi qattiq jism hosil qilish uchun bir-biriga bog‘langan. Polimer so‘zi tom ma’noda “ko‘p qismlar” degan ma’noni anglatadi. Sanoat ahamiyatiga ega bo‘lgan ikki polimer material plastmassalar va elastomerlardir. Plastmassalar – bu shakl berish yoki qoliplash orqali qayta ishlanadigan sintetik materiallarning katta va xilma-xil guruhidir. Alyuminiy va mis kabi metallarning turlari ko‘p bo‘lgani kabi, polietilen va kapron kabi plastmassalarning turlari ham ko‘p. Elastomerlar yoki kauchuklar ularga kuch ta’sir ettirilganda katta miqdorda elastik deformatsiyalanishi va kuch ta’siridan ozod bo‘lganda dastlabki shakliga (yoki deyarli) qaytishi mumkin.

1.4-rasm. Polimerning turlari.

Polimerlar ularni ma’lum sharoitlarda ishlatish uchun jozibador qiladigan ko‘plab xususiyatlarga ega. Ko‘pgina polimerlar (1.4-rasm):

• metall yoki keramikaga qaraganda kamroq zichlikka ega,
• korroziyaning atmosfera va boshqa shakllariga qarshilik ko‘rsatadi
• inson to‘qimalari bilan yaxshi moslashuvchanlikni taklif etadi yoki
• elektr tokini o‘tkazishga juda yaxshi qarshilik ko‘rsatadi.

Polimer plastmassalarni strukturaviy va kimyoviy bog‘lanishiga qarab ikki sinfga bo‘lish mumkin: termoplastlar va termoreaktiv plastmassalar. Termoplastik polimerlar to‘rtta eng muhim xom ashyo - polietilen, polipropilen, polistirol va polivinilxloridni o‘z ichiga oladi. Bir qator maxsus muhandislik polimerlari ham mavjud. “Termoplastik” atamasi shuni ko‘rsatadiki, bu materiallar qizdirilganda eriydi va turli xil qoliplash va ekstruziya usullari bilan qayta ishlanishi mumkin. Shuningdek, “termoreaktiv” polimerlarni eritish yoki qayta eritish mumkin emas. Termoreaktiv polimerlarga alkidlar, amin va fenol smolalar, epoksidlar, poliuretanlar, to‘yinmagan poliefirlar kiradi.

Kauchuk tabiiy polimer hisoblanadi. Biroq, ko‘pchilik polimerlar vodorod va uglerod atomlarining birikishi va ular hosil qiladigan zanjirlarning joylashishini muhandislik yo‘li bilan hosil qilinadi. Polimer molekulasi kovalent bog‘langan atomlarning uzun zanjiri va ikkilamchi bog‘lar bo‘lib, keyin polimer zanjirlari guruhlarini bir-biriga bog‘lab, polimer materialini hosil qiladi. Polimerlar asosan neft yoki tabiiy gaz xomashyosi mahsulotlaridan ishlab chiqariladi, ammo organik moddalardan foydalanish ko‘payib bormoqda. Kevlar deb nomlanuvchi supermaterial texnogen polimerdir. Kevlar o‘q o‘tkazmaydigan nimchalar, mustahkam/yengil ramalar va po‘latdan 20 marta mustahkam bo‘lgan suv osti kabellari uchun ishlatiladi.

Kompozitlar. Kompozit odatda har biri o‘zining o‘ziga xos xususiyatlarini saqlab qoladigan ikki yoki undan ortiq turli xil materiallarning birikmasi sifatida ta’riflanadi, bu esa tarkibiy qismlarning hech biri yolg‘iz o‘zi erisha olmaydigan xususiyatlarga ega yangi materialni yaratadi. Ushbu ta’rifdan foydalanib, muhandislik materiallarining keng doirasi ushbu toifaga kirishini aniqlash mumkin. Masalan, beton portlandsement va to‘ldirgich aralashmasi bo‘lgani uchun kompozitsion hisoblanadi. Shisha tolali list kompozit hisoblanadi, chunki u polimerga kiritilgan shisha tolalaridan tayyorlangan.

1.5-rasm. Kompozit materiallardan tayyorlangan moddalar.

Kompozitsion materiallar ikki fazaga ega. Mustahkamlovchi faza matritsa fazasiga kiritilgan tolalar, varaqlar yoki zarrachalardir. Armatura materiali va matritsa materiali metall, keramika yoki

polimer bo‘lishi mumkin. Odatda, mustahkamlovchi materiallar past zichliklarda mustahkam bo‘ladi, matritsa esa odatda egiluvchan yoki qattiq materialdan iborat bo‘ladi.

Kompozitlarning keng tarqalgan klassifikatsiyalaridan ba’zilari:

- Armaturalangan plastmassalar
- Metall-matritsali kompozitlar
- Keramik-matritsali kompozitlar
- Sendvich tuzilmalari
- Beton

Kompozitsion materiallar ko‘p shakllarda bo‘lishi mumkin, ammo ularni mustahkamlash mexanizmiga qarab uch toifaga bo‘lish mumkin. Bu toifalar dispersiya kuchaytirilgan, zarrachalar kuchaytirilgan va tolalar kuchaytirilgandir. Dispersion mustahkamlangan kompozitlar material matritsasida ikkilamchi zarrachalarning nozik taqsimotiga ega. Bu zarrachalar materialning deformatsiyalanishiga imkon beradigan mexanizmlarga to‘sqinlik qiladi. (Bu mexanizmlar dislokatsiya harakati va sirpanishni o‘z ichiga oladi, ular keyinroq ko‘rib chiqiladi). Ko‘pgina metall-matritsali kompozitlar dispersion kuchaytirilgan kompozitlar toifasiga kiradi. Tolali kompozitlarda tola asosiy yuk ko‘taruvchi komponent hisoblanadi. Shisha va uglerod tolali kompozitlar tolali kompozitlarga misol bo‘la oladi. Agar kompozit to‘g‘ri loyihalashtirilgan va to‘g‘ri tayyorlangan bo‘lsa, u armaturaning mustahkamligini matritsaning qovushqoqligi bilan birlashtirib, hech qanday oddiy materialda bo‘lmagan kerakli xususiyatlarning kombinatsiyasiga erishadi. Ba’zi kompozitlar, shuningdek, mustahkamlik va qattiqlik kabi xususiyatlarni armatura materialining miqdori yoki yo‘nalishini o‘zgartirish orqali osongina o‘zgartirish uchun yeyilish xususiyatiga ega. Salbiy tomoni shundaki, bunday kompozitlar ko‘pincha oddiy materiallarga qaraganda qimmatroq bo‘ladi.

Atom tuzilishi

Bizni o‘rab turgan jismlar juda mayda zarralar – atomlardan tashkil topgan. Qiziq, Koinotning bu “g‘ishtchalari”ning tuzilishi qanday ekan? Ekspertlar bilan birgalikda atom tuzilishi haqidagi zamonaviy ilmiy tasavvurlarni ko‘rib chiqamiz.

Moddaning atom tuzilishi haqidagi taxminlar eramizdan oldin paydo bo‘lgan. Qadimgi Sharq va Qadimgi Gretsiya mutafakkirlari ham butun olamni tashkil etuvchi nihoyatda kichik, keyinchalik bo‘linmaydigan moddiy zarralar mavjudligi haqida fikr bildirganlar.

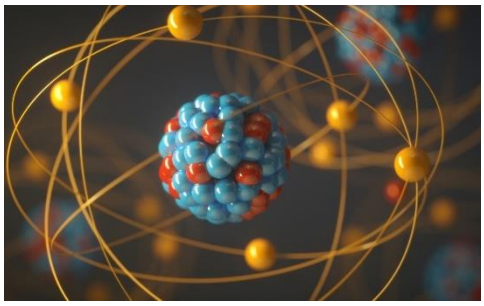
Ulardan eng mashhuri qadimgi yunon faylasufi Demokrit nazariyasidir. Aynan u birinchi bo‘lib “bo‘linmas” degan ma’noni anglatuvchi “atomos” atamasini kiritgan. Demokrit dunyodagi hamma narsa atom va bo‘shliqdan iborat, atomlar abadiy mavjud, ularni hech kim yaratmagan, ular moddiy, shakli, o‘lchami va

og‘irligiga ega, deb hisoblagan. Atomlarning jismlarga birikishi ilgaklar va halqalar yordamida amalga oshadi. Inson ruhi ham silliq shaklga ega bo‘lgan atomlardan tashkil topgan. Atomlar bo‘shliqda faqat to‘g‘ri chiziq bo‘ylab harakatlanadi, shuning uchun insonda erkinlik yo‘q, hamma narsa oldindan belgilangan. Demokritning shogirdi Epikur bu ta’limotni takomillashtirdi va atomlar to‘g‘ri chiziqli yo‘ldan o‘z-o‘zidan og‘ishi mumkin, shuning uchun insonda erkinlik bor, degan taxminni ilgari surdi.

Atom nima?

Hozirgi zamon fani atomni moddaning o‘lchamlari va massasi jihatidan nihoyatda kichik, kimyoviy elementning eng kichik qismi bo‘lgan va uning kimyoviy xossalarini tashuvchi zarracha sifatida ta’riflaydi (1.6-rasm).

Hammasi bo‘lib 118 ta atom ma’lum bo‘lib, ulardan 94 tasi tabiatda uchraydi, qolgan 24 tasi yadro reaktorlari va laboratoriyalarda sun’iy sintez qilingan.

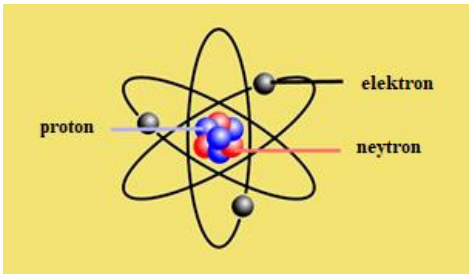


1.6-rasm. Atomning ko‘rinishi.

Atomlar ma’lum massa, o‘lcham va tuzilishga ega. Atomlarning massalari nihoyatda kichik. Masalan, vodorod atomi atigi $1{,}67 \cdot 10^{-24}$ g massaga ega. Atom og‘irligini massaning atom birliklarida o‘lchash qabul qilingan. Bunday birliklardan biri uglerod atomi massasining 1/12 qismiga teng bo‘lib, uning yadrosi tarkibiga 6 ta neytron va 6 ta proton kiradi. Demak, 1 m.a.b. = 1 neytron = 1 proton. Masalan, vodorod atomining yadrosi 1 ta protondan iborat, demak, uning massasi 1 m.a.b. ga teng bo‘ladi.

Atomlarning o‘lchamlari ham kichik bo‘lib, 0,046-0,25 nm (1 nm = 10^{-9} m) oralig‘ida bo‘ladi.

Atom tuzilishi haqida ma’lumotlar



1.7-rasm. Atom tuzilishi.

Atom yadrosi. U atomning markazida joylashadi va uning deyarli butun massasini (99,9%) tashkil qiladi. Shu bilan birga, atom yadrosi uning hajmining atigi bir trillion qismini egallaydi. Ya’ni, ichidagi atom deyarli bo‘sh.

Elektron. Atomning eng aktiv qismi, chunki u doimo harakatda bo‘ladi. U nihoyatda kichik vaznga ega. Masalan, vodorod atomidagi elektronning massasi yadro massasining 0,0005 qismini tashkil qiladi.

Eng yengil va og‘ir atomlar. Tabiiy elementlar haqida gapiradigan bo‘lsak, eng yengili vodorod atomi (uning nisbiy atom massasi 1,00797), eng og‘iri esa uran atomi (238,03) dir.

Atom tarkibi. Atomlar yadro va elektronlardan iborat bo‘lib, ular ba’zan “elektron buluti” deb ataladi. Atom yadrosi proton va neytronlardan tashkil topgan (1.7-rasm).

Elektron (yunoncha “yantar” so‘zidan olingan, 1897-yilda kashf etilgan) manfiy zaryadlangan zarradir. Elektronlar elektron qobiqlar bo‘ylab harakatlanadi.

Proton (yunoncha – “birinchi”, 1919-yilda kashf etilgan) - musbat zaryadga ega bo‘lgan yadro zarrasi.

Neytron (lotincha “na unisi, na bunisi”, 1932-yilda kashf etilgan) - yadroning zaryadga ega bo‘lmagan elementi.

Protonlar va neytronlar birgalikda nuklonlar (yadro zarralari) deb ham ataladi.

Atomlar yadrodagi proton va neytronlar soni bilan farq qiladi. Protonlar soniga qarab, atom Mendeleyev davriy sistemasida tegishli raqamga ega bo‘ladi va biror kimyoviy elementga tegishli bo‘ladi.

Atom yadrosidagi neytronlar soni ushbu elementning izotopini ko‘rsatadi. Izotoplar deb bitta kimyoviy element atomlarining bir xil atom raqamiga, lekin turli xil massaga ega bo‘lgan turlariga aytiladi.

Atom tuzilishining elektron sxemasi. Atom elektr jihatdan neytraldir, chunki yadroning musbat zaryadi yadro atrofida aylanayotgan elektronlarning manfiy zaryadlari yig‘indisiga teng. Ularning harakati elektron qobiqlar bo‘ylab sodir bo‘ladi. Elektronlar va elektron qobiqlarning soni atom yadrosi zaryadining kattaligiga bog‘liq.

Atomlarning tuzilish sxemasi kimyoviy elementlar davriy sistemasida yaqqol ko‘rsatilgan. Misol tariqasida natriy kimyoviy elementini olaylik. Element belgisi lotin harflari (Na) bilan belgilanadi. Nomi o‘zbekcha harflar bilan yoziladi – natriy.

Tartib (atom) raqami (Z) – atomdagi proton va elektronlar soni (***Na*** uchun 11).

Elektronlarning qatlamlar bo‘yicha taqsimlanishi ***Na*** uchun 2, 8, 1 ga teng. Elementning atom massasi (atom og‘irligi, nisbiy atom massasi) – bu atomdagi neytronlar, protonlar va elektronlarning umumiy massasi bo‘lib, m.a.b. ***Na*** da u 22,99. Na atomining elektron konfiguratsiyasi quyidagicha yoziladi: $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^1$, bu yerda 1s – s-elektron orbitalida 2 ta elektron joylashgan birinchi energetik sath; 2s va 2p – ikkinchi energetik pog‘ona bo‘lib, s-elektron orbitasida 2 ta elektron va p-elektron orbitasida 6 ta elektron joylashgan; 3s – s-elektron orbitasida 1 ta elektron joylashgan uchinchi energetik pog‘ona.

Atom tuzilishi modellari

Fan tarixida atom tuzilishining turli modellari ishlab chiqilgan. 1803-yilda Jon Dalton atomni parchalanmaydigan eng kichik moddiy shar sifatida tasvirlaydigan sferik modelni taklif qildi.

1904-yilda Jozef Tompson “Mayizli keks” deb nomlangan modelni yaratdi. Bu modelda atomni ichida manfiy zaryadlangan elektronlari bo‘lgan muayyan musbat zaryadlangan jism deb qaraldi.

1911-yilda Ernest Rezerford o‘tkazilgan tajribalarga asoslanib, atom yadro atrofida orbitalar bo‘ylab elektronlar aylanadigan kichik sayyoralar sistemasiga o‘xshaydi, degan xulosaga keldi. Biroq planetar model klassik elektrodinamika tamoyillariga zid edi, unga ko‘ra harakatlanayotgan elektronlar energiya yo‘qotishi va yadroga tushishi kerak edi.

Nils Bor atomning planetar modelini quyidagi qo‘shimchalar kiritish orqali takomillashtirdi:

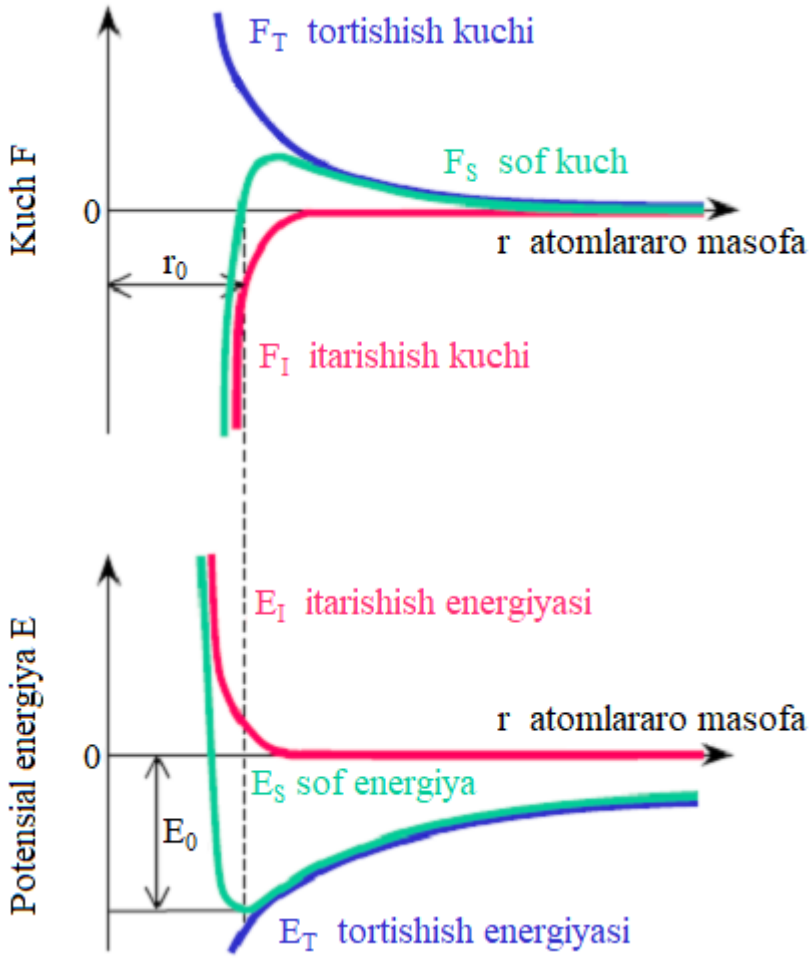
- har bir elektron yadro atrofida faqat qat’iy belgilangan statsionar orbitalar bo‘ylab aylanishi mumkin;
- bunday aylanish jarayonida atom energiya chiqarmaydi;
- energiyaning nurlanishi yoki yutilishi atom bir statsionar holatdan boshqasiga o‘tgandagina amalga oshadi.

Atomning hozirgi zamon modeli kvant-mexanikaviy model deb ataladi. Unda Verner Geyzenbergning noaniqlik va to‘ldiruvchanlik tamoyillaridan foydalaniladi, unga ko‘ra elektron bir vaqtning o‘zida ham zarra, ham to‘lqin bo‘lib, ma’lum orbitalar mavjud emas, elektronlar esa yadro atrofida harakatlanib, elektron bulutini hosil qiladi.

1.2-§. Kimyoviy bog‘lanishning asosiy turlari

Turli elementlarning molekulalar va qattiq jismlarni hosil qilish uchun o‘zaro ta’sir qilish va bog‘lanish usuli ularning elektron tuzilishi bilan chambarchas bog‘liq. Albatta, har qanday turdagi molekula yoki qattiq jism hosil bo‘lishi uchun atomlar orasida o‘zaro tortishish kuchi mavjud bo‘lishi kerak. Biroq atomlarning bir-biriga juda yaqinlashishiga to‘sqinlik qiladigan itarishish kuchlari ham mavjud. Aynan tortishish va itarishish kuchlarining muvozanati qattiq jismdagi atomlarning uch o‘lchamli fazoviy joylashuvini hosil qilishda atomlar o‘rtasida muvozanatli konfiguratsiyani keltirib chiqaradi. Soddalik uchun biz asta-sekin bir-biriga yaqinlashadigan ikkita bir xil atomni ko‘rib chiqishimiz mumkin. Katta masofalarda atomlar orasidagi kuchlar juda kichik bo‘ladi (ya’ni o‘zaro ta’sir potensial energiyasi nolga teng deyish mumkin). Atomlar bir-biriga yaqinlashgan sari o‘zaro ta’sir potensiali ortadi va ularni bir-biriga tortuvchi tortishish kuchlari ishga tushadi. Shuni

qayd qilamizki, matematik nuqtayi nazardan bu energiya manfiy, xuddi atomlardagi elektronlarning bog‘lanish energiyalari kabi va ularni ajratish uchun atomlar ustida ish bajarish kerak. Atomlarning ajralishi bir necha atom diametrlari tartibida bo‘lganda, kristallarning o‘z-o‘ziga qulab tushishiga to‘sqinlik qiluvchi qisqa masofali itarishish kuchlari ishga tushadi. Bu yerda potensial energiya atomlarni yanada yaqinlashtirish uchun ish bajarish kerak degan ijobiy ma’noni anglatadi. Aynan shu qarama-qarshi kuchlar o‘rtasidagi muvozanat yakuniy muvozanatga olib keladi. Haqiqatan ham, atomlar orasidagi tortishish kuchlari ularni elektron bulutlar bir-birini qoplay boshlaguncha tortadi va keyin kuchli itarish kuchlari paydo bo‘ladi, bu esa Pauli istisno prinsipiga mos keladi. Atomlar orasidagi muvozanatli ajralish r_0 ikki kuch bir xil qiymatga ega bo‘lgan joyda sodir bo‘ladi, bu esa minimal potensial energiyaning barqaror konfiguratsiyasini beradi.



1.8-rasm. Zarralar orasidagi o‘zaro ta’sir kuchi va potensial energiyaning ular orasidagi *r* masofaga bog‘liqligi. Potensial energiyaning minimal chuqurligi atomlar orasidagi umumiy E_0 bog‘lanish energiyasiga to‘g‘ri keladi. Muvozanatni ajratish r_0 bilan ko‘rsatilgan.

Biz bu holatni quyidagi munosabat bilan ifodalangan tortishish va itarishish kuchlarining oddiy yig‘indisi sifatida matematik shaklda ifodalashimiz mumkin:

$$U(r) = -\frac{A}{r^n} + \frac{B}{r^m}, \tag{1.1}$$

bu yerda r – atom markazlari orasidagi masofa va A, B, n va m – aynan shu atomlar uchun xos bo‘lgan konstantalar. Bu tenglamaning ko‘rinishi Mi potensiali deb ataladi. Atomlar orasidagi o‘zaro ta’sir kuchini quyidagilardan olish mumkin:

$$F = -\frac{dU(r)}{dr} = -\frac{nA}{r^{n+1}} + \frac{mB}{r^{m+1}}. \tag{1.2}$$

Bu holat 1.8-rasmda tasvirlangan. Potensial energiya minimum bo‘lgan va atomlararo kuch noldan o‘tgan nuqtada muvozanat vujudga kelishini qayd qilib o‘tamiz. Bundan tashqari, muvozanat ($r = r_0$) da $F = 0$ va $U(r)$ = min ekanligini ta’kidlab, atomlarning muvozanatli ajralishini quyidagicha olishimiz mumkin:

$$r_0 = \left(\frac{mB}{nA}\right)^{\frac{1}{m-n}}. \tag{1.3}$$

Buni potensial energiyaga qo‘yib, muvozanat holat potensialini quyidagicha topishimiz mumkin:

$$U(r_0) = -\frac{A}{r_0^n}\left(1 - \frac{n}{m}\right). \tag{1.4}$$

Bu qiymat bog‘langan holatga mos keladigan manfiy hisoblanadi. Bu ikki atomni ajratish uchun zarur bo‘lgan energiya bo‘ladi. Ko‘ramizki, muvozanat holatida tortishish va itarishish kuchlari teng bo‘lishi kerak, ammo ularning mos energiyalari teng emas: $m \neq n$. Haqiqatdan ham atomlarning barqaror birikmalari faqat $m > n$ shartdagina yuzaga kelishi mumkin. Bu itarishish kuchlari tortishish kuchlariga qaraganda qisqaroq masofada bo‘lishi kerakligini aytishning yana bir usuli. Buni shartni qo‘llash orqali ko‘rsatishimiz mumkin:

$$\left[\frac{d^2U(r)}{dr^2}\right]_{r=r_0} > 0. \tag{1.5}$$

Bu shart to‘g‘ridan to‘g‘ri $m > n$ ga olib keladi. Albatta, bu (1.4) tenglamadan ko‘rinib turishi kerak, chunki faqat shundagina U (r_0) bog‘langan holat sharti uchun manfiy bo‘lib qoladi. Yuqoridagilarning juda aniq va misol uchun $m = 12$ va $n = 6$ dan foydalanadi va Lennard – Jons (6 – 12) potensiali sifatida aniqlangan.

Kimyogarlarni oz sonli atomlarning molekula hosil qilish uchun qanday bog‘lanishi qiziqtiradi, qattiq jismlar fizikasida biz asosan bir xil muammo bilan shug‘ullanamiz, garchi ko‘proq atomlar ishtirok etsa ham. Ushbu bo‘limning qolgan qismida biz buni amalga oshiradigan asosiy fizik mexanizmni tasvirlaymiz. Bu yerda biz fizik kuchlar va davriy jadval haqidagi bilimlarimizga tayanamiz. Ushbu mexanizmlarni muhokama qilishdan oldin, bog‘lanish turlaridagi muhim farqni ta’kidlab o‘tamiz: kuchli bog‘lanish elektronlar biror shaklda almashganda (ion, kovalent va metall bog‘lanishlar kabi), kuchsiz bog‘lanish esa elektronlar

elektrostatik kuchlar orqali o‘zaro ta’sir qiladigan dipol momentini hosil qilish uchun atomlarda notekis taqsimlanganda sodir bo‘ladi (vodorod va Van-der-Vaals bog‘lanishlari). Birinchisi kimyoviy bog‘lanish, ikkinchisi esa fizik bog‘lanish deb ataladi. Xuddi shunday farq sirtdagi atomlar uchun ham mavjud bo‘lib, ular elektron almashinuvi bor yoki yo‘qligiga qarab xemosorbsiya yoki fizosorbsiya qilishi mumkin.

Ion bog‘lanish. Bu, ehtimol, bog‘lanishning eng oddiy shaklidir. Bu elementlari osonlik bilan ionlar hosil qiladigan birikmalarda sodir bo‘ladi, bu ularning normal neytral holatidan elektronlarning ortiqchaligi yoki yetishmasligidir. Bunga osh tuzi ***NaCl*** ni misol qilib keltirish mumkin. Ularning davriy sistemadagi o‘rnidan ko‘rinib turibdiki, Na va Cl ning tashqi qavatida bitta elektron ortiqcha (Na) yoki tashqi qavatida bitta elektron yetishmaydi (Cl). Bu atomlar yetarlicha masofada yaqinlashganda Na dagi ortiqcha elektron Cl ning tashqi qobig‘ini to‘ldirish uchun energetik jihatdan qulay bo‘ladi va shu bilan ikkalasi ham ion holatida qoladi; Na^+ va Cl^- ancha barqaror konfiguratsiyalarda, chunki ularning ikkalasi ham tashqi elektron qobiqlarini to‘ldirgan. Juft atomlarning tashqi qobig‘ida bir xil miqdorda ortiqcha/kam elektronlar mavjud, shuning uchun sof ion bog‘lanish faqat shu holatlarda sodir bo‘ladi. Bunday juftlarga yana NaF, KCl, CsCl misol bo‘la oladi. Shu sababli bir xil tipdagi atomlar orasida bunday bog‘lanish hosil bo‘lishi mumkin emas. Elektronlar almashinuvining natijasi shundaki, atomlar neytral bo‘lmay qoladi va kulon o‘zaro ta’siri orqali bir-biriga tortiladi. Elektronlarning bunday ko‘chish jarayonini boshqacha qilib, ishqoriy metall (Na) ning kichik ionlanish potensiali va galogen (Cl) ning katta elektronga moyilligi ta’siri deb qarash mumkin. Kulon potensiali quyidagi ko‘rinishga ega:

$$U_{Kulon}(r) = -\frac{\nu e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}, \qquad (1.6)$$

bu yerda ν = 1 bir marta ionlangan turlar uchun (NaCl uchun bo‘lgani kabi). Itarishish bilan bog‘liq energiya ko‘pincha eksponentsial ko‘rinishida beriladi, bu esa yuqorida keltirilgan itarishish energiyasining muqobil shaklidir. Buni quyidagicha yozish mumkin: $B\cdot\exp\left(-\frac{r}{\rho}\right)$. Bu yerda ρ itarishish ko‘rsatkichi rolini o‘ynaydi (uzunlik birliklariga ega) va itarishish kuchlari muhim bo‘lgan masofani aniqlaydi. Ion kristallning har bir molekulasiga to‘g‘ri keladigan umumiy energiyani quyidagicha yozish mumkin:

$$U_{ion}(r) = -\frac{\alpha\nu e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} + B\exp\left(\frac{r}{\rho}\right). \qquad (1.7)$$

Bu yerdagi qo‘shimcha doimiy *a* Madelung doimiysi deb ataladi va ionlarning geometrik joylashishiga bog‘liq bo‘ladi (NaCl strukturasi uchun bu qiymat 1,74756

ga teng, rux sfalerit uchun bu qiymat 1,63805 ga teng va CsCl turidagi struktura uchun 1,76267 ga teng). (1.7) tenglamadagi noma'lumlardan birini *r* bo'yicha birinchi hosila muvozanat ajralishida nolga teng bo'lishini e'tirof etish orqali yo'q qilishimiz mumkin. Bundan quyidagilarni topamiz:

$$B = \frac{\alpha \nu e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_0^2} \exp\left(\frac{r_0}{\rho}\right). \tag{1.8}$$

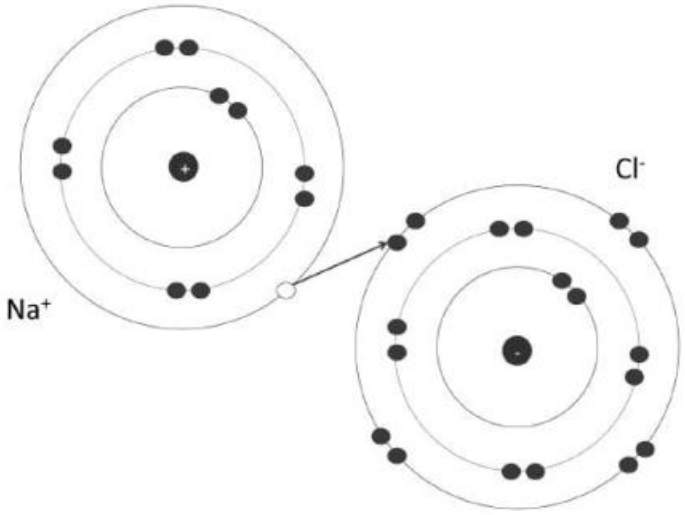
Endi energiyani quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$U_{ion}(r) = -\frac{\alpha \nu e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_0}\left[1 - \frac{r\rho}{r_0^2}\exp\left(\frac{r - r_0}{\rho}\right)\right]. \tag{1.9}$$

Bundan kelib chiqadiki, bog'lanish energiyasini (muvozanatdagi potensial energiya) oson baholash mumkin:

$$U_{ion}(r_0) = -\frac{\alpha \nu e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_0}\left[1 - \frac{\rho}{r_0}\right]. \tag{1.10}$$

Odatda ρ parametr r_0 ning kichik foizini tashkil qiladi va bog'lanish energiyasida Madelung hadi ustunlik qiladi. Ion bog'lanish mexanizmini 1.9-rasmda sxematik ravishda ko'rsatilgandek tasavvur qilish mumkin.



1.9-rasm. Ion bog'lanish: Na^+ kationi (chapda) va Cl^- anioni (o'ngda) elektronning Na atomidan Cl ga o'tishi natijasida hosil bo'ladi va ular Kulon kuchlari ta'sirida ushlab turiladi.

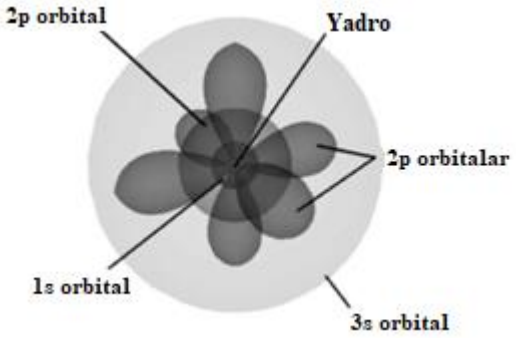
Kovalent bog'lanish. Davriy jadvalning markaziy qismidagi elementlar osonlikcha yopiq elektron qobiq tuzilmalariga aylanmaydi, chunki elektronlarni turlar o'rtasida o'tkazish uchun ortiqcha energiya talab etiladi va shuning uchun ion turidagi bog'lanish ehtimoldan yiroq. Buning o'rniga, bog'lanish valent elektronlarni bo'lishish orqali sodir bo'lishi mumkin, bunda har bir atom o'z hissasini qo'shish uchun yana bitta elektronni beradi. Elektronlarni taqsimlash mexanizmi kovalent bog'lanish deb ataladi. Eng oddiy ko'rinishdagi vodorod

molekulasi H_2 uchun ikkita vodorod atomining har biri elektron juftli kovalent bog‘lanish hosil qilish uchun $1s^1$ elektronini beradi.

Ikkita *H* atomining yaqinligi ularning tegishli elektronlari o‘rtasidagi o‘zaro ta’sirni keltirib chiqaradi va har xil energiyali ikkita holatga bo‘linadi. Ulardan biri bog‘lanish holati deb ataladi va juft (simmetrik) orbital to‘lqin funksiyasiga ega bo‘lib, uning umumiy energiyasi izolyatsiyalangan elektron energiyasidan kamayadi va shu bilan bog‘lanish hosil bo‘ladi. Simmetrik eritma elektron zaryadining zichligi $-e|\psi|^2$ yadrolar orasidagi sohada to‘planishini talab qiladi. Pauli prinsipi talabi shundan iboratki, to‘liq to‘lqin funksiya antisimmetrik bo‘lib, *1s* holat uchun elektronlar antiparallel spinlar bilan mos kelganda qanoatlantiriladi. Antibog‘lanish holati deb ataluvchi ikkinchi holatda spinlari parallel bo‘lgan ikkita elektron bo‘lib, u sof itarishish holatidir.

1.10-rasm. H_2 molekulasini hosil qilish uchun bir juft *H* atomlari o‘rtasidagi eng oddiy ko‘rinishdagi kovalent bog‘lanish.

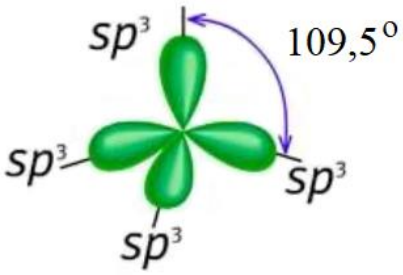
Ushbu oxirgi holat yuqori energiyaga ega va ikkita elektron *1s* holatida joylashishi mumkin bo‘lganligi sababli, bu hosil bo‘lgan, bog‘lovchi holat bo‘lib, u amalga oshiriladi va kuchli bog‘lanish hosil bo‘ladi. Ta’kidlab o‘tamizki, bunday hol, masalan, ikkita *He* atomida bo‘lishi mumkin emas, chunki barcha s-holatlar band bo‘lib, umumiy to‘liq energiyaning ortishiga olib keladi.



1.11-rasm. p-orbitallarning yo‘nalganlik xarakterini va s-orbitallarning simmetrik taqsimlanishini ko‘rsatuvchi quyi darajadagi orbitallar.

Ravshanki, kovalent bog‘lanish mavjud bo‘lishi uchun valent elektronlar qobig‘i *He* dagi kabi to‘la band bo‘la olmaydi. Og‘irroq atomlar uchun yuqori orbitallar band. Bu orbitallar, s-orbitallardan farqli o‘laroq, 1.11-rasmda tasvirlanganidek, juda yo‘naltirilgan xarakterga ega. Orbitallarning bunday yo‘nalganlik xarakteri energetik mulohazalar va Pauli prinsipidan kelib chiqadi, ya’ni elektronlar fazoda simmetrik taqsimlangan orbitallar hosil qilib, bir-biridan qochishga harakat qiladi. Buning

natijasi shundaki, qisman bo‘sh orbitallarning qoplanishidan hosil bo‘lgan kovalent bog‘lanishlar ham yuqori yo‘nalishli bo‘ladi. Masalan, uglerod atomlarining kovalent bog‘lanishlari olmos strukturasining tetraedrik birligini hosil qiladi, bu haqida 2-bobda so‘z yuritiladi. C uchun elektron konfiguratsiya $1s^2 2s^1 2p^1_x 2p^1_y 2p^1_z$. Ushbu asosiy holat konfiguratsiyasida bizda to‘rtta juftlashmagan elektron mavjud bo‘lib, ular gibridlanib, sp^3 gibrid orbitallarining to‘rtta teng masofali bo‘laklarini (tetraedr) hosil qiladi, ular orasidagi burchaklar 109,5° ga teng (1.12-rasmga qarang).



1.12-rasm. Tetraedrning asosini tashkil etuvchi sp^3 - orbitallarning fazoviy taqsimoti.

Bu yerda shuni qayd qilamizki, holatlarning gibridlanishi (ayni holda biz s va p holatlarni ko‘rib chiqamiz) birdan ortiq atomlar orasidagi elektron holatlarning aralashishini o‘z ichiga oladi. Bu elektronlar uchun ko‘proq mavjud bo‘lgan va atomlarni bir-biriga bog‘laydigan turli xil energiya darajalarini keltirib chiqaradi. Birikma izolyatsiyalangan atomlarga nisbatan kamroq umumiy energiyaga ega bo‘ladi.

Kovalent mexanizm ko‘pchilik organik birikmalardagi bog‘lanishlar uchun javobgardir. Shuningdek, u galogen atomlari uchun dominant juftlikdir. Ko‘pchilik yarimo‘tkazgich materiallarda kovalent bog‘lanish ham juda muhim. *sp* gibridlanish (2- yoki 3-tur bo‘lishidan qat’iy nazar) nafaqat olmos (sp^3) hosil bo‘lishida, balki sp^2 turidagi bog‘lanishlar natijasida atomar yupqa uglerod qatlamini (grafen) hosil qiluvchi ancha keng tarqalgan allotropik grafit shakli ham muhimdir.

Ushbu struktura asosan 2D olti burchakli shakllanishdir, bu yerda grafitda grafen tomonlari orasidagi Van der Vaals o‘zaro ta’siri 3D strukturasini hosil qiladi. Uglerodning olmos va grafit shakllari o‘rtasidagi farq strukturaning fizik xususiyatlari bo‘yicha muhimligini ko‘rsatadi: olmos elektr izolyator bo‘lsa, grafit yaxshi o‘tkazuvchandir. Grafitdagi zaif qatlamlararo bog‘lanishlar uni parchalanishiga yoki hatto yopishqoq lenta yordamida grafen tomonlarini ishlab chiqarishga imkon beradi. Kovalent bog‘lanish juda kuchli bo‘lishi mumkin va masalan, olmosning afsonaviy qattiqligi uchun javobgardir.

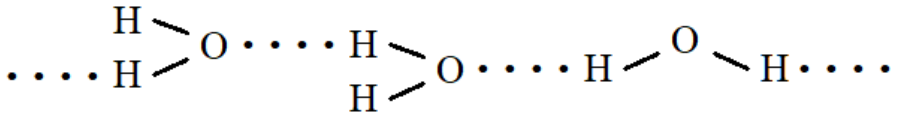
Molekulalararo va ichki molekulyar ta’sir. Vodorod bog‘lanish. Yuqorida ko‘rib o‘tilgan ion, kovalent, metall, donor-akseptor kabi bog‘lanishlar kimyoviy bog‘lanishning asosiy turi hisoblanadi. Atom va molekulalar orasida bu xil bog‘lanishlardan tashqari yana ikkinchi darajali bog‘lanish xili – vodorod bog‘lanish hamda molekulalar aro tortishish kuchlari (Vander–Vals kuchlari) ham mavjud. Oriyentatsion, dispersion va induksion kuchlar ham shular jumlasiga kiradi. Vodorod bog‘lanish – kimyoviy bog‘lanishning o‘ziga xos turidir. U molekulalararo va ichki molekulyar bo‘lishi mumkin. Molekulalararo vodorod bog‘lanish tarkibiga

vodorod hamda kuchli elektromanfiy element – ftor, kislorod, azot, xlor va oltingugurt atomlari kiradigan molekulalar orasida vujudga keladi. Bunday molekulalarda umumiy elektron juft vodorod atomidan elektromanfiy element atomi tomoniga siljigan bo‘ladi. Bunda musbat vodorod ioni kichik bo‘lganligi uchun boshqa atom yoki ionning bo‘linmagan elektron jufti bilan o‘zaro ta’sirlashib kuchsizroq bog‘ni hosil qiladi. Bu bog‘lanish *vodorod bog‘lanish* deyiladi. Masalan, donor-akseptor bog‘lanish ikki xil molekula orasida ham yuzaga chiqishi mumkin:

$$H_3N + BF_3 \rightarrow H_3N{:}BF_3.$$

Bu yerda NH_3 elektron juftli donor bo‘lib, BF_3 bu elektron juft uchun akseptordir. CO molekulasida ham ichki donor-akseptor bog‘lanish mavjuddir. Bunda uglerod akseptor, kislorod donor vazifasini o‘taydi.

Odatda vodorod bog‘lanish nuqtalar bilan belgilanadi (1.13-rasm) va bu bilan uning kovalent bog‘lanishdan ancha kuchsizroqligi ko‘rsatiladi. Shunga qaramay, molekulalarning assotsilanishi ana shu bog‘lanish tufayli vujudga keladi.



1.13-rasm. Vodorod bog‘lanish.

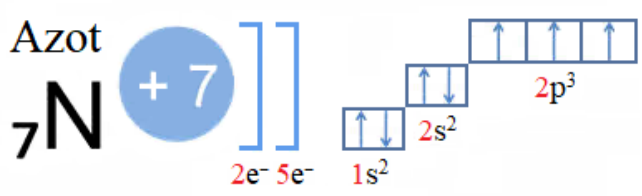
Lekin bu bog‘lanishning energiyasi uncha katta emas. Masalan, kimyoviy bog‘lanishlarning asosiy turlarini bog‘lanish mustahkamligi *84-1042 kJ/mol* bo‘lsa, vodorod bog‘lanishniki *21-42 kJ/mol*.

Kimyoviy elementlar valentligi. Birikmalardagi element atomlarining valentligi va oksidlanish darajasi. Atomning (elementning) valentligi ham kimyoning asosiy tushunchalari qatoriga kiradi. U elementlar atomlarining kimyoviy bog‘lanishlar hosil qilish xususiyatini ko‘rsatadi. Atom massa yoki ekvivalentga teng bo‘ladi yoki ekvivalentdan bir necha marta katta bo‘ladi. Atom massaning ekvivalentdan necha marta katta ekanligini ko‘rsatuvchi son *valentlikdir*, valentlik *V* harfi bilan belgilanadi:

$$V = \frac{A}{E}. \qquad (2.11)$$

Valentlik quyidagicha ta’riflanadi: *Elementning bir atomiga necha atom vodorod birikishi yoki almashinishini ko‘rsatadigan son shu elementning valentligi deb ataladi.* Bir atom kislorod ikki atom vodorod bilan birikadi, demak kislorod ikki valentlidir. Elementlarning valentliklarini faqat vodorod orqali emas, kislorod orqali ham aniqlash mumkin. Vodorod va ishqoriy metallar hamisha bir valentli, kislorod va ishqoriy yer metallar esa ikki valentli, alyuminiy hamisha uch valentli bo‘ladi. Bu elementlar o‘zgarmas valentli elementlar deyiladi. Ammo ba’zi elementlar borki, ularning valentliklari birikuvchi elementlarning tabiatiga va reaksiya sharoitiga

qarab o‘zgaradi. Masalan, mis qizdirilganda, sharoitga qarab ba’zan bir valentli bo‘lib Cu_2O hosil qiladi, ba’zan esa ikki valentli bo‘lib SuO hosil qiladi. Demak mis bir valentli ham, ikki valentli ham bo‘lishi mumkin, yana *N*, *P*, *As* va galogenlar va boshqa ko‘pgina metallar o‘zgaruvchan valentli elementlardir. Azot o‘z birikmalarida 1, 2, 3, 4, 5 valentli bo‘la oladi. Davriy sistemaning *VIII*-guruhidagi inert gazlarning valentliklari nolga teng. Ya’ni ular bir-biri bilan va boshqa elementlar bilan birikmaydi. Atom hosil qila oladigan bog‘lanishlar soni uning juftlashmagan elektronlari soniga teng. Eng oddiy hollarda element atomining valentligi ham unda umumiy elektronlar jufti hosil qilishga ketadigan juftlashmagan elektronlar soni bilan aniqlanadi. Bunda hosil bo‘lgan bog‘lanishlar qutbliligi e’tiborga olinmaydi, shu sababli valentlikning ishorasi bo‘lmaydi. Bog‘lanishlar soni sifatida aniqlanadigan valentlik manfiy bo‘lishi ham, nolga teng bo‘lishi ham mumkin emas. Buni azot - N_2, gidrazin - N_2H_2, nitrat kislota - HNO_3, ammiak - NH_3 misolida ko‘rib chiqamiz. Azot atomi elektronlarning kvant katakchalarida joylashuvi 1.14-rasmda keltirilgan.



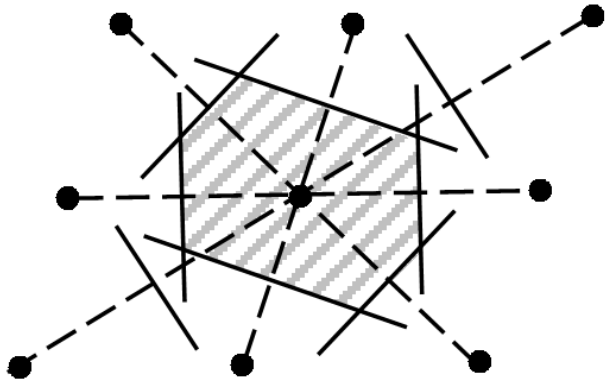
1.14-rasm. Azot atomi elektronlari konfiguratsiyasi.

Bundan azotning uchta juftlashmagan elektroni bo‘lgani sababli u uchta kimyoviy bog‘lanish hosil qilishi mumkin va uning valentligi 3 ga teng bo‘ladi. Kovalent bog‘lanishning har qaysi elektron juftini chiziqcha bilan belgilab, struktura formulalarni olamiz. Bu birikmalarning hammasida azot uch valentli. Lekin azotning oksidlanish darajasi 0, -2, -3 ga teng. NH_4^+ da azot 4 valentli, lekin azotning oksidlanish darajasi -3 ga teng. HNO_3 molekulasida azotning valentligi 4 ga teng, oksidlanish darajasi +5 ga teng bo‘ladi. Ayni birikma batamom ionli tuzilishga ega deb faraz qilinganda uning tarkibidagi biror elementning shartli zaryadi uning oksidlanish darajasi deb ataladi. Elementlarning oksidlanish darajasini aniqlashda doim kislorodning oksidlanish darajasining -2, vodorodnikini +1 deb qabul qilinadi. Metall ionlarining oksidlanish darajasi ularning zaryadiga teng deb olinadi. Masalan, H_2O da vodorodning oksidlanish darajasi +1, kislorodniki -2 dir. *Kl* da kaliyniki +1, yodniki -1 ga teng. Ko‘pchilik hollarda element atomining oksidlanish darajasi u hosil qiladigan bog‘lanishlar soniga to‘g‘ri kelmaydi, ya’ni shu element valentligiga teng emas. Bu ayniqsa, organik birikmalar misolida yaqqol ko‘rinadi. Ma’lumki, organik birikmalarda uglerodning valentligi 4 ga teng (4 ta bog‘lanish hosil qiladi), lekin uglerodning oksidlanish darajasi metan CH_4 da -4. metanol CH_3OH da -2, formaldagi CH_2O da -0, chumoli kislota *HCOOH* da +2, karbonat angidrid CO_2 da

+4 ga teng bo‘ladi. Kovalent bog‘lanish bo‘lmaydigan birikmalarda atomlarning valentligi haqida gap yuritib bo‘lmaydi, bunda oksidlanish darajasi to‘g‘risida gapirish kerak. Shuning uchun anorganik kimyoda oksidlanish darajasi tushunchasini, organik kimyoda esa valentlik tushunchasini qo‘llagan ma’qul. Bunga sabab shuki, ko‘pchilik anorganik birikmalar nomolekulyar tuzilgan, organik birikmalarning ko‘pchiligi esa molekulyar tuzilgan.

1.3-§. Qattiq jismlar zonaviy nazariyasi elementlari

Brillyuen zonasi. Brillyuen zonalarini tushuntirish uchun ikki o‘lchovli kristall panjarasini ko‘rib chiqamiz. Kristall panjara tugunidagi biror atomni atrofidagi boshqa atomlar bilan birlashtirib chiqamiz. Har bir qo‘shni atom bilan birlashtiruvchi chiziqning o‘rtasidan shu chiziqqa tik kesma bilan teng ikkiga bo‘lamiz. Hosil bo‘lgan shtrixlangan shakl Vigner-Zeyts elementar katakchasi deb ataladi (1.15-rasm). Ushbu katakchani tekislikda translyatsiya vektorlari bo‘yicha ko‘chirsak, kristall panjara tuzilishini tiklash mumkin, ya’ni Vigner-Zeyts elementar katakchasi ham elementar katakchani tanlashning bir usulidir.

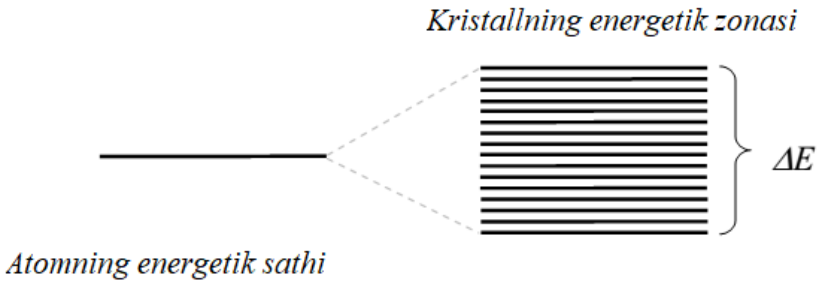


1.15-rasm. Ikki o‘lchovli kristalldagi Vigner-Zeyts elementar katakchasi – eng yaqin tugunlarni bog‘laydigan segmentlarning markazlariga chizilgan perpendikulyarlar bilan chegaralangan maydondir.

Endi ushbu kristall panjaraga teskari panjarani tuzamiz va bu panjarada ham yuqoridagi tartibda elementar katakcha ajratib olamiz. Teskari panjaradagi ushbu katakcha birinchi Brillyuen zonasi deb ataladi. Brillyuen zonasining fizik mohiyati shundan iboratki, Brillyuen zonasi ichida yotuvchi *k* to‘lqin vektoriga ega bo‘lgan barcha rentgen nurlari Bregg-Vulf shartiga asosan kristalldan qaytishi mumkin. Hozirgi kunda Brillyuen zonalari kristallografiyada ishlatilmasada, kristallarning zonalar nazariyasida juda muhim ahamiyatga ega. Brillyuen zonasidagi elektronlar o‘zining energiyasini va impulsini uzluksiz o‘zgartira oladilar. Brillyuen zonasini tark etish uchun elektronlarning energiyasi sakrab o‘zgarishi kerak.

Energetik sathlarning parchalanishi. Yadro bilan o‘zaro ta’sirlashayotgan elektron potensial quduqda joylashgan bo‘lganligi sababli, atomdagi elektronning energetik spektri diskret shaklga ega bo‘ladi. Bu holat faqat ajratilgan atomlar uchun emas, balki o‘zaro ta’sirlashmaydigan atomlardan tashkil topgan tizimlar, masalan, siyrak gazlar uchun ham o‘rinlidir. Bunday hollarda elektronlarning energetik sathlari takrorlanadi. Agar tizimda N ta atom bo‘lsa, unda har bir energetik sath N marta aynigan bo‘ladi.

Kristall panjarasi hosil bo‘lish jarayonida atomlar bir-biriga yaqinlashadi va ular o‘zaro ta’sirlasha boshlaydi. Elektronlarning to‘lqin funksiyalari qisman ustma-ust tushadi. Natijada aynigan energetik sathlar parchalanadi (1.16-rasm). Parchalangan sathlar esa energetik zonani (yoki tasmasini) hosil qiladi.



1.16-rasm. Atom energetik sathining energetik zonaga parchalanishi.

Elektron qobiqlari ustma-ust tushish darajasi energetik sathlarning parchalanishiga ta’sir qilganligi sababli, yadroga yaqin joylashgan ichki qobiqlarning energetik sathlari tashqi (valent) elektronlarga qaraganda kamroq darajada parchalanadi. Yadrodan uzoqlashgan sayin energetik zonalarning kengligi ortadi. Shu sababli valent elektronlarga tegishli bo‘lgan zona keng bo‘ladi.

1.17-rasm. Bir-biri bilan ta’sirlashmaydigan ikkita bir xil litiy atomlarining energetik spektrlari.

Bu umumiy qoidalarni litiy atomi misolida ko‘rib chiqamiz. Litiy atomining elektron konfiguratsiyasi — $1s^2\ 2s^1$. Ya’ni, *1s* holatda qarama-qarshi spinli ikkita elektron va *2s* holatda bitta elektron mavjud.

1.17-rasmda katta masofada joylashgan, ya’ni o‘zaro ta’sirlashmaydigan ikkita litiy atomining spektrlari ko‘rsatilgan. Bunday holatda energetik sathlar aynigan bo‘ladi.

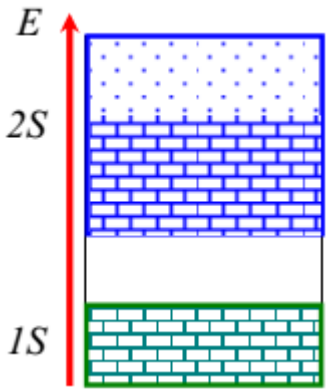
Atomlar bir-biriga yaqinlashganda ularning to‘lqin funksiyalari ustma-ust tushadi. Pauli prinsipiga ko‘ra, ikki fermion (ya’ni elektron) bir xil kvant sonlari to‘plamiga ega bo‘lishi mumkin emas. Shu sababli, *1s* va *2s* holatlarining energetik sathlari ikki sathchaga parchalanadi. *1s* holatining parchalanishi kuchsizroq, *2s* esa kuchliroq bo‘ladi, chunki *2s* holatidagi to‘lqin funksiyalarining ustma-ust tushishi ancha kattaroq bo‘ladi.

a) *b*)

1.18-rasm. Ikki (*a*) va uch (*b*) atomdan tashkil topgan tizimlarning energetik spektrlari.

1.18*a*-rasmda ikki atomdan, 1.18*b*-rasmda esa uchta atomdan iborat tizimning energetik spektri tasvirlangan. Energetik sathlarning parchalanish darajasi atomlar orasidagi masofa bilan belgilanadi va bu masofa o‘zgarmaganligi sababli parchalanish miqdori ham o‘zgarmaydi. Uchinchi sath mavjud bo‘lgan ikki sath orasida joylashadi. Shu mantiqqa ko‘ra, atomlar soni ortgani sari sathchalar orasidagi masofa kamayadi.

1.19-rasmda litiy atomi kristall tuzilma hosil qilganida yuz beradigan energetik sathlarning parchalanish sxemasi keltirilgan. To‘liq to‘lgan $1s^2$ elektron qatlami parchalangach, unchalik keng bo‘lmagan energetik zonani hosil qiladi. Ikkinchi — valent — qatlam esa yarmigacha to‘lgan $2s^1$ holat bo‘lib, u parchalanganda ancha kengroq zonani shakllantiradi. Parchalanish faqat to‘lgan emas, balki bo‘sh (to‘lmagan) sathlarda ham yuz beradi.



1.19-rasm. Litiy kristalli hosil bo‘lishida yuz beradigan energetik sathlarning parchalanish sxemasi.

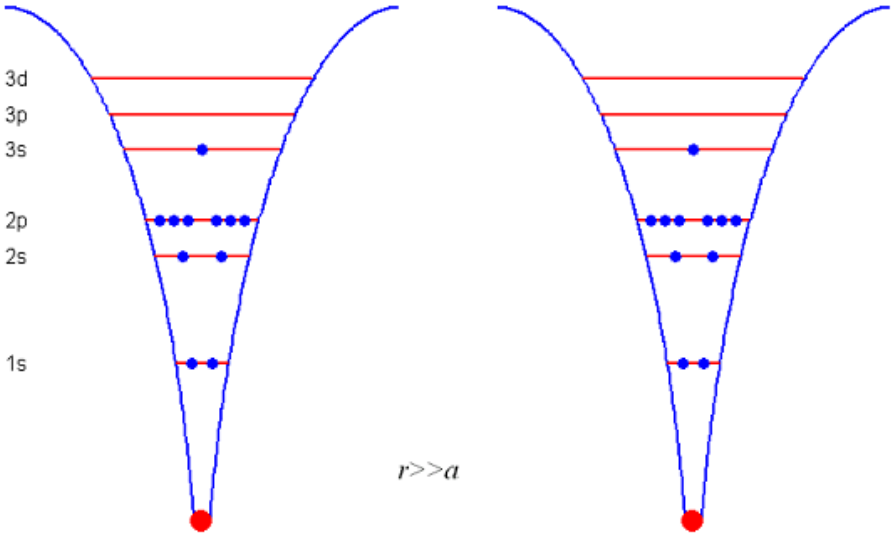
$1s^2$ va $2s^1$ elektron qatlamlariga mos keluvchi ruxsat etilgan energetik zonalar bir-biridan taqiqlangan (yoki man etilgan) energetik zona bilan ajratilgan. Shu bois, ular mos ravishda ruxsat etilgan va taqiqlangan zonalar deb

ataladi. Kristalldagi elektronlar uchun eng yuqori energiyali zona o‘tkazuvchanlik zonasi, undan pastda joylashgan zona esa valent zona deb ataladi.

Noaniqlik munosabati $\Delta E \cdot \tau > h$ (bu yerda h – Plank doimiysi) orqali energetik zonaning kengligini baholash mumkin. Atomda qo‘zg‘algan holatdagi yashash vaqti $\tau \approx 10^{-8}$ s ga teng bo‘lsa, energetik sathning tabiiy kengligi $\Delta E \approx h / \tau \approx 10^{-7}$ eV bo‘ladi. Kristallda esa bu vaqt $\tau \approx 10^{-15}$ s ni tashkil etadi va zonaning kengligi esa $\Delta E \approx h / \tau \approx 1$ eV atrofida bo‘ladi.

Energetik zonalarning kengligi kristall o‘lchamiga bog‘liq emas, balki uni tashkil etuvchi atomlarning tabiatiga bog‘liq bo‘ladi. Energetik sathlar zonani juda zich to‘ldiradi. Masalan, agar kristalldagi atomlar soni $N \approx 10^{23}$ bo‘lsa, unda zona ichida sathlar orasidagi masofa taxminan 1 eV / $N \approx 10^{-23}$ eV ga teng bo‘ladi. Bu qiymatni xona haroratidagi issiqlik harakati energiyasi bilan solishtirsak ($kT \approx 10^{-2}$ eV), zonadagi energiyalar deyarli uzluksiz tarzda taqsimlangan deb qarash mumkin.

Keling, natriy kristalli hosil bo‘lish jarayonini ko‘rib chiqamiz. Natriy atomining elektron konfiguratsiyasi: $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^1$.



1.20-rasm. Natriy atomining energetik spektri.

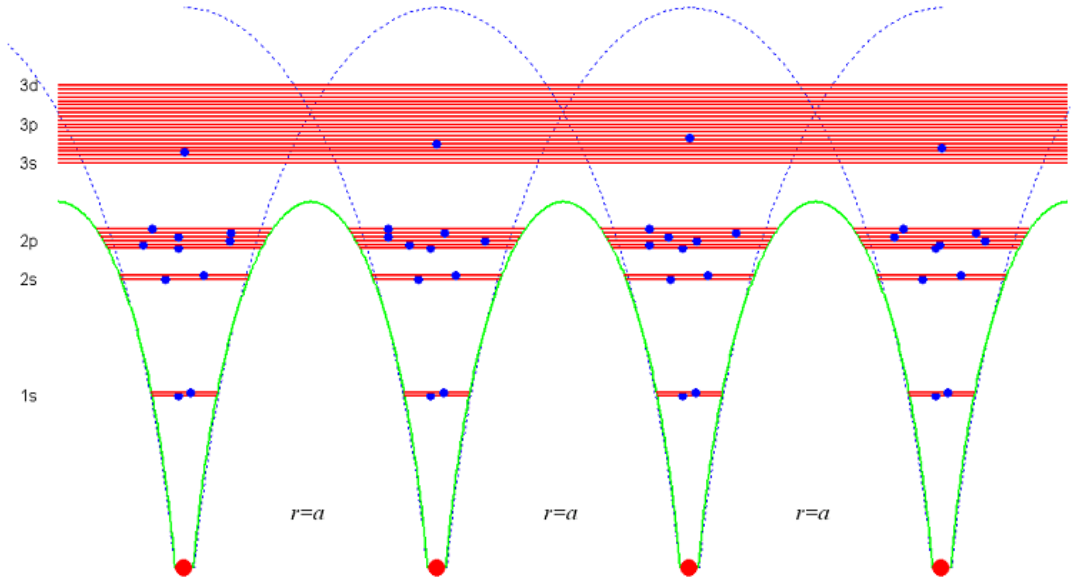
1.20-rasmda natriy atomining energetik spektri tasvirlangan. Birinchi va ikkinchi elektron qatlamlari to‘liq to‘ldirilgan. Uchinchi qatlam esa qisman to‘lgan: *s*-qobiq to‘ldirilgan, *p* va *d*-qobiqlar esa bo‘sh.

Shuningdek, rasmdan ikkinchi natriy atomining spektri ham ko‘rish mumkin. Bu yerda atomlar orasidagi masofa r kristall panjarasidagi atomlar orasidagi masofa a ga nisbatan ancha katta (natriy kristallida $a \approx 0.5$ nm). Atomlar bu holatda o‘zaro ta’sirlashmaydi, shuning uchun ularning energetik spektrlari shunchaki bir-birini takrorlaydi.

Kristallanish jarayonida atomlar orasidagi masofa kamayadi. Atomlar o‘zaro ta’sirlasha boshlaydi. Turli atomlarga tegishli bo‘lgan to‘lqin funksiyalarining ustma-ust tushishi butun tizimning energetik spektrini o‘zgartiradi.

1.21-rasmda natriy kristallining energetik spektri keltirilgan. Energetik sathlar parchalanadi, eng keng zona esa valent elektronlarga to‘g‘ri keladi. Ajratilgan atomlarning potensial energiyasi egri chiziqlari (punktir chiziq bilan ko‘rsatilgan) qisman ustma-ust tushadi, natijada umumiy potensial egri chiziq (to‘liq chiziq) pastroqqa siljiydi. Yaqin atomlar orasidagi potensial to‘siqning kengligi va balandligi kamayadi.

Uchinchi qatlamga mansub valent elektronlar uchun bu to‘siq butunlay yo‘qoladi. Bunday sharoitda elektronlar bir atomdan boshqasiga erkin o‘tish imkoniga ega bo‘ladi. Bu elektronlar kristall tomonidan kollektivlashtiriladi (ya’ni umumlashtiriladi). Amalda ular erkin zarrachalarga aylanadi, ularning yig‘indisi esa *elektron gazini* tashkil qiladi.



1.21-rasm. Natriy kristallining energetik spektri.

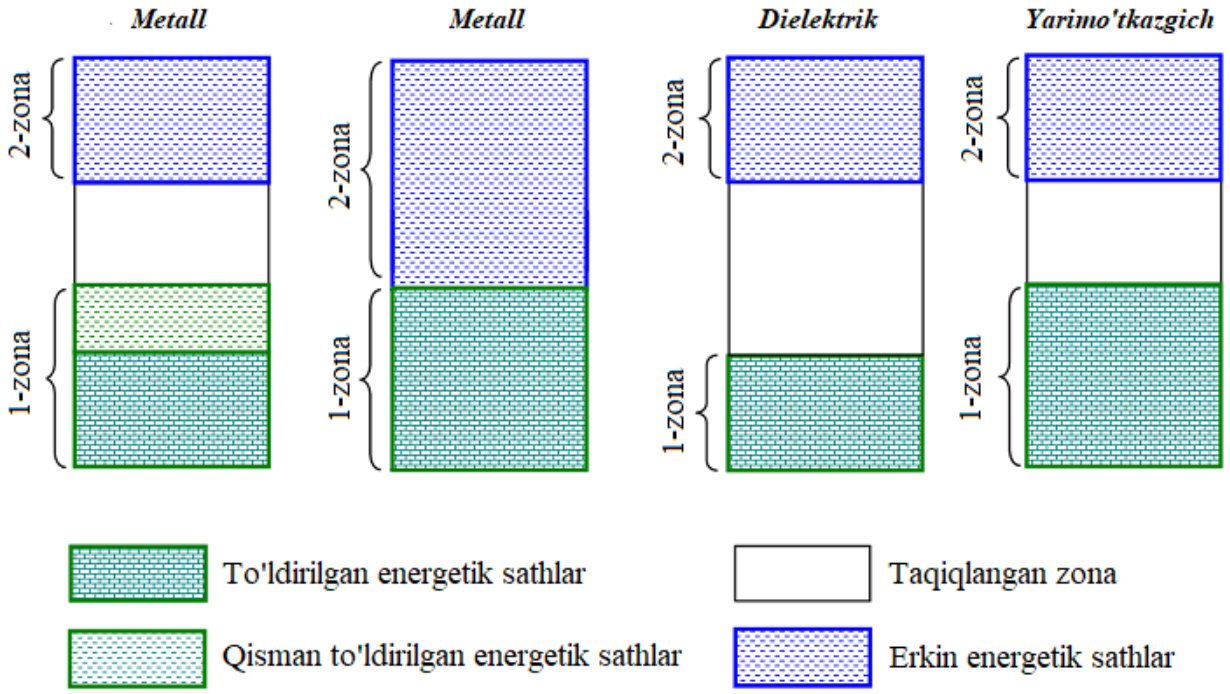
Kristallar klassifikatsiyasi. Kristall jismlar metallar, yarimo‘tkazgichlar va dielektriklarga bo‘linadi. Kristallarning zonaviy nazariyasi ularning asosiy xossalarini yagona nuqtai nazardan tushuntirib beradi. Masalan, qattiq jismlarning issiqlik nurlanishining uzluksiz spektri aynan keng energetik zonalarning mavjudligi bilan izohlanadi. Zonalar nazariyasiga asoslangan elektr xossalarining klassifikatsiyasi eng izchil va to‘liq hisoblanadi.

Bu yerda asosiy rolni zonalarning strukturasi, kengligi va ularning elektronlar bilan qanday to‘lganligi o‘ynaydi. Mumkin bo‘lgan holatlar 1.22-rasmda ko‘rsatilgan. Issiqlik harakatining ta’sirini istisno qilish uchun $T = 0$ (mutlaq nol harorat) holati ko‘rib chiqiladi.

Metallar. Absolyut nol haroratda elektronlar valent zonasini qisman to‘ldiradi. Natijada bu zonada hali elektronlar egallamagan bo‘sh kvant holatlari mavjud bo‘ladi.

Shu sababli, hatto nihoyatda kichik qizdirish ham elektronlarning harakatini keltirib chiqaradi. Termik energiya ayrim elektronlarni yuqoriroq energetik sathlarga o‘tishga majbur qiladi — ular bo‘sh kvant holatlariga o‘tadilar.

Agar tashqi elektr maydoni qo‘llansa, bu elektronlar o‘z kvant holatini o‘zgartiradi va maydonga qarshi yo‘nalgan tartibli harakatni amalga oshiradi. Natijada elektr toki hosil bo‘ladi.



1.22-rasm. Kristallar klassifikatsiyasi bo‘yicha energetik zonalarining manzarasi.

Shuni ta’kidlash kerakki, to‘liq to‘ldirilgan energetik sathlardagi elektronlar fazoviy harakatda qatnasha olmaydi. Elektronning har qanday harakati uning kvant holatining o‘zgarishini bildiradi. Pauli prinsipiga ko‘ra, bir tizimda bir xil kvant sonlariga ega bo‘lgan ikki yoki undan ortiq elektron mavjud bo‘lishi mumkin emas. Shu sababli, elektron allaqachon band qilingan holatlarga o‘ta olmaydi, ya’ni fazoviy harakat qilolmaydi.

Shuningdek, valent zonasi to‘liq to‘ldirilgan, ammo taqiqlangan zona kengligi nolga teng bo‘lgan kristall ham metalldir. O‘tkazuvchanlik zonasi valent zonasiga tutashgan yoki hatto qisman uni qamrab olgan bo‘ladi. Bu holat yuqorida ko‘rib chiqilgan holatdan tubdan farq qilmaydi: issiqlik harakati energiyasi elektronlarning bo‘sh holatlarga o‘tishi uchun yetarli bo‘ladi.

Dielektriklar. Absolyut nol haroratda elektronlar valent zonani to‘liq to‘ldiradi. Bunday materiallarda taqiqlangan zona juda keng, kamida 5 eV bo‘ladi. Issiqlik harakati energiyasi elektronlarni bo‘sh holatlarga — ya’ni o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tkazish uchun yetarli emas. Shu sababli bunday kristallar elektr tokini o‘tkazmaydi.

Yarimo‘tkazgichlar. Amalda yarimo‘tkazgichlar ham absolyut nol haroratda dielektriklarga o‘xshash: elektronlar valent zonasini to‘liq to‘ldiradi. Ammo bunday holatda taqiqlangan zona kengligi kichikroq — 3 eV dan kam bo‘ladi.

Issiqlik harakati yoki tashqi nurlanishdan olingan fotonlar energiyasi elektronlarni o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tkazish uchun yetarli bo‘ladi. Harorat ortishi bilan o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar konsentratsiyasi ortadi va natijada kristall yaxshiroq tok o‘tkazadi.

Katta miqdordagi elektronlar va kristall panjaradagi ionlar o‘rtasidagi o‘zaro ta’sirni to‘liq kvant-mexanikaviy hisoblash imkonsizdir. Biroq o‘zaro moslashtirilgan (ya’ni самосогласованное) maydon yondashuvida bunday tizimni samarali tahlil qilish mumkin. Bu yondashuvga ko‘ra, elektron barcha elektronlar va yadrolarning o‘rtachalashtirilgan va moslashtirilgan maydonida harakat qiladi.

O‘tkazuvchanlik zonasi elektronlari esa erkin zarralardan iborat gazni hosil qiladi. Ularning kristall panjarasi bilan o‘zaro ta’siri real massa o‘rniga “*effektiv massa*” ni kiritish orqali hisobga olinadi.

Kvant statistikasi. Ko‘plab zarrachalardan tashkil topgan tizimlar ehtimollik (statistik) xarakteristikalari va qonuniyatlari orqali tavsiflanadi. Tizimning statistik xarakteristikalari alohida zarrachaga xos emas. Masalan, ideal gaz uchun bosim va harorat tushunchalari aynan shu tarzda aniqlanadi. Bunday yondashuv nafaqat klassik tizimlar, balki kvant tizimlari uchun ham amal qiladi.

Kvant statistikasi — bu statistik fizikaning bir bo‘limi bo‘lib, unda kvant mexanikasi qonunlariga bo‘ysunuvchi juda ko‘p zarrachalardan iborat tizimlar o‘rganiladi.

Klassik tizimlarda, hattoki, agar ular bir xil molekulalardan tashkil topgan ideal gaz bo‘lsa ham, zarrachalar ajratib bo‘linadigan (farqlanadigan) hisoblanadi. Ularni oddiy raqamlar bilan belgilash mumkin, yoki bunday imkon bo‘lmasa ham, zarrachalarning boshlang‘ich koordinatalari va impulslari ma’lum bo‘lsa, ularning keyingi vaqtlardagi holatini hisoblab chiqish mumkin. Agar bir xil ikkita zarracha turli holatlarda bo‘lib, o‘rin almashsa, tizimning holati o‘zgaradi.

Kvant tizimlarida esa statistika butunlay boshqacha bo‘ladi. Eng avvalo bu o‘xshash zarrachalarning ajralmasligi tamoyili bilan bog‘liq. Agar turli kvant holatlarida bo‘lgan ikki o‘xshash zarracha o‘rin almashsa, tizim holati o‘zgarmaydi.

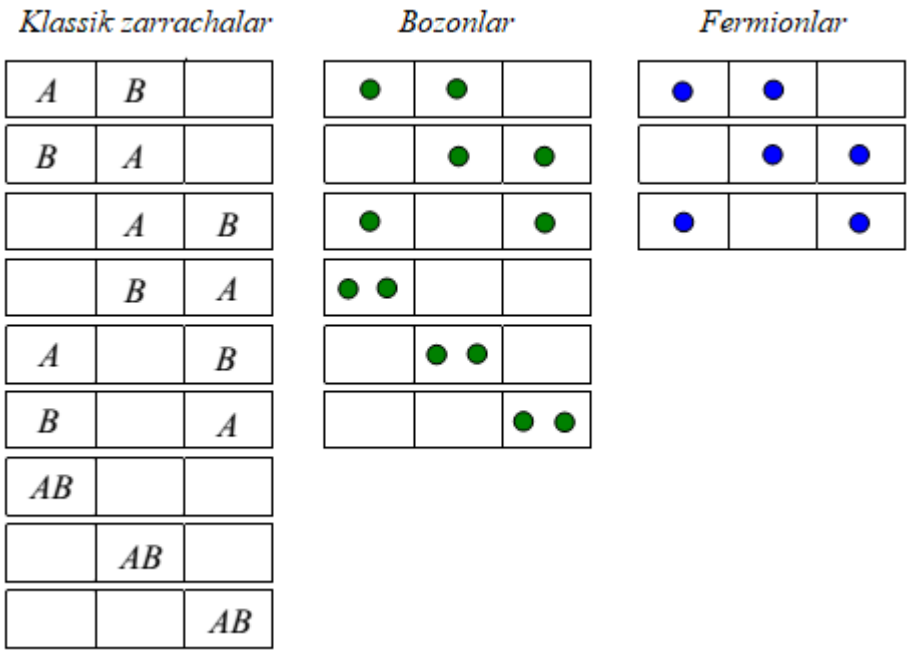
Kvant nazariyasida barcha zarrachalar *fermionlar* va *bozonlarga* bo‘linadi. Bozonlar — butun spinga ega zarrachalar, fermionlar esa — yarim butun spinga ega

bo‘lgan zarrachalardir. Pauli prinsipi bir xil kvant sonlariga ega ikki yoki undan ortiq fermionlarning bir tizimda bir vaqtda mavjud bo‘lishini taqiqlaydi (ya’ni ular bir xil holatda bo‘la olmaydi). Bozonlar uchun esa bunday cheklovlar mavjud emas. Shuning uchun, fermionlar va bozonlar statistikasi bir-biridan farq qiladi: fermionlar — Fermi-Dirak statistikasi, bozonlar esa Bose-Eynshteyn statistikasi asosida tavsiflanadi.

Ushbu statistikalar o‘rtasidagi farqni quyidagi misolda ko‘rsatamiz. Faraz qilaylik, *A* va *B* zarrachalari mavjud bo‘lib, har biri uchta holatdan birida bo‘lishi mumkin. Agar zarrachalar klassik deb qaralsa va kvant holatlari katakchalar bilan ifodalansa, tizim uchun 9 ta mumkin bo‘lgan holat mavjud bo‘ladi (1.23-rasmga qarang). Bu holatlar teng ehtimolliklidir. Har bir holatning ehtimoli — 1/9.

Bozonlar kvant holatlariga boshqacha taqsimlanadi. A ↔ B zarrachalarining o‘rin almashtirishi tizim holatini o‘zgartirmaydi. Zarrachalar o‘xshash bo‘lgani sababli ular rasmda bir xil ko‘rinishda tasvirlanadi. Mumkin bo‘lgan holatlar soni — 6 ta. Har birining ehtimoli — 1/6.

Fermionlar esa bir kvant holatida birga bo‘la olmaydi, shuning uchun tizimda faqat 3 ta holat qoladi va ularning har birining ehtimoli — 1/3.



1.23-rasm.

Kvant statistikasi o‘rganadigan eng muhim obyekt — bu o‘zaro ta’sirlashmaydigan zarrachalar tizimi (ideal gaz) hisoblanadi. Zarracha *i*-chi kvant holatida bo‘lishi mumkin va bu holatda E_i energiyaga ega bo‘ladi. Demak, kvant tizimining holati kvant holatlarining qanchalik band qilinganiga qarab aniqlanadi. *i*-chi kvant holatining to‘lganlik darajasi yoki to‘lganlik soni — bu shu holatda joylashgan zarrachalar soni bo‘lib, u n_i bilan belgilanadi.

Statistik fizikaning vazifasi — zarrachalarning E_i energiyali kvant holatlari bo‘yicha eng ehtimolli taqsimotini aniqlashdan iborat. Aynan eng ehtimolli taqsimot tizimning termodinamik muvozanat holatini ifodalaydi. Eng ehtimolli taqsimot — bu zarrachalarning shu holatda eng ko‘p usulda joylashishi mumkin bo‘lgan taqsimotdir. Holatning ehtimolligi esa o‘z navbatida tizimning entropiyasini belgilaydi.

Shuning uchun zarrachalarning muvozanatdagi taqsimotini topish masalasi — bu zarrachalar soni va energiya doimiy bo‘lgan sharoitda tizim entropiyasining ekstremumini (maksimumini) topish masalasiga tengdir:

$$n_1 + n_2 + n_3 + \ldots = N,\ \ n_1E_1 + n_2E_2 + n_3E_3 + \ldots = E.$$

Maksvell-Bolsman taqsimoti. Klassik ideal gazning termodinamik muvozanat holati Maksvell-Bolsman taqsimoti bilan tavsiflanadi:

$$\overline{n}_i = n_0 \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right),$$

$\overline{n}_i$ – i-sathning o‘rtacha to‘lganlik soni.

Kimyoviy potensial. Issiqlik almashinuvi dQ va bajarilgan ish dA termodinamik tizimning ichki energiyasi dU ni o‘zgartiradi, bunda $dU = dQ - dA$. Biroq zarrachalar soni o‘zgaruvchi tizimlarda ichki energiyani o‘zgartirish uchun zarrachani qo‘shish (yoki olib tashlash) mumkin:

$$dU = dQ – dA + \mu dN.$$

Agar tizim izolyatsiyalangan bo‘lsa va ish bajarmasa, unda $dQ = dA = 0$, bu holda termodinamik parametr μ (kimyoviy potensial deb ataladi) uchun quyidagini olamiz:

$$\mu = \left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_{V,Q}.$$

Kimyoviy potensial — bu tizimga bitta zarracha qo‘shilganda ichki energiyaning qanday o‘zgarishini ifodalovchi termodinamik parametr bo‘lib, bunda ichki energiyaga ta’sir qiluvchi boshqa barcha parametrlar o‘zgarmasligicha qoladi.

Boze-Eynshteyn taqsimoti. Bir xil kvant zarrachalar — bozonlar tizimi Boze-Eynshteyn statistikasiga bo‘ysunadi. Energetik sathlarning o‘rtacha to‘lganlik sonlari $\overline{n}_i$ quyidagi funksiyaga asosan aniqlanadi:

$$\overline{n}_i = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_i - \mu}{kT}\right) - 1}.$$

Faraz qilaylik, bozonlar tizimining kimyoviy potensiali musbat. Bunday holda, $E_i < \mu$ bo‘lgan energetik sathlar uchun maxrajdagi eksponenta birdan kichik bo‘ladi va natijada to‘lganlik sonlari manfiy chiqadi, bu esa mumkin emas. Shu sababli, bozonlar tizimida kimyoviy potensial har doim manfiy yoki nolga teng

bo‘ladi, ya’ni: $\mu \leq 0$. Shuni ta’kidlash kerakki, zarrachalar soni o‘zgaruvchan bo‘lgan boze-tizimlar uchun $\mu = 0$.

Boze-Eynshteyn statistikasida o‘rtacha to‘lganlik sonlari $\bar{n}_i \geq 0$ va ular cheklanmagan. Eksponenta argumenti kichik bo‘lganda, ya’ni past energiyali holatlar uchun sathlar juda yuqori to‘lganlikka ega bo‘lishi mumkin. Bu esa bozonlardan tashkil topgan tizimlarda noyob fizik xossalarning paydo bo‘lishiga olib keladi.

Fermi-Dirak taqsimoti. Bir xil fermionlar tizimi Fermi-Dirak statistikasiga bo‘ysunadi. Energetik sathlarning o‘rtacha to‘lganlik sonlari $\bar{n}_i$ quyidagi funksiyaga asosan aniqlanadi:

$$\bar{n}_i = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_i - \mu}{kT}\right) + 1}.$$

Faraz qilaylik, fermionlarning kimyoviy potensial manfiy, u holda $T \to 0$ da (harorat nolga intilganda) maxrajdagi eksponenta cheksizlikka intilardi, natijada to‘lganlik sonlari nolga teng bo‘lardi, bu esa mumkin emas. Shunday ekan, fermionlar uchun kimyoviy potensial musbat bo‘lishi kerak, ya’ni: $\mu > 0$.

Fermionlar uchun Pauli taqiqlov prinsipi amal qiladi, shuning uchun spinni hisobga olmagan holda fermion tizimlarida energetik sathlarning o‘rtacha to‘lganlik sonlari quyidagicha cheklangan bo‘ladi: $0 \leq \bar{n}_i \leq 1$.

Aynigan tizimlar. Faraz qilaylik, o‘rtacha to‘lganlik sonlari juda kichik, ya’ni $\bar{n}_i \ll 1$. Bunday holatda, bozonlar statistikasi ham, fermionlar statistikasi ham kichik to‘lganlik sonlariga ega bo‘ladi, bu esa: $E_i - \mu \gg kT$ shart bajarilganda kuzatiladi. Chunki bu holatda maxrajdagi bir birlikni e’tiborsiz qoldirish mumkin bo‘ladi. Natijada ikkala statistika ham klassik Maksvell-Bolsman statistikasiga o‘tadi:

$$\bar{n}_i = n_0 \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right), \; n_0 = \exp\left(\frac{\mu}{kT}\right).$$

Maksvell-Bolsman statistikasiga bo‘ysunuvchi kvant tizimlari aynimagan tizimlar deb ataladi. Aslida, bular — siyrak kvant gazlaridir.

Aksincha holatda, ya’ni agar $E_i - \mu \ll kT$ bo‘lsa, bunday tizim aynigan tizim deb ataladi. Aynigan tizimlarning xossalari klassik tizimlarnikidan tubdan farq qiladi. Bunday hollarda zarrachalarning kvant xossalari va butun tizimning kvant xossalari asosiy rolni o‘ynaydi.

Bob bo‘yicha nazorat savollari

1. Materiallar qanday asosiy guruhlarga bo‘linadi? Har biriga misollar keltiring.
2. Atom nima va uning asosiy tarkibiy qismlari qaysilar?
3. Proton, neytron va elektronlarning massasi va zaryadi qanday?
4. Atom yadrosi qanday zarrachalardan tashkil topgan?
5. Elektron qobig‘idagi *s*, *p*, *d*, *f* orbitallar nimani anglatadi?
6. Kvant sonlari nimalar va ular nimani ifodalaydi?
7. Atom orbitallarining shakllari qanday bo‘ladi?
8. Pauli prinsipi nima va u elektronlar joylashuviga qanday ta’sir qiladi?
9. Geyzenbergning noaniqlik prinsipi nima?
10. Atomdagi elektronlar qanday energiya darajalariga ega?
11. Kimyoviy bog‘lanish nima va u qanday hosil bo‘ladi?
12. Ion bog‘lanish qanday atomlar o‘rtasida yuzaga keladi? Misol keltiring.
13. Kovalent bog‘lanish qanday hosil bo‘ladi? U qanday moddalar uchun xos?
14. Metall bog‘lanish qanday tusga ega va u qanday materiallarda uchraydi?
15. Vodorod bog‘lanish qanday sharoitda paydo bo‘ladi?
16. Dipol-dipol va Van-der-Vaals kuchlari qanday bog‘lanishlar hisoblanadi?
17. Kovalent bog‘lanishda elektron juftlari qanday bo‘linadi?
18. Kimyoviy bog‘lanishlarning energiyasi nima bilan belgilanadi?
19. Ion kristallarning xossalari qanday bo‘ladi?
20. Kimyoviy bog‘lanishning moddiy xossalarga (qattiqlik, erish harorati, elektr o‘tkazuvchanlik) ta’siri qanday?
21. Zonaviy nazariya nimani tushuntiradi?
22. Qattiq jismda valent zona va o‘tkazuvchanlik zonasi nima?
23. Taqiqlangan zona deganda nima tushuniladi?
24. Metall, yarimo‘tkazgich va dielektriklar qanday energetik zonaga ega?
25. Zonaviy tuzilma qattiq jismning elektr o‘tkazuvchanligiga qanday ta’sir qiladi?
26. Yarimo‘tkazgichlarda elektr o‘tkazuvchanlik qanday yuzaga keladi?
27. Zonaviy nazariyada “delokalizatsiyalashgan elektronlar” tushunchasi nimani bildiradi?
28. Egri chiziqli zonalar nimalarni anglatadi va ular qanday aniqlanadi?
29. Doimiy tok va elektr yurituvchi elektronlarning bog‘liqligi qanday tushuntiriladi?
30. Haroratning zonalar oralig‘idagi ta’siri qanday bo‘ladi?
31. Kimyoviy potensial nima?
32. Boze-Eynshteyn va Fermi-Dirak taqsimotlarini mazmunini tushuntiring.

II BOB. O‘TKAZGICH MATERIALLARDAGI FIZIK JARAYONLAR VA HODISALAR

Elektr o‘tkazuvchanlik hodisasi moddaning mikroskopik tuzilishi bilan chambarchas bog‘liq bo‘lib, u material ichida erkin zaryad tashuvchilarning (odatda elektronlarning) harakati orqali amalga oshadi. O‘tkazgich materiallar, ayniqsa metallar, o‘zining yuqori elektr o‘tkazuvchanlik xususiyati bilan ajralib turadi va zamonaviy elektr va elektron qurilmalarning ajralmas tarkibiy qismidir. Ularning elektr xossalari, ayniqsa elektr qarshiligi, harorat, kristall panjaraning tuzilishi, hamda turli struktura nuqsonlari bilan bevosita bog‘liqdir.

Ushbu bobda o‘tkazgich materiallarning, xususan, metallarning elektr o‘tkazuvchanligining fizik mohiyati kvant-mexanik va zaryad tashuvchilar statistikasi asosida ko‘rib chiqiladi. Avvalo, metallarda erkin elektronlar modeli asosida ularning elektr o‘tkazuvchanligi tushuntiriladi, shuningdek, elektr qarshiligining haroratga bog‘liqligi, kristall panjara tebranishlari (fononlar) va elektronlararo to‘qnashuvlar bilan bog‘liq hodisalar tahlil qilinadi.

Keyingi bo‘limda esa metallarning real strukturasi – ya’ni kirishmalar, dislokatsiyalar, don chegaralari kabi nuqsonlarning elektr xossalarga ko‘rsatadigan ta’siri o‘rganiladi. Ayniqsa, turli qotishmalarda kuzatiladigan diffuz tarqalgan elektron sochilishi jarayonlari, ular natijasida qarshilikning ortishi va uning haroratdan mustaqil komponenti (qotishma qarshiligi) haqida ma’lumotlar keltiriladi. Metall qotishmalarning elektr xossalari ham ularning tarkibi va struktura xususiyatlariga bog‘liq bo‘lib, texnik qo‘llanmalarda muhim ahamiyat kasb etadi.

Mazkur bobda yoritilgan nazariy asoslar elektr materiallarining fizikaviy tahlili, ularning ishlash xususiyatlarini prognoz qilish hamda yangi yuqori samarali materiallarni ishlab chiqishda muhim ilmiy-metodik poydevor bo‘lib xizmat qiladi.

2.1-§. O‘tkazgichlar haqida umumiy ma’lumotlar. Metallarning elektr o‘tkazuvchanligining fizik tabiati. Metall o‘tkazgichlar qarshiligining haroratga bog‘liqligi

Qattiq jismlar, suyuqliklar, tegishli sharoitlarda esa gazlar ham elektr tokini o‘tkazgich bo‘lib xizmat qilishi mumkin. Metallar, metall qotishmalari va uglerodning ba’zi modifikatsiyalari qattiq o‘tkazgichlardir. Metallarga o‘ziga xos yaltiroqlikka ega bo‘lgan, elektr tokini va issiqlikni yaxshi o‘tkazadigan plastik moddalar kiradi. Elektron texnika materiallari orasida metallar eng muhim o‘rinlardan birini egallaydi.

Suyuq o‘tkazgichlarga suyuqlangan metallar va turli elektrolitlar kiradi. Odatda metallarning suyuqlanish harorati yuqori bo‘ladi, faqat simobning erish

harorati –39 °C ni tashkil etadi. Shuning uchun normal haroratda suyuq metall o‘tkazgich sifatida faqat simobdan foydalanish mumkin. Normal erish haroratiga (29,8 °C) yaqin bo‘lgan galliy ham mavjud. Boshqa metallar yuqori yoki yuqori haroratlardagina suyuq o‘tkazgichlar bo‘ladi.

Qattiq va suyuq holatdagi metallar orqali elektr tokining o‘tish mexanizmi erkin elektronlarning harakatiga bog‘liq bo‘lib, ular elektron elektr o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan o‘tkazgichlar yoki birinchi tur o‘tkazgichlar deb ataladi.

Elektrolitlar yoki ikkinchi tur o‘tkazgichlar kislota, ishqor va tuzlarning (asosan suvli) eritmalari hamda ionli birikmalarning suyuqlanmalari hisoblanadi. Bunday o‘tkazgichlardan tok o‘tishi elektr zaryadlari bilan birga molekulalar (ionlar) ning bir qismi ham ko‘chishi bilan bog‘liq, buning natijasida elektrolitning tarkibi asta-sekin o‘zgaradi, elektrodlarda esa elektroliz mahsulotlari ajralib chiqadi.

Barcha gazlar va bug‘lar, shu jumladan, metall bug‘lari ham elektr maydon kuchlanganligi kichik bo‘lganda o‘tkazgich bo‘la olmaydi. Biroq, agar maydon kuchlanganligi zarbli ionlanish va fotoionlanish boshlanishini ta’minlaydigan biror kritik qiymatdan yuqori bo‘lsa, u holda gaz elektron va ion elektr o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan o‘tkazgichga aylanishi mumkin.

Kuchli ionlashgan gaz hajm birligidagi elektronlar va musbat ionlar soni teng bo‘lganda plazma deb ataluvchi o‘ziga xos muvozanatli o‘tkazuvchi muhitdan iborat bo‘ladi.

Metallar elektr o‘tkazuvchanligining fizik tabiati. Eksperimental qonunlar va elektron nazariya. P.Drude va X.A.Lorens tomonidan rivojlantirilgan metallarning klassik elektron nazariyasi asosida erkin (kollektivlashgan) elektronlardan tashkil topgan elektron gaz haqidagi tasavvur yotadi. Elektron gazga ideal gaz xossalari beriladi, ya’ni elektronlar harakati klassik statistika qonunlariga bo‘ysunadi. Agar metalldagi atomlar bir marta ionlashgan deb hisoblasak, u holda erkin elektronlar konsentratsiyasi atomlar konsentratsiyasiga teng bo‘ladi va quyidagi formula bo‘yicha hisoblanishi mumkin:

$$n = \frac{\rho}{A} \cdot N_A ,$$

bu yerda ρ – materialning zichligi; A – atom massasi; N_A – Avogadro soni.

Ideal gazlarning atom-kinetik nazariyasiga muvofiq, uzluksiz xaotik harakat holatida bo‘lgan elektronlarning o‘rtacha kinetik energiyasi harorat ortishi bilan chiziqli ravishda ortadi:

$$\frac{m_0 \bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT , \qquad (2.1)$$

bu yerda $\bar{u}$ – issiqlik harakatining o‘rtacha tezligi; k – Bolsman doimiysi. 300 K haroratga o‘rtacha 10^5 m/s tartibidagi tezlik to‘g‘ri keladi.

Tashqi kuchlanishning qo‘yilishi elektronlarning maydonning ta’sir etuvchi kuchlari yo‘nalishida ergashishiga olib keladi, ya’ni elektronlar yo‘naltirilgan harakatning qandaydir qo‘shimcha tezligiga ega bo‘ladi, shu tufayli elektr toki paydo bo‘ladi. O‘tkazgichdagi tok zichligi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\bar{j} = ne\bar{\upsilon}, \qquad (2.2)$$

bu yerda n – o‘tkazgichdagi erkin elektronlar konsentratsiyasi, $\bar{\upsilon}$ – zaryad tashuvchilarning yo‘naltirilgan harakatining o‘rtacha tezligi (dreyf tezligi).

Tok zichligi 10^6 A/m^2 bo‘lgan mis o‘tkazgichda elektronlarning dreyf tezligi 10^{-4} m/s tartibida bo‘ladi, ya’ni real sharoitda $\bar{\upsilon} \ll \bar{u}$ tengsizlik bajariladi deb hisoblash mumkin.

Panjara tugunlari bilan to‘qnashishlar orasidagi oraliqlarda elektronlar elektr maydon ta’sirida quyidagi tezlanish bilan harakatlanadi:

$$a = \frac{eE}{m_0}.$$

Erkin yugurish oxirida elektron tomonidan erishgan maksimal dreyf tezligi

$$\upsilon_{\max} = a\tau_0,$$

bu yerda τ_0 – erkin yugurish vaqti.

To‘qnashishdan so‘ng ko‘pchilik elektronlar uchun yo‘naltirilgan harakat tezligi nolgacha pasayadi, ya’ni to‘plangan kinetik energiya panjara atomlariga uzatiladi. Shuning uchun erkin yugurish vaqtidagi dreyf tezligining o‘rtacha qiymati maksimal qiymatning yarmiga teng:

$$\bar{\upsilon} = \frac{eE}{2m_0}\tau_0.$$

$\bar{\upsilon} \ll \bar{u}$ bo‘lganligi uchun, erkin yugurish vaqtini hisoblashda $\bar{\upsilon}$ tezlik qo‘shimchasini hisobga olmaslik mumkin:

$$\tau_0 = \frac{\bar{l}}{\bar{u}},$$

bu yerda $\bar{l}$ – elektronlarning o‘rtacha erkin yugurish yo‘li.

Olingan munosabatlarni tok zichligi uchun (2.2) formulaga qo‘yish quyidagi natijaga olib keladi:

$$\bar{j} = \frac{e^2 n\bar{l}}{2m_0\bar{u}}E = \gamma E, \qquad (2.3)$$

ya’ni tok zichligi elektr maydon kuchlanganligiga proporsionaldir, bu esa Om qonunining analitik ifodasidir.

(2.3) formulani keltirib chiqarishni absolyut qat’iy deb bo‘lmaydi, chunki bunda faqat bitta elektronning harakati e’tiborga olindi, xulosalar esa barcha erkin elektronlarga taalluqli edi. Yig‘indi impulsi maydon ta’sirida ham, kristall panjara tugunlari bilan to‘qnashishlar ta’sirida ham o‘zgaradigan erkin elektronlarning butun to‘plamiga elektr maydonning ta’sirini qarab chiqish to‘g‘riroq bo‘lar edi. Bunday analiz shunga olib keladiki, elektronlarning o‘rtacha dreyf tezligi ilgari

aniqlanganidan ikki marta katta bo‘ladi. Ushbu tuzatishni hisobga olgan holda, solishtirma o‘tkazuvchanlik ifodasi quyidagi ko‘rinishni oladi:

$$\gamma = \frac{e^2 n\bar{l}}{m_0 \bar{u}}. \qquad (2.4)$$

Erkin elektronlar haqidagi tasavvurlar metallning elektr o‘tkazuvchanligi bilan issiqlik o‘tkazuvchanligi orasidagi bog‘lanishni aniqlaydigan Videman - Frans eksperimental qonuniga osongina kelish imkonini beradi. Metalldagi elektronlar nafaqat elektr zaryadini tashiydi, balki undagi haroratni tenglashtirib, yuqori issiqlik o‘tkazuvchanlikni ta’minlaydi. Erkin elektronlarning yuqori konsentratsiyasi tufayli issiqlik o‘tkazuvchanlikning elektron tashkil etuvchisi issiqlik uzatishning boshqa mexanizmlaridan ustunlik qiladi. U holda ideal gazning atom-kinetik nazariyasiga muvofiq solishtirma issiqlik o‘tkazuvchanlik quyidagi ko‘rinishda yozilishi mumkin:

$$\lambda_T = \frac{1}{2} kn\bar{u}\bar{l}. \qquad (2.5)$$

(2.5) ifodani (2.4) formuladan topilgan solishtirma o‘tkazuvchanlikka bo‘lib, (2.1) formulani hisobga olsak, quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$\frac{\lambda_T}{\gamma} = 3k^2 e^{-2} T = L_0 T,$$

ya’ni solishtirma issiqlik o‘tkazuvchanlikning berilgan haroratda metallning solishtirma o‘tkazuvchanligiga nisbati o‘tkazgichning tabiatiga bog‘liq bo‘lmagan o‘zgarmas kattalikdir. Bundan, xususan, elektr tokini yaxshi o‘tkazgichlar issiqlikni ham yaxshi o‘tkazadi degan xulosa kelib chiqadi.

$L_0 = 3k^2e^{-2}$ yarim doimiy Lorens soni deyiladi. Garchi Lorens sonining son qiymati sezilarli darajada o‘zgarmasa ham elektronlarning kvant statistikasiga asoslangan yanada qat’iyroq tahlil u uchun biroz boshqacha ifodani beradi:

$$L_0 = \frac{\lambda_T}{\gamma T} = \frac{\pi^2}{3} k^2 e^{-2} = 2,45 \cdot 10^{-8} B^2 K^{-2}. \qquad (2.6)$$

Ko‘pgina metallar uchun xona haroratidagi Lorens sonining eksperimental qiymatlari nazariy qiymat bilan yaxshi mos keladi. Biroq metallarning klassik elektron nazariyasi nuqtai nazaridan muvaffaqiyatli hal qilingan masalalardan tashqari, tajriba ma’lumotlari bilan qarama-qarshiliklar ham paydo bo‘ldi. Xususan, klassik nazariya elektron gazning issiqlik sig‘imining kichikligini tushuntirib bera olmadi. Garmonik tebranuvchi ossillyatorlar sistemasi deb qarash mumkin bo‘lgan har qanday qattiq jism kristall panjarasining molyar issiqlik sig‘imi $3R$ (R – universal gaz doimiysi) ga teng. Bu natija fizikada Dyulong-Pti qonuni nomi bilan ma’lum bo‘lib, u yuqori haroratda qattiq jismlar uchun bajarilanadi. Metallarda energiyani yutish jarayonida faqat tebranuvchi atomlar emas, balki erkin elektronlar ham ishtirok etishi kerak. Shu nuqtai nazardan metallning issiqlik sig‘imi erkin elektron

tutmaydigan dielektriklarning issiqlik sig‘imidan ancha katta bo‘lishi kerak. Metalldagi erkin elektronlar soni atomlar soniga teng deb qabul qilib va elektronlar ideal gaz zarrachalari sifatida o‘rtacha issiqlikka ega ekanligini hisobga olgan holda (3/2)*kT* energiyani metallarning molyar issiqlik sig‘imi uchun C ni olamiz:

$$C = C_{pan} + C_e = 3R + \frac{3}{2}kN_A = \frac{9}{2}R, \qquad (2.7)$$

bu yerda C_{pan} – kristall panjaraning issiqlik sig‘imi; C_e – elektron gazning issiqlik sig‘imi.

Biroq haqiqatda metallarning yuqori haroratlardagi issiqlik sig‘imi kristall dielektriklarning issiqlik sig‘imidan kam farq qiladi. Bu elektron gaz metall o‘tkazgichni qizdirganda amalda issiqlik yutmasligidan dalolat beradi, bu esa klassik elektron nazariya tasavvurlariga ziddir. Qayd etilgan ziddiyat klassik nazariyaga qarshi asosiy, lekin yagona e’tiroz emas. Yuqori o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan metallarda elektronlarning o‘rtacha erkin yugurish yo‘li normal sharoitda $10^2 \div 10^3$ Å, past haroratlarda esa ancha katta bo‘ladi. Bu qiymatni angstrem birliklarini tashkil etuvchi panjaradagi atomlararo masofalar bilan taqqoslaganda elektronlar panjaraning yuzlab davrlari tartibidagi masofada to‘qnashmasdan harakatlanishini e’tirof etishga to‘g‘ri keladi. Yuqorida sanab o‘tilgan qiyinchiliklarni sovet olimi Ya.I. Frenkel va nemis fizigi A. Zommerfeld asoslarini ishlab chiqqan metallarning kvant nazariyasi yordamida yengib o‘tishga muvaffaq bo‘lindi.

Metall o‘tkazgichlar solishtirma qarshiligining haroratga bog‘liqligi. Fizikadan ma’lumki, elementar zarralar (shu jumladan elektronlar ham) korpuskulyar-to‘lqin dualizmi xususiyatiga ega. Shuning uchun metalldagi erkin elektronlarning harakatini uzunligi de Broyl nisbati bilan aniqlanadigan yassi elektron to‘lqinlarning tarqalishi deb qarash mumkin:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 u} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_p}}. \qquad (2.8)$$

Bunday yassi elektron to‘lqin qat’iy davriy potensial maydonda energiya sochmasdan (so‘nmasdan) tarqaladi, ya’ni qattiq jismning ideal, buzilishlarsiz kristall panjarasi elektronlar oqimiga sochuvchi ta’sir qilmaydi. Bu shuni bildiradiki, ideal kristallda elektronlarning erkin yugurish yo‘li cheksizlikka intiladi, elektr tokiga qarshilik esa nolga yaqinlashadi. Harorat absolyut nolga yaqinlashganda toza kuydirilgan (termik ishlov berilgan) metallarning qarshiligi nolga intilishi bu fikrni tasdiqlaydi. Ideal kristall panjarada elektronning erkin ko‘chish xususiyati klassik mexanikada o‘xshashi yo‘q. Qarshilik paydo bo‘lishiga olib keladigan sochilish panjarada uning to‘g‘ri tuzilishi turlicha buzilgan hollarda yuzaga keladi.

Ta’kidlab o‘tilganidek, struktura nuqsonlari dinamik va statik, atom (nuqtaviy) va og‘ir nuqsonlar bo‘lishi mumkin. Sochuvchi markazlar (defektlar) ning o‘lchami to‘lqin uzunligining choragidan katta bo‘lganda to‘lqinlarning

effektiv sochilishi sodir bo‘lishi nazariy jihatdan isbotlangan. Metallarda o‘tkazuvchanlik elektronlarining energiyasi 3 ÷ 15 eV. Bu energiyaga 3 ÷ 7 Å to‘lqin uzunlik mos keladi (2.8 formulaga qarang). Shuning uchun strukturaning har qanday mikro birjinslimasligi elektron to‘lqinlarning tarqalishiga to‘sqinlik qiladi, materialning solishtirma qarshiligini oshiradi.

Mukammal strukturali sof metallarda elektronlarning erkin yugurish yo‘lini chegaralovchi yagona kattalik kristall panjara tugunlaridagi atomlarning issiqlik tebranishlari hisoblanadi. Metallning issiqlik omili ta’sirida hosil bo‘ladigan solishtirma qarshiligini ρ_T bilan belgilaymiz. Ravshanki, harorat ortishi bilan atomlarning issiqlik tebranishlari amplitudalari va ular bilan bog‘liq bo‘lgan panjara davriy maydonining fluktuatsiyalari ortadi. Bu esa o‘z navbatida elektronlarning sochilishini kuchaytiradi va solishtirma qarshilikning ortishiga sabab bo‘ladi. Solishtirma qarshilikning haroratga bog‘liqlik xarakterini sifat jihatdan aniqlash uchun quyidagi qisqartirilgan modeldan foydalanamiz. Sochilish intensivligi tebranayotgan atom egallagan sferik hajmning ko‘ndalang kesimiga to‘g‘ri proporsional deb faraz qilamiz. Agar elektronlar oqimi yuzi F_o bo‘lgan tekis sirtga tushayotgan bo‘lsa, u holda bitta elektronning bitta tebranuvchi markazdan sochilish ehtimoli S_o quyidagi munosabat bilan aniqlanadi:

$$F_0 = \frac{\pi \cdot \Delta a^2}{S_0},$$

bu yerda Δa – atomlarning issiqlik tebranishlari amplitudasi.

Oqimning L_0 chuqurlikka siljishi elektronning sochilish ehtimolining ko‘rib chiqilayotgan hajmga kiritilgan atomlar soniga mutanosib ravishda ortishi bilan birga keladi:

$$F_L = F_o \cdot N \cdot S_o \cdot L_o,$$

bu yerda N – sochuvchi moddiy muhitning hajm birligidagi atomlar soni.

Elektronlarning o‘rtacha erkin yugurish yo‘li uzunligi l_T F_1 yo‘l birligida ularning sochilish ehtimolligiga teskari proporsional bo‘lib, quyidagini olamiz:

$$\overline{l_T} = \frac{1}{F_l} = \frac{1}{F_0 N S_0} = \frac{1}{\pi \Delta a^2 N}. \qquad (2.9)$$

Panjara tugunidan Δa ga og‘gan atomning potensial energiyasi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$E_p = \frac{1}{2} k_0 \Delta a^2,$$

bu yerda k_0 – atomni muvozanat holatiga qaytarishga intiladigan elastik bog‘lanish koeffitsiyenti. Klassik statistikaga ko‘ra, bir o‘lchovli garmonik ossillyatorning (tebranayotgan atomning) o‘rtacha energiyasi kT ga teng.

Shu asosda quyidagi tenglikni yozamiz:

$$\frac{1}{2}k_0\Delta a^2 = kT\,. \qquad (2.10)$$

(2.9) va (2.10) formulalar yordamida elektronlarning erkin yugurish yo‘li tezlikka teskari proporsional ekanligini isbotlash oson:

$$\bar{l}_T = \frac{k_0}{2\pi NkT}\,. \qquad (2.11)$$

Shuni ta’kidlash kerakki, olingan nisbat past haroratlarda bajarilmaydi. Gap shundaki, harorat pasayishi bilan atomlarning issiqlik tebranishlari amplitudasigina emas, balki tebranishlar chastotasi ham kamayishi mumkin. Shuning uchun past haroratlar sohasida elektronlarning panjara tugunlaridagi issiqlik tebranishlari ta’sirida sochilishi samarasiz bo‘lib qoladi. Elektronning tebranayotgan atom bilan o‘zaro ta’siri elektronning impulsini juda oz o‘zgartiradi. Panjara atomlarining tebranish nazariyasida harorat Debay harorati (Θ_D) deb ataluvchi biror xarakteristik haroratga nisbatan baholanadi. Θ_D Debay harorati kristallda yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan issiqlik tebranishlarining maksimal chastotasini aniqlaydi:

$$\Theta_D = \frac{h\nu_{\max}}{k}\,.$$

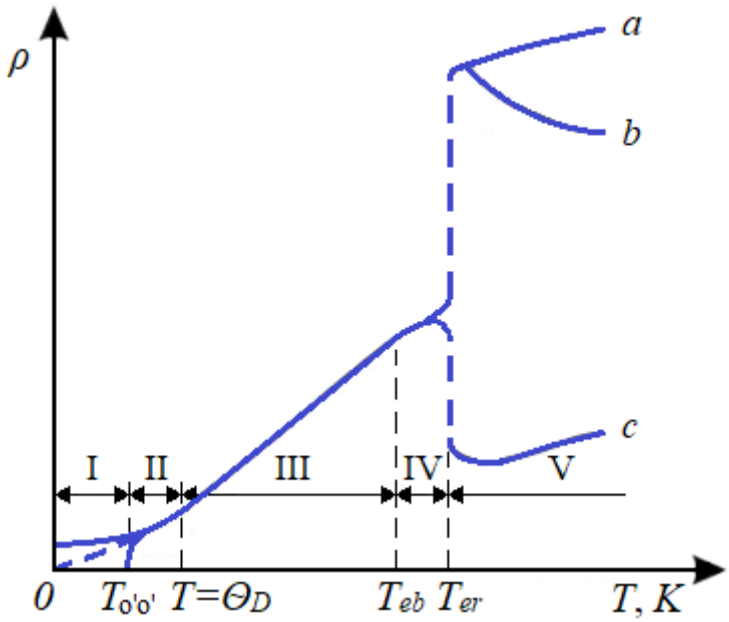
Bu harorat kristall panjara tugunlari orasidagi bog‘lanish kuchlariga bog‘liq bo‘lib, qattiq jismning muhim parametri hisoblanadi.

(2.11) ifodani $\gamma = \frac{e^2 n\bar{l}}{m_n u_F}$ ifodaga qo‘ygandan so‘ng, $T > \Theta_D$ da metallarning solishtirma qarshiligi haroratga bog‘liq ravishda chiziqli o‘zgaradi degan xulosaga kelish mumkin:

$$\rho_T = \frac{1}{\gamma} = \frac{2\pi k m_n u_F}{e^2 k_0} T = BT\,, \qquad (2.12)$$

bu yerda $B = \frac{2\pi k m_n u_F}{e^2 k_0}$.

Tajriba shuni ko‘rsatadiki, haroratga bog‘liqlik $\rho_T(T)$ ning chiziqli approksimatsiyasi xatolik 10% dan oshmaydigan $(2/3)\Theta_D$ ga yaqin haroratgacha ham o‘rinli bo‘ladi. Ko‘pchilik metallar uchun xarakteristik Debay harorati 400÷450 K. Shuning uchun chiziqli yaqinlashish odatda xona haroratidan va undan yuqori haroratlarda o‘rinli bo‘ladi. Solishtirma qarshilikning pasayishi fononlarning issiqlik tebranishlarining yangi va yangi chastotalarini asta-sekin yo‘q qilish bilan bog‘liq bo‘lgan past haroratli sohada ($T << \Theta_D$) nazariya $\rho_T \sim T^5$ ning darajali bog‘liqligini bashorat qiladi. Fizikada bu munosabat Blox-Gryunayzen qonuni deb ataladi. $\rho_T(T)$ ning keskin darajali bog‘liqligi kuzatiladigan harorat oralig‘i odatda uncha katta bo‘lmaydi, bunda daraja ko‘rsatkichining eksperimental qiymatlari 4 dan 6 gacha oraliqda yotadi.



2.1-rasm. Keng haroratlar oralig‘ida metall o‘tkazgich solishtirma qarshiligining haroratga bog‘liqligi: *a, b, c* – har xil erigan metallar solishtirma qarshiliklarining o‘zgarish variantlari.

Metall o‘tkazgich solishtirma qarshiligining haroratga bog‘liq ravishda o‘zgarishining tipik egri chizig‘i 2.1- rasmda keltirilgan. Absolyut nol yaqinidagi tor I sohada bir qator metallar o‘tao‘tkazuvchanlik holatiga o‘tishi mumkin (bu haqida keyinroq batafsil to‘xtalib o‘tamiz) va 2.1-rasmda $T_{o'o'}$ haroratda solishtirma qarshilikning sakrashi ko‘rinib turibdi. Mukammal strukturali sof metallarda harorat 0 *K* ga intilganda solishtirma qarshilik ham 0 ga intiladi (punktir egri chiziq), erkin yugurish uzunligi esa cheksizlikka intiladi. Hatto odatiy haroratda ham metallarda elektronlarning erkin yugurish yo‘li atomlar orasidagi masofadan yuzlab marta katta bo‘ladi (2.1-jadval).

II o‘tish sohasi chegaralarida solishtirma qarshilikning tez o‘sishi kuzatiladi: $\rho \sim T^n$, bu yerda n ning qiymati 5 gacha borishi mumkin, biroq harorat ortishi bilan asta-sekin 1 gacha kamayadi ($T = \Theta_D$ da).

$\rho(T)$ haroratga bog‘liqlikning chiziqli qismi (III soha) ko‘pchilik metallarda erish nuqtasiga yaqin haroratlargacha cho‘ziladi. Spin tartibining buzilishida elektronlarning qo‘shimcha sochilishi sodir bo‘ladigan ferromagnit metallar bu qoidadan istisnodir. Erish nuqtasi yaqinida, ya’ni IV sohada (boshlanishi 2.1-rasmda T_{eb} harorat bilan belgilangan) oddiy metallarda ham chiziqli bog‘lanishdan biroz chetlanishlar kuzatilishi mumkin.

Qattiq holatdan suyuq holatga o‘tishda ko‘pchilik metallarning solishtirma qarshiligi taxminan 1,5-2 marta ortishi kuzatiladi, ammo g‘ayrioddiy holatlar ham mavjud: murakkab kristall tuzilishga ega bo‘lgan moddalarda, masalan, vismut va galliyda, erish ρ ning kamayishi bilan birga keladi. Tajriba quyidagi qonuniyatni

aniqlaydi: agar metallning erishi hajmning ortishi bilan borsa, u holda solishtirma qarshilik sakrashsimon ortadi; aksincha hajmning kamayishi bilan kechadigan metallarda esa ρ ning kamayishi sodir bo‘ladi.

Erish vaqtida erkin elektronlarning sonida ham, ularning o‘zaro ta’sirlashuv xarakterida ham sezilarli o‘zgarish sodir bo‘lmaydi. ρ ning o‘zgarishiga hal qiluvchi ta’sir ko‘rsatuvchi omil – atomlar joylashuvidagi tartibning buzilishi va uzoqdan tartibning yo‘qolishi bilan bog‘liq jarayonlardir. Ba’zi metallarning (Ga, Bi) xossalarida kuzatiladigan noodatiy holatlarni bu moddalar eritilganda siqiluvchanlik modulining oshishi bilan tushuntirish mumkin, bu esa atomlarning issiqlik tebranishlari amplitudasining kamayishiga olib keladi.

2.1-jadval

Bir qator metallar uchun 0 °C da elektronlarning o‘rtacha erkin yugurish yo‘li

Metall	**Li**	**Na**	**K**	**Ni**	**Cu**	**Ag**	**Au**	**Fe**
$\overline{l} \cdot 10^{-10}$ m	110	350	370	133	420	570	410	220

Harorat bir kelvinga o‘zgarganda solishtirma qarshilikning nisbiy o‘zgarishi solishtirma qarshilikning harorat koeffitsiyenti deb ataladi:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}. \qquad (2.13)$$

Musbat ishora α_ρ harorat ko‘tarilganda berilgan nuqta atrofida solishtirma qarshilik ortgan holga mos keladi. α_ρ kattalik ham haroratning funksiyasidir. $\rho(T)$ ning chiziqli bog‘liqlik sohasida quyidagi ifoda o‘rinli:

$$\rho = \rho_0\left[1+\alpha_\rho\left(T-T_0\right)\right],$$

bu yerda ρ va ρ_0 – mos ravishda T_0 va T haroratlardagi solishtirma qarshiliklar; α_ρ – qarshilikning harorat koeffitsiyenti bo‘lib, bu koeffitsiyent harorat diapazonining boshiga, ya’ni T_0 haroratga nisbatan olingan:

$$\alpha_\rho = \alpha_R + \alpha_l,$$

bu yerda α_R – ushbu o‘tkazgich qarshiligining harorat koeffitsiyenti; α_l – materialning chiziqli kengayishining harorat koeffitsiyenti. Sof metallarda $\alpha_l << \alpha_\rho$, shuning uchun ularda $\alpha_R = \alpha_\rho$. Ammo termik barqaror metall qotishmalari uchun bunday yaqinlashish to‘g‘ri bo‘lmaydi.

2.2-§. Kirishmalar va boshqa strukturaviy nuqsonlarning metallarning qarshiligiga ta’siri. Metall qotishmalarning elektrik xossalari

Metallda elektron to‘lqinlarning sochilishiga faqat panjara tugunlarining issiqlik tebranishlarigina emas, balki kristall potensial maydonining davriyligini buzadigan strukturaning statik nuqsonlari ham sabab bo‘ladi. Strukturaning statik

nuqsonlarida sochilish haroratga bog‘liq emas. Shuning uchun harorat absolyut nolga yaqinlashgan sari real metallarning qarshiligi qoldiq qarshilik deb ataluvchi biror o‘zgarmas qiymatga intiladi (2.1- rasmga q.). Bundan solishtirma qarshilikning additivligi haqidagi *Mattissen qoidasi* kelib chiqadi:

$$\rho = \rho_{\text{T}} + \rho_{\text{qol}}$$

bu yerda ρ_{T} – kristall panjara tugunlarining issiqlik tebranishlarida elektronlarning sochilishi bilan bog‘liq bo‘lgan solishtirma qarshilik; ρ_{qol} – strukturaning statik nuqsonlarida elektronlarning sochilishi bilan bog‘liq bo‘lgan solishtirma qoldiq qarshilik.

Bu qoidadan qarshiligi biror kritik haroratdan pastda yo‘qoladigan o‘ta o‘tkazuvchan metallar mustasnodir.

Real o‘tkazgichda doimo ifloslanish ko‘rinishida yoki legirlovchi (qasddan kiritilgan) element ko‘rinishida mavjud bo‘lgan aralashmalardagi sochilish qoldiq qarshilikka eng katta hissa qo‘shadi. Shuni ta’kidlash kerakki, har qanday qo‘shimcha, hatto u asosiy metallga nisbatan yuqori elektr o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lsa ham, ρ ning oshishiga olib keladi. Masalan, mis o‘tkazgichga kumush aralashmasining 0,01 ulushini kiritish misning solishtirma qarshiligini 0,002 μΩ·m ga oshiradi. Tajribada aniqlanishicha, kirishmalar miqdori kam bo‘lganda solishtirma qarshilik kirishma atomlari konsentratsiyasiga proporsional ravishda ortadi. Bu tajribaviy qonuniyatga quyidagicha izoh berish mumkin. Kirishmaviy sochilish elektronlarning erkin yugurish yo‘lini cheklaydi, bu haqiqiy o‘tkazgichda quyidagi munosabat bilan aniqlanadi:

$$\frac{1}{\bar{l}} = \frac{1}{\bar{l}_T} + \frac{1}{\bar{l}_k}, \qquad (2.14)$$

bu yerda $\bar{l}_T$ va $\bar{l}_k$ – mos ravishda issiqlik tebranishlarida va kirishmalarda sochilish.

Kirishma atomini ko‘ndalang kesimi S_{k} bo‘lgan sfera ko‘rinishida qarab, faqat kirishmalarda sochilish bilan chegaralangan erkin yugurish yo‘li $\bar{l}_k$ uchun (2.9) formulaga o‘xshash formula yozamiz:

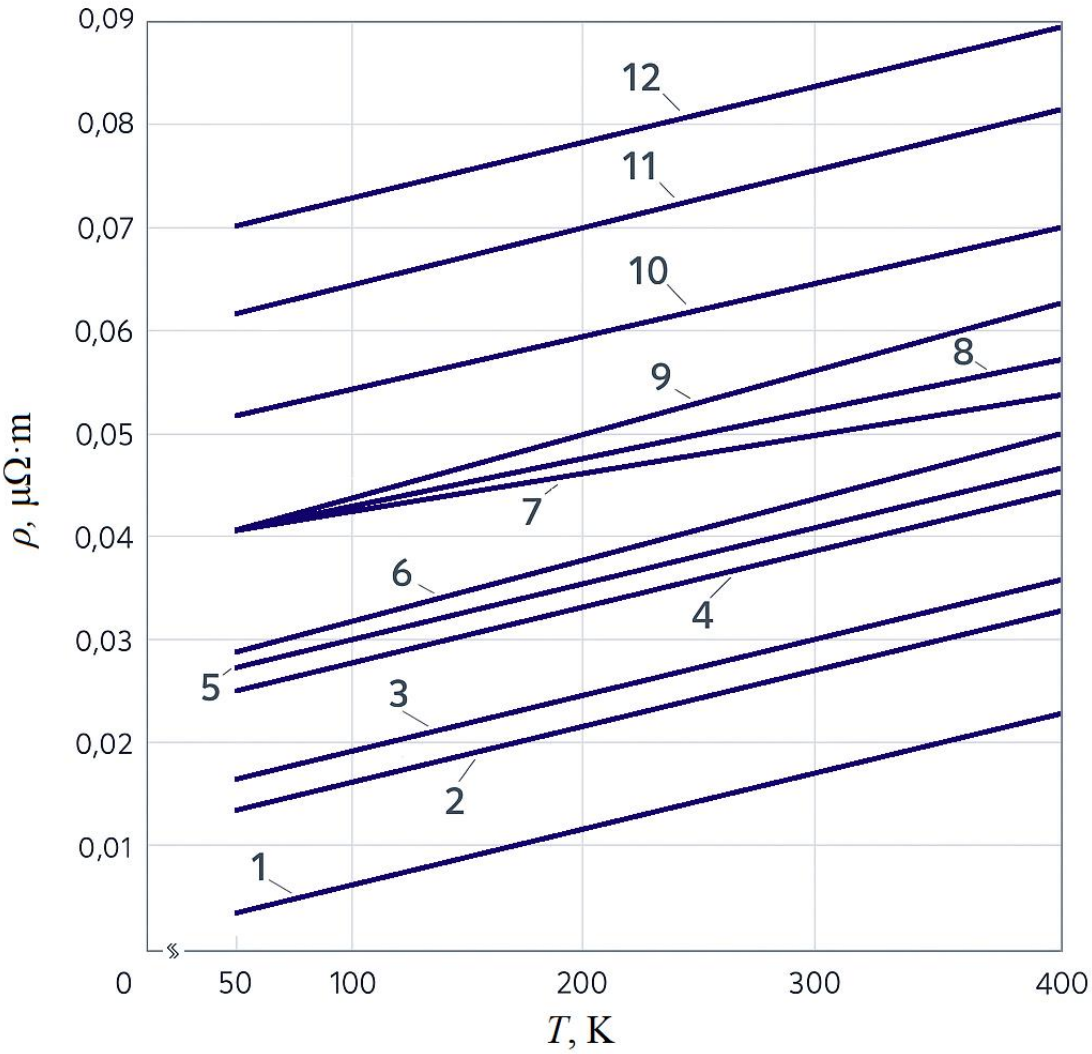
$$\frac{1}{\bar{l}_k} = N_k S_k ,$$

bu yerda N_{k} – hajm birligidagi kirishma atomlar soni.

Sochilishning ikkala turini hisobga olib, o‘tkazgichning solishtirma qarshiligi uchun quyidagini olamiz:

$$\rho = \frac{m_p u_F}{e^2 n \bar{l}} = \rho_T + \frac{m_p u_F}{e^2 n} N_k S_k . \qquad (2.15)$$

Mattissen qoidasi 2.2-rasmda ko‘rsatilgan bo‘lib, undan ko‘rinib turibdiki, toza mis va uning qotishmalari solishtirma qarshiligining haroratga bog‘liqligi kichik miqdorda (taxminan 4 at. %) indiy, surma, qalay, mishyak o‘zaro parallel; oraliq metallar bilan qotishmalar uchun bu qoidadan ba’zi og‘ishlar kuzatiladi.



2.2-rasm. Matissen qoidasini ifodalovchi qattiq eritma turidagi mis qotishmalarining solishtirma qarshiligining haroratga bog‘liqligi:

1 – toza Cu; 2 – Cu-In (1,03 at. %); 3 – Cu-Ni (1,12 at. %); 4 – Cu-Sb (0,40 at.%); 5 – Cu-Sn (0,89 at.%); 6 – Cu-Ni (2,16 at.%); 7 – Cu-Mn (1,20 at.%); 8 – Cu-Fe (0,61 at.%); 9 – Cu-Ni (3,32 at.%); 10 – Cu-Fe (0,87 at. %); 11 – Cu-Sb (1,13 at. %); 12 – Cu-As (1,01 at. %).

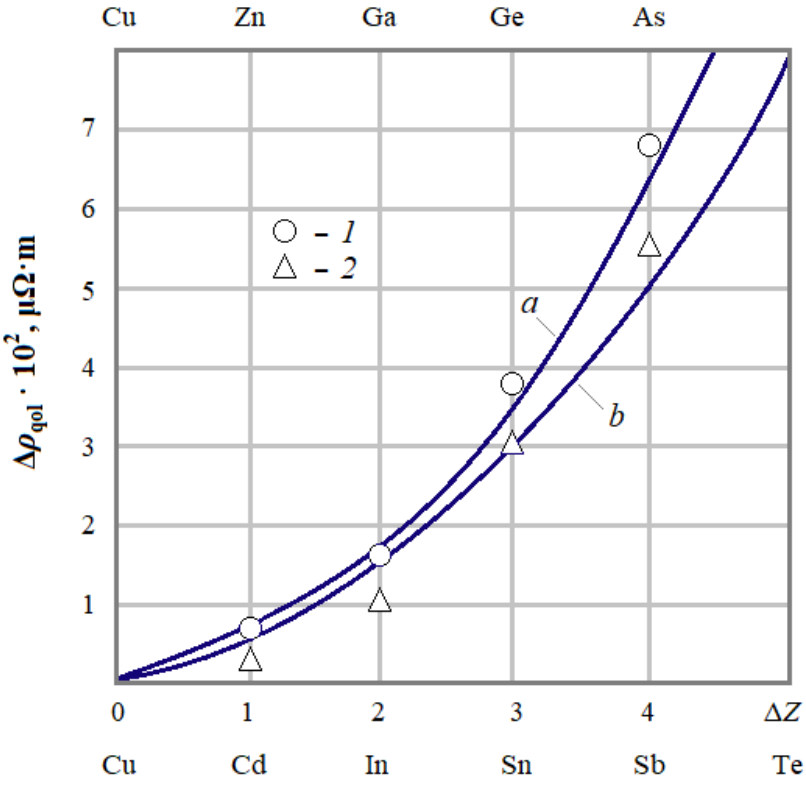
Mattissen qoidasidan chetga chiqishning sabablaridan biri aralashmalarning metallning elastiklik xossalariga ta’siri bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin, bu esa kristall panjaraning tebranish spektrining o‘zgarishi bilan birga boradi. Turli aralashmalar metall o‘tkazgichlarning qoldiq qarshiligiga turlicha ta’sir ko‘rsatadi. Kirishmaviy sochilishning samaradorligi panjaradagi g‘alayonlantiruvchi potensial bilan aniqlanadi, uning qiymati kirishma atomlari va erituvchi metall (asos) dagi valentliklar qanchalik kuchli farq qilsa, shunchalik yuqori bo‘ladi.

Bir valentli metallar uchun solishtirma qoldiq qarshilikning 1 at. ga o‘zgarishi % aralashma (“aralashma” qarshilik koeffitsiyenti) quyidagi qonuniyatga bo‘ysunadi:

$$\Delta\rho_{qol} = a + b \cdot \Delta Z^2, \qquad (2.16)$$

bu yerda a va b – metall tabiatiga va D.I.Mendeleevning elementlar davriy sistemasida aralashma atomi egallagan davrga bog‘liq bo‘lgan konstantalar; ΔZ – erituvchi metall va kirishma atomining valentliklari farqi.

(2.16) munosabat fizikada Linde qoidasi nomi bilan ma’lum. Bundan ko‘rinadiki, o‘tkazuvchanlikning kamayishiga metalloid aralashmalarning ta’siri metall elementlar aralashmalarining ta’siriga qaraganda kuchliroq bo‘ladi. Bu qonuniyatning tasdig‘i sifatida 2.3-rasmda keltirilgan eksperimental ma’lumotlarni keltirish mumkin.



2.3-rasm. Misning 1 at. dagi qoldiq qarshiligi. Aralashma konsentratsiyasi %: 1 - elementlarning yuqori qatori; 2 - elementlarning pastki qatori;

$a - \Delta\rho_{qol} = 0,4\Delta Z^2$; $b - \Delta\rho_{qol} = 0,32\Delta Z^2$.

Solishtirma qoldiq qarshilikka aralashmalardan tashqari strukturaning xususiy nuqsonlari: vakansiyalar, kirishma atomlari, dislokatsiyalar, donalar chegaralari ta’sir ko‘rsatadi. Nuqtaviy nuqsonlar konsentratsiyasi harorat ortishi bilan eksponensial ravishda ortadi va erish nuqtasi yaqinida yuqori qiymatlarga erishishi mumkin. Bundan tashqari, material yuqori energiyali zarralar, masalan, reaktordagi neytron yoki tezlatkichdagi ionlar bilan nurlantirilganda unda vakansiyalar va tugunlararo atomlar oson paydo bo‘ladi. Qarshilikning o‘lchangan qiymatiga qarab panjaraning radiatsion shikastlanish darajasi haqida fikr yuritish mumkin. Xuddi shu yo‘l bilan nurlantirilgan namunaning tiklanishini

(kuydirilishini) ham kuzatish mumkin. Mis solishtirma qoldiq qarshiligining 1 at. ga o‘zgarishida nuqtali nuqsonlar foizi quyidagilarni tashkil etadi:

- vakansiya uchun 0,010÷0,015 μΩ·m;
- kirishma atomlari uchun 0,005÷0,010 μΩ·m.

Solishtirma qoldiq qarshilik metallarning kimyoviy tozaligi va strukturaviy mukammalligining butun sezgir xarakteristikasidir. Amaliyotda o‘ta yuqori tozalikdagi metallar bilan ishlashda qo‘shimchalar miqdorini baholash uchun xona haroratida va suyuq geliy haroratida solishtirma qarshiliklar nisbati o‘lchanadi:

$$\beta = \frac{\rho_{300}}{\rho_{4,2}}.$$

Metall qanchalik toza bo‘lsa, β qiymati shunchalik katta bo‘ladi. Hozirgi vaqtda olinadigan eng toza metallarda (tozalik darajasi 99,99999%) β parametri 10^5 tartibidagi qiymatga ega.

Metall va qotishmalarning solishtirma qarshiligiga kuchlanganlik holati keltirib chiqaradigan buzilishlar katta ta’sir ko‘rsatadi. Lekin bu ta’sir darajasi yigirish xarakteriga qarab aniqlanadi.

Masalan, har tomonlama siqishda ko‘pchilik metallarning solishtirma qarshiligi kamayadi. Bu atomlarning yaqinlashishi va panjaradagi atomlarning issiqlik tebranishlari amplitudasining kamayishi bilan tushuntiriladi.

Elastik cho‘zilish va buralishda atomlararo masofalar ortadi. Bu hol elektronlar sochilishining kuchayishi va ρ ning ortishi bilan birga sodir bo‘ladi. Ta’sir etuvchi kuch bo‘ylab tok o‘tkazish shartida elastik cho‘zilish yoki siqilishning ta’siri quyidagi formula bilan hisobga olinadi:

$$\rho = \rho_0 (1 \pm \varphi\sigma), \qquad (2.17)$$

bu yerda φ – bosim bo‘yicha solishtirma qarshilik koeffitsiyenti, $\varphi = \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{d\sigma}$; σ – namuna kesimidagi mexanik kuchlanish.

(2.17) ifodadagi “+” ishora cho‘zilishdagi deformatsiyaga, “–” ishora esa siqilishdagi deformatsiyaga mos keladi. Odatda φ koeffitsiyent $(1\div5)\cdot10^{-11}$ Pa^{-1} ni tashkil etadi. Plastik deformatsiya va zichlanish (deformatsiyalanishdagi mustahkamlanish) metallar va qotishmalarning solishtirma qarshiligini har doim oshiradi, bu esa dislokatsiyalar zichligi va boshqa strukturaviy nuqsonlarning ortishi bilan bog‘liq. Biroq bu o‘sish hatto toza metallar sezilarli darajada parchalanganda ham bir necha foizni tashkil etadi.

Termik toblash ρ ning ortishiga olib keladi, bu esa panjaraning buzilishi, ichki kuchlanishlarning paydo bo‘lishi bilan bog‘liq. Termik ishlov berish (kuydirish) yo‘li bilan rekristallizatsiyalashda solishtirma qarshilik dastlabki qiymatgacha pasaytirilishi mumkin, chunki nuqsonlar “davolanadi” va ichki kuchlanishlar yo‘qoladi.

Metall qotishmalarning elektrik xossalari. Texnikada tartibsiz qattiq eritma tuzilishiga ega bo‘lgan metall qotishmalari keng qo‘llaniladi. Qattiq eritma hosil bo‘lishida erituvchi metallning kristall panjarasi saqlanib qoladi, faqat uning davri o‘zgaradi. Kristall tuzilishining tipi bir xil bo‘lgan ko‘pgina metallar istalgan nisbatda aralashadi, ya’ni uzluksiz qattiq eritmalar qatorini hosil qiladi. Shu bilan birga, komponentlari o‘zaro cheklangan eruvchanlikka ega bo‘lgan yoki qattiq fazada umuman erimaydigan ko‘plab metall tizimlari mavjud. Turli sortdagi atomlarning kristall panjara tugunlari bo‘ylab statistik taqsimlanishi kristallning davriy potensial maydonida sezilarli fluktuatsiyalarni keltirib chiqaradi, bu esa o‘z navbatida elektronlarning kuchli sochilishiga olib keladi. Xuddi metallar kabi, qotishmaning to‘liq qarshiligini ikki qo‘shiluvchining yig‘indisi sifatida ifodalash mumkin:

$$\rho_{qot} = \rho_T + \rho_{qol}\,, \tag{2.18}$$

bu yerda ρ_T – panjaraning issiqlik tebranishlarida elektronlarning sochilishi bilan bog‘liq bo‘lgan qarshilik; ρ_{qol} – qotishma tuzilishining bir jinsli bo‘lmagan joylarida elektronlarning sochilishi bilan bog‘liq bo‘lgan qo‘shimcha (qoldiq) qarshilik.

Qattiq eritmalarning o‘ziga xos xususiyati shundaki, o‘sish issiqlik tarkibiy qismidan sezilarli darajada (ko‘p marta) oshib ketishi mumkin. Ko‘pgina ikki komponentli qotishmalar uchun tarkibga qarab o‘sishning o‘zgarishi ko‘rinishning parabolik bog‘liqligi bilan yaxshi tavsiflanadi:

$$\rho_{qol} = Cx_A x_B = Cx_B\left(1 - x_B\right), \tag{2.19}$$

bu yerda C – qotishma tabiatiga bog‘liq bo‘lgan konstanta; x_A va x_B – qotishmadagi komponentlarning atom ulushi.

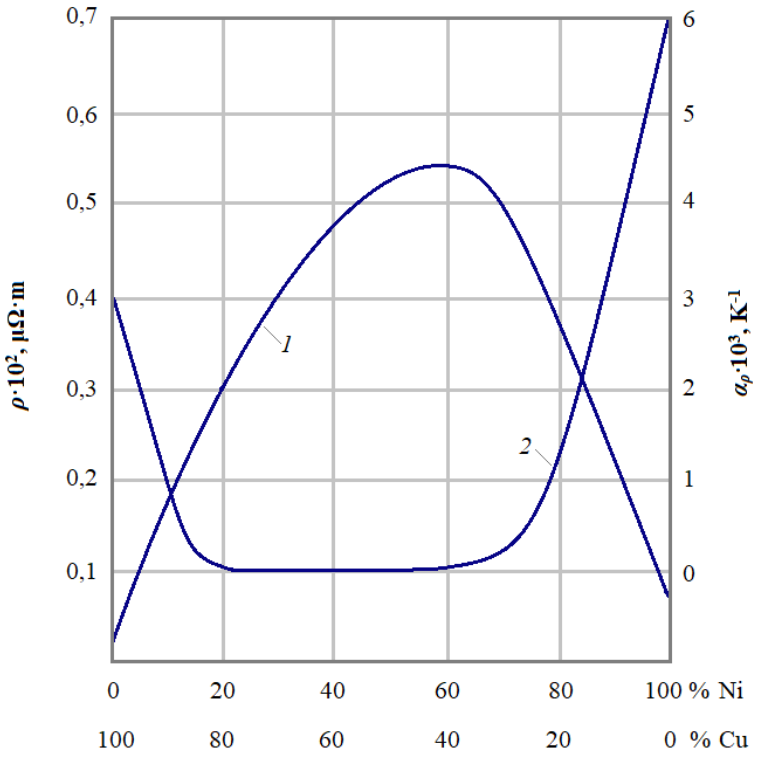
(2.19) munosabat *Nordgeym qonuni* deb nomlanadi. Bundan A - B binar qattiq eritmalarda qoldiq qarshilik A metallga B atomlari qo‘shilganda ham, B metallga A atomlari qo‘shilganda ham ortadi, shu bilan birga bu o‘zgarish simmetrik egri chiziq bilan xarakterlanadi. Qattiq eritmalarning uzluksiz qatorida solishtirma qarshilik qotishma o‘z tarkibiga ko‘ra toza komponentlardan qancha uzoq bo‘lsa, shuncha katta bo‘ladi. Qoldiq qarshilik o‘zining maksimal qiymatiga komponentlar miqdori teng bo‘lganda erishadi ($x_A = x_B = 0{,}5$). Nordgeym qonuni tarkib o‘zgarganda fazaviy o‘tishlar kuzatilmasa va komponentlardan birortasi ham o‘tuvchi yoki siyrak yer elementlari qatoriga kirmasa, uzluksiz qattiq eritmalar solishtirma qarshiligining o‘zgarishini ancha aniq tavsiflaydi. Bunday sistemalarga Au - Ag, Si - Ag, Si - Au, W - Mo va boshqa qotishmalar misol bo‘la oladi. Tarkibiy qismlari oraliq guruh metallari bo‘lgan qattiq eritmalar o‘zini biroz boshqacha tutadi (2.4-rasm). Bunday holda, komponentlarning yuqori konsentratsiyalarida qoldiq qarshilikning sezilarli darajada katta qiymati kuzatiladi, bu valent elektronlarning bir qismini oraliq metallar atomlarining ichki to‘ldirilmagan *d*-qobiqlariga o‘tishi bilan bog‘liq.

Bundan tashqari, bunday qotishmalarda maksimal qarshilik ρ ko‘pincha 50% dan farqli konsentratsiyalarga to‘g‘ri keladi. Qotishmaning solishtirma qarshiligi qancha katta bo‘lsa, uning α_ρ qiymati shuncha kichik bo‘ladi. Bu shundan kelib chiqadiki, qattiq eritmalarda ρ_{qol}, odatda ρ_T dan ancha katta bo‘ladi va haroratga bog‘liq bo‘lmaydi. Solishtirma qarshilikning harorat koeffitsiyentini aniqlashga muvofiq

$$\alpha_\rho^{qot} = \frac{1}{\rho_{qot}} \frac{d\rho_{qot}}{dT} = \frac{1}{\rho_{qol} + \rho_T} \frac{d\rho_T}{dT}. \qquad (2.20)$$

Sof metallarning α_ρ lari bir-biridan kam farq qilishini hisobga olsak, (2.20) ifodani quyidagi ko‘rinishga keltirish oson:

$$\alpha_\rho^{qot} = \frac{1}{1+\frac{\rho_{qol}}{\rho_T}} \frac{1}{\rho_T} \frac{d\rho_T}{dT} \approx \frac{\alpha_\rho^{met}}{1+\frac{\rho_{qol}}{\rho_T}}. \qquad (2.21)$$



2.4-rasm. Mis-nikel qotishmalarining solishtirma qarshiligi (1) va solishtirma qarshilik harorat koeffitsiyentining (2) komponentlar tarkibiga bog‘liqligi.

Konsentrlangan qattiq eritmalarda ρ_{qol} odatda ρ_T dan bir tartibga va undan ortiq bo‘ladi. Shuning uchun α_ρ^{qol} sof metalldan ancha past bo‘lishi mumkin. O‘tkazuvchi materiallar termostatini olish shunga asoslangan. Ko‘p hollarda qotishmalar solishtirma qarshiligining haroratga bog‘liqligi (2.18) oddiy additiv qonuniyatdan kelib chiqadigan bog‘liqlikka qaraganda murakkabroq bo‘ladi. Qotishmalarning solishtirma qarshiligining harorat koeffitsiyenti (2.21) munosabatda ko‘rsatilgandan ancha kichik bo‘lishi mumkin. Qayd etilgan

anomaliyalar mis-nikel qotishmalarida yaqqol namoyon bo‘ladi (2.4-rasmga qarang). Ba’zi qotishmalarda komponentlarning ma’lum nisbatlarida α_ρ manfiy bo‘ladi.

Qotishma komponentlarining protsent miqdoriga bog‘liq bo‘lgan ρ va a_ρ ning bunday o‘zgarishini, aftidan, toza metallarga nisbatan ancha murakkab tarkib va strukturali qotishmalarni klassik metallar deb qarash mumkin emasligi bilan tushuntirish mumkin, ya’ni ularning o‘tkazuvchanligining o‘zgarishi elektronlarning erkin yugurish yo‘li uzunligining o‘zgarishigagina emas, balki ba’zi hollarda harorat ko‘tarilganda qator ortidagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining qisman ortishiga ham bog‘liq bo‘ladi. Harorat ortishi bilan erkin yugurish yo‘lining kamayishi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining ortishi bilan kompensatsiyalanadigan qotishma solishtirma qarshiligining harorat koeffitsiyenti nolga teng bo‘ladi.

Suyultirilgan eritmalarda komponentlardan biri (masalan, *B* komponent) juda past konsentratsiya bilan tavsiflangan va uni aralashma sifatida ko‘rib chiqish mumkin bo‘lsa, (2.19) formulada aniqlikka putur yetkazmasdan $(1 - x_B) = 1$ deb olish mumkin. U holda qoldiq qarshilik bilan metalldagi kirishma atomlar konsentratsiyasi orasidagi chiziqli bog‘lanishga kelamiz:

$$\rho_{qol} = C \cdot x_B ,$$

bu yerda *C* doimiysi qoldiq qarshilikning $\Delta\rho_{qol}$ 1 at. ga o‘zgarishini tavsiflaydi (% aralashma).

Binar sistemaning komponentlari qattiq holatda o‘zaro erimaydigan bo‘lsa, kristallangandan keyin qotgan qotishmaning strukturasi ikki fazaning aralashmasidan iborat bo‘ladi. Bunday geterofazali qotishmalarning solishtirma qarshiligi birinchi yaqinlashishda tarkib o‘zgarishi bilan chiziqli o‘zgaradi, ya’ni ρ qiymati katta bo‘lgan metall miqdoriga proporsional ravishda ortadi. Biroq bir jinsli bo‘lmagan materiallarning elektr xususiyatlari sezilarli darajada strukturaviy sezgir bo‘lganligi sababli, zarrachalarning o‘lchamlari, ularning shakli va materialdagi taqsimoti tufayli oddiy additivlikdan sezilarli chetlanishlar yuzaga kelishi mumkin. Masalan, agar fazalardan biri uzluksiz bog‘langan matritsa asosini hosil qilsa, unga boshqa fazaning bir-biriga tegmaydigan zarralari joylashtirilgan bo‘lsa, u holda aralashmaning solishtirma o‘tkazuvchanligini quyidagi formula bo‘yicha hisoblash kerak:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \gamma_0 \frac{\Theta_V}{\frac{1-\Theta_V}{3} + \frac{\gamma_0}{\gamma_1 - \gamma_0}},$$

bu yerda γ_0, γ_1 – mos ravishda matritsaviy asos va ikkinchi faza qo‘shimchalarining o‘tkazuvchanligi; Θ_v – kiritmalarning hajmiy ulushi.

Bob bo‘yicha nazorat savollari

1. Elektr o‘tkazgich nima?
2. O‘tkazgich materiallar qanday turlarga bo‘linadi?
3. Elektr tokini o‘tkazish qobiliyatiga ko‘ra materiallar qanday tasniflanadi?
4. Nima uchun metall atomlar elektr tokini yaxshi o‘tkazadi?
5. O‘tkazgichlarning sanoatdagi asosiy qo‘llanilish sohalari qanday?
6. O‘tkazgich va yarim o‘tkazgich materiallar o‘rtasida qanday farqlar bor?
7. Metall va grafit o‘rtasidagi o‘tkazuvchanlikni qanday solishtirish mumkin?
8. Metallarda erkin elektronlar nima?
9. Elektr o‘tkazuvchanlik metallarda qanday zarrachalar orqali ta’minlanadi?
10. Metallarning elektr o‘tkazuvchanligi qanday kvant-mexanik asosda tushuntiriladi?
11. Drude modeli elektr o‘tkazuvchanlikni qanday izohlaydi?
12. Erkin elektronlar nazariyasi va kvant modeli o‘rtasidagi farq nimada?
13. Mis va temirning o‘tkazuvchanlik xossalarini taqqoslang.
14. Metallarning elektr qarshiligi harorat oshganda qanday o‘zgaradi?
15. Qanday hollarda metall o‘tkazuvchanligi kamayadi?
16. Haroratning oshishi metallning panjaraviy tebranishlariga qanday ta’sir qiladi?
17. Nima uchun harorat oshganda elektronlarning harakati sekinlashadi?
18. O‘tao‘tkazgich va oddiy metallning haroratga bog‘liq o‘tkazuvchanligini solishtiring.
19. Qanday metallarda haroratga sezgirlik kam bo‘ladi?
20. Kirishmalar metall strukturasida qanday rol o‘ynaydi?
21. Strukturaviy nuqsonlar qanday turlarga bo‘linadi?
22. Kirishmalar elektr tokining o‘tishiga qanday halaqit beradi?
23. Dislokatsiya va tanelar chegarasi elektr o‘tkazuvchanlikka qanday ta’sir ko‘rsatadi?
24. Toza metall va aralashmali metallning elektr xossalarini solishtiring.
25. Kristall strukturasi mukammal va nuqsonli metallni taqqoslang.
26. Metall qotishmalar deganda nima tushuniladi?
27. Qanday mashhur elektr qotishmalarini bilasiz?
28. Qotishmalarda o‘tkazuvchanlik qanday aniqlanadi?
29. Qanday hollarda qotishma sof metallga qaraganda pastroq o‘tkazuvchanlikka ega bo‘ladi?
30. Nixrom va misning o‘tkazuvchanligini solishtiring.
31. Qotishmalar va sof metallarni elektr xossalari bo‘yicha solishtiring.

III BOB. O‘TKAZGICH MATERIALLARNING ASOSIY XOSSALARI VA QO‘LLANILISHI

Zamonaviy texnika va texnologiyalar taraqqiyoti elektr energiyasini uzatish, taqsimlash hamda undan samarali foydalanishni ta’minlovchi yuqori sifatli o‘tkazgich materiallarsiz tasavvur etib bo‘lmaydi. Elektr va elektronika sohalarining jadal rivojlanishi, yangi avlod axborot tizimlari, energiya tejovchi texnologiyalar va kvant qurilmalarining paydo bo‘lishi o‘tkazgich materiallarning xossalarini chuqur o‘rganish va ularni maqsadga muvofiq takomillashtirishni talab etmoqda. Shu sababli o‘tkazgich materiallarning fizik, kimyoviy va strukturaviy xususiyatlarini hamda ularning qo‘llanilish sohalarini ilmiy asosda tahlil qilish bugungi kunda dolzarb masalalardan biridir.

O‘tkazgich materiallar elektr toki o‘tishini ta’minlaydigan moddalardir. Ularning elektr o‘tkazuvchanligi kristall panjaradagi erkin elektronlar soni va ularning harakatlanish darajasiga bog‘liq. Elektr o‘tkazuvchanligi yuqori bo‘lgan mis, kumush, oltin, alyuminiy kabi metallar elektr texnikasining deyarli barcha sohalarida ishlatiladi. Shu bilan birga, harorat, magnit maydoni, bosim va boshqa tashqi omillar ta’sirida o‘tkazuvchanlikning keskin o‘zgarishi mumkin bo‘lgan **o‘tao‘tkazgich materiallar** — zamonaviy fizika va texnika rivojida alohida o‘rin tutadi. Ularning qarshiligi mutlaq nolga teng bo‘lishi, magnit maydonni to‘liq siqib chiqarish xususiyati (Meissner effekti) yuqori samarali energetik tizimlar, magnit levitatsiya, tibbiyot tomografiyasi va kvant hisoblash texnologiyalarida keng qo‘llanilish imkonini yaratadi.

So‘nggi o‘n yilliklarda uglerodning turli modifikatsiyalari — **grafit, fullerenlar, nanotubalar, grafen** va ularning hosilalari — o‘tkazgich materiallar kimyosida yangi sahifa ochdi. Ularning noyob elektr, mexanik va issiqlik xossalari tufayli bu modifikatsiyalar nanokompozit materiallar, sensorlar, elektroximik energiya manbalari, yuqori chastotali elektronika va superkondensatorlarda qo‘llanilmoqda. Xususan, fullerenlar va fulleridlar strukturasidagi π-elektronlar tizimi ularni yarim o‘tkazgich, metall yoki o‘tao‘tkazgich sifatida ishlatish imkonini beradi.

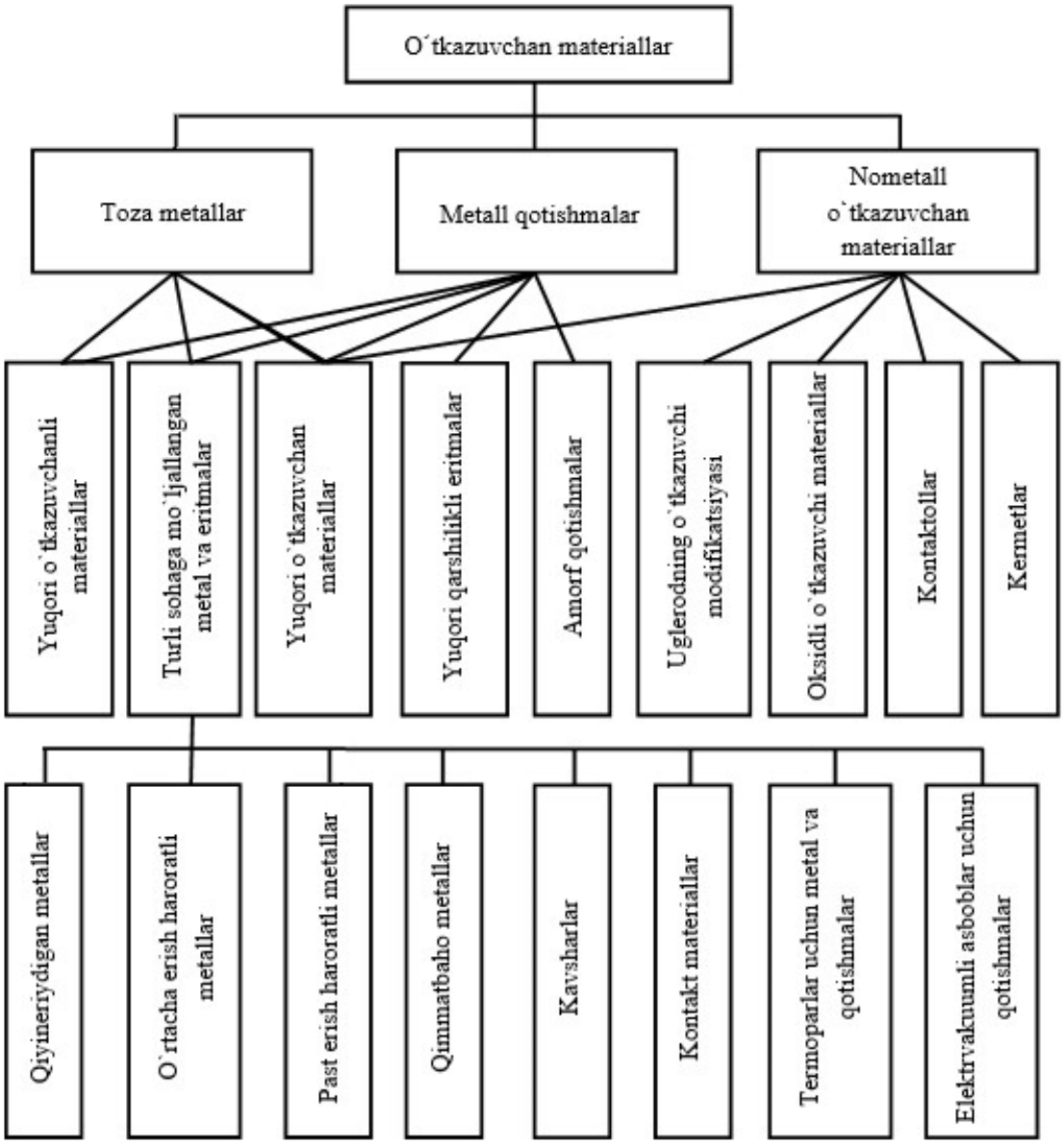
Bundan tashqari, **kompozitsion va oksidli o‘tkazgich materiallar** — murakkab fazali strukturalarga ega bo‘lib, metall, keramika yoki polimer asosida yaratiladi. Ular mexanik mustahkamlik, korroziyaga chidamlilik va dielektrik xossalar bilan birga barqaror elektr o‘tkazuvchanlikni ta’minlaydi. Bunday materiallar aerokosmik, atom energetikasi, elektronika, mikro va nanoelektron qurilmalar sohalarida keng qo‘llaniladi.

Ushbu bobda o‘tkazgich materiallarning tasnifi, ularning o‘tkazuvchanlik tabiati, fizik-mexanik va issiqlik xossalari, shuningdek, yuqori o‘tkazuvchan,

o‘tao‘tkazgich, kompozitsion va uglerod asosidagi yangi avlod o‘tkazgich materiallarning ilmiy-texnik asoslari hamda amaliy qo‘llanilish yo‘nalishlari batafsil tahlil qilinadi.

3.1-§. O‘tkazgich materiallarning tasnifi. Yuqori o‘tkazuvchan materiallar, o‘tao‘tkazgich metallar va qotishmalar

Hozirgi kunda o‘tkazgich materiallarning umumiy qabul qilingan klassifikatsiyasi mavjud emas. Fizika, kimyo va texnikada o‘tkazgich materiallar turli belgilar bo‘yicha tasniflanadi. O‘tkazgichlarning tarkibi, xossalari va texnik maqsadlari bo‘yicha mumkin bo‘lgan bitta sxemasi 3.1-rasmda keltirilgan.



3.1-rasm. O‘tkazgich materiallarning klassifikatsiyasi

Klassifikatsion sxemadan ko‘rinib turibdiki, hamma o‘tkazgich materiallar kimyoviy tarkibi bo‘yicha metallar va nometallarga bo‘linadi. Solishtirma qarshilik

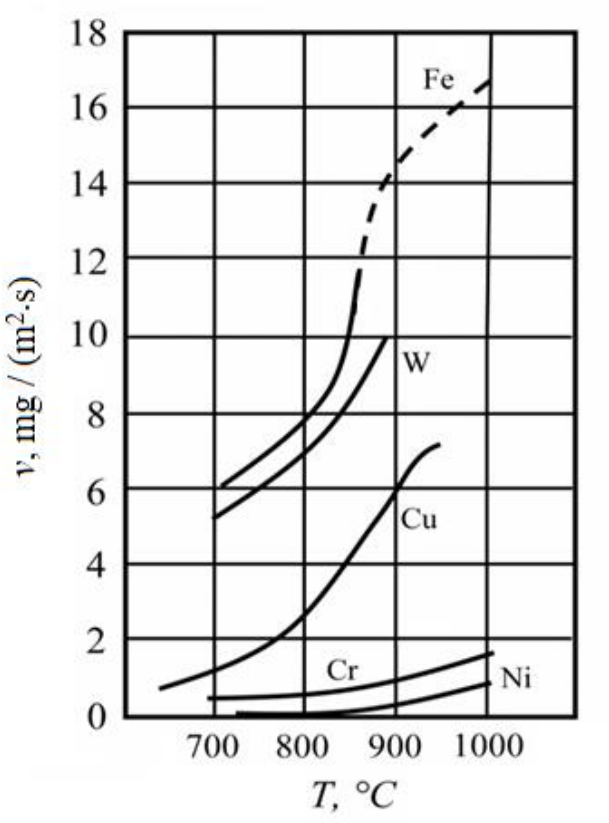
bo‘yicha metall qotishmalar toza metallar va o‘tkazgich muhitli metall bo‘lmaganlar orasida joylashgan. Metallar va qotishmalar orasidan umumiy va maxsus maqsadlarga mo‘ljallangan materiallarni ajratiladi. Umumiy maqsadlarga mo‘ljallangan materiallarga yuqori o‘tkazuvchan metallar va yuqori qarshilikka ega bo‘lgan qotishmalar kiradi. Elektronikada qiyin eriydigan metallar va elektrovakuumli qotishmalar, kavsharlar va kontakt materiallar, tartiblangan magnitli metallar va termoparalar uchun qotishmalar maxsus qo‘llanishda o‘rin egallagan.

O‘tao‘tkazgichlar alohida materiallar guruhini tashkil etadi, ularda past haroratlarda elektr xossalarining anomaliyasi namoyon bo‘ladi. O‘tao‘tkazuvchanlik holatiga faqatgina metallar va qotishmalar o‘tmasdan, balki oksidli birikmalarning butunqatori o‘tishi mumkin. Normal sharoitlarda elektr tokini yaxshi o‘tkazadigan, oksidli birikmalar, keng tarqalgan sovitgich bo‘lib hisoblangan – suyuq azotning qaynash haroratidan katta bo‘lgan rekordli yuqori haroratlarda o‘tao‘tkazuvchanlik holatlarini saqlab qoladi. Yuqori o‘tkazuvchan materiallar. Materiallarning ushbu guruhiga solishtirma qarshiligi normal sharoitda 0,1 μΩ·m dan katta bo‘lmagan o‘tkazgichlar kiradi. Materiallar ichida ko‘p tarqalgani mis va alyuminiydir.

Mis. Misning o‘tkazgich materiallar sifatida keng tarqalishini ta’minlovchi afzalliklari quyidagilar:

- kichik solishtirma qarshilik (metallar ichida faqat kumush misga nisbatan bir necha kam solishtirma qarshilikka ega);
- yetarlicha yuqori mexanik mustahkamlik;
- ko‘pchilik holatlarda korroziyaga qoniqarli turg‘unlik, hattoki, namlik yuqori sharoitlarda mis havoda, masalan, temirga nisbatan sekin oksidlanadi, misning intensiv oksidlanishi ko‘tarilgan haroratlarda sodir bo‘ladi (3.2-rasm);
- yaxshi qayta ishlanuvchanlik: mis list, lenta ko‘rinishiga keladi va sim holatiga keladi, uning qalinligi millimetrning mingdan bir ulushigacha keltiriladi;
- nisbatan oson payvandlash va kavsharlash.

Misning olinishi. Misni tabiatda ko‘p uchraydigan sulfid rudalarni qayta ishlash yo‘li bilan olinadi. Elektrotexnik maqsadlar uchun mo‘ljallangan rudani misni intensiv portlatish bilan qator eritishlardan va qizdirishdan so‘ng majburiy elektrolitik tozalanadi. Elektrolizdan so‘ng olingan misning katod plastinalarini massasi 80-90 kg li olish usullariga bog‘liq ravishda mis qattiq yoki yumshoq bo‘lishi mumkin. Yumshoq mis yumshatish, ya’ni keyingi sekin sovutiladigan bir necha yuzlab graduslarga qizdirish natijasida olinadi. Yumshoq mis qattiq misdan egiluvchanroq va kichik qarshilikka ega.



3.2-rasm. Temir, volfram, mis, nikel, xrom uchun oksidlanish tezligini haroratga bog‘liqligi (havoda).

Elektrovakuumli texnikada kislorodga ega bo‘lmagan mis turlari qo‘llanadi. Kislorod misdagi eng zararli aralashmalardan biri hisoblanadi, mexanik xossalari yomonlashadi, kavsharlash qiyinlashadi. Eng toza mis gazning qoldiq past bosimida vakuumda eritish usulida olinadi, bu metallga kislorod tushishini oldini oladi. Elektrotexnikada o‘tkazgichlar, kabellar, transformatorlar va elektr mashinalarning chulg‘amlari, folgalashtirilgan getinaks va tekstolit tayyorlash uchun qo‘llaniladi.

Mikroelektronikada gibrid mikrosxemalarni tayyorlashda taglikka o‘tqazilgan qatlamlar ko‘rinishida qo‘llaniladi.

Konstruktsion materiallar sifatida mis asosidagi qotishmalar – latunlar va bronzalar keng qo‘llaniladi.

Latunlar misning rux bilan qotishmasi hisoblanadi. Rux misning mexanik xossalarini yaxshilaydi va materialni arzonlashtiradi. Latun atmosfera, ichimli va dengiz suvida, lekin po‘lat bilan kontaktsiz korrozion barqarorlikka ega. Latun yaxshi deformatsiyalanadi, kesish bilan oson ishlov beriladi, kavsharlanadi va nuqtaviy payvandlash bilan payvandlanadi, lekin quruq ishqalanishda tez eskiradi. U yoki bu xossalarni berish uchun qo‘shimcha elementlar – alyuminiy, temir, kremniy, marganets, nikel, qalay, qo‘rg‘oshin kiritiladi.

Latun turli quyilmalar, shaybalar, asboblar karkaslarining detallari va mahkamlashlar uchun, shuningdek 80-100 °C haroratda ishlaydigan prujinalar va boshqa elementlar uchun qo‘llaniladi.

Bronzalar qalay, fosfor, alyuminiy, marganes va boshqa ayrim boshqa elementlar qo‘shimchalariga ega mis qotishmalari hisoblanadi. Bronzalarning ko‘plab turlari yuqori mexanik xossalarli yuqori elektr va issiqlik o‘tkazuvchanlikni o‘zida mujassamlashtiradi, masalan, berilliyli, kadmiyli, kremniy-marganetsli, xromli. Boshqa legirlash elementlari ham qo‘shiladigan qalayli, alyuminiyli va kremniyli bronzalar konstruktsion nomagnit korrozion-barqaror materiallar sifatida qo‘llaniladi.

Ular yaxshi payvandlanadi, kavsharlanadi, yaxshi antifriktsion xossalarga ega. Armaturalar, prujinali elementlar, kontaktlar tutgichlari detallarini tayyorlash uchun qo‘llaniladi.

Alyuminiy misga qaraganda tabiatda kengroq tarqalgan va shuning uchun arzon. Alyuminiyning solishtirma qarshiligi misning solishtirma qarshiligidan 1,6 martaga katta, lekin alyuminiy 3,5 martaga yengil. Alyuminiyning kamchiligi uning past mexanik mustahkamligi va kavsharlash hamda payvandlashning qiyinligi hisoblanadi. Alyuminiyning sirti aktiv oksidlanadi va Al_2O_3 oksidi bilan qoplanadi, u mis oksididan farqli ravishda yaxshi dielektrik hisoblanadi, mustahkam va qizishga barqarordir.

Alyuminiy elektrotexnikada o‘tkazgichlar va elektrolitik kondensatorlarni tayyorlash uchun keng ishlatiladi, mikroelektronikada integral mikrosxemalardagi kontaktlar va bog‘lanishlarni yaratish uchun qo‘llaniladi.

Yuqori qarshilik qotishmalari. Bu solishtirma qarshiligi 0,3μΩ·m dan kichik bo‘lmagan o‘tkazuvchan materiallar hisoblanadi. Ular elektr o‘lchash asboblari, rezistorlar, elektr isitish qurilmalarini tayyorlash uchun ishlatiladi. Binobarin, sanab o‘tilgan maqsadlar uchun ishlatiladigan materiallar qoniqtirishi kerak bo‘lgan talablar turlichadir.

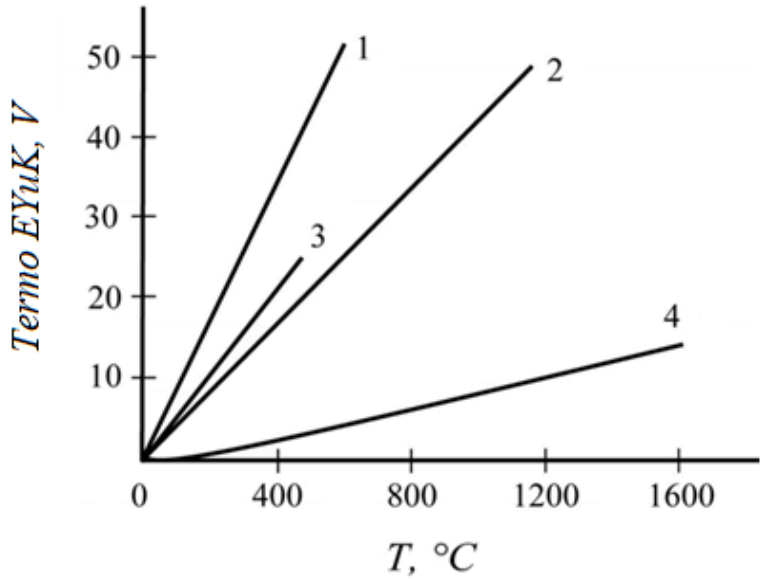
3.1-jadval

Yuqori qarshilik qotishmalarining asosiy xossalari

Qotishma	Solishtirma qarshilik ρ, μΩ·m	Solishtirma qarshilikning harorat koeffitsiyenti $\alpha_\rho, 10^{-4} K^{-1}$	Termo-EYuK, misga nisbatan, μV/K	Ishchi harorat, °C
Manganin	0,42-0,48	5-30	1-2	100-200
Konstantan	0,48-0,52	-(5-25)	40-50	450-500
Nixrom	1,0	100-200	-	1000

Elektr isitish qurilmalarida o‘tkazuvchan material 1000 °C tartibdagi yuqori haroratlarda uzoq vaqt ishlashi kerak. Elektr o‘lchash asboblari va rezistorlarni tayyorlash uchun kichik α_ρ – solishtirma qarshilik harorat bo‘yicha koeffitsiyenti va misga nisbatan past termo-EYuK qiymatiga ega bo‘lish muhim. Ko‘rsatilgan maqsadlar uchun mis asosidagi qotishmalar – *manganin* (86% Cu, 12% Mn, 2% Ni) va *konstantan* (60% Cu, 40% Ni), shuningdek *nixromlar* (nikel va xromning turli tarkiblari) eng keng tarqalgan (3.1-jadval).

Termoparalar uchun qotishmalar va kavsharlar. Haroratni o‘lchash maqsadlarida termoparalarni tayyorlash uchun qo‘llanadi. Xromel (90% Ni, 10% Cr), kopel (56% Cu, 44% Ni), alyumel (95% Ni, +Al, Si, Mn), platinorodiy (90% Pt, 10% Rh), konstantan (60% Cu, 40% Ni) qotishmalari eng keng qo‘llaniladi. Termoparalar uchun materiallar to‘plami maksimal termo-EYuK va o‘lchanadigan haroratlarning zarur diapazoni ta’minlanadigan tarzda tanlanadi. Eng yuqori barqarorlik, ishlovchanlik va keng haroratlar diapazoniga (1600 °C gacha) platina – platinorodiyli (PPr) termoparalar ega. Maksimal solishtirma termoEYuK ga xromel-kopel (XK) juftliklariga ega (3.3-rasm).



3.3-rasm. Termo-EYuKning termoparalarning kavsharlanish haroratlari farqiga bog‘liqligi: 1 – xromel-kopel, 2 – mis-konstantin, 3 – xromel-alyumel, 4 – platina-platinarodiy.

Kavsharlar bu kavsharlash uchun qo‘llanadigan maxsus qotishmalar hisoblanadi. Kavsharlash mexanik yoki elektr kontaktni hosil qilish uchun mo‘ljallangan. Kavsharlashda ulanishlar joyi qizdiriladi, kavshar eriydi, tarqaladi va ulanadigan detallar orasidagi oraliqlarni to‘ldiradi.

Kavsharlar yumshoq (erish harorati 300 °C gacha) va qattiq (erish harorati 300°C dan yuqori) kavsharlarga bo‘linadi. Yumshoq kavsharlar turli qalay va qo‘rg‘oshin tarkibli qalay-qo‘rg‘oshinli kavsharlar (QQK) hisoblanadi. Qattiq

kavsharlarga mis-ruxli kavsharlar (MRK) va kumushli kavsharlar (KK) kiradi. Kavsharlardan tashqari, kavsharlashda flyuslar qo‘llanadi. Ularning vazifasi ulanadigan detallar sirtidan oksidlar va ifloslanishlarni eritish va yo‘qotish, sirt bo‘yicha kavsharning tarqalishini yaxshilash, shuningdek erigan kavsharni oksidlanishdan himoyalash hisoblanadi.

Qiyin eriydigan metallar. Qiyin eriydigan metalllarga erish harorati 1700 °C dan oshadigan metallar kiradi. Asosiy qiyin eriydigan metallar volfram, molibden, tantal, niobiy, xrom, vanadiy, titan, sirkoniy, reniy hisoblanadi. Barcha qiyin eriydigan metallar oshirilgan haroratlarda aktiv bo‘lib qoladi va bir lahzali bog‘lanishlar hosil bo‘lish bilan jadal oksidlanadi. Shuning uchun ularni faqat vakuumda yoki himoyalangan muhitda ishlaydgan isitish elementlarini tayyorlash uchun qo‘llash mumkin. Bunday qizdirgichlarning turlaridan biri yupqa qatlamlarni vakuumda o‘tqazish uchu qurilmalarda qo‘llanadigan bug‘lantirgichlar hisoblanadi.

Qiyin eriydigan metallar odatda kukunli metallurgiya usullari – kukunlarni presslash va qizdirib biriktirish orqali olinadi. Barcha metallar ichidan eng yuqori erish haroratiga *volfram* (3400 °C) ega. Bu mayda donli tuzilishga ega bo‘lgan kul rang og‘ir qattiq metall hisoblanadi. Yuqori ichki kristall mustahkamligi va juda kuchsiz alohida donlar orasidagi bog‘lanish bilan ajralib turadi. Toza volframning xossalarini yaxshilash uchun unga turli qo‘shimchalar – toriy, kremniy, alyuminiy oksidlari qo‘shiladi. Volfram elektrovakuumli texnikaning eng muhim materiallaridan biri hisoblanadi. Undan elektron lampalardagi elektrodlar va qizdirgichlar tayyorlanadi.

Molibden tashqi ko‘rinishi va xossalari bo‘yicha volframga yaqin bo‘lgan metall, lekin egiluvchanroq, bu detallarga mexanik ishlov berishni yengillashtiradi.

Tantal tabiatda kam tarqalganligi tufayli juda qimmat turadigan metall hisoblanadi. Yaxshi egiluvchanlik va shaklga barqarorlikka ega. Molibden kabi elektrovakuumli asboblarning detallari sifatida qo‘llaniladi. Tantal kondensatorlarni ishlab chiqarish alohida ahamiyatga ega, chunki uning sirtida yuqori dielektrik singdiruvchanlikka ($\varepsilon = 25$) ega bo‘lgan zich dielektrik hisoblanadigan Ta_2O_5 oksidi qatlamini oson olish mumkin. Ta_2N nitrid tantal qatlamlari esa yupqa qatlamli rezistorlarni tayyorlash uchun keng qo‘llaniladi.

Xrom hatto oshirilgan haroratlarda oksidlanishga yuqori barqarorlikka ega bo‘lgan metall hisoblanadi, shuning uchun buyumlarning himoya qoplamalari uchun ishlatiladi. Mikroelektronikada yupqa xrom qatlamlari yupqa qatlamli rezistorlar va adgezion (ya’ni taglik sirtidan boshqa qatlamlarni tirkab olishni yaxshilaydigan) qatlamlar sifatida ishlatiladi.

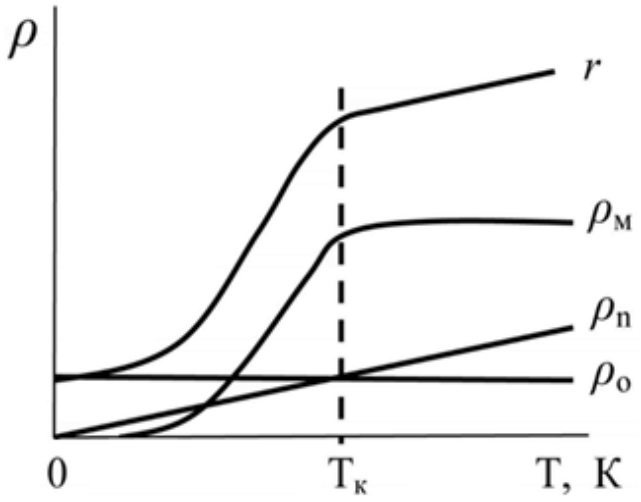
Xrom isitish asboblari, termoparalar, zanglamaydigan po‘latlar va magnit materiallar uchun ko‘p sonli qotishmalar tarkibiga kiradi.

O‘rtacha erish haroratidagi metallar. Bu guruhdagi materiallardan elektron texnikada *temir, nikel, kobalt* eng keng qo‘llanadi. Barcha sanab o‘tilgan metallar ferromagnetiklar ya’ni tashqi magnit maydonda magnitlanadigan metallar hisoblanadi. Shu sababga ko‘ra, bu metallarning o‘ziga xos xususiyati solishtirma qarshilikni haroratga nochiziqli bog‘liqligi hisoblanadi. Bu haroratning ortishida atomlar magnit momentlarining parallel joylashishi bilan tushuntiriladi, kristall tuzilmadagi tartibning istalgan buzilishi esa kvant mexanikasi nazariyasidan kelib chiqadiki, solishtirma qarshilikning ortishiga olib keladi.

Mattissen qoidasiga muvofiq, turli mexnizmlar to‘liq qarshilikka additiv ulushni qo‘shadi:

$$\rho = \rho_{iss} + \rho_{qol} + \rho_M ,$$

bu yerda ρ_{iss}, ρ_{qol} – mos ravishda panjaraning issiqlik tebranishlari va kirishmalarda elektronlarning sochilishiga bog‘liq qarshilik, ρ_M – atomlar magnit momentlarini joylashishidagi tartibsizliklarga bog‘liq elektr qarshilikka magnit ulushi. T_K – Kyuri haroratida yuqori haroratda ρ_M magnit tashkil etuvchi o‘zgarmas qoladi, bu tufayli solishtirma qarshilikning haroratga bog‘liqligi chiziqli xarakterga ega bo‘ladi (3.4-rasm).



3.4-rasm. Ferromagnit material solishtirma qarshiligining haroratga bog‘liqligi.

Temirning solishtirma qarshiligi aralashmalarning tarkibiga bog‘liq, binobarin, kremniy aralashmasi eng katta ta’sirni o‘tkazadi. Kremniy solishtirma qarshilikni oshirish uchun elektrotexnik po‘latlarni eritishda qo‘shiladi, bu tufayli po‘latda toza temirga qaraganda uyurma toklarga yo‘qotishlar kamayadi.

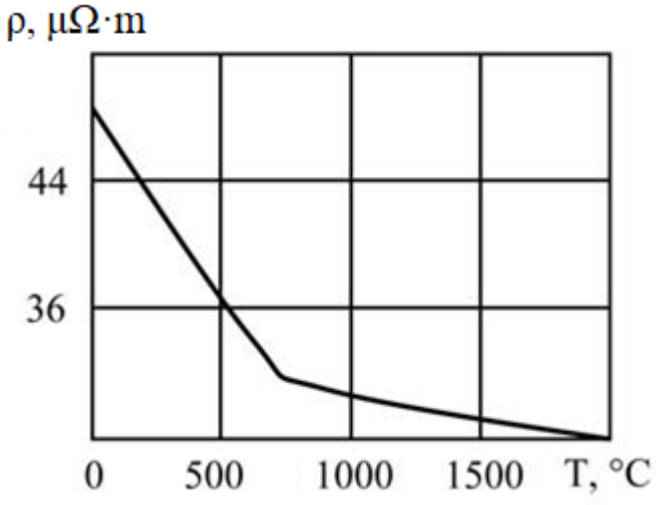
Yuqori μ magnit singdiruvchanlik tufayli temir va po‘latda sirt samarasi sezilarli ta’sir etadi, ya’ni yuqori chastotalarda sirtdagi tokning zichligi o‘tkazgichning ichidagidan sezilarli yuqori bo‘ladi.

Nikel – kumush-oq rang metall bo‘lib, elektrovakuum asboblar uchun armatura sifatida keng qo‘llaniladi. Juda oson mexanik ishlov beriladi. Kimyoviy barqaror. Temir, nikel, kobalt asosida qotishma – *kovar* olinadi. U chiziqli kengayish past koeffitsiyentiga ega, bu volfram va molibden o‘rniga uni shishaga kavsharlash uchun ishlatishga imkon beradi.

Nometall o‘tkazuvchan materiallar. Metallar va metalli qotishmalar bilan bir qatorda, rezistorlar, kontaktlar va tok o‘tkazadigan elementlar sifatida turli kompozitsion materiallar va uglerodning o‘tkazuvchan modifikatsiyalari ishlatiladi. *Uglerodli materiallar* – grafit, qurum, pirolitik uglerod, antratsit hisoblanadi. Bu materiallardan elektr mashinalar cho‘tkalari, projektorlar va yoyli elektr pechlar uchun elektrodlar tayyorlanadi. Buyumlarni olish uchun bog‘lovchi modda (masalan, toshko‘mir smolasi yoki suyuq shisha) bilan aralashtirilgan maydalangan massa mos press-shakllarda presslanadi, keyin yuqori haroratda uni yumshatish amalga oshiriladi. Uglerodli metallarning elektr qarshiligini kamatstirish uchun kukunli metall qo‘shimchasi qo‘llanadi.

Ko‘mir kukuni yuqori omli rezistorlarni tayyorlashda, shuningdek ovoz bosimiga bog‘liq o‘zgaradigan qarshilikni hosil qilish uchun mikrofonlarda ishlatiladi.

Grafit yuqori kimyoviy va qizishga barqarorlik (3900 ^{o}C tartibdagi erish harorati), mexanik ishlov berishning engilligi kabbi xossalar tufayli elektrotexnikada eng keng qo‘llanadi. Undan turli isitkichlar, tigellar va boshqalarni tayyoplash uchun foydalaniladi. Grafit yarimo‘tkazgich material hisoblanadi, harorat ortganda uning solishtirma qarshiligi kamayadi (3.5-rasm).



3.5-rasm. Ko‘mir uglerod solishtirma qarshiligining haroratga bog‘liqligi.

Kompozitsion o‘tkazuvchan materiallar bu dielektrik bog‘lanishli o‘tkazuvchan to‘ldirgichning mexanik aralashmasi hisoblanadi. Komponentlar tarkibini o‘zgartirish yo‘li bilan bunday materiallarning elektr xossalarini boshqarish mumkin. O‘tkazuvchan bosqich komponentlari sifatida metallar, grafit, qurum

ishlatiladi. Bog‘lovchi element sifatida organik va noorganik dielektriklar (masalan, shisha yoki sintetik smolalar) xizmat qiladi.

Organik smolalar asosida kontaktollar – tok o‘tkazadigan yelimlar, bo‘yoqlar tayyorlanadi. Ular metallararo, metallar va yarimo‘tkazgichlar orasida elektr kontaktlarni olish uchun, dielektriklar sirtida elektrodlarni yaratish va boshqalar uchun xizmat qiladi.

Kermetlar noorganik bog‘lovchili, ko‘pincha shishali yoki SiO kremniy monooksidili kompozitsion materialar hisoblanadi. Yupqa rezistorlarni tayyorlash uchun mo‘ljallangan. Bunday rezistorlarning qarshiligi o‘tkazuvchan komponentlar foizli tarkibi va tayyorlashdagi termik ishlov berish rejimlariga bog‘liq. O‘tkazuvchan komponent sifatida odatda mayda dispersiyali xrom kukuni yoki xrom disilitsidi xizmat qiladi.

Uglerodli materiallarning elektr qarshiligini kamaytirish uchun kukunli metall qo‘shimchasi qo‘llaniladi.

O‘tkazuvchan oksidlar. Metallarning ko‘plab oksidlari dielektriklar hisoblanadi. Lekin to‘liq bo‘lmagan oksidlanishda qalay ikki oksidi (SnO_2) va indiy oksidi (In_2O_3) qatlamlari etarlicha katta o‘tkazuvchanlikni ko‘rsatadi. Qatlamlarning solishtirma qarshiligi stexiometrik tarkibning buzilishi darajasiga bog‘liq va 10μΩ·mga etishi mumkin.

Yuqori optik shaffoflik va oshirilgan elektr o‘tkazuvchanlik birikmasi ulardan shisha elektrovakuum asboblarning ichki devorlaridagi shaffof o‘tkazuvchan qoplamalar, suyuq kristalli indikatorlar, tasvir kuchaytirgichlarida elektrodlar va boshqalar sifatida qo‘llashga imkon beradi.

3.2-§. Fullerenlar, fulleridlar, grafit va uglerodning boshqa modifikatsiyalari. Kompozitsion va oksidli o‘tkazgich materiallar

Fullerenlar — bu uglerod atomlarining shakli sharsimon, ellipsoid yoki trubkali bo‘lgan bir turdagi molekulalaridir. Shuning uchun fullerenlar uglerodning sun’iy ravishda olingan modifikatsiyalari, uning klasterlari bo‘lib, ko‘p qirrali tuzilishga ega fazoviy moddalardir. 1985-yil amerikalik olim G. Kroto hamkasblari bilan hamkorlikda lazer yordamida grafitni bug‘latib, go‘zal fazoviy ko‘rinishga ega bo‘lgan 32 qirrali C60 molekulasini kashf etdi. C60 ning atom massasi 720 m.a.b, zichligi 2,5-3,0 g/cm^3 ga teng. Uglerodning yangi klasteri — C60ni mualliflar o‘z vatandoshlari me’mor, muhandis — ixtirochi R.B.Fuller sharafiga *fulleren* deb atashni taklif etdilar. Buning boisi 1967-yil Monreal shahrida o‘tkazilgan Jahon xalqaro ko‘rgazmasida pavilyoni uchun qurilgan fazoviy geodezik gumbazning konstruksion elementlari kashf etilgan yangi modda tuzilishining kattalashtirilgan ko‘rinishini (futbol to‘pini) eslatardi. Oradan ko‘p vaqt o‘tmay, uglerod klasterlari

yulduzlar spektrlarida, meteoritlar, koinot zarralari va hatto oddiy ko‘mir qurumida ham mavjudligi aniqlandi. 1988-yilda uglerod klasterlarining bir qator vakillari — C28, C32, C50 va C70 ham sintez qilindi. 1990-yil fullerenning kristall shakldagi xillari olinib, ularga *fulleritlar* deb nom berdi. Fulleritlar tarkibiga turli elementlar, jumladan, ishqoriy metallar kiritilib, noyob xossalarga ega bo‘lgan moddalar (fulleridlar) sintez qilindi. K3C60 18 K da o‘tao‘tkazuvchanlikni namoyon qildi. 20 ta 6 burchak, 12 ta to‘g‘ri 5 burchak va 32 qirrali fulleren va uning birikmalari 1000 °C haroratga bardoshlidir.

Fulleren — kelajagi porloq moddalardir. Ular kimyo sanoatida, mashinasozlikda, kemasozlikda, aviasozlikda, yer osti inshootlari, binolar, sharsimon va geodezik gumbazlar qurilishida konstruksion material sifatida qo‘llanishi mumkin.

Uglerodli fullerenlar va kukunlar olish. Hozirgi kunda kukun metallurgiyasi va ular asosida ishlaydigan qurilmalar juda ko‘plab yaratilmoqda. Qattiq uglerod yordamida qayta tiklash usulida kukunlar olish metodlarini umumiy holatda quyidagi ikkita katta guruhga bo‘lish mumkin:

- dispergatsion, ya’ni materiallarni maydalash yo‘li bilan olish. Bu kukun olishning eng oddiy usuli bo‘lib, kukunlash jarayonida namunani kukun holigacha maydalashga asoslangan;

- kondensatsion, ya’ni sintez jarayonida atomlarni “o‘stirish” orqali kukunlar olish. Bu metod alohida atomlarni birlashtirish yo‘li bilan kukun olishga asoslangan.

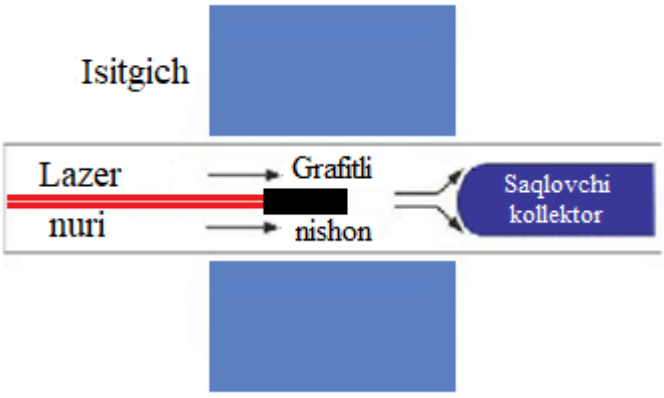
Har ikkala metod ham kukunlarning fizikaviy xossalarini o‘rganishda muhim ahamiyatga ega. Jumladan, kondensatsiya ta’rifiga ko‘ra – bu moddani sovutish natijasida gazsimon holatdan kondensatsiyalangan (qattiq yoki suyuq) holatiga o‘tishidir. Bu jarayonda turli fizikaviy hodisalar yuz beradi. Bu metodga asosan, birlamchi jismlar oldin bug‘lanadi, keyin esa hosil bo‘lgan bug‘ kerakli o‘lchamli kukun hosil bo‘lguncha kondensatsiyalanadi. Natijada kompakt modda ultradispers moddaga aylanadi.

Kukun olishning barcha usullarida ham tashqi manbadan kuchli energiya oqimi zarur bo‘ladi. Sovugan sari zarralar paydo bo‘la boshlaydi va kattalashadi. Ular tartiblanib va birlashib granulalarga aylanadi.Kukunlar fizikasini o‘rganishda u jarayon tizimda dastlabki monokristalga tiklanguncha davom etadi. Bug‘dagi kukunlar soni sezilarli darajada ko‘paygan vaqtdan boshlab, kukunlar o‘lchami 100 nm ga yetguncha tizim nanoholatda bo‘ladi. Sistema muvozanat holatiga kelganda zarralar kukun holatiga o‘tadi. Hozirgi kunda turli o‘lchamli va xossali uglerodli kukun materiallari olishning usullari ishlab chiqilgan. Texnologiyaga asosan kukun va fullerenlar uglerodli materiallarni yuqori haroratlarda kimyoviy aylanishlari hisobiga hosil bo‘ladi.

Olimlar inert gaz bilan to‘ldirilgan kamerada gaz atomlarini ionlashtiruvchi grafit elektrodlari o‘rtasida elektrik razryad hosil qilishga asoslangan metodni tavsiya qiladilar. Kamerada yuqori haroratda grafit sirti bug‘lanadi. Bug‘langan uglerod atomlari plazmaning issiq qismidan sovuqroq qismiga borgach, haroratning birdan tushib ketishi natijasida kamera devori va katod sirtida o‘tirib qoladi. Bunday tuzilmalar fullerenlar va kukunlarni iboratligi aniqlangan. Uning bir qismi – grafit, qurum, va fullerenlar kameraning sovuq devoriga, grafit va kukunlar esa katodga o‘tirib qoladi.

Bundan tashqari lazer metodi ham mavjud. Metodga ko‘ra, lazer yordamida bug‘langan grafit sovutilgan kollektorga o‘tirib qoladi. Grafit maxsus kvars kukunli pechga joylashtiradi. Grafitning termik changlanishi natijasida hosil bo‘lgan mahsulotlar issiq joydan olib ketiladi va sovutilgan kollektorning yuzasiga o‘tirib qoladi. Olingan cho‘kmada grafit kukunlaridan tashqari fullerenlar va kukunlarni topish mumkin. Bu metodning asosiy afzalligi olinayotgan kukun xarakteristikalari lazer nurlanishi parametrlariga juda sezgirligidir. Xususan, kukun diametri lazer nuri quvvatiga bog‘liq. Bu esa oldindan belgilangan, kerakli tuzilishga ega bo‘lgan kukunlar olish imkonini beradi. Usulning kamchiligi uning nisbatan past unumdorligi va keng ko‘lamlarda qo‘llash qiyinligidir.

Grafitning termik changlanishi natijasida hosil bo‘lgan mahsulotlar issiq joydan olib ketiladi va sovutilgan kollektorning yuzasiga o‘tirib qoladi. Olingan cho‘kmada grafit kukunlaridan tashqari fullerenlar va kukunlarni topish mumkin. Bu metodning asosiy afzalligi olinayotgan kukun xarakteristikalari lazer nurlanishi parametrlariga juda sezgirligidir. Xususan, kukun diametri lazer nuri quvvatiga bog‘liq. Bu esa oldindan belgilangan, kerakli tuzilishga ega bo‘lgan kukunlar olish imkonini beradi.



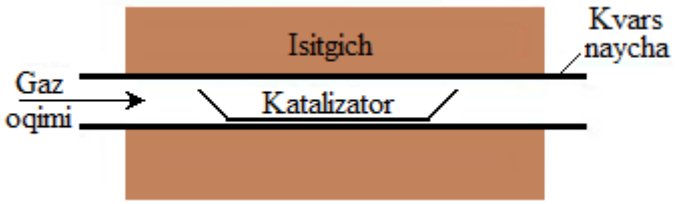
3.6-rasm. Lazerli bug‘latish usuli bilan qattiq uglerod yordamida kukun oluvchi qurilma sxemasi.

Usulning kamchiligi uning nisbatan past unumdorligi va keng ko‘lamlarda qo‘llash qiyinligidir.

Uglerodli kukunlar olishning bug‘dan kimyoviy cho‘ktirish metodi ham mavjud. U qulay va ommabop turi uglerodli gazni issiq metal katalizator yuzasiga termokimyoviy cho‘ktirishga (o‘tqazishga) asoslangan. Bu usul uglevodorodlarni katalitik parchalash usuli degan nomni ham oldi.

Uglerodli gaz aralashmasi (odatda atsetilen C_2H_2 yoki metanning CH_4 azot bilan aralashmasi) 700-1000°C haroratdagi pechkaga kiritilgan kvars kukun orqali o‘tkaziladi.

Kvars kukun ichida sopoldan qilingan idishchada metal kukunidan qilingan katalizator joylashgan. Kukunning geometrik o‘lchamlari katta darajada jarayon borishi shartlariga (vaqti, temperuturasi, bosimi va gazning turi va h.k), hamda katalizatorning dispersiyalanish darajasi va naviga bog‘liq.



3.7-rasm. Fulleren va kukunlarni bug‘dan kimyoviy cho‘ktirish yo‘li bilan oluvchi qurilma sxemasi.

Kompozitsion materiallar ikki va undan ortiq tashkil etuvchilardan komponentlardan tuzilgan murakkab material bo‘lib, har xil usullar bilan bog‘langan va o‘ziga xos xossalari bor.

Birinchi kompozitsion material fransuz bog‘boni J.Mone tomonidan 1867-yilda patentlangan (hovli gul tuvaklari, sim va sementdan yasalgan). Samolyot konstruktsiyasida oynaplastik “stekloplastik” poliefir materiali oyna tolasi bilan sinchlangan (“armirovan”) kompozitsion material 1942-yilda qo‘llanilgan.

Kompozitsion materiallar mashinasozlik apparati konstruktsiyalariga qo‘yilgan quyidagi talablarga javob beradi:

- yengil bo‘lishi;
- maksimal mustahkamlik va bikrlik;
- ishlash davrida maksimal ishlash resursi.

Shular uchun kompozitsion materiallar samolyotsozlikda ko‘p qo‘llanilgan. Sovet ittifoqining “Ruslan” samolyotida 5,5 t og‘irlikdagi konstruktsion kompozitsion materiallardan yasalgan va 15 t og‘irlik iqtisod qilingan.

Hozirgi zamon transport samolyotlari konstruktsiyalarining 15-20%; harbiy samolyotlarning 25-30%; harbiy vertolyotlarning 45-55%; strategik raketalarning 75-80% kompozitsion materiallardan yasalgan.

Kompozitsion materiallarga quyidagi xususiyatlar yig‘indisi xos:

a) Komponentlarning tarkibi, formasi va taqsimlanishi oldindan aniqlangan;

b) Ikki va undan ortiq kimyoviy har xil materiallardan tarkib topgan va bir-birlari bilan ajralib turadilar;

c) Kompozitsion materialning xossalari har bir tashkil etuvchining xossalari bilan aniqlanadi;

d) Kompozitsion materialning xossalari, tashkil etuvchilarning xossalaridan farq qiladi;

e) Kompozitsion material makromasshtab miqyosida birjinsli, mikromasshtabda bir jinsli emas;

f) Bu material tabiyatda uchramaydi va odamzodning ixtirosidir.

Geometrik ko‘rsatkichlariga qarab tashkil etuvchilar har xil bo‘ladi. Butun hajm bo‘yicha uzluksiz-to‘xtovsiz tarqalgan hamda kompozitsion materialning bir butunligini ta’minlovchi komponent – matritsa deyiladi. Uzlukli, bo‘lak-bo‘lakli materiallar sinchlovchi yoki puxtalovchi modda tashkil etuvchilar ya’ni armatura deb ataladi.

Nol-o‘lchamli to‘ldirgichli kompozitsion materiallar. Bu turdagi kompozitsion materiallarda matritsa asosan metalldan va qotishmadan iborat. Metall asosidagi kompozitsiyalar dispers zarrachalar bilan bir tekis puxtalanadi. Dispers zarrachalar:

a) mikroskopik (d = 0,01-0,1 mkm);

b) mayda (d = 1-50 mkm) bo‘ladi.

Xossalari izotrop bo‘ladi. Dispers zarrachalar bilan sinchlangan kompozitsiyalar ko‘pincha kukun metallurgiyasi usulida olinadi. Asosiy bosqichlari:

1. Matritsa metali va puxtalovchini kukunlarini aralashmasini olish (maxsus usullar bilan kukunlar olinadi, so‘ngra maxsus mashinalarda aralashtiriladi);

2. Po‘lat matritsalarda kukunni presslash va ixcham zagatovkaga aylantirish. So‘ngra uni termik ishlash – “spekonie” presslash, deformatsiyalash va termik ishlash davrida mahsulot optimal, turg‘un dislokatsion strukturaga ega bo‘ladi.

Bob bo‘yicha nazorat savollari

1. O‘tkazgich materiallar qanday guruhlarga bo‘linadi?
2. Metall va yarim o‘tkazgichlar orasidagi asosiy farq nima?
3. Elektr o‘tkazuvchanlik jihatidan o‘tkazgichlar qanday baholanadi?
4. Nima uchun mis va alyuminiy sanoatda eng ko‘p ishlatiladigan o‘tkazgich materiallar hisoblanadi?
5. Harorat o‘zgarishi metallarning o‘tkazuvchanligiga qanday ta’sir qiladi?
6. Metall o‘tkazgichlar va ionli o‘tkazgichlar o‘rtasidagi farqlarni tushuntiring.
7. O‘tkazgich va dielektrik materiallarni fizik xossalari bo‘yicha solishtiring.
8. Yuqori o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan metallarga misollar keltiring.

9. O‘tao‘tkazgich nima?
10. O‘tao‘tkazgichlik hodisasi qanday sharoitlarda sodir bo‘ladi?
11. O‘tao‘tkazgichlarning amaliy qo‘llanilishi haqida ma’lumot bering.
12. Oddiy metall va o‘tao‘tkazgichlar o‘rtasidagi farq nimada?
13. Qanday farq bor: haroratga bog‘liq o‘tkazuvchanlik va o‘tao‘tkazuvchanlik?
14. Fulleren nima va u qanday tuzilishga ega?
15. Grafitning elektr o‘tkazuvchanligi qanday?
16. Nima uchun grafit o‘tkazgich hisoblanadi, lekin olmos emas?
17. Fulleren va grafen o‘rtasida qanday struktura va xossalar farqi bor?
18. Uglerodning turli modifikatsiyalarini o‘tkazuvchanlik jihatidan solishtiring.
19. Grafit va grafen o‘rtasidagi asosiy farq nima?
20. Kompozit materiallar nima?
21. Oksidli o‘tkazgichlarga misollar keltiring.
22. Nima uchun keramika oksidli o‘tkazgichlar ayrim hollarda metallardan ustunroq bo‘lishi mumkin?
23. Kompozitsion materiallarning strukturasi ularning elektr xossalariga qanday ta’sir qiladi?
24. Oksidli va metall o‘tkazgichlarning afzallik va kamchiliklarini taqqoslang.
25. Kompozit o‘tkazgichlar va an’anaviy metall o‘tkazgichlar o‘rtasidagi farqlarni tushuntiring.

IV BOB. YARIMO‘TKAZGICHLI MATERIALLARDAGI FIZIK JARAYONLAR VA HODISALAR

Yarimo‘tkazgichlar solishtirma o‘tkazuvchanligi o‘tkazgichlar va dielektriklar o‘rtasida oraliq holatni egallaydigan materiallardir. Chunki ularning solishtirma o‘tkazuvchanligi kirishmalar konsentratsiyasiga, haroratga va har xil turdagi nurlanish ta’siriga kuchli bog‘liqdir. Yarimo‘tkazgichlarning asosiy xususiyati harorat oshishi bilan elektr o‘tkazuvchanligini oshirishdir.

Yarimo‘tkazgichlar taqiqlangan soha kengligi elektron volt (eV) darajasida bo‘lgan kristall moddalardir. Masalan, olmos keng zonali yarimo‘tkazgich (taxminan 5,47 eV) va indiy arsenidi tor zonali yarimo‘tkazgich (0,35 eV) sifatida tasniflanishi mumkin. Yarimo‘tkazgichlarga ko‘plab oddiy moddalar (kremniy, germaniy, selen, tellur, mishyak va boshqalar), juda ko‘p miqdordagi birikmalar (galliy arsenid, galliy nitridi, kadmiy-simob-tellur qotishmasi, kadmiy tellurid, vismut va boshqalar) kiradi.

Sof kristall panjaradagi boshqa kimyoviy element atomi (masalan, kremniy kristallidagi fosfor, bor va boshqalar atomi) kirishma deyiladi. Kirishma atomi kristallga elektron berishiga (yuqoridagi misolda fosfor) yoki uni tutib olishiga (bor) qarab, kirishma atomlari donor yoki akseptor deb ataladi. Kirishmalarning tabiati kristall panjaraning qaysi atomini almashtirganiga va qaysi kristallografik tekislikka joylashtirilganiga qarab o‘zgarishi mumkin.

4.1-§. Yarimo‘tkazgichlar haqida umumiy ma’lumotlar. Xususiy va kirishmali yarimo‘tkazgichlar. Asosiy va noasosiy zaryad tashuvchilar

Yarimo‘tkazgichlar moddaning ajoyib turi bo‘lib, ular o‘ziga xos xossalari bilan boshqalardan yaqqol ajralib turadi. Umuman olganda, elektr o‘tkazuvchanligiga qarab moddalar uchta katta sinfga bo‘linadi:

- **o‘tkazgichlar** (elektr o‘tkazuvchanligi 10^6 $\Omega^{-1}cm^{-1}$ dan katta),
- **yarimo‘tkazgichlar** (elektr o‘tkazuvchanligi $10^{-8} \div 10^6$ $\Omega^{-1}cm^{-1}$ oralig‘ida),
- **dielektriklar** (elektr o‘tkazuvchanligi 10^{-8} $\Omega^{-1}cm^{-1}$ dan kichik).

Yarimo‘tkazgichlarning elektr o‘tkazuvchanligi juda keng oraliqda yotishi yuqoridagi ma’lumotlardan ko‘rinib turibdi.

Shu bilan birga yarimo‘tkazgichlarning o‘ziga xos muhim xususiyatlaridan biri elektrik o‘tkazuvchanligining ulardagi kirishmalarning turi va konsentratsiyasiga nihoyatda sezgirligidir. Masalan, toza yarimo‘tkazgichga $10^{-7} \div 10^{-10}$ % miqdorda kirishma kiritish bilan uning elektrik o‘tkazuvchanligini keskin o‘zgartirish mumkin.

Yarimo‘tkazgichlarning yana bir muhim xususiyati – ular elektrik o‘tkazuvchanligining haroratga o‘ta sezgirligidir. Bunday bog‘lanishni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\sigma = \sigma_0 \exp \frac{W_a}{kT}, \qquad (4.1)$$

bu yerda, σ – berilgan T haroratdagi elektrik o‘tkazuvchanlik, σ_0 – o‘zgarmas doimiy, W_a – zaryad tashuvchilarning aktivatsiya energiyasi, k – Bolsman doimiysi. Chunonchi, yarimo‘tkazgichning harorati 1 ℃ ga o‘zgarganda uning elektrik o‘tkazuvchanligi 5-6% ga o‘zgarishi mumkin.

Juda ko‘plab yarimo‘tkazgichlarga va ular asosida yasalgan asboblarga yorug‘likning ta’siri ham elektrik o‘tkazuvchanlikning keskin o‘zgarishiga olib keladi. Bunga turli yarimo‘tkazgich detektorlarni, yorug‘lik diodlarini, yorug‘lik rezistorlarini va qator boshqa asboblarni ko‘rsatish mumkin.

Shuni eslatib o‘tish joizki, yarimo‘tkazuvchanlik xossasi faqat qattiq jismlargagina xos bo‘lmay, suyuq holatdagi organik birikmalardan iborat shishasimon, amorf tuzilishga ega bo‘lgan yarimo‘tkazgichlar ham shunday xossalarga egadir. Ular o‘zlarining bir qator ma’lum kamchiliklari tufayli hozircha texnikada keng tatbiq qilinganicha yo‘q.

Qattiq jismlardan yarimo‘tkazgich xossasiga ega bo‘lgan moddalar qatoriga juda ko‘p turli moddalar, masalan, kremniy, germaniy, bor, olmos, fosfor, oltingugurt, selen, tellur, ko‘pchilik tabiiy minerallar va qator birikmalar: GaAs, GaP, JnSb, SiC, ZnS, CdTe, GaSb va hokazolar kiradi. Bu yarimo‘tkazgichlar o‘zlarining xilma-xil xossalari bilan bir-birlaridan ancha farq qiladi. Shuning uchun ham turli maqsadlar uchun turli yarimo‘tkazgichlar qo‘llaniladi.

Biroq hozirgi zamon texnikasida asosan bir necha xil yarimo‘tkazgichlar keng ishlatilmoqda. Bularning ichida eng oldingi o‘rinlarda kremniy (Si), germaniy (Ge), galliy arsenidi (GaAs) turadi. Ayniqsa kremniy hozirgi zamon mikroelektronikasida o‘zining ko‘p xossalari bilan murakkab texnologik talablarga javob beranligi sababli asosiy material o‘rnini egallab turibdi.

Elektron texnikasida ishlatiladigan ko‘pchilik yarimo‘tkazgich materiallar kristall tuzilshga ega. Yarimo‘tkazgichning kristall tuzilishi naqadar mukammalligi, unda turli nuqsonlarning bor yoki yo‘qligi va ularning miqdori yarimo‘tkazgichning asosiy xossalarini belgilab beruvchi omildir.

Yarimo‘tkazgich materiallar quyidagi xossalari bilan boshqa materiallardan ajralib turadi:

1. Yarimo‘tkazgich materialining solishtirma qarshiligi harorat ortishi bilan eksponensial qonuniyatga asosan oshadi.

2. Yarimo‘tkazgich materiallarning solishtirma qarshiligini kirishma atomlarini legirlash yo‘li bilan o‘zgartirish mumkin. Misol uchun 1 kg Si ga 0,001

mg ya’ni Si dagi atomlar sonidan 10^9 marta kam bo‘lgan B, P yoki Sb ni qo‘shadigan bo‘lsak, uning solishtirma qarshiligi 10^3 marta oshadi. Demak, xona haroratida Si solishtirma qarshiligini faqat kirishma atomlar konsentratsiyasi $10^{11} \div 10^{19}$ cm^{-3} ga oshirish hisobiga uning solishtirma qarshiligi $\rho \sim 10^5$ Ω·cm dan $\rho \sim 10^{-3}$Ω·cm ga o‘zgartirish mumkin. Demak, yarimo‘tkazgichlarga kirishma elementlari kiritilganda ularning xususiyatlarini keskin o‘zgarishi ham ularning noyob xossaga ega ekanligidan darak beradi.

3. Yarimo‘tkazgich materiallarida metallardan farqli holda 2 xil tok tashuvchilar ya’ni elektron va kovaklar mavjud. Bu degani bitta yarimo‘tkazgich materiali asosida elektronli o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan *n*-tur yoki kovakli o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan *p*-tur material olish mumkin. Ushbu xususiyat:

- “Qattiq jismlar elektronikasi” faniga asos bo‘luvchi diod (*p*-*n* o‘tish) va tranzistorlarning kashf etilishiga;

- hozirgi zamon mikro- hamda nanoelektronika paydo bo‘lishiga va rivojlanishiga asos bo‘ldi. Yarimo‘tkazgich materiallarining bu o‘ta noyob xossasi insoniyat hayotida texnika yo‘nalishi bo‘yicha texnika revolyutsiya davrini boshlab berdi.

4. Metallarda umuman mavjud bo‘lmagan tok tashuvchilarning (elektron va kovaklarning) yashash vaqti tushunchasi va uni boshqarish yo‘llari yarimo‘tkazgichlar asosida umuman yangi turdagi elektron asboblar – lazerlar, fotoelementlar va boshqalarni yaratish imkonini berdi. Yarimo‘tkazgichlarda tok tashuvchilar yashash vaqti juda katta oraliqlarda $10^{-11} \div 10^{-3}$ s bo‘lib, bu o‘ta tez ishlaydigan hozirgi zamon hisoblash mashinalari paydo bo‘lishiga olib keldi.

5. Metallarga qaraganda yarimo‘tkazgich materiallari elektrik, optik, magnit xossalari tashqi ta’sirga (magnit maydon, radiatsiya, bosim, yorug‘lik va h.k.) o‘ta sezgirdir. Ushbu noyob xususiyat tubdan yangi asboblar – detektorlar, fotoelementlar, fotoqabullagichlar yaratilishiga olib keldi. Bu esa hozirgi zamon hisoblash texnikasi, robototexnika va diagnostika sohalarini o‘ta yuqori darajada rivojlanishiga asos bo‘ldi.

6. Yarimo‘tkazgich materiallarni metallardan yana bir alohida xususiyati bu tok tashuvchilar harakatchanligining nafaqat o‘ta yuqori qiymatlarga egaligi va balki uning harorat hamda nuqsonlarga o‘ta bog‘liqligidir. Bu xususiyat mikro va nanoelektronikada materiallarning elektron xususiyatlarini aniq nazorat qilish imkoniyatlarini ochadi.

Element va kristall panjara tuzilishiga ko‘ra yarimo‘tkazgichlar oltita guruhga bo‘linadilar:

1. Elementar (oddiy) yarimo‘tkazgichlar: Si (kremniy), Ge (germaniy), Sn (α-fazadagi qalay).

2. $A^{III}B^{V}$ tipidagi murakkab yarimo‘tkazgichlar: AlAs (alyuminiy arsenid), AlP (alyuminiy fosfidi), GaAs (galliy arsenid), GaP (galliy fosfidi), InAs (indiy arsenid), InP (indiy fosfidi).

3. $A^{II}B^{VI}$ tipidagi murakkab yarimo‘tkazgichlar: CdS (kadmiy sulfid), CdSe (kadmiy selenid), CdTe (kadmiy tellurid), ZnS (rux sulfid).

4. $A^{IV}B^{IV}$ tipidagi murakkab yarimo‘tkazgichlar: SiC (kremniy karbid), SiGe (kremniy germaniy).

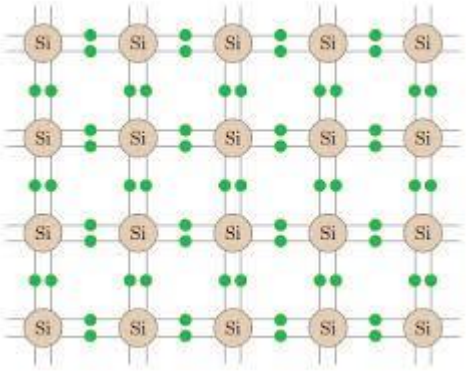
5. $A^{VI}B^{VI}$ tipidagi murakkab yarimo‘tkazgichlar: PbS (qo‘rg‘oshin sulfid), PbSe (qo‘rg‘oshin selenid), PbTe (qo‘rg‘oshin telluridi).

6. Ko‘p komponentli (qattiq eritmalar) yarimo‘tkazgichli materiallar: $Zn_xGa_{1-x}As$ (rux galliy arsenid), $Zn_xHg_{1-x}Te$ (rux simob telluridi).

Yarimo‘tkazgichlarning kristall tuzilishi. Umuman barcha elementar yarimo‘tkazgichlar hamda ko‘pgina birikmali yarimo‘tkazgichlar ($A^{III}B^{V}$ va $A^{II}B^{VI}$), shuningdek ba’zi bir murakkab yarimo‘tkazgich materiallar olmos yoki sfalerit (rux aldamasi) kristall panjarasiga mansub tetraedrik fazada, ya’ni har bir atomni bir xil masofada to‘rtta atom o‘rab turishi orqali bog‘langan.

Bir-biriga qo‘shni yaqin atomlarni bog‘lab turish spinlari qarama-qarshi tomonga yo‘nalgan elektron juftlik orqali izohlanadi. Shuning uchun elementar yarimo‘tkazgichlarda kimyoviy bog‘lanishni 100% kovalent bog‘lanish hosil qiladi deb qarash mumkin. Birikmali yarimo‘tkazgichlar $A^{III}B^{V}$ da bog‘lanish ion – kovalent ko‘rinishida bo‘ladi. Birikmali yarimo‘tkazgichlar $A^{II}B^{VI}$ bog‘lanishlarning bir qismini ion bog‘lanish tashkil etadi.

Asosan yarimo‘tkazgich materiallaridagi kimyoviy bog‘lanish bu kovalent bog‘lanishdir. Yarimo‘tkazgich materiallarini tashkil etadigan atomlarning asosiy qismi *s* va *p* elektron qobiqlari to‘lmagan bo‘lgani uchun, kristall hosil bo‘lganda, undagi hamma atomlarning tashqi elektron qobiqlari to‘lishi shart. Natijada kristalldagi har bitta atomni tashqi qobig‘ida elektronlar soni 8 taga yetib s^2p^6 holatiga o‘tadi.



4.1-rasm. Si da elektron qobiqlarning to‘lishi va Si kristallining kovalent bog‘lanishi.

Bunday bog‘lanishda spinlari bir-biriga qarama-qarshi bo‘lgan 2 ta elektron, ikki atom o‘rtasida umumiy bo‘lgan holda, ikki atomni bog‘lab turadi. Misol uchun Si kristallini ko‘radigan bo‘lsak (4.1-rasm), undagi atomlarning valent elektronlari holati s^1p^3 holatda bo‘lib, bunday atom to‘rt tomondagi qo‘shnilaridan bittadan,

qarama-qarshi spinli elektronlarni qabul qilishi bilan, s^2p^6 holatiga o‘tadi. Shuning uchun bunday bog‘lanishlarni s^1p^3 gibrid bog‘lanishlar deb atash qabul qilingan.

Yarimo‘tkazgich materiallarida kovalent s^1p^3 bog‘lanish mavjud bo‘lishi uchun kristall shunday atomlardan tashkil topgan bo‘lishi kerakki, unda kristallni tashkil etgan 2 ta qo‘shni atom valent elektronlari yig‘indisi 8 ga teng bo‘lishi kerak.

Bunday kristallar quyidagilardan hosil bo‘ladi:

1. IV guruh elementlari – Si (s^2p^2), Ge (s^2p^2), Sn (s^2p^2), C (s^2p^2).

2. III-V guruh birikmalari – III guruh (Ga, In (s^2p^2)) va V guruh elementlari (As, Sb, P (s^2p^2)), bunda V guruh atomidan bitta elektron III guruh atomiga to‘liq o‘tadi va natijada ikkala atom ham 4 ta elektron (s^1p^3) oladi.

3. II-VI guruh birikmalari – II guruh elementlari (Cd, Zn (s^2p^0)) va VI guruh elementlari (S, Se, Te (s^2p^4)), bunda ikkita elektron VI guruh elementidan II guruh elementiga to‘liq o‘tib, ikkala atomda s^1p^3 holatni hosil qiladi va tetraedrik kovalent bog‘lanish hosil qiladi.

Yarimo‘tkazgichlarning kristall panjarasi asosan 4 ta guruhlarga bo‘linadi:

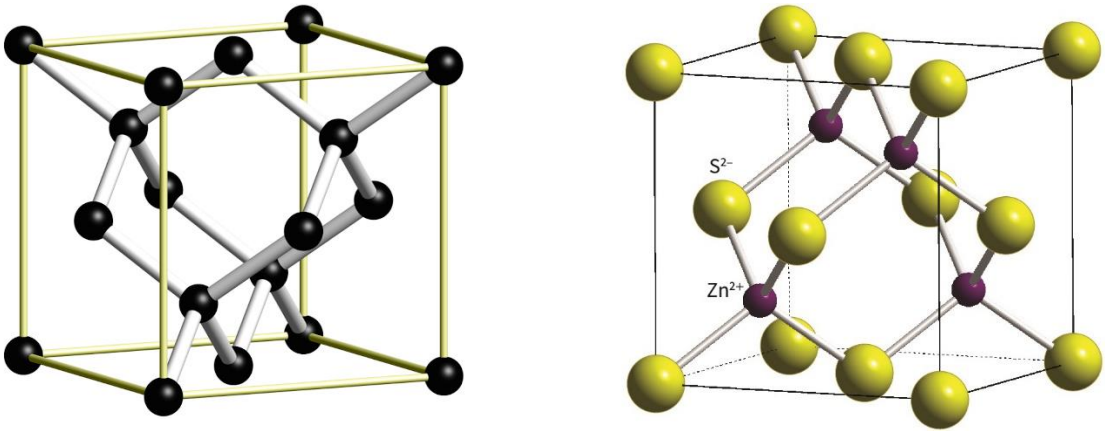
1. Olmos kristall panjara,
2. Sfalerit panjarasi (rux aldamasi),
3. Vyursit panjarasi,
4. Tosh tuzi panjarasi.

Olmos kristall panjara, sfalerit va tosh tuzi panjarasi asosi yonlari markazlashgan kub panjaradan iborat bo‘ladi. Olmos panjara tuzilishini xuddi yonlari markazlashgan ikkita kub panjarani bir-biriga joylashtirilgan shaklda deb qarash mumkin. Bunday elementar yarimo‘tkazgichlarni ikki yoni markazlashgan kub panjara bir-biridan bir xil uzoqlikda joylashgan elementar yacheykaning to‘rtdan bir hajmini tashkil etgan deb qarash mumkin. Birinchi kub panjaraning koordinata boshlang‘ich nuqtasini (0, 0, 0) deb olganda, ikkinchi kub panjara atomining joylashishi boshlang‘ich nuqtasi birinchi kub atomidan kub dioganali bo‘yicha (¼, ¼, ¼) uzoqlikda joylashgan bo‘ladi.

Agar yonlari markazlashgan kub panjara tugunlarida joylashgan ikki xil atomlar ketma-ketligi saqlangan bo‘lsa, olmos kristall panjara tuzilishidan sfalerit kristall tuzilishiga ega panjara hosil qilish mumkin (4.2-rasm). Misol uchun birinchi tugunda – Ga, boshqasida – As turadi. Ga va As atomlari panjarada koordinata nuqtalari (0, 0, 0) va (¼, ¼, ¼) ni tashkil etadi. Tosh tuzi kristall panjarasi yonlari markazlashgan ikkita kub panjaradan tuzilgan. Birinchi panjara atomini Na, ikkinchi kub panjari atomini Cl tashkil etadi. Panjarada bu atomlar joylashish koordinata o‘qi bo‘yicha (0, 0, 0) va (½, 0, 0) ni tashkil etadi.

Vyursit tuzilishi – geksagonal panjara ko‘rinishda bo‘lib, atomlar bir-biridan (⅓, ⅓, ⅓) uzoqlikda joylashadi.

Olmos kristall panjarasida har bir atom kovalent kimyoviy bog‘lanishlar orqali ya’ni valent elektronlari bilan bog‘langan tetraedr uchlarida o‘rnashgan o‘zaro kuch bilan tasirlashib turuvchi (tortish va itarish) to‘rtta atomdan tashkil topgan bo‘ladi (4.2-rasm).

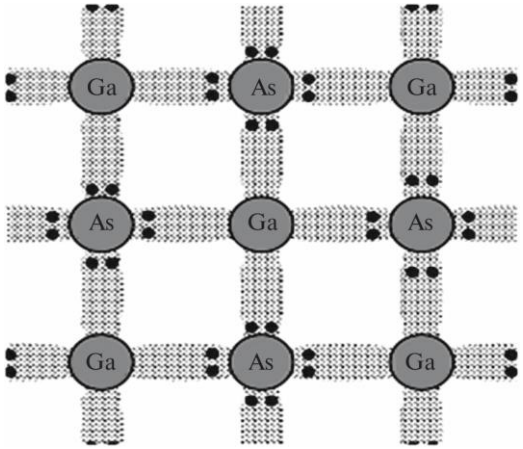


4.2-rasm. Olmos va sfalerit kristall panjaralari strukturasi.

Elementar yarimo‘tkazgichlar kristall panjarasi tugunlari bir xil atomlardan tashkil topgan bo‘ladi. Quyidagi Si, Ge va Sn elementar yarimo‘tkazgichli materiallar to‘rttadan valent elektronlariga ega va ko‘rsatilgandek kristall panjarada to‘rttadan atomlar bilan bog‘lanish xususiyatiga egadir. Bu xususiyatlari ularning olmos kristall panjaraga ega bo‘lishlarini namoyon etadi.

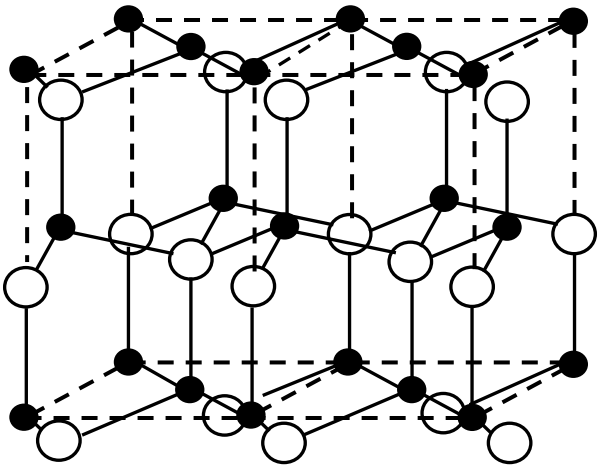
Sfalerit kristall panjarasini ikkita yonlari markazlashgan kub panjara bir-biridan hajm dioganali bo‘yicha ¼ qismga siljigan elementar yacheykalardan tashkil topgan deb qarash mumkin.

Olmos va boshqa turdagi kristall panjarani hosil qiluvchi yarimo‘tkazgichli materiallardan sfalerit kristall panjarasi farqi elementar yacheyka tugunida bir element atomi joylashsa, yacheykaning ikkinchi tugunida boshqa element atomi joylashgan bo‘ladi. Misol uchun Ga va As hosil qilgan kristall panjarani qarashimiz mumkin (4.3-rasm). Bunday ko‘rinishlarga ega bo‘lgan panjarani quyidagi yarimo‘tkazgich materiallar hosil qiladi: AlAs, AlP, BN, BP, GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP va h.k. $A^{III}B^{V}$ birikmali yarimo‘tkazgichli materiallarning tetraedrik, ion – kovalent bog‘lanishi keltirilgan.



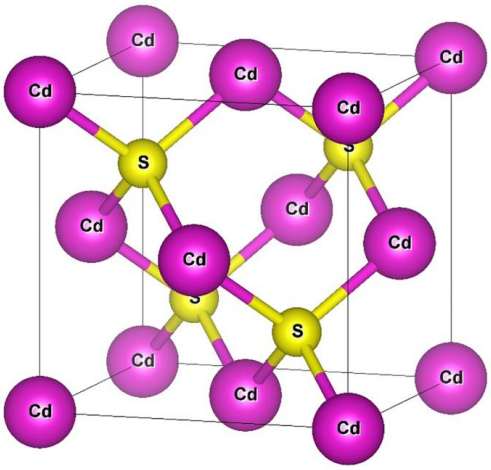
4.3-rasm. $A^{III}B^{V}$ birikmali yarimo‘tkazgich materiallarning tetraedrik, ion – kovalent bog‘lanishi.

Vyursit kristall panjarasini bir-biriga mahkamlangan ikkita geksagonal kristall panjara ko‘rinishida tassavvur qilish mumkin (4.4-rasm).

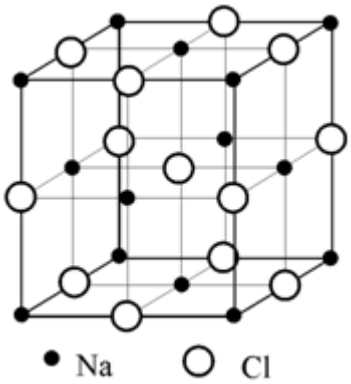


4.4-rasm. Vyursit kristall panjarasi.

Vyursit kristall panjarasida ham xuddi sfalerit panjarasi singari tetraedrik tugunlarida ikki har xil atom bir-biri bilan yaqin qo‘shni holatda joylashadi. Bunday ko‘rinishlarga ega bo‘lgan panjarani quyidagi yarimo‘tkazgich materiallar hosil qiladi: CdS, CdSe, CdTe va ZnS. $A^{II}B^{VI}$ birikmali yarimo‘tkazgichli materiallar tetraedrik ion – kovalent bog‘lanishda bo‘ladi (4.5-rasm).



4.5-rasm. $A^{II}B^{VI}$ birikmali yarimo‘tkazgich materiallarning tetraedrik ion – kovalent bog‘lanishi (CdS misolida).



4.6-rasm. Tosh tuzi kristall panjarasi.

Tosh tuzi kristall panjarasini yonlari markazlashgan ikkita kub panjara tugunlarida bir xil ishorali ionlar (musbat yoki manfiy) bir-biriga joylashtirilgan ko‘rinishida tasavvur qilish mumkin (4.6-rasm). Bunday kristall panjarani quyidagi birikmali yarimo‘tkazgichli materiallar hosil qiladi: PbS, PbSe va PbTe.

Yarimo‘tkazgichlarning zonaviy tuzilishi. Kristalldagi energetik zonalarning o‘ziga xos xususiyatlari hamda taqiqlangan zonaning kengligiga qarab, kristallarning elektr xossalari o‘zgaradi. Dielektriklarda valent zona to‘liq to‘lgan bo‘ladi, uning ustida joylashgan o‘tkazuvchanlik zonasigacha bo‘lgan masofa esa

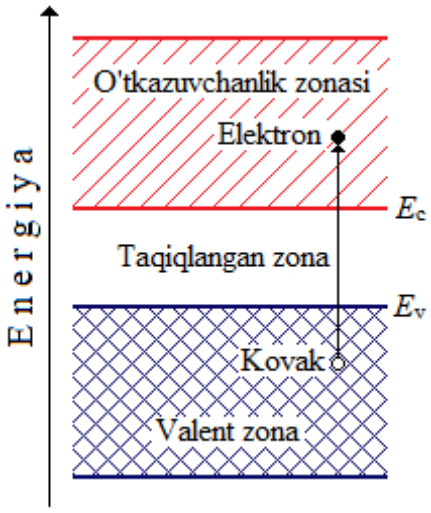
katta bo‘ladi. Bunday holatda elektronlar valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘ta olmaydi va shuning uchun elektr o‘tkazuvchanlikda ishtirok eta olmaydi.

Elektrik o‘tkazuvchanlik yuzaga kelishi uchun elektron valent zonani tark etib, bo‘sh o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tishi kerak bo‘ladi. Demak, zonalar orasidagi energiya farqi E_g qancha katta bo‘lsa, elektronning valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tishi uchun shuncha ko‘proq energiya zarur bo‘ladi.

Xo‘sh, bu energiyani elektron qayerdan olishi mumkin?

Ma’lumki, berilgan haroratda qattiq jismning atomlari (gaz atomlari kabi) ma’lum bir issiqlik energiyasiga ega bo‘ladi. Masalan, biror atomning E_g issiqlik energiyasiga ega bo‘lish ehtimoli $\exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$ ifodaga proporsionaldir.

Agar gazda molekulalari gaz egallagan hajm bo‘ylab harakatlansa, qattiq jismda atomlar o‘z muvozanat holati atrofida to‘xtovsiz tebranadi va o‘zaro ta’sirlashadi. Bunday o‘zaro ta’sirlashish natijasida atom o‘z issiqlik energiyasini elektronga batamom yoki qisman berishi mumkin.



4.7-rasm. Valent zonada bog‘lanishdagi bo‘sh o‘rin – “kovak” ning paydo bo‘lishi.

Agar bu energiya elektronning valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tishi uchun kifoya qilsa, u holda o‘tkazuvchanlik zonasida erkin elektron va valent zonada valent bog‘lanishdagi elektronning bo‘sh joyi (uni bundan keyin “kovak” deb ataymiz) yuzaga keladi (4.7-rasm).

Hisoblashlarning ko‘rsatishicha, taqiqlangan zonasi E_g ga teng bo‘lgan yarimo‘tkazgichda birorta atomning elektronini valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tkazish uchun zarur energiyaga ega bo‘lish ehtimolligi quyidagicha:

$$p = \theta \cdot C_c \cdot C_v \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \qquad (4.2)$$

bu yerda, θ – atomlar bilan elektronlarning “to‘qnashish” takroriyligiga bog‘liq doimiy, C_c – bo‘sh zonaning tubi atrofidagi bo‘sh joylar soni, C_v - valent zonaning yuqori shifti atrofidagi elektronlar soni, k – Bolsman doimiysi, T – mutlaq harorat.

Ushbu munosabatdan ko‘rinishicha, taqiqlangan zonaning kengligi E_g qancha katta bo‘lsa, elektronlarning o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tish ehtimolligi (va demak, ko‘rilayotgan kristallning elektrik o‘tkazuvchanligi) shuncha kichik bo‘lar ekan.

Taxminiy hisoblashlar shuni ko‘rsatadiki, taqiqlangan zonaning kengligi $E_g > 2$ eV bo‘lganda yuqoridagi ehtimollik amalda uchraydigan har qanday

haroratlarda nihoyatda kichik bo‘lar ekan. Shu sababli taqiqlangan zonasi kengligi 2 eV dan katta bo‘lgan moddalar elektr tokini o‘tkazmaydi va ular dielektriklar deb ataladi. Shu narsa ravshanki, E_g = 2 eV chegara shartli ma’noga ega bo‘lib, aslida dielektriklar bilan yarimo‘tkazgichlar orasida bu qadar keskin chegara yo‘q.

Yarimo‘tkazgichlarda valent zona batamom to‘lgan, lekin keyingi bo‘sh zonagacha bo‘lgan masofa kichik (2 eV dan kichik). Mutlaq nol haroratda yarimo‘tkazgichning valent zonasi batamom to‘la, o‘tkazuvchanlik zonasi esa bo‘sh bo‘lganligi sababli elektrik o‘tkazuvchanlik nolga teng. Harorat ortishi bilan issiqlik ta’sirida o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tadigan elektronlar soni eksponensial ravishda orta boradi. O‘tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar soniga mos ravishda valent zonadagi kovaklar soni va demak, yarimo‘tkazgichning elektr o‘tkazuvchanligi ham ortadi. Xususiy (kirishmasiz) yarimo‘tkazgichlar uchun o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar soni n_0 va mos ravishda valent zonadagi kovaklar soni p_0 haroratga quyidagicha bog‘liq holda o‘zgaradi:

$$n_0 = p_0 = Ae^{-\frac{E_g}{2kT}}, \tag{4.3}$$

bu yerda A – yarimo‘tkazgichga tegishli o‘zgarmas kattalik.

Elektr o‘tkazuvchanlik erkin zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasiga proporsional ekanligi ma’lum:

$$\delta = \mu_n e n_0 = \mu_p e p_0 \tag{4.4}$$

bu yerda, μ_n va μ_p – elektron va kovaklar harakatchanligi, e – elektron zaryadi. U holda yarimo‘tkazgichlarning elektrik o‘tkazuvchanligi haroratga bog‘liq ravishda quyidagi qonuniyat bilan o‘sadi:

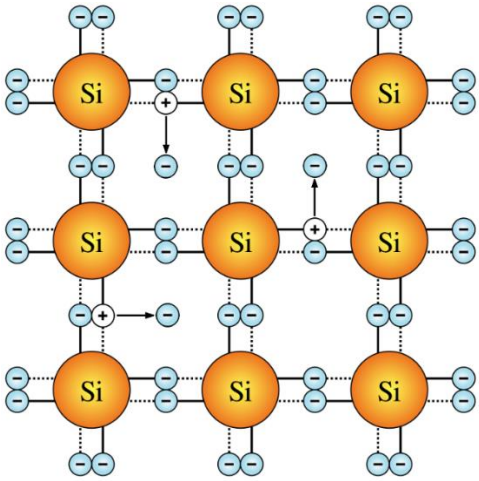
$$\sigma \cong Be^{-\frac{E_g}{2kT}}, \tag{4.5}$$

bu yerda, B – o‘zgarmas doimiy. Demak, yarimo‘tkazgichning elektr o‘tkazuvchanligi harorat ortishi bilan juda keskin ortar ekan. Bu yarimo‘tkazgichlarning o‘ziga xos muhim xususiyatlaridan biridir.

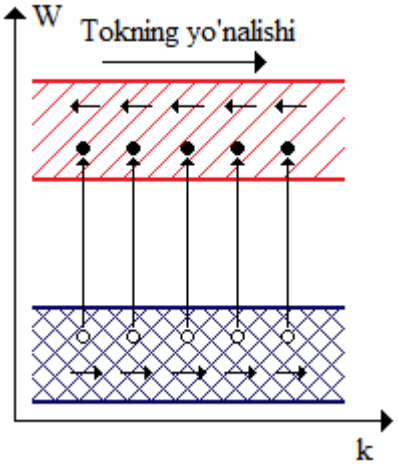
Xususiy (kirishmasiz) yarimo‘tkazgich. Demak, yarimo‘tkazgichda pastdagi to‘lgan (valent) zonaning yuqori shiftidan yuqoridagi erkin (o‘tkazuvchanlik) zonaning tubigacha shunday energetik oraliq E_g bilan ajralganki, xona haroratida yetarlicha issiqlik energiyasiga ega bo‘lgan ba’zi elektronlar bu oraliqdan o‘ta olishi mumkin. Ushbu jarayonda elektronlar to‘lgan zonaning yuqori qismidan erkin zonaning pastki qismiga o‘tadi. Har qanday elektronning to‘lgan zonaning yuqori sathlarini tashlab erkin zonaning quyi sathlariga o‘tish ehtimolligi, ushbu oraliqni o‘tish uchun zarur bo‘lgan E_g energiya ortishi bilan keskin kamayadi.

To‘lgan zonadagi elektronlar kristallning o‘tkazuvchanligida ishtirok etmasligi yuqorida ko‘rsatib o‘tildi. Biroq xona haroratida valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga nechta elektron o‘tsa, valent zona shuncha elektronni

yo‘qotadi va nihoyat qisman to‘lmagan holat yuzaga keladi. Ya’ni valent zonada elektron yetishmagan bog‘lanishlar – musbat zaryadli kovaklar hosil bo‘ladi (4.8-rasm). Endi elektronlar boshqa bog‘lanishlardan ana shu kovaklarga sakrab o‘tish imkoniyatiga ega bo‘ladi. Natijada bu kovak elektron bilan to‘lib yo‘qoladi va boshqa bog‘lanishda kovak paydo bo‘ladi. Shunday qilib, kovak go‘yo kristallning bir joyidan ikkinchi joyiga tartibsiz ko‘chib yuradi.



4.8-rasm. Valent zonada musbat zaryadli “kovak”larning paydo bo‘lishi.



4.9-rasm. Tashqi elektr maydon ta’sirida yarimo‘tkazgichda erkin elektronlar va kovaklarning tartibli harakati.

Agar bunday yarimo‘tkazgichga tashqi elektr maydon berilsa, valent zonada bu bog‘lanishdan u bog‘lanishga tartibsiz sakrab yurgan valent elektronlarning maydonga teskari yo‘nalishda tartibli sakrab o‘tishlari va demak, valent zonada kovaklarning ushbu elektronlarga teskari yo‘nalishda maydon bo‘ylab tartibli ko‘chishi – kovaklar tokini, o‘tkazuvchanlik zonasidagi erkin elektronlar esa, elektronlar toki yuzaga keladi (4.9-rasm).

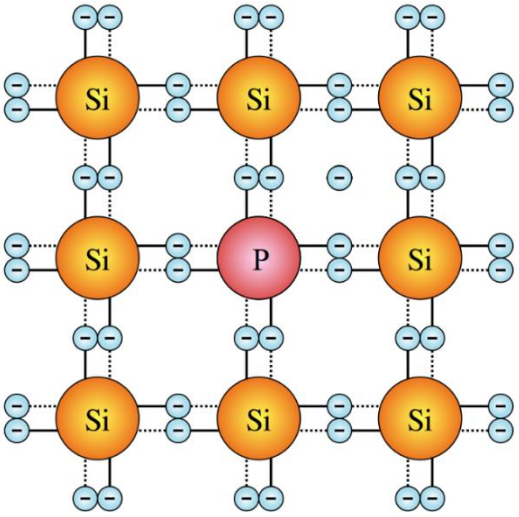
Elektronlari soni kovaklari soniga teng (n_0=p_0) bo‘lgan, bir turdagi atomlardan tashkil topgan sof yarimo‘tkazgich – xususiy yarimo‘tkazgich deyiladi. Masalan, tarkibida birorta ham nuqsoni bo‘lmagan yarimo‘tkazgich xususiy yarimo‘tkazgich bo‘lishi mumkin. Tabiiyki, bunday yarimo‘tkazgichning o‘tkazuvchanligi berilgan sharoitda shu turdagi, lekin xususiy bo‘lmagan yarimo‘tkazgichnikiga qaraganda nihoyatda kichik bo‘ladi. Masalan, xususiy yarimo‘tkazgich kremniyning xona haroratidagi solishtirma qarshiligi taxminan 300 kΩ·cm atrofida bo‘ladi. Shu bilan birga xususiy yarimo‘tkazgichlarda elektr tokining paydo bo‘lishida ham elektronlar, ham kovaklar qatnashishini doim esda tutish lozim.

Kirishmali *n*-tur yarimo‘tkazgich. Agar yarimo‘tkazgich kristalldagi ayrim atomlar boshqa valentlikka ega bo‘lgan elementning atomlari bilan almashtirilsa, panjara tuzilishidagi qat’iy tartib buziladi. Kirishmaning mavjudligi tufayli

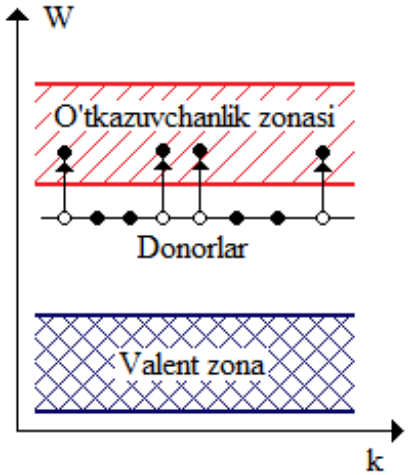
energetik diagramma ko‘rinishi o‘zgaradi. Biroq agar kirishma miqdori ko‘p bo‘lmasa, masalan, asosiy atomlar sonining yuz mingdan birini tashkil qilsa, ideal yarimo‘tkazgich kristallining energetik diagrammasi deyarli o‘zgarmaydi, deb qarash mumkin. Chunki kirishma atomlarining kiritilishi faqatgina mavjud zonalar orasida yangi kvant holatlar hosil bo‘lishiga (agar faqat bir turdagi kirishma kiritilsa) olib keladi. Bu holda kirishma atomlari bir-biridan uzoq joylashganligi uchun, umumiy holda ular orasidagi o‘zaro ta’sirni hisobga olmasdan, kirishma atomlari tomonidan kiritilgan kvant holatlarni taqiqlangan zonaning ma’lum joylarida joylashgan energetik holatlar deb qarash mumkin.

Qo‘shimcha energetik sathning asosiy kristall zonalari orasidagi holati kristallning o‘tkazuvchanligiga kirishmalar miqdori juda oz bo‘lganida ham kuchli ta’sir qiladi.

Besh valentli fosfor, mishyak va surma kabi elementlar atomlari germaniy va kremniyda o‘tkazuvchanlik zonasiga yaqin joylashgan qo‘shimcha donor sathlar hosil qiladi. Past haroratlarda kirishmaviy sathlar elektronlar bilan to‘lgan bo‘ladi, ammo yuqori haroratlarda elektronlar issiqlik harakati tufayli bu sathdan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tib oladi. Bu holda ular erkin elektronga aylanadi va kristallning elektr o‘tkazuvchanligida qatnashadi. Bunday sharoitda o‘tkazuvchanlik elektronlarining soni taxminan kirishma atomlarining soniga teng bo‘ladi, kristallning o‘tkazuvchanligi kirishmalar konsentratsiyasiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri bog‘liq bo‘ladi.



4.10-rasm. Kremniyda besh valentli kirishma atomining kovalent bog‘lanishi.



4.11-rasm. *n*-tur yarimo‘tkazgichda zaryad tashuvchilar.

Kremniy kristalliga kiritilgan besh valentli kirishmaviy atom bitta elektronini osongina bo‘shatib, o‘tkazuvchanlik zonasiga berishining fizik-kimyoviy mohiyati quyidagidan iborat: kremniy atomlari to‘rt valentli bo‘lganligi uchun kristall panjara

n-tur yarimo‘tkazgichda erkin zaryad tashuvchilari hosil qilishda to‘rtta elektroni orqali atrofidagi to‘rtta atom bilan kovalent bog‘ hosil qiladi (4.10-rasm).

Agar kristall panjaraning biror tugunidagi kremniy atomini besh valentli kirishma atom bilan almashtirsak, u holda bu atom to‘rtta elektronini atrofidagi atomlar bilan kovalent bog‘lanish hosil qilishga beradi. Uning beshinchi valent elektroni kimyoviy bog‘lanishda ishtirok etmay, atom bilan zaif bog‘langan valent elektronligicha qoladi. Bunday elektronga ozginagina issiqlik energiyasi berilsa, u atomdan ajralib, o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tadi, ya’ni erkin elektronga aylanadi (4.10-rasm).

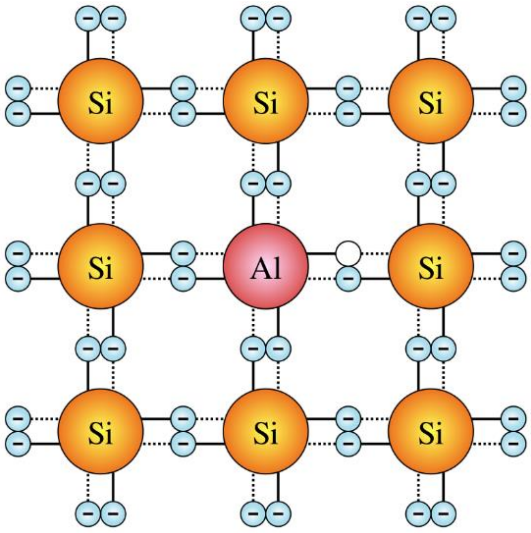
4.11-rasmda *n*-tur yarimo‘tkazgichda tok hosil qiluvchi zaryad tashuvchilar ko‘rsatilgan.

Kirishmali *p*-tur yarimo‘tkazgich. Uch valentli galliy yoki bor elementining atomlari germaniy va kremniy kristallida valent zonaga yaqin joylashgan kirishmaviy sath hosil qiladi. Past haroratlarda kirishmaviy sath elektronlar bilan to‘lmagan. Biroq yuqori haroratlarda elektronlar issiqlik harakati tufayli valent zonadan kirishmaviy sathga o‘tishi mumkin. Bunda ular qo‘zg‘almas manfiy zaryadlarga aylanib (chunki bu sathlar ancha chuqur bo‘lganligi uchun ulardan elektronning qaytib chiqishi ancha qiyin) valent zonada qo‘shimcha erkin kovaklar hosil qiladi.

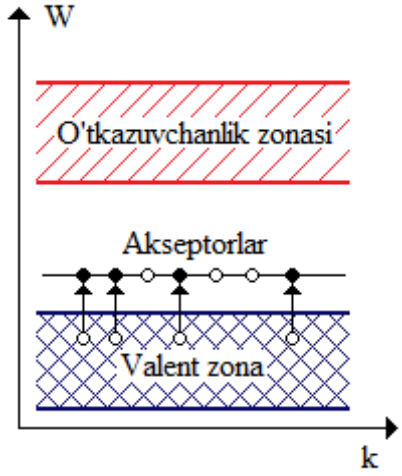
“Kovak” – musbat zaryadli erkin zaryad tashuvchi kvazizarracha sifatida namoyon bo‘ladi. Aslida u kristall panjarasidagi (valent bog‘lanishlarni ko‘z oldingizga keltiring) biror sabab tufayli yetishmay qolgan elektronning o‘rnidir.

Masalan, kremniy kristall panjarasining keltirilgan beshta atomdan iborat yacheykasini olaylik. Bu yacheykada valent bog‘lanishlarda sakkizta elektron ishtirok etadi. Bu elektronlarning to‘rttasi markazdagi atomniki, qolgan to‘rttasi atrofidagi qolgan atomlarnikidir. O‘sha atrofdagi atomlarning har biri ham o‘z navbatida, o‘z atrofidagi qolgan uchta atom bilan uchta valent elektroni yordamida valent bog‘lanishlar hosil qiladi. Xullas, kremniy kristallidagi atomlarning hamma valent elektronlari valent bog‘lanishlarga umumlashgan. Shu bilan birga, har bir atomda elektrik neytrallik saqlanib qoladi, ya’ni odatdagidek atom yadrosidagi musbat zaryad atomdagi elektronlarning yig‘indi zaryadi bilan neytrallashguncha qoladi.

Agar biror valent bog‘lanishdagi elektron qandaydir sabab bilan (masalan, issiqlik energiyasi yoki tashqaridan berilgan boshqa energiya hisobiga) shu bog‘lanishdan bo‘shab o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tib ketsa, u holda shu valent elektronini yo‘qotgan atom musbat ionga aylanadi, ya’ni shu atomda bitta musbat zaryad – kovak paydo bo‘ladi. Agar shu bog‘lanishning atrofiga birorta elektron kelib qolsa, uni shu kovak ushlab oladi va natijada elektronning bo‘sh joyi – kovak rekombinatsiya yo‘li bilan yo‘qoladi.



4.12-rasm. Kremniyda uch valentli kirishma atomning kovalent bog‘lanishi.



4.13-rasm. *p*-tur yarimo‘tkazgichda zaryad tashuvchilar.

Uch valentli kirishma valent zonadan elektron olganligi uchun uni akseptor kirishma deyiladi. Xo‘sh, bu kirishma nima sababdan o‘ziga elektronni oladi? Yuqorida aytilganidek, kremniy atomi to‘rt valentli bo‘lganligi uchun, kristall panjara to‘rtta elektron bilan kovalent bog‘lanish hosil qiladi. Endi uning o‘rniga uchun valentli atom kiritilsa, to‘la kovalent bog‘lanish hosil qilish uchun unga bitta elektron etishmaydi, ya’ni kovak yuzaga keladi (4.12-rasm). Endi biror yo‘l bilan bitta elektronni qo‘shib olish imkoniyati tug‘ilishi bilan kirishma atom bu imkoniyatini amalga oshiradi. Bunday elektronlar kristallda berilgan haroratda issiqlik harakati fluktuatsiyasi hisobiga doimo hosil bo‘lib turadi. Demak, kristallning birlik hajmida unga kiritilgan akseptor atomlarning konsentratsiyasiga mos konsentratsiyada kovaklar mavjud bo‘ladi. Kristall elektrik o‘tkazuvchanligi bu holda asosan kovaklar bilan belgilanganligi uchun bunday yarimo‘tkazgich *p*-tur yoki kovakli yarimo‘tkazgich deb ataladi. *p*-tur yarimo‘tkazgichda kovaklar asosiy zaryad tashuvchilar, elektronlar esa noasosiy zaryad tashuvchilardir.

4.13-rasmda *p*-tur yarimo‘tkazgichda tok hosil qiluvchi erkin zaryad tashuvchilar ko‘rsatilgan.

n-tur va *p*-tur yarimo‘tkazgichlarda noasosiy zaryad tashuvchilarni hisobga olmasa ham bo‘ladi degan tasavvur paydo bo‘lishi mumkin. Bu mutlaqo noto‘g‘ri fikr. Ko‘pchilik yarimo‘tkazgichli asboblarning ish jarayonida noasosiy zaryad tashuvchilar katta ahamiyatga egadir.

4.2-§. Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining haroratga bog‘liqligi

Ma’lum bir haroratda muayyan yarimo‘tkazgichning birlik hajmidagi erkin zaryad tashuvchilarining miqdori konsentratsiya deb ataladi. Zaryad tashuvchilar

konsentratsiyasini topish uchun ruxsat etilgan zonada (elektronlar uchun o‘tkazuvchanlik zonasi va kovaklar uchun valent zona) mavjud bo‘lgan erkin energetik sathlari soni $N(\varepsilon)$ ni Pauli prinsipini inobatga olgan holda hisobga olish kerak.

Qattiq jismlar nazariyasiga ko‘ra, energiya birligiga to‘g‘ri keladigan energetik sathlar zichligi (holatlar zichligi) N energiyaga quyidagicha bog‘liqdir (4.14*a*-rasm):

$$N_c(\varepsilon) = \frac{4\pi}{h^3}\left(2m_n^*\right)^{3/2}\sqrt{\varepsilon - \varepsilon_c} \tag{4.6}$$

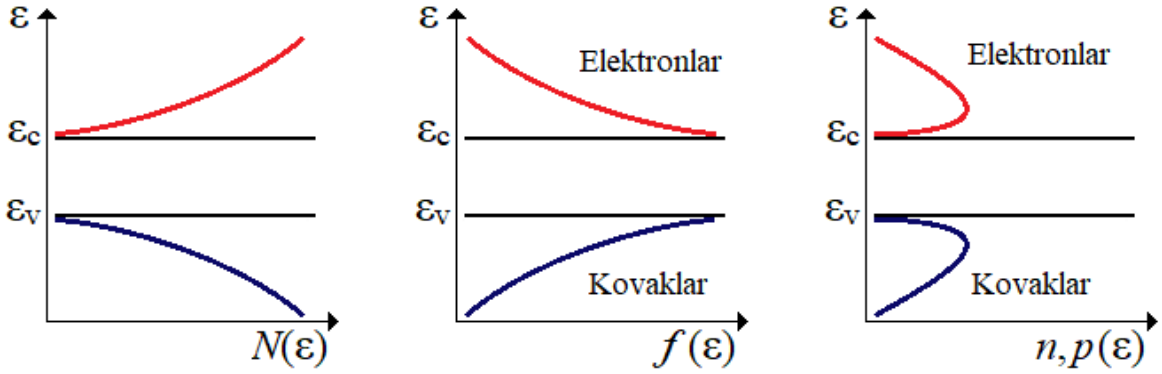
$$N_v(\varepsilon) = \frac{4\pi}{h^3}\left(2m_p^*\right)^{3/2}\sqrt{\varepsilon_v - \varepsilon} \tag{4.7}$$

Antisimmetrik to‘lqin funksiyalari bilan tasvirlanadigan zarrachalar tizimlarida Fermi-Dirak taqsimoti amal qiladi. Ushbu statistika Pauli prinsipiga bo‘ysunadigan va yarim butun spinga (±1/2) ega bo‘lgan zarralar – *fermionlar* (elektronlar, protonlar, neytronlar) tizimining harakatini tavsiflaydi.

Ruxsat etilgan sathlarning to‘ldirilish ehtimoli Fermi-Dirak funksiyasi (.14*b*-rasm) bilan aniqlanadi, u tizim holatining parametrlari sifatida harorat va Fermi sathining energiyasini o‘z ichiga oladi:

$$f_n(\varepsilon) = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right)\right]^{-1} \tag{4.8}$$

$$f_p(\varepsilon) = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_F - \varepsilon}{kT}\right)\right]^{-1} \tag{4.9}$$



***a*)** **b)** **c)**

4.14-rasm. Kirishmasiz yarimo‘tkazgichlarda energetik holatlar zichligi (*a*), sathlarni erkin tashuvchilar bilan to‘ldirilganlik ehtimolligi (*b*) va erkin tashuvchilar kontsentratsiyasining (*c*) energiyaga bog‘liqligi.

Agar ixtiyoriy energetik oraliqqa tegishli elektronlar (yoki kovaklar) soni mumkin bo‘lgan kvant holatlar sonidan kam bo‘lsa, bunday yarimo‘tkazgich *aynimagan* yarimo‘tkazgich deb ataladi. Aynimagan yarimo‘tkazgichlar

legirlanmagan yoki kuchsiz legirlangan yarimo‘tkazgichlardir. Yarimo‘tkazgichlarda harakatchan tashuvchilar soni mumkin bo‘lgan kvant holatlar sonidan oshib ketganda (kirishmalarning yuqori konsentratsiyasida) ular *aynigan* yarimo‘tkazgichlarga aylanadi. Aynimagan yarimo‘tkazgichlarda elektronlar va kovaklar energiyasi Fermi energiyasidan sezilarli darajada farq qiladi. $\varepsilon - \varepsilon_F$ energiyalar farqi qoida bo‘yicha kT qiymatidan uch martadan ko‘p bo‘ladi.

Shuning uchun (4.8) va (4.9) formulalarining maxrajidagi 1 ni e’tiborga olmaslik mumkin. U holda o‘tkazuvchanlik zonasidagi energetik sathlarni to‘ldirilish ehtimolligi klassik statistikaning Maksvell-Bolsman taqsimoti bilan ifodalanadi:

$$f_n(\varepsilon) \approx \exp\left(-\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right). \tag{4.10}$$

Kovaklarning hosil bo‘lish ehtimolligi esa

$$f_p(\varepsilon) \approx \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon}{kT}\right). \tag{4.11}$$

Elektronlar va kovaklarning energetik zichligi

$$n(\varepsilon) = N_c(\varepsilon) f_n(\varepsilon) \tag{4.12}$$

$$p(\varepsilon) = N_v(\varepsilon) f_p(\varepsilon). \tag{4.13}$$

Yarimo‘tkazgichdagi elektronlar va kovaklarning konsentratsiyasini aniqlash uchun mos ravishda elektronlar va kovaklar energetik zichliklarini energiya bo‘yicha integrallash kerak:

$$n = \int_{\varepsilon_c}^{\infty} N_c(\varepsilon) f_n(\varepsilon) d\varepsilon = N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_F}{kT}\right) \tag{4.14}$$

$$p = \int_{0}^{\varepsilon_v} N_v(\varepsilon) f_p(\varepsilon) d\varepsilon = N_v \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_v}{kT}\right). \tag{4.15}$$

Bu yerda N_c – o‘tkazuvchanlik zonasidagi holatlarning effektiv zichligi, N_v – valent zonadagi holatlarning effektiv zichligi.

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \tag{4.16}$$

$$N_v = 2\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \tag{4.17}$$

Xususiy yarimo‘tkazgichda $n_i = p_i$ bo‘lganligi uchun

$$N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_F}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_v}{kT}\right). \tag{4.18}$$

(4.18) ni logarifmlab va ε_F ga nisbatan yechib

$$\varepsilon_F = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} \tag{4.19}$$

ga ega bo‘lamiz. $\frac{kT}{2}\ln\frac{N_v}{N_c}$ ning qiymati $\frac{\varepsilon_c+\varepsilon_v}{2}$ ning qiymatidan sezilarli darajada kichik, shuning uchun xususiy yarimo‘tkazgichda Fermi sathi taqiqlangan zonaning taxminan o‘rtasida joylashgan bo‘ladi.

Muvozanatdagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi Fermi sathining holatiga bog‘liq. Elektronli yarimo‘tkazgichda elektronlar konsentratsiyasi asosan elektronlarning ε_d energetik sathdan o‘tkazuvchanlik zonasining energetik sathlariga o‘tishi bilan asoslanadi. Shuning uchun n_n konsentratsiya ionlashgan donorlar konsentratsiyasiga teng bo‘lishi kerak:

$$n_n = N_d\left[1-f(\varepsilon_d)\right]. \tag{4.20}$$

$1-f(\varepsilon_d)$ – elektronning ε_d energetik sathda bo‘lmaslik ehtimolligi, demak

$$n_n = N_d \exp\frac{\varepsilon_d-\varepsilon_F}{kT}. \tag{4.21}$$

(4.14) va (4.21) tenglamalarning o‘ng tomonlarini tenglashtirib quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_c-\varepsilon_F}{kT}\right) = N_d \exp\frac{\varepsilon_d-\varepsilon_F}{kT}. \tag{4.22}$$

Bu tenglikni ε_F ga nisbatan yechib quyidagi ifodani olamiz:

$$\varepsilon_F = \frac{\varepsilon_d+\varepsilon_c}{2}-\frac{kT}{2}\ln\frac{N_c}{N_d}. \tag{4.23}$$

Olingan ifodadan kelib chiqadiki, Fermi sathining holati harorat va kirishmalar konsentratsiyasiga bog‘liq.

$$n_n = n_i \exp\frac{\varepsilon_F-\varepsilon_i}{kT} \tag{4.24}$$

$$p_n = n_i \exp\left(-\frac{\varepsilon_F-\varepsilon_i}{kT}\right) \tag{4.25}$$

bo‘lishini ko‘rsatish mumkin. Olingan ifodalarni bir-biriga ko‘paytirib, quyidagini olamiz:

$$n_n p_n = n_i^2 \tag{4.26}$$

Shunday qilib, kirishmalarning ixtiyoriy konsentratsiyasida elektronlar va kovaklar konsentratsiyalarining ko‘paytmasi doimiy bo‘lib qoladi.

Kovakli yarimo‘tkazgichda kovaklarning konsentratsiyasi asosan elektronlarning valent zonaning energetik sathlaridan akseptorlarning energetik sathiga o‘tishi bilan asoslanadi. Shuning uchun kovaklarning konsentratsiyasi ionlashgan kirishmalar konsentratsiyasiga teng bo‘lishi kerak, ya’ni

$$p_p = N_a \exp\left(-\frac{\varepsilon_a-\varepsilon_F}{kT}\right) = n_i \exp\frac{\varepsilon_i-\varepsilon_F}{kT} \tag{4.27}$$

$$n_p = n_i \exp\left(-\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_F}{kT}\right). \qquad (4.28)$$

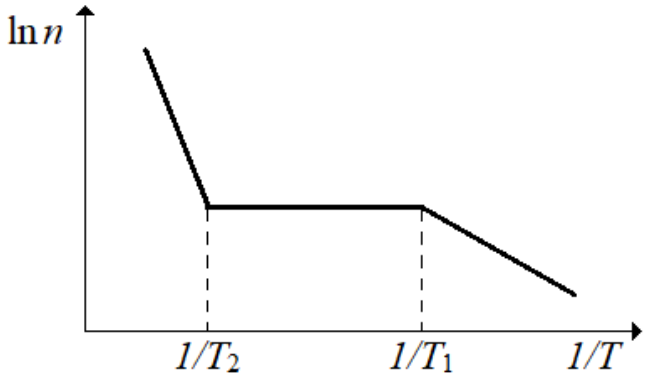
Yuqoridagilardan quyidagi xulosalarni chiqarish mumkin:

- asosiy va noasosiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi Fermi sathining holatiga bog‘liq;

- yarimo‘tkazgichga kirishmalarning kiritilishi Fermi sathini taqiqlangan zonaning o‘rtasiga nisbatan elektronli yarimo‘tkazgichda yuqoriga, kovakli yarimo‘tkazgichda esa pastga siljitadi;

- yarimo‘tkazgichda haroratning oshishi Fermi sathining taqiqlangan zonaning o‘rtasiga siljishiga olib keladi;

- kirishmalar konsentratsiyasining ortishi asosiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini oshiradi va noasosiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini esa kamaytiradi.



4.15-rasm. Elektronlar va kovaklar konsentratsiyasining haroratga bog‘liqligi.

Haroratga bog‘liq holda erkin zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini uchta xarakterli sohaga ajratish mumkin (4.15-rasm):

1. Yetarlicha past haroratlar sohasida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining o‘zgarishi asosan elektronlarning donor sathidan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tishi yoki elektronlarning valent zonadan akseptor sathiga o‘tib, erkin kovaklar hosil qilishi hisobiga sodir bo‘ladi. Bu “muzlash sohasi” bo‘lib, harorat $T_1 \approx 100$ K ga yetganda kirishmalar sathining to‘liq ionlashishi bilan tugaydi.

2. Harorat yana ko‘targanda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi deyarli o‘zgarmaydi (kirishmalarni tugatish sohasi).

3. Harorat $T_2 \approx 400$ K dan oshganda elektronlarning valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tishi va elektron-kovak juftliklarining hosil bo‘lishi tufayli zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi yana ko‘tarila boshlaydi. Bu soha xususiy o‘tkazuvchanlik sohasi deb ataladi.

Amalda ko‘pchilik yarimo‘tkazgichli qurilmalar asosan kirishmalarni tugatish sohasida ishlaydi.

4.3-§. Yarimo‘tkazgichlarda optik va fotoelektrik hodisalar

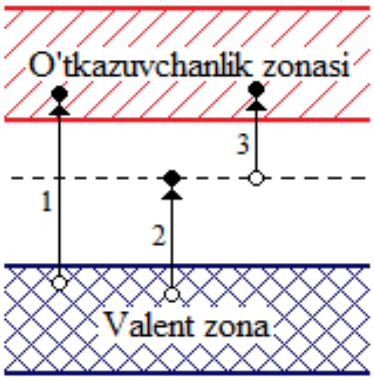
Optoelektronika – bu mikroelektronikaning signallarni elektrik va optik qayta ishlash vositalaridan foydalanishga asoslangan bo‘limi bo‘lib, uning ilmiy asosini elektr signallarini yorug‘lik signallariga va yorug‘lik signallarini elektr signallariga aylantirish jarayonlari, shuningdek, yorug‘lik orqali uzatiladigan axborotni shakllantirish, uzatish, qayta ishlash va saqlash jarayonlari tashkil etadi. Bu jarayonlar va hodisalarga, birinchi navbatda, yarimo‘tkazgichlarda yorug‘likning yutilishi va fotoo‘tkazuvchanlik, *p-n* o‘tishdagi fotoelektr effekt, elektrolyuminessensiya va yarimo‘tkazgichlardagi rag‘batlangan nurlanish jarayonlari kiradi.

Optoelektronikada yorug‘lik signallarini elektr signallariga aylantirish uchun ventil yoki fotodiod rejimidagi *p-n* o‘tishlar, $A^{II}B^{VI}$ va $A^{III}B^{V}$ birikmalaridan yasalgan yupqa pardali ko‘rinishdagi fototranzistor va fotorezistorlar, shuningdek, anomal yuqori fotokuchlanishlar effektiga asoslangan pardali qurilmalar qo‘llaniladi.

Elektr signallarini yorug‘lik signallariga aylantirishda turli xil ko‘rinishdagi elektrolyuminessensiyadan, shuningdek rag‘batlangan kogerent nurlanish hodisasidan foydalaniladi. Elektrolyuminessent qurilmalar asosida kristallarda tashqi kontakt yoki *p-n* o‘tish orqali muvozanatsiz zaryad tashuvchilarni purkash, zarbli ionlanish yoki kuchli elektr maydonidagi ionlanish natijasida vujudga keladigan spontan nurlanishli o‘tishli jarayonlar yotadi. Rag‘batlangan kogerent nurlanish shuningdek *p-n* o‘tish orqali zaryad tashuvchilarini purkash natijasida ham yuzaga keladi, lekin yuqori energetik sathlarning teskari (invers) to‘lishi sharoitlarida yuzaga keladi. Bunda nurlanishning rag‘batlangan komponenti spontan elektrolyuminessensiyadan ustun turadi. Elektr signallarini yorug‘lik signallariga o‘zgartirgichlar ham yupqa pardali, ham monolit ko‘rinishlarda ishlab chiqarilishi mumkin. Optoelektronikaning ilmiy asosini tashkil etuvchi hodisalarning aksariyati nisbatan uzoq vaqtdan beri ma’lum bo‘lib, ularning ko‘pchiligi elektronikada keng amaliy qo‘llanilmoqda. Lekin “optoelektronika” atamasi fotoelektrik va optik hodisalarning barcha qo‘llanilish sohalarini qamrab olmaydi. Bu tushuncha ancha torroq ma’noda – qattiq jismlar yoki yupqa pardalar asosida yaratilgan mikroelektron qurilmalarga nisbatan qo‘llaniladi. Bunday qurilmalarda signalni qayta ishlash elektronlar va fotonlar o‘rtasidagi o‘zaro ta’sir jarayonlari orqali amalga oshiriladi.

Bunday qurilmalarda faol ishlashni belgilovchi aloqa ham elektrik, ham optik kanallar orqali amalga oshiriladi.

Yarimo‘tkazgichlarda fotoo‘tkazuvchanlik va yorug‘likning yutilishi. Fotoo‘tkazuvchanlik hodisasi infraqizil, ko‘rinuvchi yoki ultrabinafsha nurlanish ta’sirida modda qarshiligining o‘zgarishidan iborat. Ko‘p hollarda nurlanish ta’sirida modda qarshiligining kamayishi kuzatiladi (normal fotoeffekt). Biroq ba’zida qarshilikning ortishi (anomal fotoeffekt) ham kuzatiladi. Bu hodisa kamdan-kam uchraydi. Ko‘pgina eksperimental tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, qarshilikning kamayishi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining oshishi bilan asoslanadi.



4.16-rasm. Yorug‘lik ta’sirida erkin zaryad tashuvchilarni generatsiyalashning mumkin bo‘lgan yo‘llari sxemasi. 1 – zona-zona o‘tish; 2 – valent zona-kirishma sath o‘tish; 3 – kirishma sath-o‘tkazuvchanlik zonasi o‘tish.

Yarimo‘tkazgichlarda yorug‘lik ta’sirida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining oshishi quyidagi usullar bilan amalga oshirilishi mumkin (4.16-rasmga qarang):

1. Elektromagnit nurlanish kvantlari elektronlarni qo‘zg‘atib, ularni valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tkazadi, buning natijasida kovaklar va elektronlar konsentratsiyasi teng miqdorda ortadi;

2. Valent zonadan elektronlar kirishma sathlariga o‘tkaziladi, bu faqat kovakli o‘tkazuvchanlikni oshiradi;

3. Elektronlar kirishmalar sathidan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tkaziladi, bu elektronli o‘tkazuvchanlikning oshishiga olib keladi.

Yorug‘lik yutilishi tufayli zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining ortishi elektr o‘tkazuvchanlikning ortishiga olib keladi. Fotoo‘tkazuvchanlikning paydo bo‘lishini elektronlarning kirishma sathlaridan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tishi misolida ko‘rib chiqaylik.

Yorug‘lik ta’sirida yarimo‘tkazgichning birlik hajmida vaqt birligida g elektron hosil bo‘lsin. Keyinchalik yorug‘lik ta’siri boshlangan paytdan boshlab, elektronlar konsentratsiyasi o‘sishni boshlaydi. Biroq o‘sish jarayoni cheksiz davom etmaydi, chunki zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ortishi bilan rekombinatsiya ehtimoli ham ortadi. Yetarlicha vaqtdan so‘ng muvozanat holati o‘rnatiladi, bunda hosil bo‘lgan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ma’lum vaqt oralig‘ida rekombinatsiyalangan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasiga teng bo‘ladi.

Ko‘rib chiqilayotgan holat uchun uzluksizlik tenglamasini quyidagicha yozish mumkin:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = g - \frac{\Delta n}{\tau_n}, \tag{4.29}$$

bu yerda Δn – yorug‘lik ta’sirida hosil bo‘lgan elektronlar konsentratsiyasi bo‘lib, u $n - n_0$ muvozanat konsentratsiyaga teng; τ_n – elektronlarning yashash davri. Bu tenglamaning yechimi quyidagicha

$$\Delta n = \Delta n_{bar}\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)\right], \tag{4.30}$$

bu yerda Δn_{bar} – hosil bo‘lgan elektronlar konsentratsiyasining barqaror holat qiymati bo‘lib, u quyidagiga teng:

$$\Delta n_{bar} = g\tau_n. \tag{4.31}$$

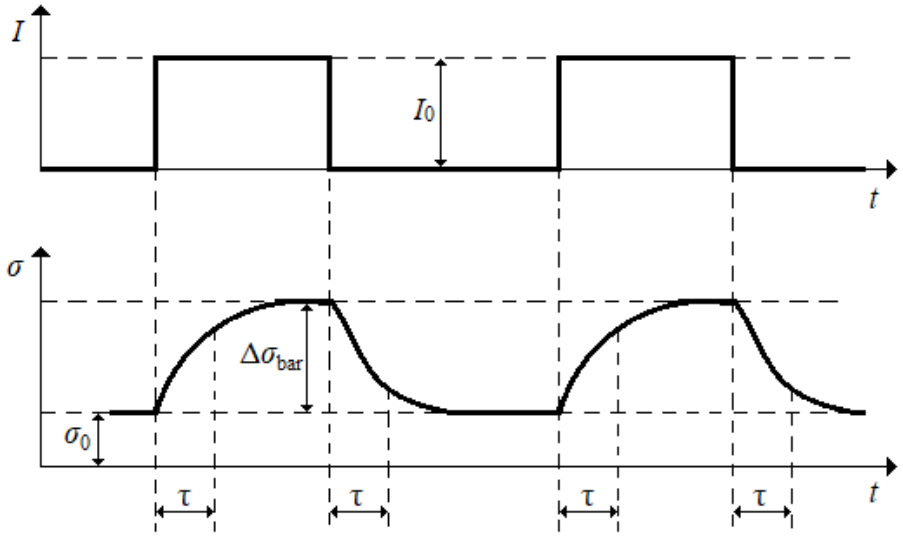
Yoritish to‘xtagandan so‘ng (g=0) (4.29) tenglama quyidagi shaklni oladi

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau_n}. \tag{4.32}$$

Bu tenglamaning yechimi

$$\Delta n = \Delta n_{bar} \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \tag{4.33}$$

zaryad tashuvchilar rekombinatsiyasi va yarimo‘tkazgichning muvozanat holatiga qaytish jarayonini tavsiflaydi.



4.17-rasm. To‘g‘ri burchakli yorug‘lik impulslari bilan yoritilganda yarimo‘tkazgich fotoo‘tkazuvchanligining o‘zgarishi (I_0 va σ_0 - mos ravishda impuls amplitudasi va qorong‘ilikdagi o‘tkazuvchanlik).

Yarimo‘tkazgichning fotoo‘tkazuvchanligi quyidagiga teng:

$$\Delta\sigma = q\mu_n\Delta n, \tag{4.34}$$

elektronlar konsentratsiyasi o‘zgarish tabiatini takrorlaydi. 4.17-rasmda yarimo‘tkazgich I_0 intensivlikdagi to‘g‘riburchakli yorug‘lik impulslari bilan

yoritilganda fotoo‘tkazuvchanlikning o‘zgarish egri chizig‘i ko‘rsatilgan. Fotoo‘tkazuvchanlikning barqaror holat qiymati quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$\Delta\sigma_{bar} = q\mu_n \Delta n_{bar} = q\mu_n g\tau_n . \qquad (4.35)$$

Olingan formuladan ma’lum bo‘lishicha, yarimo‘tkazgichning ishlash muddati qancha uzoq bo‘lsa, fotoo‘tkazuvchanlik shuncha yuqori bo‘ladi.

Erkin zaryad tashuvchilarning paydo bo‘lishiga olib keladigan yorug‘lik yutilish mexanizmlari fotoaktiv yutilish deb ataladi. Shu bilan birga, yorug‘lik kvantlari yutilishining bir qator mumkin bo‘lgan mexanizmlari mavjud bo‘lib, ular erkin zaryad tashuvchilarning paydo bo‘lishiga olib kelmaydi. Bularga eksitonli yutilish, shuningdek, erkin zaryad tashuvchilar va panjaraning optik tebranishlari tomonidan yutilishlar kiradi.

Eksitonli yutilish. Kvant energiyasining eksitonli yutilishi bog‘langan elektronning qo‘zg‘atish turi bo‘lib, unda elektron o‘z atomidan ajralib chiqmaydi, balki atomga yaqin joyda to‘ldirilmagan sathlardan biriga o‘tadi. Binobarin, eksitonli qo‘zg‘alish erkin zaryad tashuvchilarni yaratmaydi va kristallning elektr o‘tkazuvchanligini o‘zgartirmaydi.

Eksitonli qo‘zg‘alish kristall bo‘ylab harakatlanishi mumkin, ya’ni agar berilgan atom qaysidir nuqtada qo‘zg‘aluvchan holatda bo‘lsa, vaqt o‘tishi bilan bu qo‘zg‘alish boshqa atomga o‘tishi mumkin. Bunda qaysidir atomning qo‘zg‘aluvchan holatda bo‘lgan elektroni normal holatga o‘tadi va bu jarayonda ajralib chiqqan energiya qo‘shni atomning valent elektroniga o‘tadi.

Eksitonli qo‘zg‘alish yoki oddiygina eksiton harakati tabiiy ravishda kristallda elektr tokini vujudga keltirmaydi, chunki bunda zaryad tashuvchi emas, balki faqatgina qo‘zg‘atilgan holat ko‘chadi xolos. Eksitonni shuningdek, kulon kuchlari orqali bog‘langan va umumiy og‘irlik markazi atrofida aylanuvchi elektron va kovakning kristalldagi birgalikdagi ilgarilanma harakati sifatida ham ifodalash mumkin.

Atomning qo‘zg‘aluvchan holatini hosil qilish uning ionlanishiga qaraganda kamroq energiya talab qiladi. Shuning uchun eksitonga taqiqlangan zonada joylashgan ma’lum bir energetik sathni belgilash mumkin. Natijada kristallning energetik diagrammasida eksiton zonasi yoki butun eksitonli zonalar seriyasi paydo bo‘ladi.

Ammo shuni ta’kidlash kerakki, eksitonli yutilish fotoo‘tkazuvchanlikka bilvosita ta’sir qilishi mumkin. Eksiton kristall bo‘ylab harakatida panjara yoki boshqa yorug‘lik kvantining issiqlik tebranishlarida buzilishi mumkin, natijada ikkita erkin zaryad tashuvchisi – elektron va kovak paydo bo‘ladi. Bundan tashqari, eksiton kirishma atomiga duch kelishi va energiyasini zaif bog‘langan elektronga berib, uni o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tkazishi mumkin.

Erkin tashuvchilarda yutilish. Yarimo‘tkazgichga ta’sir qiluvchi nurlanish erkin elektronlar tomonidan ham yutilishi mumkin. Ushbu turdagi yutilish kuchli legirlangan yarimo‘tkazgichlarda kuzatiladi, ularda erkin tashuvchilarning konsentratsiyasi juda yuqori bo‘ladi. Erkin elektronlar tomonidan nurlanish energiyasi yutilish mexanizmi quyidagicha: elektromagnit nurlanish maydoni ta’sirida erkin elektronlar uning energiyasini o‘zlashtirmaydi, balki bu maydon bilan sinxron ravishda tebranadi. Agar bu tebranish paytida elektron panjara bilan to‘qnashsa (panjarali sochilish), u maydon energiyasini unga o‘tkazadi. Ushbu turdagi yutilish faqat relaksatsiya vaqti elektromagnit tebranishlar davridan sezilarli darajada kichik bo‘lganda paydo bo‘ladi. Aks holda elektron to‘plangan ushbu energiyani elektromagnit to‘lqinga qaytaradi.

Shuning uchun erkin elektronlar tomonidan yutilish ehtimoli tushayotgan nurlanish chastotasining kamayishi bilan ortadi, ya’ni spektrning infraqizil sohasida paydo bo‘ladi. Erkin tashuvchilar tomonidan nurlanishning yutilishi fotoaktiv jarayon emas va yarimo‘tkazgichning fotoo‘tkazuvchanligini o‘zgartirmaydi.

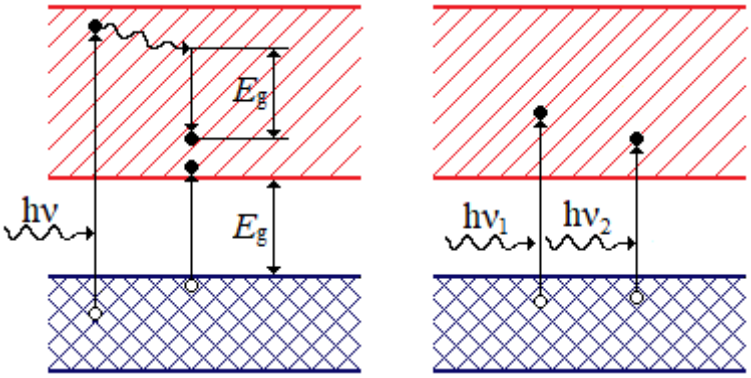
Panjaraning optik tebranishlarida yutilish. Bir necha turdagi atomlarni o‘z ichiga olgan murakkab kristallarda, ma’lumki, akustik tebranishlardan tashqari, panjaraning optik tebranishlari ham kuzatiladi. Akustik tebranishlardan farqli o‘laroq, optik tebranishlar qisqa to‘lqinli bo‘lganligi sababli, bunday tebranishlar paytida qo‘shni atomlarning fazaviy siljishi sezilarli bo‘lib chiqadi. Bu katta amplitudali o‘zgaruvchan elektr dipol momentining paydo bo‘lishiga olib keladi.

Agar tushayotgan elektromagnit nurlanish chastotasi atomlarning xususiy tebranishlari optik tarmog‘i chastotasiga to‘g‘ri kelsa, elektr dipol tomonidan nurlanish energiyasining rezonansli yutilishi kuzatiladi. Bunday yutilish optik tebranishlarning intensivligini oshiradi, lekin erkin zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini o‘zgartira olmaydi.

Ko‘p elektronli fotoqo‘zg‘alish. Ko‘rib chiqilgan yutilish mexanizmlaridan farqli ravishda shunday yutilish jarayonlari kuzatiladiki, bunda har bir kvant bitta emas, balki bir nechta fotoelektronlarni hosil qiladi. Bunday hodisa yorug‘lik kvantining energiyasi taqiqlangan zona kengligidan ikki baravardan ko‘proq katta bo‘lgan holatda sodir bo‘lishi mumkin. Ushbu kvant tomonidan o‘tkazuvchanlik zonasiga qo‘zg‘atilgan elektron taqiqlangan zona kengligidan kattaroq energiya olishi mumkin. Sochilish jarayonlari natijasida 4.18*a*-rasmda ko‘rsatilganidek, bu energiyaning bir qismini panjaraga berishi mumkin.

Biroq panjara bilan keyingi to‘qnashuvda bu elektron o‘z energiyasini bog‘langan elektronga berib, uni o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tkazadi. Binobarin, bitta kvantning yutilishi ikkilamchi zarbli ionlanish jarayoni ikkita elektron va ikkita kovakning chiqishiga olib keladi. Shuni ta’kidlash kerakki, agar yarimo‘tkazgich fotonlar o‘rniga yuqori energiyali zaryadlangan zarrachalar bilan nurlantirilsa,

ionlanish jarayoni xuddi shunday kechadi. Birlamchi ionlanish harakati natijasida bu zarralar tez elektronlarni hosil qiladi, keyinchalik ular ko‘p kaskadli ko‘payish jarayoni tufayli zonalarda ko‘p sonli elektronlar va kovaklarni chiqaradi.



a) *b*)

4.18-rasm. Taqiqlangan zona kengligidan katta energiyali yorug‘lik kvantlari yutilganda elektronlar o‘tish sxemasi. *a* – zarbli ionizatsiya bilan kvant yutilishi; *b* – Kompton effekti bilan kvant yutilishi.

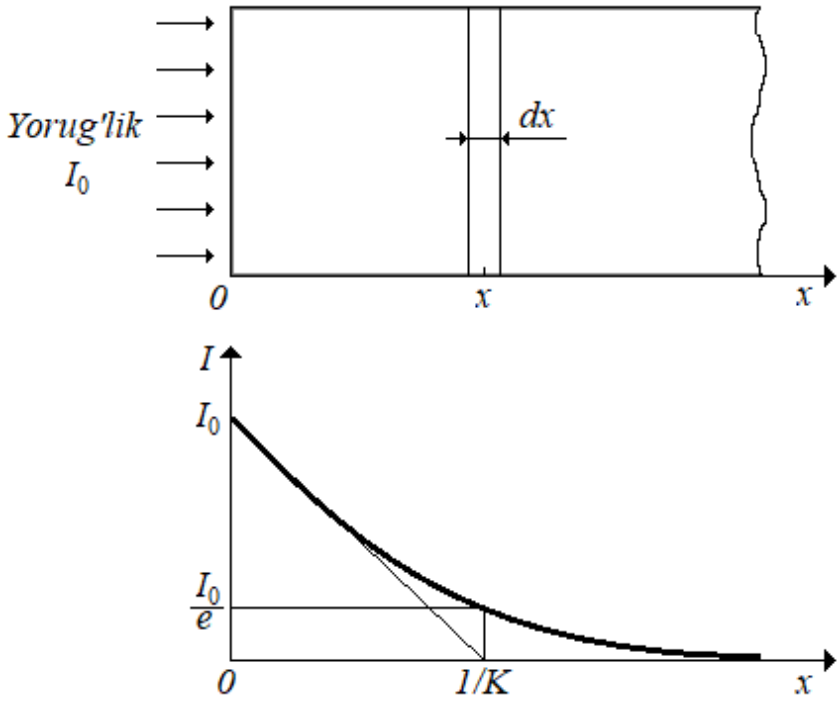
Yuqori energiyali kvantning yutilishi nafaqat ichki fotoeffektning yakka akti shaklida, balki Kompton effekti natijasida ham ro‘y berishi mumkin. Bunda $h\nu_1$ kvanti elektronga to‘liq energiyasini emas, balki elektron va kovakni ozod qilish uchun yetarli bo‘lgan qismini o‘tkazadi. Qolgan energiya $h\nu_2$ nurlanish kvanti shaklida saqlanib qoladi, biroq endi u pastroq chastotaga (ν_2) ega bo‘ladi (4.18*b*-rasmda ko‘rsatilganidek). Bu kvant kristallda tarqalib, yutilishi va yangi elektron-kovak juftligini hosil qilishi mumkin.

Yarimo‘tkazgichda elektromagnit nurlanish yutilishining fotoaktiv mexanizmlari turlicha bo‘lganligi sababli, fotoeffektning kvant chiqishi tushunchasi joriy etilgan. Kvant chiqishi – bu yorug‘lik kvantlari yutilishi natijasida hosil bo‘lgan erkin elektronlar (yoki kovaklar) sonining yutilgan kvantlar soniga nisbati hisoblanadi:

$$\eta = \frac{g}{N}. \qquad (4.36)$$

Agar yorug‘lik yutilishining barcha jarayonlari fotoaktiv bo‘lsa, u holda kvant chiqishi birga teng bo‘ladi. Fototashuvchilar (elektronlar yoki kovaklar) paydo bo‘lishiga olib kelmaydigan yutilish jarayonlarining mavjudligi kvant chiqishining aksariyat hollarda birdan kichik bo‘lishiga olib keladi. Nihoyat, yarimo‘tkazgich, masalan, ultrabinafsha yoki undan qattiqroq nurlanish bilan nurlantirilganda, bitta kvant energiyasi taqiqlangan zona kengligidan sezilarli darajada katta bo‘lganligi uchun, yuqorida aytib o‘tilganidek, bitta kvant bir nechta elektronlarni qo‘zg‘atishi mumkin. Bunday holda kvant chiqishi birdan katta bo‘ladi.

Kristallda yorug‘lik yutilishi tushunchasi qandaydir miqdoriy fazoviy xarakteristikaga ega bo‘lishi kerak. Haqiqatan ham, kuchli yutiladigan nurlanish ham juda yupqa namunalarda faqat qisman yutiladi. Yomon yutiladigan nurlanish esa katta o‘lchamli jismga tushganda oxir-oqibat u tomonidan deyarli to‘liq yutiladi. Shu munosabat bilan nurlanishning namuna chuqurligi bo‘yicha yutilish xususiyati ko‘rib chiqiladi.



4.19-rasm. Yutilgan nurlanish intensivligining jism chuqurligi bo‘yicha taqsimoti.

Faraz qilaylik, namuna sirtiga unga tik yo‘nalishda (4.19-rasmda ko‘rsatilganidek) I_0 intensivlikdagi yorug‘lik oqimi tushsin. U holda, birlik yuzali va dx qalinlikdagi qatlamda vaqt birligida yutiladigan yorug‘lik energiyasi miqdori dI, x koordinatadagi kesimda joylashgan I yorug‘lik intensivligiga va bu qatlamning dx qalinligiga proporsional bo‘ladi:

$$-dI = \alpha I dx, \qquad (4.37)$$

bu yerda α – yorug‘lik yutilish koeffitsiyenti deb ataluvchi proporsionallik koeffitsiyenti. Ushbu tenglamani integrallash orqali quyidagini olamiz:

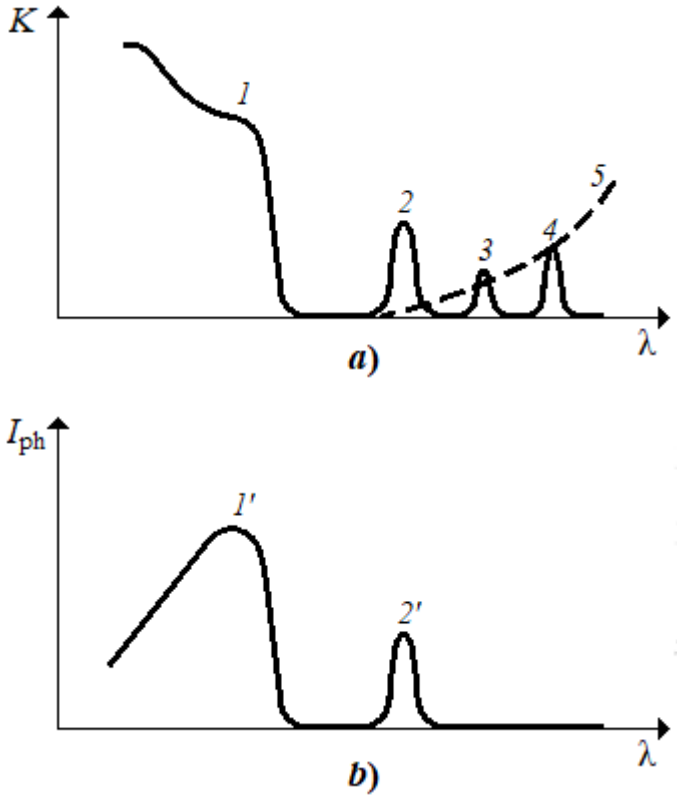
$$I = I_0 \exp(-\alpha x). \qquad (4.38)$$

Namuna chuqurligi bo‘yicha nurlanish intensivligining taqsimoti 4.19-rasmda ko‘rsatilgan. Rasmdan ko‘rinib turibdiki, 1/α – yutilish koeffitsiyentiga teskari kattalik yorug‘lik intensivligi e marta pasayadigan masofani bildiradi.

Kristallda berilgan nurlanish qanchalik kuchli yutilsa, yutilish koeffitsiyenti shunchalik katta bo‘ladi. Yutilish koeffitsiyentining kattaligi tabiiyki, jarayonning fotoaktiv yoki fotoaktiv emasligiga bog‘liq emas.

Yuqorida ko‘rsatilgandek, turli energiyaga (va shunga mos turli chastotaga) ega kvantlar kristallda har xil yutilish mexanizmlarini boshdan kechiradi. Ularning yutilish ehtimolligi ham farq qiladi. Shuning uchun α yutilish koeffitsiyenti chastotaga bog‘liq xususiyatdir. Shunday qilib, energiyasi taqiqlangan zona kengligidan katta yorug‘lik kvantlari uchun yutilish koeffitsiyenti $10^4 \div 10^6$ cm^{-1} tartibda katta qiymatlarga yetadi, $h\nu < E_g$ da yutilish koeffitsiyenti $10^6 \div 10^7$ marta kamayishi mumkin.

Yutilish koeffitsiyentining chastotaga bog‘liqligi yutilish spektri deb ataladi. 4.20*a*-rasmda yarimo‘tkazgichning tipik yutilish spektri ko‘rsatilgan. Yutilish spektri egri chizig‘ining 1-bo‘limi zonalararo o‘tishlarga (xususiy yutilish sohasi) mos keladi, 2, 3, 4-bo‘limlar kirishmalarda yutilish, eksitonli yutilishi va panjaraning optik tebranishlarida yutilishi natijasida hosil bo‘lgan soha yoki chiziqlarni ifodalaydi.



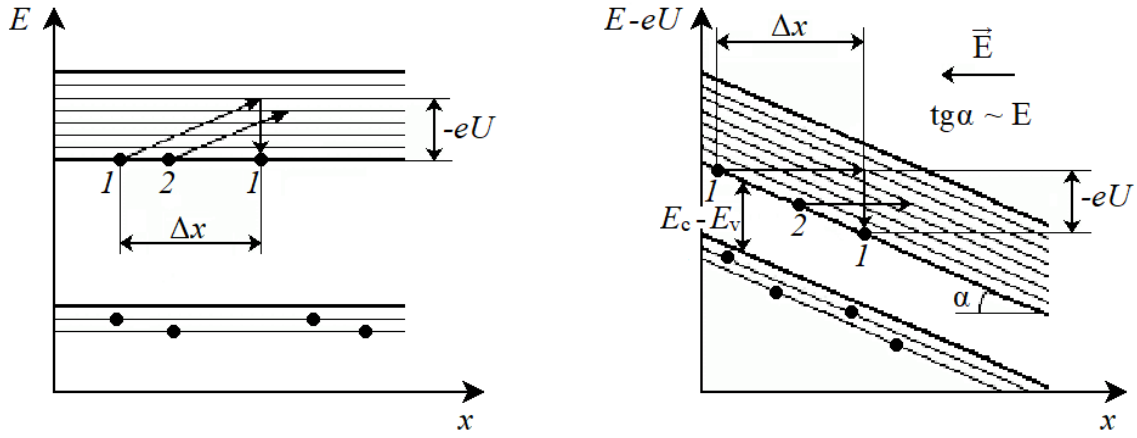
4.20-rasm. Yarimo‘tkazgichda yorug‘lik yutilish koeffitsiyenti (*a*) va fototokning (*b*) spektral egri chiziqlari. *1* – xususiy yutilish chizig‘i; *2, 3, 4* – kirishmali, eksitonli va panjaraning optik tebranishlaridagi yutilish chiziqlari; *5* – erkin elektronlarda yutilish egri chizig‘i; *1′* – xususiy fotoo‘tkazuvchanlik chizig‘i; *2′* – kirishmali fotoo‘tkazuvchanlik chizig‘i.

5-shtrix chiziq erkin zaryad tashuvchilar tomonidan yutilishga mos keladi. 4.20*b*-rasmda fototokning spektral egri chizig‘i ko‘rsatilgan. Fotoaktiv bo‘lmagan yutilish jarayonlari fototokga hissa qo‘shmaydi. Amalda kuzatiladigan spektral egri chiziqlar odatda murakkabroq bo‘lib, bu nurlanishning turli nazoratsiz kirishmalar va ko‘plab panjara nuqsonlari tomonidan yutilishi bilan bog‘liq.

Shuni ta’kidlash kerakki, xususiy yutilish sohasida nurlanish to‘lqin uzunligi kamayishi bilan fototokning kamayishi spektral egri chiziqlar odatda doimiy yorug‘lik oqimi energiyasida olinishi bilan bog‘liq. Har bir kvantning energiyasi chastota ortishi bilan ortib borayotganligi sababli ularning soni kamayadi, bu yorug‘lik to‘lqin uzunligi kamayishi bilan mos ravishda yorug‘lik generatsiya qiladigan elektron-kovak juftliklari sonining kamayishiga olib keladi.

4.4-§. Kuchli elektr maydonidagi yarimo‘tkazgichlarning elektr o‘tkazuvchanligi

Elektronning tashqi elektr maydonidagi harakatini zonaviy diagramma orqali ko‘rsatish mumkin. Gorizontal o‘qda elektron x – koordinatasi, vertikal o‘qda esa kristallning davriy maydonida harakat qilayotgan elektron energiyasini yo‘naltiramiz. Energetik sathlar esa gorizontal chiziqlar sifatida tasvirlanadi.



***a*)** ***b*)**

4.21-rasm. Tashqi elektr maydonida elektronning harakati.

Elektr maydonida harakatlanayotgan elektron ham koordinatasini, ham energiyasini o‘zgartiradi ya’ni bir sathdan ikkinchisiga o‘tadi (4.21*a*-rasm). Bunday holda, uning kinetik energiyasi eU qiymatga oshadi (bu yerda U – elektron o‘tadigan potensiallar farqi) va potensial energiya esa o‘sha qiymatga kamayadi, chunki umumiy energiya o‘zgarmaydi. Elektron to‘plagan energiyasini sochilish jarayonida yo‘qotib, pastroq energetik sathga qaytishi mumkin (*1*-elektron). Ba’zan elektronning umumiy energiyasini tashqi elektr maydonni hisobga olgan holda vertikal o‘qda chizish qulaydir. Bunday holda elektronning harakati gorizontal chiziq, energetik sathlar esa qiya chiziqlar sifatida tasvirlanadi (4.21*b*-rasm).

Energetik sathlar qiyalik burchagining tangensi elektr maydon kuchlanganligiga proporsional bo‘ladi.

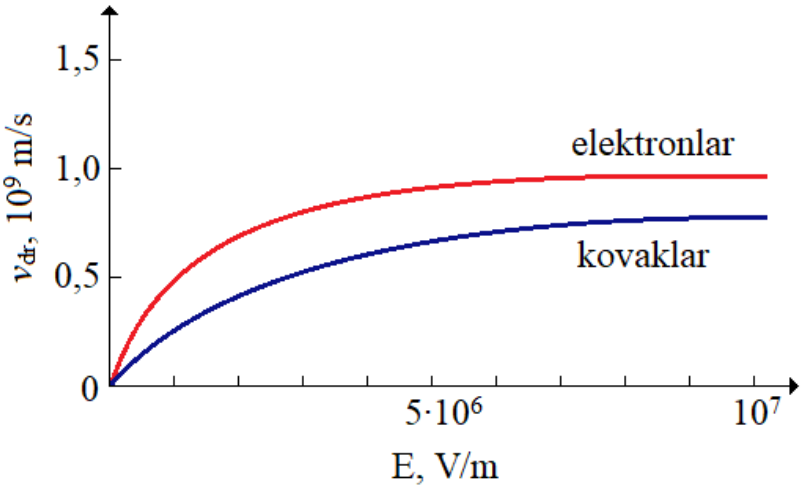
Elektron tashqi elektr maydonda harakatlanayotganda $\Delta\varepsilon$ qo‘shimcha energiya oladi va keyin uni elektron-fonon o‘zaro ta’sir orqali panjaraga (kristallga) beradi (*1*-elektron). Agar E maydon kuchlanganligi katta bo‘lmasa ($E < 10^5$ V/m), elektronlar ortiqcha energiyasini panjaraga bergan holda o‘z energiyasini deyarli o‘zgarmas saqlaydi. Maydon kuchlanganligi yanada ortishi bilan elektron energiyasi panjaraga o‘tishga ulgurmaydi va to‘plana boshlaydi. Natijada tashuvchilar harorati panjara haroratidan yuqori bo‘ladi. Bu effekt elektron gazining qizishi deb ataladi, elektronlar va kovaklarning o‘zi esa “qaynoq” tashuvchilar deb ataladi.

Om qonuni bo‘yicha zaryad tashuvchilarning harakatchanligi va ularning konsentratsiyasi elektr maydon kuchlanganligiga bog‘liq bo‘lmasligi kerak.

Kuchsiz elektr maydoni sohasida harakatchanlikning mustaqilligi yarimo‘tkazgichdagi zaryad tashuvchilarning issiqlik tezligining maydon kuchlanganligidan ahamiyatsiz o‘zgarishi bilan aniqlanadi. Maydon kuchlanganligi yetarlicha yuqori bo‘lsa, elektron gazining qizishi sodir bo‘lib, zaryad tashuvchilarning issiqlik tezligi oshadi. U holda

$$\mu = \frac{qL}{m^* \bar{u}} \tag{4.39}$$

ifodaga ko‘ra, kuchli maydonlarda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi maydon kuchlanganligining ortishi bilan kamayadi. Shunday qilib, dreyf tezlik $v_{dr} = \mu E$ kuchlanganlik ortishi bilan o‘zgarishsiz qoladi va to‘yinish tezligiga teng bo‘ladi (4.22-rasm).



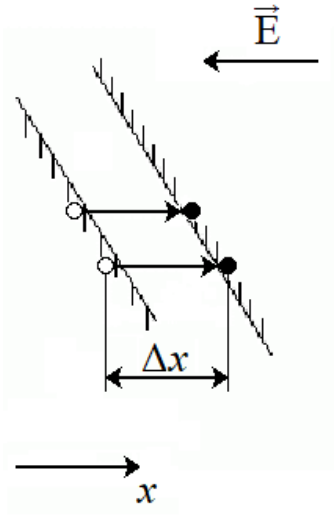
4.22-rasm. Si da elektronlar va kovaklarning dreyf tezligining elektr maydon kuchlanganligiga bog‘liqligi.

Amalda esa zaryad tashuvchilar harakatchanligining pasayishi tufayli kuchli elektr maydonida yarimo‘tkazgichlar o‘tkazuvchanligining kamayishi har doim ham kuzatilavermaydi. Bu ko‘p hollarda maydon kuchlanganligining ortishi zaryad

tashuvchilar konsentratsiyasini sezilarli darajada oshishiga olib kelishi bilan izohlanadi.

Elektr maydon kuchlanganligi $10^6 \div 10^7$ V/m gacha ortganda atomlarning zarbli va elektrik ionlanish jarayonlari boshlanadi, bu ham erkin tashuvchilar konsentratsiyasini ortishiga sabab bo‘ladi. Zarbli (ko‘chkili) ionlanish paytida kuchli elektr maydonda harakatlanayotgan elektron modda atomlarini ionlash uchun yetarli bo‘lgan kinetik energiyani to‘playdi. Bunda hosil bo‘lgan erkin elektron ham maydon tomonidan tezlashtiriladi va boshqa atomning ionlanishiga olib keladi. Elektronlarning to‘qnashuv jarayoni noelastik xarakterga ega bo‘lib, u to‘qnashuv paytida elektron energiyasining o‘zgarishida namoyon bo‘ladi. Yangi erkin elektronlarning paydo bo‘lishi bilan boradigan ko‘p marta takrorlanuvchi to‘qnashuvlar ko‘chkisimon xarakterga ega bo‘ladi. Zarbli ionlanish ko‘proq kirishmali yarimo‘tkazgichlar uchun xarakterli bo‘lib, bunda elektronning kirishma sathidan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tishi uchun zarur bo‘lgan energiya nisbatan kichik bo‘lishi muhimdir.

Kuchli elektr maydonlarida ($E \sim 10^6 \div 10^7$ V/m) elektrostatik ionlanish (Zener effekti) elektronning valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga tunnel o‘tishi natijasida kuzatiladi. Tunnel effekti belgilangan elektr maydon kuchlanganliklarida energetik zonalarning qiyaligi tufayli yuzaga keladi. Energetik diagrammada bu zonalarning E maydonga proporsional ravishda bo‘lgan qiyaligi sifatida ko‘rinadi (4.23-rasm). Bunday holda, elektron energiyasining ma’lum bir qiymati valent hamda o‘tkazuvchanlik zonasidagi holatlarga mos kelishi mumkin. $E \sim 10^7$ V/m da zonalardagi ekvivalent holatlar orasidagi masofa taxminan 1 Å ni tashkil qiladi.



4.23-rasm. Kuchli maydon ta’sirida elektronlarning valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga tunnellanishi.

Bob bo‘yicha nazorat savollari

1. Yarimo‘tkazgichlar qanday xossalarga ega va ular metallardan va dielektriklardan nimasi bilan farqlanadi?
2. Xususiy va kirishmali yarimo‘tkazgichlar orasidagi asosiy farqlar nimalarda namoyon bo‘ladi?
3. Asosiy va noasosiy zaryad tashuvchilar tushunchasini izohlang. Ular qanday sharoitlarda muhim ahamiyat kasb etadi?
4. Donor va akseptor qo‘shimchalarning yarimo‘tkazgichdagi roli qanday?
5. *n*-tur va *p*-turdagi yarimo‘tkazgichlar qanday hosil qilinadi?
6. Harorat o‘zgarishi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasiga qanday ta’sir ko‘rsatadi?
7. Xususiy yarimo‘tkazgichda harorat oshishi bilan o‘tkazuvchanlik qanday o‘zgaradi va bu qanday fizik hodisa bilan izohlanadi?
8. Kirishmali yarimo‘tkazgichlarda haroratga bog‘liq ravishda o‘tkazuvchanlikning uchta asosiy sohasini tavsiflang.
9. Harorat oshishi bilan kirishmalarning ionlanishi qanday kechadi va bu zaryad tashuvchilarga qanday ta’sir qiladi?
10. Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining haroratga bog‘liqligini egri chiziqli grafik asosida qanday tushuntirish mumkin?
11. Yarimo‘tkazgichda fotoelektrik effekt qanday yuzaga keladi?
12. Yorug‘likning energiyasi yarimo‘tkazgichning taqiqlangan zonasiga qanday ta’sir ko‘rsatadi?
13. Fotoyarimo‘tkazuvchanlik hodisasi qanday fizik jarayonlarga asoslangan?
14. Fotoelektrik hodisalarda kvant samaradorligi deganda nima tushuniladi?
15. Yarimo‘tkazgich asosida ishlovchi fotodatchiklar qanday ishlaydi va ularda qaysi hodisalardan foydalaniladi?
16. Kuchli elektr maydonining yarimo‘tkazgichdagi zaryad tashuvchilarning harakati va o‘tkazuvchanligiga ta’siri qanday?
17. Avvalgi chiziqli o‘tkazuvchanlikdan farqli ravishda kuchli maydon ta’siridagi g‘ayrichiziqli xatti-harakat qanday tushuntiriladi?
18. Elektr maydon kuchayganida o‘tkazuvchanlikning kamayishiga sabab bo‘luvchi hodisalarni tushuntiring (masalan, to‘qnashuv chastotasi o‘zgarishi).
19. Issiqlik ta’siri bilan bog‘liq bo‘lgan o‘zgarishlar elektr maydon ostida qanday rol o‘ynaydi?
20. Gann effekti va uning kuchli elektr maydondagi o‘tkazuvchanlik bilan bog‘liqligini izohlang.
21. Yarimo‘tkazgichlarning o‘tkazuvchanligi qanday ta’minlanadi?

22. Yarimo‘tkazgichlarning taqiqlangan zonasida donor va akseptor qo‘shimchalarining energetik sathlari qanday joylashgan?
23. Nima uchun germaniydagi kirishmaning ionlanish energiyasi kremniydagikidan past?
24. Aynimagan yarimo‘tkazgichda elektronlar va kovaklarning kontsentratsiyasi qanday bog‘langan?
25. Yarimo‘tkazgichda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining haroratga bog‘liqligini tushuntiring. Qanday yarimo‘tkazgich "aynigan" deb ataladi?
26. Yarimo‘tkazgichda zaryad tashuvchilarning sochilish sabablari qanday?
27. Yarimo‘tkazgichda o‘tkazuvchanlik harorat oshishi bilan kamayishi mumkinmi?
28. Yarimo‘tkazgichda muvozanatsiz zaryad tashuvchilar paydo bo‘lishining sabablari qanday?
29. Tutib olish tuzoqlari va rekombinatsion tuzoqlar qanday farq qiladi?
30. Muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning yashash vaqti va diffuzion uzunligiga qanday omillar ta’sir qiladi?
31. Nima uchun qo‘shimcha fotoo‘tkazuvchanlik uzunroq to‘lqinlar tomonga siljiydi?

V BOB. YARIMO‘TKAZGICHLI MATERIALLARNING ASOSIY XOSSALARI, TEXNOLOGIK XUSUSIYATLARI VA QO‘LLANILISHI

Yarimo‘tkazgichli materiallarni tasniflash turli mezonlarga ko‘ra amalga oshiriladi. Eng ko‘p ishlatiladigan tasnif materialning kimyoviy tarkibiga asoslanadi. Shunga ko‘ra, organik va noorganik yarimo‘tkazgichlar bo‘lib farqlanadi. O‘z navbatida noorganik yarimo‘tkazgichlar oddiy va murakkabga bo‘linadi.

Oddiy yarimo‘tkazgichlar asosan bitta kimyoviy element atomlaridan tashkil topgandir, masalan: bor (B), kremniy (Si), fosfor (P), oltingugurt (S), germaniy (Ge), mishyak (As), kulrang qalay (Sn), surma (Sb), selen (Se), tellur (Te).

Murakkab yarimo‘tkazgichlar ikki yoki undan ortiq kimyoviy elementlarning atomlaridan tashkil topgandir, masalan:

$A^{IV}B^{IV}$ turdagi birikmalar (kremniy karbid SiC);

$A^{III}B^{V}$ turdagi birikmalar (alyuminiy antimonidi AlSb, galliy antimonidi GaP, galliy arsenidi GaAs, galliy fosfidi GaP, indiy antimonidi InSb, indiy arsenidi InAs, indiy fosfidi InP);

$A^{II}B^{VI}$ turdagi birikmalar (kadmiy sulfid CdS, kadmiy selenid CdSe, rux oksidi ZnO, rux sulfid ZnS);

$A^{IV}B^{VI}$ turdagi birikmalar (qo‘rg‘oshin sulfid PbS, qo‘rg‘oshin selenid PbSe, qo‘rg‘oshin tellurid PbTe).

Noorganik moddalar bilan bir qatorda, ba’zi organik moddalar, masalan, benzol, naftalin va boshqalar ham yarimo‘tkazuvchanlik xususiyatiga ega.

Moddaning agregat holatiga qarab, kristall, amorf va suyuq yarimo‘tkazgichlar farqlanadi.

Ba’zan tor zonali yarimo‘tkazgichlar, oksidli yarimo‘tkazgichlar, magnit yarimo‘tkazgichlar va boshqalar ularda sodir bo‘ladigan fizik jarayonlarning o‘ziga xosligini hisobga olgan holda alohida sinflar sifatida qaraladi.

5.1-§. Yarimo‘tkazgichli materiallarning tasnifi. Kremniy, germaniy, kremniy karbid va yarimo‘tkazgichli birikmalar

Zamonaviy elektronika asosini noorganik kristall yarimo‘tkazgichlar tashkil etadi. Tarkibi bo‘yicha ular elementar yarimo‘tkazgichlar va kimyoviy birikmalarga bo‘linadi. Yarimo‘tkazgich xususiyatlariga ega bo‘lgan 12 ta kimyoviy element mavjud (5.1-jadval), ulardan kremniy (Si), germaniy (Ge) va selen (Se) mustaqil yarimo‘tkazgichlar sifatida, qolganlari esa legirlovchi kirishmalar sifatida

ishlatiladi. Asosiy elementar yarimo‘tkazgichlar – kremniy va germaniyning elektrofizik xususiyatlari 5.2-jadvalda keltirilgan.

5.1-jadval

Elementar yarimo‘tkazgichlar

Element	Taqiqlangan zona kengligi E_g, eV*	Element	Taqiqlangan zona kengligi E_g, eV*
Bor (B)	1,1	Mishyak (As)	1,2
Uglerod (olmos) (C)	5,6	Surma (Sb)	0,12
Germaniy (Ge)	0,665	Oltingugurt (S)	2,5
Kremniy (Si)	1,12	Selen (Se)	1,8
Qalay (Sn)	0,08	Tellur (Te)	0,36
Fosfor (P)	1,5	Yod (I)	1,25
*taqiqlangan zona kengligi 20 °C da berilgan.			

5.2-jadval

Kremniy va germaniyning elektrofizik xususiyatlari

Paramertlar	Kremniy	Germaniy
Panjara davri, nm	0,542	0,566
Zichlik (20°C da), g/cm^3	2,3	5,3
Erish harorati, °C	1414	936
Xususiy solishtirma qarshiligi ρ, Om·m	$2 \cdot 10^3$	0,47
Xususiy tashuvchilar konsentratsiyasi N_o, m^{-3}	$1 \cdot 10^{16}$	$2{,}5 \cdot 10^{19}$
Taqiqlangan zona kengligi (20°C da) E_g, eV	1,12	0,665
Zaryad tashuvchilar harakatchanligi, $m^2/V \cdot s$:		
• elektronlar μ_n	0,14	0,39
• kovaklar μ_p	0,05	0,19
Nisbiy dielektrik singdiruvchanlik ε	12	16

Kremniy. Kremniy tabiatda keng tarqalgan bo‘lib, kisloroddan keyin ikkinchi o‘rinda turadi. U mikroelektronikaning asosiy yarimo‘tkazgich materiali hisoblanadi. Elektron qurilmalarning 70% gacha qismi kremniy asosida ishlab chiqariladi. Kremniy qo‘llaniladigan asosiy yo‘nalishlar:

- elektron uskunalar va kompyuterlar uchun juda kichik o‘lchamdagi integral mikrosxemalar;
- bipolyar va maydon tranzistorlari;
- yassi to‘g‘rilagich diodlari;
- stabilitronlar va tiristorlar;
- 0,3 dan 1,1 μm gacha bo‘lgan to‘lqin uzunligida ishlaydigan fotodiodlar;

- quyosh batareyalari;
- yadro nurlanish detektorlari;
- Xoll datchiklari.

Kremniyli qurilmalar 180°C gacha bo‘lgan haroratlarda ishlashi mumkin.

Kremniy IV guruhga mansub element bo‘lib, olmos tipidagi murakkab kubik kristall panjaraga ega. U germaniydan kimyoviy bog‘lanishining kuchliroq bo‘lishi bilan ajralib turadi. Shuning uchun kremniy yuqori erish haroratiga, kengroq taqiqlangan zonaga, zaryad tashuvchilarning pastroq harakatchanligiga va xususiy elektr o‘tkazuvchanlikning pastroq darajasiga ega (5.2-jadval).

Kremniyning o‘ziga xos xususiyatlari:

• Kimyoviy chidamlilik;

• 900°C gacha issiqlikka chidamlilik;

• Erigan holatda yuqori faollik – monokristallar olish uchun ishlatiladigan tigel va reaktor materiallariga (kvars, grafit) kuchli ta’sir ko‘rsatishi, bu esa sof Si olishni qiyinlashtiradi.

Yarimo‘tkazgichli kremniyning olinishi:

1. Elektropechlarda kremniy dioksidini uglerod bilan qaytarish va tarkibida 1% gacha kirishmalar bo‘lgan texnik kremniy olish.

2. Texnik kremniyni 300-400°C da quruq vodorod xlorid bilan ishlov berish orqali triklorsilan ($SiHCl_3$) olish:

$$Si + 3HCl \rightarrow SiHCl_3 + H_2.$$

3. Triklorsilanni nozik kimyoviy texnologiya usullari yordamida chuqur tozalash.

4. Triklorsilandan vodorod yordamida qaytarish orqali polikristall kremniy olish.

5. Monokristall kremniy olish:

• Eritmadan tortib olish usuli orqali kvars tigelidan foydalangan holda diametri 150 mm gacha va uzunligi 1 metrgacha yetadigan past qarshilikli ($\rho \leq 2{,}5$ Om·m) monokristall kremniy olish;

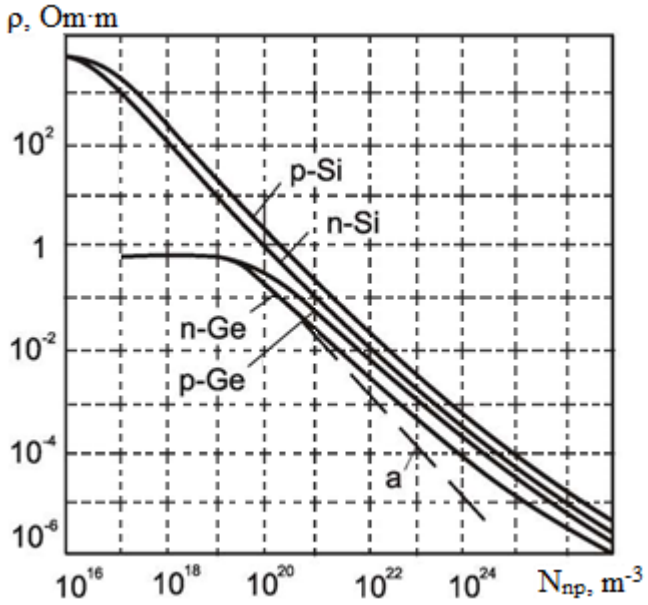
• Kremniy SiO_2 bilan reaksiyaga kirishib monookis (SiO) hosil qiladi, bunda monokristall chuqur akseptorli kislorod atomlari bilan ifloslantiriladi;

• Tigelsiz zonaviy eritish usuli orqali diametri 100 mm gacha bo‘lgan yuqori qarshilikli ($\rho \leq 200$ Om·m) monokristallar keraksiz kirishmalardan holi holda olinadi.

Kremniyda o‘tkazuvchanlikning shakllanishi. Legirlovchi kirishmalar sifatida davriy sistemaning III va V guruh elementlaridan foydalaniladi. Kremniydagi kirishmalarning ionlanish energiyasi germaniynikiga qaraganda yuqori (0,03÷0,06 eV). Asosiy legirlovchi kirishmalar sifatida asosan *n*-tur Si olish uchun fosfor (P) va *p*-tur Si olish uchun bor (B) ishlatiladi.

Kremniydagi vakansiyalar elektr faol va chuqur akseptor hisoblanadi. I va II guruhlarning aralashmalari chuqur energiya sathini hosil qiladi va muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning yashash davrini qisqartiradi.

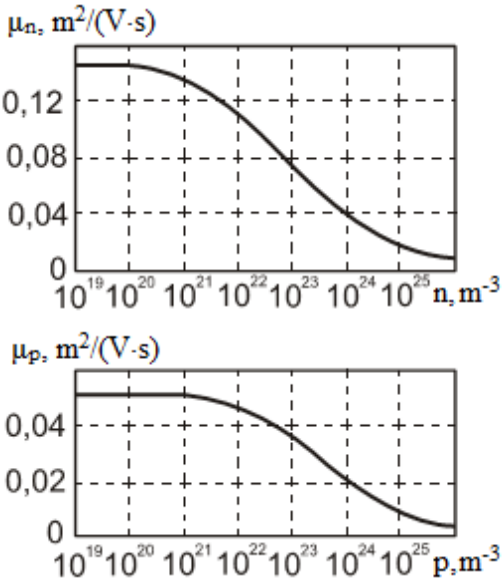
Kirishmalar konsentratsiyasining kremniyning elektr xususiyatlariga ta'siri. Kremniyning elektrik xossalariga aralashmalarning ta'sir qilish shakllari odatda germaniy bilan bir xil (5.1, 5.2-rasm).



5.1-rasm. Kremniy va germaniyning solishtirma elektr qarshiligining kirishmalar konsentratsiyasiga bog'liqligi (20°C da).

Xona haroratida (300 K) barcha kirishmalar ionlanadi. Xona haroratida xususiy o'tkazuvchanlik nazariy jihatdan kirishmalar konsentratsiyasi $N < 10^{16}$ m^{-3} bo'lganda mumkin, ammo bunday tozalik darajasiga texnik jihatdan erishib bo'lmaydi. Kremniydagi asosiy kirishmalar konsentratsiyasi germaniydagiga o'xshash, shu bilan birga xususiy o'tkazuvchanlik boshlanish harorati $T_j > 200$ °C ni tashkil qiladi.

Ionlangan kirishma atomlar sochilishi tufayli zaryad tashuvchilarining harakatchanligining pasayishi $N > 10^{21}$ m^{-3} da kuzatiladi (5.2-rasm). Kirishmalarning konsentratsiyasi solishtirma qarshilikka katta ta'sir qiladi: N ning ortishi bilan ρ 10^3



5.2-rasm. Kremniyda zaryad tashuvchilar harakatchanligining kirishmalar konsentratsiyasiga bog'liqligi.

Om·m dan 10^{-6} Om·m gacha kamayadi. Kirishmalar konsentratsiyasi teng bo‘lganda $\rho_{Si} > \rho_{Ge}$ bo‘ladi (5.1-rasm).

***Yarimo‘tkazgichli kremniyning belgilanishi*:**

1-misol: KEF 4,5/0,4 – kremniy (K) elektronli tur o‘tkazuvchanlik (E), fosfor (F) bilan legirlangan, 300 K da solishtirma qarshiligi ρ = 4,5 Om·cm, diffuzion uzunlik L = 0,4 mm.

2-misol: KDB 7,5/0,5 – kremniy (K) kovakli tur o‘tkazuvchanlik (D), bor (B) bilan legirlangan, 300 K da solishtirma qarshilik ρ = 7,5 Om·cm, diffuzion uzunlik L = 0,5 mm.

Belgilash boshidagi “*B*” harfi – tigelsiz eritilgan degan ma’noni anglatadi.

Germaniy. Germaniy tarixiy jihatdan birinchi ishlab chiqarilgan yarimo‘tkazgich material hisoblanadi, chunki u nisbatan oson tozalanishi mumkin. U IV guruhga mansub bo‘lib, olmossimon kubik panjaraga ega. Germaniyning xususiyatlari: kislotalarga kimyoviy chidamlilik, yuqori qattiqlik va mo‘rtlik.

Yarimo‘tkazgichli germaniyni olinishi.

Germaniy yer qobig‘ida kam tarqalgan (<0,001%) va o‘ziga xos rudalar hosil qilmaydi. Yarimo‘tkazgichli Ge olish uchun xom ashyo sifatida mis-rux va qo‘rg‘oshin-rux rudalari, shuningdek, metallurgiya ishlab chiqarishining qo‘shimcha mahsulotlari ishlatiladi. Ishlab chiqarishning asosiy bosqichlari:

1. Germaniy konsentratini olish.
2. Kimyoviy yo‘l bilan suyuq germaniy tetraxlorid ($GeCl_4$) olish.
3. Gidroliz usuli bilan germaniy dioksidini (GeO_2) olish:

$$GeCl_4+2H_2O \rightarrow GeO_2+4HCl.$$

4. Germaniy dioksidini vodorod bilan 650–700 °C da qaytarish orqali kukun holatdagi Ge olish:

$$GeO_2+2H_2 \rightarrow Ge+2H_2O.$$

5. Kukun holatdagi germaniydan polikristall quyma olish.
6. Polikristalli germaniy zonaviy eritish usuli yordamida aralashmalardan tozalash.
7. Eritmadan tortib olish usuli bilan monokristall Ge olinadi. Eritmaga *n*- yoki *p*-tur o‘tkazuvchanlik hosil qilish uchun qat’iy dozalarda legirlovchi kirishmalar qo‘shiladi.

Germaniyda o‘tkazuvchanlikning shakllanishi. Amaliyotda kirishmali o‘tkazuvchanlikka ega germaniy ishlatiladi. Donor kirishmalar (V guruh elementlari): Surma (Sb), margimush (As), fosfor (P), Akseptor kirishmalar (III guruh elementlari): Bor (B), alyuminiy (Al), galliy (Ga) ishlatiladi. Bu kirishmalar taqiqlangan zonada sayoz energetik sathlar hosil qiladi va ularning ionlanish energiyasi taxminan 0,01 eV ni tashkil etadi. Asosiy kirishmalar *n*-tur Ge uchun – surma (Sb), *p*-tur Ge uchun – galliydir (Ga).

Chuqur sathlar hosil qiluvchi elementlar. Mis va oltin (I guruh elementlari) taqiqlangan zonada chuqur energetik sathlarni hosil qiladi va samarali rekombinatsion tuzoqlar vazifasini bajaradi. Bu muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini qisqartiradi, qurilmalarning ishlash tezligini oshiradi.

Kirishmalar konsentratsiyasi N_{np} ning germaniyning elektrik xususiyatlariga ta'siri. Germaniyda legirlovchi kirishmalar 90÷100 K dan yuqori haroratlarda to‘liq ionlangan bo‘ladi, ya’ni zaryad tashuvchilar kontsentratsiyasi kirishma konsentratsiyasiga teng: $n = N$.

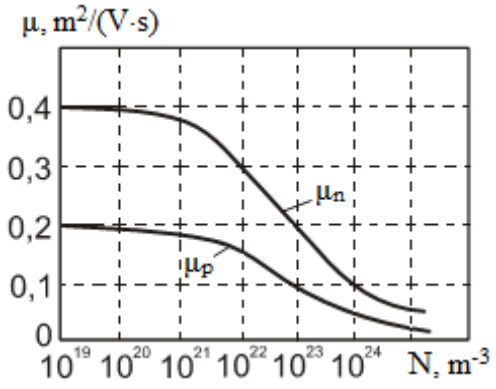
Germaniyda legirlovchi kirishmalarning asosiy ishchi kontsentratsiyasi $N=10^{21}\div10^{24}$ m^{-3} ni tashkil qiladi.

Xona haroratida (T_j=20÷25 °C) xususiy o‘tkazuvchanlik faqat juda past kirishmalar konsentratsiyasida ($N < 10^{19}$ m^{-3}) ham paydo bo‘lishi mumkin. Kirishmalar konsentratsiyasi oshgani sayin xususiy o‘tkazuvchanlik boshlanish harorati (T_j) ortadi. Kirishmalarning asosiy konsentratsiyasida ($N = 10^{21}\div10^{24}$ m^{-3}) $T_j > 100$ °C.

Shunday qilib, $N < 10^{19}$ m^{-3} (juda oz miqdordagi kirishmalarda) germaniyning solishtirma qarshiligi ρ xususiy o‘tkazuvchanlik bilan aniqlanadi. Kuchsiz legirlangan yarimo‘tkazgichda $N < 10^{21}$ m^{-3} ρ ortadi, chunki kristall panjaraning issiqlik tebranishlari tufayli sochilish kuchayadi. Asosiy kirishma konsentratsiyasida solishtirma qarshilik N ga teskari proportsional:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{en\mu} = \frac{1}{eN\mu},$$

ya’ni kirishmalar konsentratsiyasining ortishi bilan ρ kamayadi, lekin ionlashtirilgan kirishma atomlaridagi zaryadning harakatchanligi kamayishi tufayli chiziqli bog‘liqlikdan (5.1-rasmdagi “a” shtrix chiziqdan) chetlashadi (5.3-rasm). *p*-tur germaniyning qarshiligi *n*-tur germaniynikidan yuqori, chunki kovaklar harakatchanligi elektron harakatchanligidan kichik bo‘ladi.



5.3-rasm. Germaniyda zaryad tashuvchilar harakatchanligining kirishmalar konsentratsiyasiga bog‘liqligi.

$N > 10^{24}$ m^{-3} da yarimo‘tkazgichli germaniy aynigan holatga o‘tadi.

Yarimo‘tkazgichli germaniyning belgilanishi:

1-misol: GES 1,0/0,5 – germaniy (G) elektronli tur o‘tkazuvchanlik (E), surma (S) bilan legirlangan, 300 K da solishtirma qarshilik ρ = 1,0 Om·cm, diffuzion uzunlik L = 0,5 mm.

2-misol: GDG 5,0/1,0 – germaniy (G) kovakli tur o‘tkazuvchanlik (D), galliy (G) bilan legirlangan, 300 K da solishtirma qarshilik ρ = 5,0 Om·cm, diffuzion uzunlik L = 1,0 mm.

Yarimo‘tkazgichli kimyoviy birikmalar. Ikkilamchi yarimo‘tkazgichli kimyoviy birikmalar komponentlarning Mendeleyev davriy sistemasidagi guruh raqamlari bo‘yicha belgilanadi: $A^{IV}B^{IV}$, $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$.

Kremniy karbid. $A^{IV}B^{IV}$ birikmalar guruhining yagona vakili kremniy karbid SiC hisoblanadi. Bu birikma ikkita polimorf modifikatsiyaga ega:

• β-SiC olmossimon kubik panjarali (T < 2000 °C);

• α-SiC geksagonal panjarali (T > 2000 °C).

Kremniy karbidning asosiy xossalari:

• asosan kovalent bog‘ hosil qiladi;

• yuqori qattiqlik, kimyoviy chidamlilik va issiqlikka chidamlilik;

• chiziqli bo‘lmagan volt-amper xarakteristikasi;

• spektrning ko‘rinuvchi qismida lyuminessensiya qobiliyati;

• katta taqiqlangan zona kengligi, zaryad tashuvchilarning past harakatchanligi, kirishmali qarshilik ρ = 0,03÷0,15 Om·cm (5.3-jadval).

5.3-jadval

Kremniy karbid xususiyatlari

Modifikatsiya	β-SiC	α-SiC
Panjara davri, nm	0,436	0,308
Taqiqlangan zona kengligi E_g, eV	2,39	3,02
Elektronlar harakatchanligi μ_n, $m^2/V\cdot s$	0,1	0,033
Kovaklar harakatchanligi μ_p, $m^2/V\cdot s$	0,006	0,006
Bug‘lanish harorati, °C	>2600	2700

Kremniy karbidning olinishi. Boshlang‘ich xomashyo sifatida kvars qumi SiO_2 ishlatiladi. Texnik kremniy karbid kremniy dioksidini uglerod bilan elektr pechlarida qaytarish yo‘li bilan olinadi:

$$SiO_2+3C\rightarrow SiC+2CO.$$

Yarimo‘tkazgichli SiC kristallari grafit isitgichli pechlarda argon atmosferasida T = 2400÷2600°C haroratda sublimatsiya usuli bilan olinadi.

Keramik kremniy karbid SiC kukunidan bog‘lovchilar (gil, dala shpati, suyuq shisha) qo‘shib, presslash va T = 1000°C da pishirish yo‘li bilan tayyorlanadi.

SiC da o‘tkazuvchanlikni shakllantirish. Kremniy karbid asosan kirishmali o‘tkazuvchanlik bilan ishlatiladi (xususiy o‘tkazuvchanlik faqat T > 1400°C da mumkin).

V guruh elementlari (N, P, As, Sb, Bi) donor hisoblanib, yashil rangli *n*-tur SiC beradi. II guruh (Ca, Mg) va III guruh (B, Al, Ga) elementlari akseptor bo‘lib, ko‘k, binafsha, qalin qatlamlarda qora rangli *p*-tur SiC hosil qiladi. Xususiy ortiqcha atomlar elektr faoldir: ortiqcha kremniy *n*-tur o‘tkazuvchanlikni, ortiqcha uglerod esa *p*-tur o‘tkazuvchanlikni hosil qiladi.

Kremniy karbidning qo‘llanilishi:

• ko‘rinuvchi sohada ishlaydigan monokristallik geksagonal SiC asosidagi yorug‘lik diodlari. Kirishma turi va konsentratsiyasiga qarab qizildan binafshagacha ranglar olinadi. Eng barqaror nurlanish sariq diodlarga xos bo‘lib, ular azot bilan legirlangan *n*-tur SiC ga bor diffuziyasi natijasida olinadi va etalon sifatida ishlatiladi;

• 700°C gacha ishlash haroratiga ega katta quvvatli to‘g‘rilagich diodlar va tranzistorlar;

• agressiv muhitda ishlay oladigan yuqori energiyali zarrachalar hisoblagichlari;

• avtomatika, hisoblash texnikasi, asbobsozlikda tok va kuchlanishni stabilizatsiyalash, elektr uzatish liniyalarini himoya qilish uchun keramik SiC asosidagi nochiziqli rezistorlar (varistorlar);

• 1800°C gacha ishlaydigan yuqori haroratli isitgichlar (SiC sterjenlar) va keramik SiC dan yasalgan yuqori haroratli tenzorezistorlar.

$A^{III}B^{V}$ yarimo‘tkazgich birikmalar. Bu birikmalar davriy sistemaning III va V guruhlari elementlarini tashkil qiladi (5.4-jadval).

5.4-jadval

$A^{III}B^{V}$ yarimo‘tkazgichli kimyoviy birikmalar

Birikmalar guruhlari	Nitridlar	Fosfidlar	Arsenidlar	Antimonidlar
B^{V} / **A^{III}**	**N**	**P**	**As**	**Sb**
B	BN	BP	BAs	BSb
Al	AlN	AlP	AlAs	AlSb
Ga	GaN	GaP	GaAs	GaSb
In	InN	InP	InAs	InSb

Ushbu birikmalarning aksariyati uchun kristall panjaraning turi murakkab kubik (sfalerit), nitridlar uchun esa geksagonal (vyursit). Kimyoviy bog‘lanish turi – kovalent-ion:

• *kovalent* komponent: A komponentning har bir atomi to‘rtta B atomi bilan o‘ralgan va aksincha, atomlar tetraedrning uchlarida joylashgan. A atomning uchta

valent elektroni B atomlarning elektronlari bilan uchta kovalent juft hosil qiladi, to‘rtinchi juft esa faqat B (A-B, A-B, A-B, B-B) elektronlardan hosil bo‘ladi;

• *ionli* komponent: elektron buluti B atom tomon siljiydi, uning yonida ma’lum bir manfiy zaryad, A atomi yonida esa musbat zaryad hosil bo‘ladi. Effektiv zaryad kattaligi birikmaning ionlik darajasini belgilaydi.

Har bir guruh ichida birikmalarning umumiy atom massasi ortishi bilan kovalent bog‘ kuchsizlanadi, elektron bulutlarining tarqalishi kengayadi va bog‘ning metallik xususiyati kuchayadi, natijada:

• taqiqlangan zonaning kengligi kamayadi;

• erish harorati pasayadi;

• zaryad tashuvchilarning harakatchanligi ortadi va solishtirma qarshilik kamayadi;

• qattiqlik pasayadi va plastiklik ortadi, ya’ni mexanik xossalari bo‘yicha birikma metallarga yaqinlashadi (5.5-jadval).

5.5-jadval

Ayrim $A^{III}B^{V}$ birikmalarning xususiyatlari

Birikma	Zichlik, g/cm^3	T_{erish}, °C	E_g, eV	μ_n, m^2/V·s	μ_p, m^2/V·s	ε
GaN	6,11	1700	3,4	0,03	-	12,2
AlP	2,37	2000	2,45	0,008	0,003	9,8
GaP	4,07	1467	2,26	0,019	0,012	11,1
InP	4,78	1070	1,35	0,46	0,015	12,4
AlAs	3,6	1770	2,16	0,028	-	10,1
GaAs	5,32	1238	1,43	0,95	0,045	13,1
InAs	5,67	942	0,36	3,3	0,046	14,6
AlSb	4,28	1060	1,58	0,02	0,055	14,4
GaSb	5,65	710	0,72	0,4	0,14	15,7
InSb	5,78	525	0,18	7,8	0,075	17,7

$A^{III}B^{V}$ da zaryad tashuvchilarning harakatchanligi, asosan, panjara tugunlarining issiqlik tebranishlarida sochilishi orqali aniqlanadi. Atom massasining ortishi bilan panjara tugunlarining issiqlik tebranishlari amplitudasi pasayadi, zaryad tashuvchilarning harakatchanligi ortadi va xususiy solishtirma qarshilik ρ kamayadi.

Amaldagi ko‘pgina birikmalarda elektronlar harakatchanligi kovaklar harakatchanligidan sezilarli darajada yuqori bo‘ladi $\mu_n >> \mu_p$, shuning uchun ularning solishtirma qarshiligi elektronlar harakatchanligi bilan belgilanadi.

$A^{III}B^{V}$ birikmalarda o‘tkazuvchanlikning hosil bo‘lishi. Akseptor sifatida II guruh elementlari (Zn, Cd, Mg) ishlatiladi, ular kristall panjarada A^{III} atomlarini almashtirib, *p*-tur yarimo‘tkazgich hosil qiladi. Donor sifatida VI guruh elementlari

(S, Se, Te) qo‘llaniladi, ular B^V atomlarini o‘rnini bosadi va *n*-tur yarimo‘tkazgich birikmasini hosil qiladi. Kirishmalarning ionlanish energiyasi atom massasining ortishi bilan kamayadi va og‘ir birikmalar uchun 0,001÷0,005 eV ni tashkil qiladi.

O‘tish metallari (Fe, Ni, Co) chuqur akseptor tipidagi energetik sathlarni hosil qiladi va samarali rekombinatsiya tuzoqlari hisoblanadi.

$A^{III}B^V$ birikmalarning o‘ziga xos xususiyatlariga fotoelektrik effekt qobiliyati va muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning nurlanishli rekombinatsiyasining yuqori samaradorligi kiradi. Nurlanish spektri taqiqlangan zonaning kengligiga bog‘liq. Shu sababli ular quyidagi fotoelektrik va fotosezgir qurilmalarda qo‘llaniladi: yuqori tezlikda qabul qiluvchilar va nurlanish manbalari, fotoelementlar, fotokatodlar, yorug‘lik diodlari, yarimo‘tkazgichli lazerlar.

$A^{II}B^{VI}$ yarimo‘tkazgich birikmalar. Bu birikmalarni davriy sistemaning II va VI guruh elementlari tashkil qiladi (5.6-jadval).

5.6-jadval

Birikmalar guruhlari	Sulfidlar	Selenidlar	Telluridlar
B^{VI} / **A^{II}**	**S**	**Se**	**Te**
Zn	ZnS	ZnSe	ZnTe
Cd	CdS	CdSe	CdTe
Hg	HgS	HgSe	HgTe

5.7-jadval

$A^{II}B^{VI}$ yarimo‘tkazgich birikmalarining xususiyatlari

Birikma	Zichlik, g/cm^3	T_{erish}, °C	E_g, eV	μ_n, $m^2/V{\cdot}s$	μ_p, $m^2/V{\cdot}s$	λ, nm
ZnS	4,1	1780	3,74	0,014	0,0005	330
CdS	4,82	1750	2,53	0,034	0,011	500
HgS	7,73	1713	2,0	0,025	-	-
ZnSe	5,42	1520	2,73	0,026	0,0015	454
CdSe	5,81	1264	1,85	0,072	0,0075	600
HgSe	8,26	867	0,12	2,2	-	-
ZnTe	6,34	1239	2,23	0,053	0,003	-
CdTe	5,86	1041	1,51	0,12	0,006	790
HgTe	8,42	577	0,08	2,3	0,01	-

$A^{II}B^{VI}$ birikmalarining kristall panjarali turi murakkab kubik (sfalerit) yoki geksagonal (vyursit), ba’zilari uchun esa NaCl tipidagidir. Kimyoviy bog‘lanish turi kovalent-ion: A atomining ikkita valent elektroni B elektronlari bilan ikkita kovalent juft hosil qiladi va ikkita juft esa faqat B elektronlaridan hosil bo‘ladi (A-B, A-B, B-

B, B-B). Ion komponenti $A^{III}B^{V}$ birikmalarga qaraganda aniqroq namoyon bo‘ladi, bu elementlarning elektromanfiyliklaridagi katta farq bilan bog‘liq. Xususiyatlarning atom massasi bilan bog‘liqligi $A^{III}B^{V}$ birikmalarga qaraganda yomonroqdir (5.7-jadval).

$A^{II}B^{VI}$ birikmalari metall va metall bo‘lmagan komponent bug‘laridan kristallanish yo‘li bilan, ularning konsentratsiyasi nisbatini tartibga solish orqali olinadi.

O‘tkazuvchanlikning shakllanishi. Xususiy o‘tkazuvchanlik ortiqcha A^{II} yoki B^{VI} atomlarini yaratish orqali hosil bo‘ladi. Strukturaviy nuqsonlar – vakansiyalar va tugunlararo atomlar elektr faoldir: tugunlararo atomlar A^{II} sayoz donorlar (0,01÷0,03 eV), vakansiyalar A^{II} sayoz akseptorlardir (0,05 eV). O‘tkazuvchanlik turini qattiq eritmaning tarkibini tartibga solish orqali o‘zgartirish mumkin. Masalan, metall bug‘ida ishlov berish orqali A^{II} atomlarining ortiqcha konsentratsiyasini yaratish *n*-tur o‘tkazuvchanlikni hosil qiladi. Barqaror elektr xususiyatlarini olish uchun birikmaning kimyoviy tarkibini aniq nazorat qilish kerak.

Kirishmali o‘tkazuvchanlik kamroq qo‘llaniladi, I guruh metallari – Cu, Ag, Au akseptor sifatida ishlatiladi (0,1÷0,3 eV), ular panjaradagi A^{II} tugunlarini almashtiradi.

$A^{II}B^{VI}$ birikmalari xususiyatlari turli komponentlari uchun taqiqlangan zona kengligidagi katta farqlar bo‘lib, bu UB dan IQ diapazonigacha bo‘lgan λ to‘lqin uzunlikli nurlanishni hosil qilishga (5.7-jadval), shuningdek nurlanishli rekombinatsiyaning yuqori samaradorligiga erishishishga imkon beradi.

$A^{II}B^{VI}$ birikmasining asosiy qo‘llanilishi fotovoltaik qurilmalarda:

Fotorezistorlar – kadmiy sulfid va seleniddan (CdS va CdSe) tayyorlangan ichki fotoelektrik effekt hodisasiga asoslangan qurilmalar. CdS fotorezistorlar spektrning ko‘rinuvchi va ultrabinafsha sohasida yuqori sezgirlikka ega, rentgen va gamma nurlariga sezgirlikka ega bo‘lib, indikatorlar va dozimetrlarda qo‘llaniladi, shuningdek yuqori kvant chiqishiga ega: 1 ta yutilgan fotonga 10^{14} elektron to‘g‘ri keladi.

Lyuminoforlar – rux sulfid ZnS yoki (Zn, Cd)S, Zn(S, Se) eritmalari asosida ishlab chiqariladi. Uzoq davom etadigan yashil yoki ko‘k yorug‘lik (fosforessensiya) chiqaradigan fotolyuminoforlar (mis yoki Cu+Co bilan faollashtirilgan ZnS) yorug‘lik shkalalari va favqulodda yoritish uchun ishlatiladi. Yorqinligi va uzoq davom etishi bilan ajralib turadigan katodolyuminoforlar (ZnS+Ag – ko‘k, ZnS·CdS+Ag – sariq, ularning aralashmasi – oq) elektron-nurli naychalar (televizor ekranlari, ossillograflar, monitorlar) uchun qo‘llaniladi.

IQ sohada nurlanish fotodetektorlari og‘irroq birikmalar – kadmiy va simob telluridlari (CdTe, HgTe) asosida ishlab chiqariladi.

Bundan tashqari, turli spektral sohalarda ishlaydigan yarimo‘tkazgichli lazerlar, yuqori zaryad tashuvchilar harakatchanligiga ega birikmalar (HgSe, HgTe va ularning eritmalari) asosidagi Xoll E.Yu.K. datchiklarida qo‘llaniladi. Ular slyuda taglikka yotqizilgan pardalar shaklida qo‘llaniladi va ρ ning harorat va maydon kuchlanganligiga zaif bog‘liqligi tufayli xususiyatlarining barqarorligi bilan ajralib turadi.

$A^{IV}B^{VI}$ yarimo‘tkazgich birikmalar. Ushbu birikmalar guruhida qo‘rg‘oshin sulfidlari, selenidlar va telluridlar ishlatiladi (5.8-jadval). Ular mos elementni (S, Se, Te) qo‘rg‘oshin bilan birlashtirish orqali olinadi, monokristallar esa eritmadan yo‘nalishli kristallanish orqali o‘stiriladi. Bundan tashqari, tabiatda PbS monokristallari mavjud.

5.8-jadval

$A^{IV}B^{VI}$ yarimo‘tkazgich birikmalarining xususiyatlari

Parametrlar	**PbS**	**PbSe**	**PbTe**
E_g, eV	0,41	0,29	0,32
T_{erish}, °C	1114	1065	910
Zichlik, g/cm^3	7,6	8,15	8,16
μ_n, m^2/V·s	0,06	0,09	0,03
μ_p, m^2/V·s	0,04	0,05	0,02

$A^{IV}B^{VI}$ birikmalarining o‘tkazuvchanligi xususiydir: qo‘rg‘oshin ortiqcha bo‘lsa, o‘tkazuvchanlik *n*-tur, xalkogenid ortiqcha bo‘lsa, – *p*-turga ega bo‘ladi.

O‘ziga xos xususiyati – spektrning IQ sohasida spektral sezgirlikdir. Shu sababli ular yuqori chastotali xarakteristikalarga ega bo‘lgan fotorezistorlar uchun ishlatiladi (PbS). Qo‘llanilishining boshqa sohalari:

• tenzodatchiklar (tenzorezistorlar) vibratsiya datchiklarida, bosim datchiklarida, mikrofonlarda qo‘llaniladi va deformatsiya vaqtida (taqiqlangan soha kengligi) xarakteristikalari o‘zgaradigan materiallardan (PbS va PbTe) tayyorlanadi;

• yarimo‘tkazgichli termostatlar va muzlatgichlarda haroratning o‘zgarishi bilan (PbS va PbTe) *p-n* o‘tishda E.Yu.K.ning o‘zgarishiga asoslangan haroratga sezgir qurilmalarda qo‘llaniladi.

Qo‘rg‘oshin va qalay telluridlari asosidagi qattiq eritmalar istiqbolli hisolanadi. Ular bir xil kristall panjaraga (a = 0,603 nm) va to‘liq o‘zaro eruvchanlikka ega. Ular 300 K da mutlaq qora jismning maksimal nurlanishiga to‘g‘ri keladigan “atmosfera oynasi” diapazonida (8÷14 μm) yuqori sezuvchanlikka ega bo‘lgan fotodetektorlarda, spektrning chuqur infraqizil sohasida 30 μm gacha (yarimo‘tkazgichli lazerlar uchun nurlanish to‘lqin uzunligi chegarasi) nurlanishga ega $Pb_{1-x}Sn_xTe$ asosidagi purkagich lazerlarda qo‘llaniladi.

Bob bo‘yicha nazorat savollari

1. Yarimo‘tkazgichli materiallar qanday mezonlarga ko‘ra tasniflanadi?
2. Elementar va birikmali yarimo‘tkazgichlar o‘rtasidagi asosiy farqlar nimalardan iborat?
3. Organik va noorganik yarimo‘tkazgichlar qanday xususiyatlarga ega?
4. Kremniy va germaniy nima uchun eng ko‘p qo‘llaniladigan elementar yarimo‘tkazgichlar hisoblanadi?
5. Qanday fizik yoki kimyoviy omillar yarimo‘tkazgich materialni tanlashda hal qiluvchi hisoblanadi?
6. Kremniyning kristall panjarasi va o‘tkazuvchanlik xossalari qanday?
7. Kremniyning issiqlik barqarorligi va oksidlanish xossasi uni elektronika sanoatida qanday afzalliklarga ega qiladi?
8. Nega kremniy asosida ishlab chiqilgan yarimo‘tkazgich qurilmalari keng tarqalgan?
9. SiO_2 oksid qatlamining kremniy asosidagi integral sxemalarda o‘rni qanday?
10. Kremniyda donor va akseptor kirishmalar qanday zaryad tashuvchilarni hosil qiladi?
11. Germaniyning elektr o‘tkazuvchanligi kremniyga nisbatan qanday farq qiladi?
12. Germaniyning afzalliklari va cheklovlari nimalardan iborat?
13. Germaniyda zaryad tashuvchilar harakatchanligi kremniyga nisbatan qanday?
14. Germaniy va kremniy o‘rtasida taqiqlangan zona kengligining farqlari qanday qurilmalarga ta’sir qiladi?
15. Kremniy karbidning fizik xossalari uni yuqori kuchlanishli qurilmalarda qo‘llashga qanday imkon beradi?
16. SiC materiali qanday harorat va muhitlarda barqaror ishlashi mumkin?
17. Galliy arsenid (GaAs) kabi III-V guruhli yarimo‘tkazgichlar qaysi sohalarda ishlatiladi va nima uchun?
18. Bitta va ko‘p komponentli birikmali yarimo‘tkazgichlarning afzalliklari nimalarda?
19. Yarimo‘tkazgichli birikmalarda to‘g‘ri taqiqlangan zonasi (direct band gap) va to‘g‘ri emas taqiqlangan zonasi (indirect band gap) tushunchalari nimalarni anglatadi va bu narsa qanday qurilmalarga ta’sir qiladi?
20. Germaniy va kremniyni kristallizatsion tozalash usuli qanday? Katta monokristallarni o‘stirish uchun qaysi usullar keng qo‘llaniladi?
21. Germaniy va kremniyda kirishmalar konsentratsiyasining oshishi bilan zaryad tashuvchilarning harakatchanligi qanday va nima uchun o‘zgaradi?

22. Kremniyning qanday afzalliklari uni planar tranzistorlar va integral mikrosxemalar ishlab chiqarishda keng qo‘llanishiga imkon beradi?
23. $A^{III}B^{IV}$ yarimo‘tkazgich birikmalarida qanday tipdagi kimyoviy bog‘ mavjud? Atom massasi ortishi bilan elektrofizik xususiyatlari qanday o‘zgaradi?
24. Purkagich lazerlar va yorug‘lik diodlari uchun qanday materiallar ishlatiladi?
25. Quyosh elementlari uchun qanday materiallar qo‘llaniladi?
26. Qanday kirishmalarda germaniy xonadagi haroratda solishtirma qarshilikka ega bo‘ladi?

IV BOB. QUYOSH ELEMENTLARI UCHUN ELEKTRON-TEXNIK MATERIALLAR

Quyosh elementlari quyosh energetikasining eng muhim komponenti sanaladi. Funksional va strukturaviy xususiyatlariga ko‘ra, quyosh elementlari, ular asosida qurilgan batareyalar kabi, turli xil o‘lchamlarga ega bo‘lishi mumkin – mikroskopik kalkulyatordagi quyosh batareyalaridan tortib avtomobillar va binolarni qoplashgacha (ko‘pincha ularni tomlarga o‘rnatilganini ko‘rishingiz mumkin).

An’anaviy uglevodorod energetikasidan quyosh energetikasiga o‘tish asosan organik qazilma yoqilg‘i zaxiralarining yildan yilga kamayib borishi (shuningdek, ularning qayta tiklanmasligi) va dunyo aholisi sonining tez o‘sishi bilan bog‘liq energiya iste’molining keskin oshishi kabi omillarga asoslanadi. Shu bois ushbu yo‘nalishda tizimli va izchil taraqqiyot qayd etilmoqda.

Quyosh elementi yorug‘lik energiyasini bevosita elektr energiyasiga aylantiruvchi yarimo‘tkazgichli qurilma bo‘lib, uning ishlashi fotoelektrik effekt hodisasiga asoslanadi. Elementning asosiy tarkibiy qismi bo‘lgan kremniy kristalli *p-n* o‘tish sohasiga ega bo‘lib, bu soha ichida tabiiy elektr maydoni mavjud.

Quyosh nurlanishi tarkibidagi fotonlar yarimo‘tkazgichga tushganda, agar foton energiyasi yarimo‘tkazgichning taqiqlangan zona kengligidan katta bo‘lsa, ular valent zonadagi elektronlarni uyg‘otib, ularni o‘tkazuvchanlik zonasiga olib o‘tadi va shu orqali erkin elektronlar hamda kovaklar hosil bo‘ladi. Hosil bo‘lgan erkin zaryad tashuvchilari *p-n* o‘tish zonasidagi elektr maydon ta’sirida bir-biridan ajraladi: elektronlar *n*-tur soha tomon, kovaklar esa *p*-tur soha tomon harakatlanadi. Bu zaryad tashuvchilar tashqi elektr zanjir orqali harakatlanib, elektr tokini yuzaga keltiradi. Natijada yorug‘lik energiyasi elektr energiyasiga aylantiriladi, bu esa fotovoltaik jarayon deb nomlanadi.

6.1-§. Quyosh elementlarining asosiy turlari

Dunyo miqyosida quyosh energiyasidan elektr energiyasini ommaviy ishlab chiqarishda asosan kristall kremniy (c-Si) asosidagi quyosh elementlaridan foydalaniladi. Ularning tuzilishi, materiallari xilma-xil bo‘lishiga qaramasdan hammasining asosida *p-n* o‘tish kontakt maydoni yotadi. Ushbu o‘tishni hosil qiluvchi komponentlar sifatida tanlangan yarimo‘tkazgich materiallar turlariga qarab *p-n* o‘tish *gomoo‘tish* (bir xil yarimo‘tkazgichlar kontakti) va *geteroo‘tish* (har xil yarimo‘tkazgichlar kontakti) kontaktlarga bo‘linadi. Quyosh elementlari unda ishlatiladigan material turiga qarab, *p-n* o‘tishning strukturasiga va ularning o‘lchamlariga qarab turlarga ajratiladi.

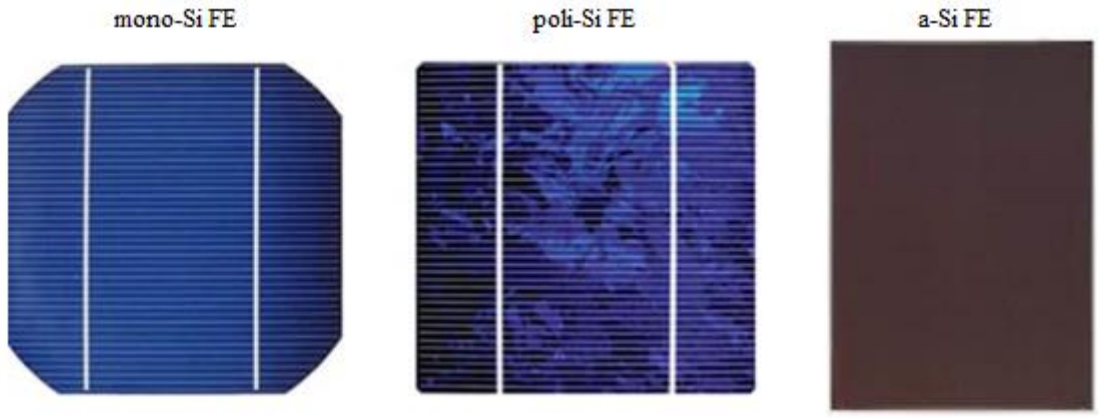
Quyosh elementlari rivojlanish bosqichiga qarab **uchta asosiy avlod**ga bo‘linadi:

1-avlod (1G) quyosh elementlari – Kremniy asosidagi klassik quyosh elementlari (mono-Si, poli-Si, a-Si);

2-avlod (2G) quyosh elementlari – Yupqa qatlamli texnologiyalar (CdTe, CIGS, a-Si);

3-avlod (3G) quyosh elementlari – Yangi avlod, innovatsion yondashuvlar (perovskit, kvant nuqtali, organik, tandem/gibrid, ikki o‘lchamli (2D) tizimlar).

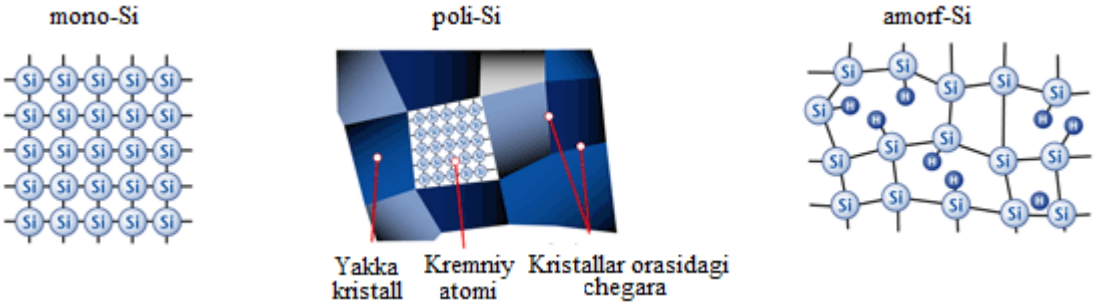
Har bir avlod texnologik yondashuvi, materiallari va samaradorligi jihatidan o‘ziga xos xususiyatlarga ega. Quyida ularning asosiylari bilan tanishamiz.



***a*)** ***b*)** ***c*)**

6.1-rasm. Kremniyli fotoelementlarning turlari.

Kremniyli quyosh elementlari. Yarimo‘tkazgich kremniyli quyosh elementlari eng keng tarqalgan quyosh elementlaridir. Kremniyli quyosh elementlari asosan tarkibidagi kremniyning modifikatsiyasiga ko‘ra monokristall, polikristall va amorf kremniyli quyosh elementlariga bo‘linadi (6.1-rasm).



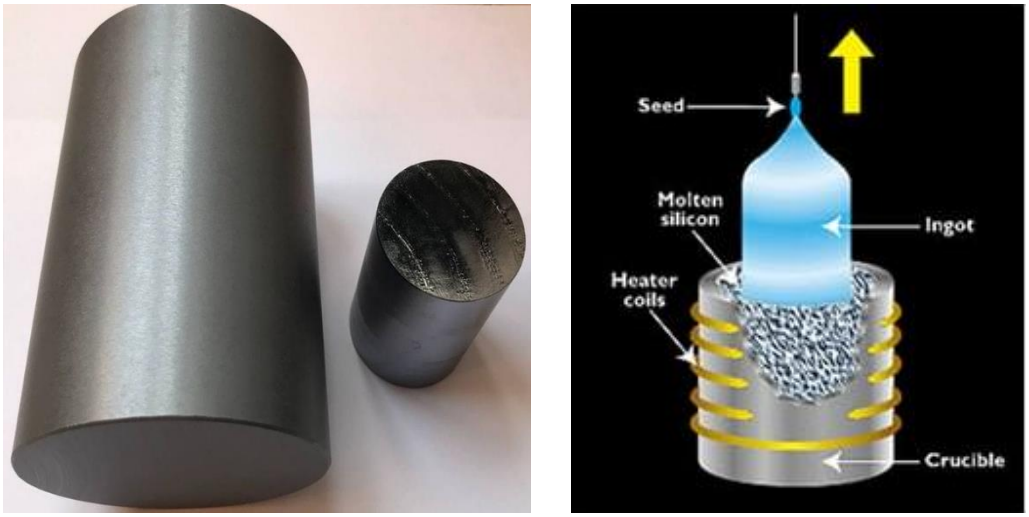
***a*)** ***b*)** ***c*)**

6.2-rasm. Quyosh elementlarida ishlatiladigan monokristall (*a*), polikristall (*b*) va amorf kremniy (*c*).

1. Monokristall kremniyli (mono-Si) quyosh elementlari. Ushbu tur quyosh elementlari yuqori samaradorlik va uzoqroq muddatli barqarorlik tufayli keng qo‘llaniladigan fotovoltaik texnologiyadir. Ushbu elementlar yuqori

tozalikdagi monokristall kremniydan ishlab chiqariladi, unda atomlar kristall panjara tugunlarida qat’iy va uzluksiz tartib bilan joylashadi (6.2*a*-rasm). Ushbu tartib va bir xillik samarali zaryad tashuvchilarni tashish va past rekombinatsiya tezligini ta’minlaydi, bu esa monokristall kremniyli elementlarni quyosh nurlanishini elektr energiyasiga aylantirish uchun ayniqsa samarador qiladi.

Ishlab chiqarish jarayoni odatda Choxralskiy usul bilan amalga oshiriladi, bunda kristall kremniy eritmadan nazorat qilinadigan sharoitlarda asta-sekin o‘stiriladi va silindrsimon ingotning yagona kristalli yo‘nalishda shakllanishiga imkon beradi (6.3-rasm). Quyma to‘liq shakllangandan so‘ng, u nozik simli arra yordamida ingichka gofretlarga bo‘linadi. Ushbu gofretlar quyosh elementlari uchun asosiy material bo‘lib xizmat qiladi, ularning elektr va optik ishlashini optimallashtirish uchun sirt teksturasi, legirlash, diffuziya va akslantiruvchi qoplama kabi keyingi bosqichlardan o‘tadi.



***a*)** ***b*)**

6.3-rasm. Monokristall kremniy silindri (*a*) va uni o‘stirish jarayoni (*b*).

Monokristall elementlar o‘zlarining bir xil to‘q ko‘rinishi, odatda qora yoki to‘q ko‘k va silindrsimon ingotlarning geometriyasini aks ettiruvchi o‘ziga xos yumaloq yoki kesilgan burchakli shakli bilan tavsiflanadi. Ular yuqori quvvatli konvertatsiya qilish samaradorligi bilan tanilgan bo‘lib, tijorat modullarida odatda 20% dan 23% gacha, laboratoriya elementlari esa 26% dan yuqori qiymatlarga erishgan. Ularning ishlashi yuqori haroratlarda nisbatan barqaror bo‘lib qoladi, harorat koeffitsiyentlari odatda Selsiy bo‘yicha -0,3 dan -0,4% gacha, bu boshqa hujayra turlariga nisbatan qulaydir.

Monokristall kremniyli quyosh elementlarining asosiy afzalliklari ularning yuqori samaradorligi, uzoq ishlash muddati (ko‘pincha 25 yildan ortiq) va ixchamlikni o‘z ichiga oladi, bu ayniqsa cheklangan maydonga ega ilovalarda muhim ahamiyatga ega. Biroq bu imtiyozlar yanada murakkab va katta energiya

talab qiladigan ishlab chiqarish xarajatlariga, shuningdek, dumaloq ingotdan gofretlarni kesishda katta moddiy chiqindilarga olib keladi.

Monokristalli quyosh elementlari turar-joy va tijorat fotovoltaik tizimlarida, shuningdek, portativ quyosh mahsulotlari va tarmoqqa ulangan fotoelektr stantsiyalarida keng qo‘llaniladi. Ularning ishonchliligi, bozor etukligi va davom etayotgan texnologik takomillashtirish, masalan, passivlashtirilgan emitentning orqa kontakti (passivated emitter rear contact – PERC) konstruksiyalari ularni zamonaviy quyosh energiyasi ishlab chiqarishning asosiga aylantiradi.

2. Polikristall kremniyli (poli-Si) quyosh elementlari. Ko‘p kristalli kremniy elementlari sifatida ham tanilgan polikristall kremniyli (poli-Si) quyosh elementlari fotovoltaik texnologiyaning asosiy va keng tarqalgan sinfini ifodalaydi. Monokristall kremniyga tejamkor muqobil sifatida joriy etilgan polikristalli elementlar o‘zining noyob material tuzilishi, ishlab chiqarish jarayonlari va ishlash ko‘rsatkichlari bilan ajralib turadi. Tarixan ular quyosh energiyasi texnologiyalarining kengayishida, ayniqsa yirik loyihalar va byudjetga sezgir dasturlarda muhim rol o‘ynagan.

Polikristall va monokristall elementlar orasidagi asosiy farq ishlatiladigan kremniyning strukturasidadir (6.1*a* va *b* rasmlarga qarang). Monokristall kremniy yagona, uzluksiz kristall panjaradan iborat bo‘lsa, polikristall kremniy ko‘plab mayda kremniy kristallari yoki donachalaridan iborat bo‘lib, ularning har biri turli yo‘nalishga ega. Bu kristallarning turli yo‘nalishlarda joylashuvi natijasida donachalar oralig‘ida chegaralar hosil bo‘ladi, bu chegaralar zaryad tashuvchilarning ko‘proq rekombinatsiyaga uchrash joylariga aylanishi bilan monokristall kremniyga nisbatan umumiy samaradorlikni biroz pasaytiradi.

Polikristall kremniyli quyosh elementlarini ishlab chiqarish odatda monokristall kremniyga qaraganda ancha sodda va arzonroq. Jarayon odatda yuqori toza kremniyni tigelda eritib va uni kvadrat shaklda sekin sovitib, qattiqlashtirishdan iborat. Monokristalli kremniy uchun qo‘llaniladigan Choxralskiy jarayonidan farqli o‘laroq, bu usul kristall o‘sish yo‘nalishini aniq nazorat qilishni talab qilmaydi. Kremniy qotib qolganda, u tasodifiy yo‘naltirilgan kristallardan tashkil topgan blokni hosil qiladi. Keyinchalik bu blok kvadrat shaklidagi plastinalarga bo‘linadi, bu esa material isrofini kamaytiradi va quyosh panellarida yuqori zichlikda joylashishni ta’minlaydi.

Polikristalli elementlar sirtida donador yoki nuqtali tuzilmalar kuzatiladi, ya’ni kristall sirtlari turli yo‘nalishlarda yorug‘likni sochadi. Bu ko‘rinish kremniy donachalarining har xil optik xususiyatlariga bog‘liq. Ularning rangi odatda ko‘kdan to‘q ko‘kgacha bo‘ladi, bu esa akslanishni kamaytirish va yorug‘likning samarali yutilishi uchun qo‘llaniladigan antiakslantiruvchi qoplama va sirt teksturasiga

bog‘liq. Ushbu optik ishlovlar akslanishni minimallashtirish va yorug‘likni samarali yutilishini yaxshilash uchun zarurdir.

Elektrik nuqtai nazaridan, polikristall kremniyda mavjud bo‘lgan donachalar chegarasi elektron va kovaklar harakatiga ta’sir qiladi. Bu chegaralar tashuvchilar uchun tuzoq bo‘lib xizmat qiladi, bu esa rekombinatsion yo‘qotishlarining oshishiga va tashuvchilar yashash davrini qisqarishiga olib keladi. Shuning uchun, polikristall elementlarning samaradorligi odatda ~15% atrofida bo‘ladi.

Issiqlik ko‘rsatkichlari bo‘yicha polikristall elementlar monokristallar bilan deyarli teng bo‘lib, ularning harorat koeffitsiyenti odatda -0,4%/°C atrofida bo‘ladi.

Polikristall elementlarning nisbatan arzonligi ularni yirik quyosh fermalari va samaradorlik o‘rniga arzonlik afzal ko‘riladigan loyihalar uchun jozibador qiladi. Ularning oddiy ishlab chiqarish jarayoni nafaqat ishlab chiqarish vaqtida kamroq energiya sarflanishiga olib keladi, balki “energiya qoplash muddati”ni ham qisqartiradi — ya’ni panelni ishlab chiqarish uchun sarflangan energiyani qoplash uchun ketadigan vaqtni ham qisqartiradi. Bu xususiyat polikristalli fotovoltaika texnologiyasining ekologik ta’sirini yanada ijobiy qiladi.

Bundan tashqari, polikristall quyosh modullari mexanik mustahkamligi va bardoshligi bilan mashhur. Kvadrat plastinka geometriyasi panellar massivida yuqori zichlikda joylashtirishga imkon beradi, bu esa mavjud bo‘sh joydan maksimal darajada foydalanishni ta’minlaydi. Ushbu modullar ko‘pincha standart alyuminiy ramka va temperli oynadan tayyorlanadi, bu esa ularni shamol, do‘l va namlik kabi tashqi ta’sirlarga nisbatan chidamli qiladi. To‘g‘ri xizmat ko‘rsatish bilan polikristalli modullar 25 yil yoki undan ortiq samarali ishlashi mumkin.

So‘nggi yillarda texnologik yutuqlar polikristall elementlarning samaradorligini yanada oshirdi. Monokristalli texnologiyalardan olingan selektiv emitter hosil qilish, orqa sirtni passivatsiyalash va takomillashgan metallizatsiya kabi usullar polikristall elementlarda ham qo‘llanilmoqda. Shuningdek, donachalar chegarasining salbiy ta’sirini kamaytirish bo‘yicha kimyoviy passivatsiya va kristall o‘sishini nazorat qilish uslublari ustida ham tadqiqotlar olib borilmoqda.

PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) va ikki tomonli modullar kabi yangi texnologiyalar joriy etilishiga qaramay, polikristall kremniy global fotovoltaika bozorida muhim o‘rin tutishda davom etmoqda. Monokristalli modullar yuqori samaradorligi va jozibali ko‘rinishi tufayli ommalashgan bo‘lsa-da, polikristalli modullar ayniqsa boshlang‘ich sarmoya cheklangan bozorlar uchun arzonlik, ishlashi va ishonchlilikning maqbul muvozanatini taklif etadi.

3. Amorf kremniyli (a-Si) quyosh elementlari. Amorf kremniyli (a-Si) quyosh elementlari kristalli bo‘lmagan kremniy tuzilishi bilan tavsiflangan yupqa pardali fotovoltaik texnologiyaning o‘ziga xos sinfini ifodalaydi. Atomlar tartibli, davriy ravishda joylashgan kristalli kremniy materialidan farqli o‘laroq, amorf

kremniy uzoqdan tartibga ega emas (6.2c-rasm). Ushbu tartibsiz tuzilish a-Si elementlarda quyosh nurini yupqa qatlamda samaraliroq yutilish imkonini beradi, bu ularning an’anaviy kristalli elementlar bilan solishtirganda asosiy afzalliklaridan biridir.

a-Si quyosh elementlari uchun ishlab chiqarish jarayoni kremniy atomlarini taglikka, odatda shisha, plastmassa yoki metallga cho‘ktirishni o‘z ichiga oladi – bu plazma bilan kuchaytirilgan kimyoviy bug‘larni cho‘ktirishdir (plasma-enhanced chemical vapor deposition PECVD). Bu usulda SiH gazi plazma muhitida parchalanadi va hosil bo‘lgan kremniy atomlari taglikda yupqa amorf parda hosil qiladi. Butun jarayon nisbatan past haroratlarda (200-300 °C) amalga oshiriladi, bu moslashuvchan va arzon tagliklardan foydalanishga imkon beradi va ishlab chiqarishning umumiy energiya talablarini kamaytiradi.

Amorf kremniyning yuqori optik yutilish koeffitsienti material qalinligining bir necha mikrometrlari ichida quyosh spektrining muhim qismini o‘zlashtirishga imkon beradi. Natijada odatdagi a-Si quyosh batareyasining qalinligi atigi 0,3-0,5 μm, bu material sarfini sezilarli darajada kamaytiradi. Kuchlanish chiqishi va samaradorligini oshirish uchun ishlab chiqaruvchilar ko‘pincha a-Si elementlarining bir nechta qatlamlarini tandem yoki uch o‘tishli konfiguratsiyasida yig‘adilar, bu yerda har bir qatlam quyosh spektrining turli sohalarini yutish uchun optimallashtirilgan.

Arzon narxlardagi materiallar, moslashuvchan shakl omillari va minimal xom kremniy iste’molining afzalliklariga qaramasdan, a-Si quyosh elementlari odatda kristall kremniyga nisbatan past konvertatsiya samaradorligini namoyish etadi. Tijoriy a-Si modullari odatda 6-10% oralig‘ida samaradorlikka erishadi.

a-Si texnologiyasi bilan bog‘liq yana bir muhim muammo – bu Stebler-Vronskiy effekti – yorug‘lik ta’sirida kremniy strukturasida metastabil nuqsonlarni keltirib chiqaradigan va vaqt o‘tishi bilan fotoelement samaradorligining asta-sekin pasayishiga olib keladigan hodisa. Garchi bu degradatsiyaning bir qismi termik qayta ishlov yoki yorug‘lik aylanishi orqali tiklanishi mumkin bo‘lsa-da, bu uzoq muddatli ishlashni baholashda hal qiluvchi omil bo‘lib qolmoqda.

Shunga qaramay, a-Si quyosh elementlarining past haroratli, kengaytiriladigan ishlab chiqarish jarayoni ularni turli xil ilovalar uchun samarali qiladi. Ular, ayniqsa, mexanik moslashuvchanlik, vazn cheklovlari va estetik integratsiya maksimal samaradorlikdan ko‘ra muhimroq bo‘lgan binolarga o‘rnatilgan fotovoltaik sistemalar (building-integrated photovoltaics – BIPV), maishiy elektronika va portativ quvvat yechimlari uchun juda mos keladi. Misol uchun, a-Si modullari odatda kalkulyatorlar, lager jihozlari, oynaga o‘rnatilgan panellar va quyosh energiyasi bilan ishlaydigan soatlarda qo‘llaniladi.

Ishlab chiqarish nuqtai nazaridan, a-Si modullarini katta yuzali tagliklarda rulonli jarayonlardan foydalangan holda ishlab chiqarish qobiliyati ularning iqtisodiy samaradorligi va kengaytirilishiga yordam beradi. Bundan tashqari, amorf kremniyni boshqa yupqa pardali materiallar bilan, masalan, mikrokristalli kremniy (mikromorf tandem elementlari deb ataladigan) bilan birlashtirish potensiali fotovoltaik sistemalarning ushbu sinfida doimiy innovatsiyalarga imkon berdi. Ushbu gibrid dizaynlar samarali yutilish spektrini kengaytirish va tok tashuvchilar to‘plamini yaxshilash orqali bitta ulanish a-Si ning ba’zi samaradorlik cheklovlarini yengishga yordam beradi.

a-Si quyosh texnologiyasi ekologik jihatdan bir qancha afzalliklarga ega. Bu kadmiy kabi zaharli og‘ir metallardan yoki indiy kabi nodir elementlardan foydalanishdan qochadi, bu uning moddiy profilini yanada barqaror qiladi. Ishlab chiqarish uchun zarur bo‘lgan energiya sarfining kamayishi, shuningdek, joylashuv va joylashtirishga qarab, odatda bir yildan kamroq energiyani qoplash muddatiga olib keladi.

a-Si texnologiyasi yanada samaraliroq va arzonroq kristalli kremniy modullarining kuchli raqobatiga duch kelsa-da, u ixtisoslashgan bozorlarda o‘z ahamiyatini saqlab qolishda davom etmoqda. Davom etilayotgan tadqiqotlar yorug‘likni yutilish spektrini yaxshilash, qatlam qalinligini optimallashtirish, nuqson holatlarini passivlashtirish va uzoq muddatli barqarorlikni oshirishga qaratilgan. Ushbu tadqiqotlar amorf kremniyli fotovoltaik sistemalarni qo‘llash doirasini kengaytirishga qaratilgan bo‘lib, ularning moslashuvchanligi va ishlab chiqarilishidagi o‘ziga xos afzalliklarini saqlab qoladi.

Yupqa pardali quyosh elementlari. Yupqa pardali quyosh elementlari fotovoltaik texnologiyalarning xilma-xil va tez rivojlanayotgan toifasini tashkil etadi, ular materiallar, tuzilish va ishlab chiqarish usullari jihatidan an’anaviy p-n o‘tishli yaxlit plastina asosidagi kremniyli quyosh elementlardan tubdan farq qiladi. Ushbu fotoelementlar shisha, plastmassa yoki metall folga kabi qo‘llab-quvvatlovchi taglikka yotqizilgan fotovoltaik materialning bir yoki bir nechta yupqa qatlamlarini (odatda bir necha mikrometrga teng) ishlatish bilan tavsiflanadi. Faol qatlamlarning qalinligining kamayishi kristall kremniyga asoslangan quyosh elementlari bilan solishtirganda sezilarli darajada materiallarni tejashga, ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirishga va qo‘llashda ko‘proq moslashuvchanlikka olib keladi.

Ommaviy kremniyli quyosh elementlaridan farqli o‘laroq, yupqa pardali quyosh texnologiyalari har biri o‘ziga xos fizik va elektr xususiyatlarga ega bo‘lgan turli xil yarimo‘tkazgichli materiallarni o‘z ichiga oladi. Yupqa pardali quyosh elementlari materiallariga asosan kadmiy tellurid (CdTe), mis indiy galiy selenid (CIGS) va amorf kremniy (a-Si) kiradi. Ushbu materiallarning har biri samaradorlik,

barqarorlik, ishlab chiqarishning murakkabligi va atrof-muhitga ta’siri nuqtai nazaridan alohida afzallik va shuningdek muammolarni ham taklif qiladi.

1. Kadmiy telluridi (CdTe). Kadmiy telluridi hozirda eng muvaffaqiyatli yupqa pardali texnologiya bo‘lib, global yupqa pardali fotovoltaika bozorining muhim ulushini egallaydi. CdTe fotoelementlari to‘g‘ri zonali va taqiqlangan zona kengligi taxminan 1,45 eV bo‘lgan yarimo‘tkazgich bo‘lib, bu quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish uchun optimalga yaqindir. Bu xususiyat juda yupqa qatlamda yuqori yorug‘lik yutilishiga imkon beradi, bu esa qalin materialni o‘stirishga bo‘lgan ehtiyojni kamaytiradi. Tijorat CdTe modullari odatda ~16 % tartibda samaradorlikka erishadi. CdTe yupqa pardali quyosh elementlari global quyosh bozorida eng tijoriy etuk va tejamkor fotovoltaik texnologiyalardan biridir. CdTe elementlari yuqori konvertatsiya samaradorligi, nisbatan past ishlab chiqarish xarajatlari va qisqa energiyani qoplash muddatlari bilan mashhur bo‘lib, ularni kristall kremniyga asoslangan quyosh modullariga, ayniqsa keng ko‘lamli kommunal dasturlarda etakchi muqobil hisoblanadi.

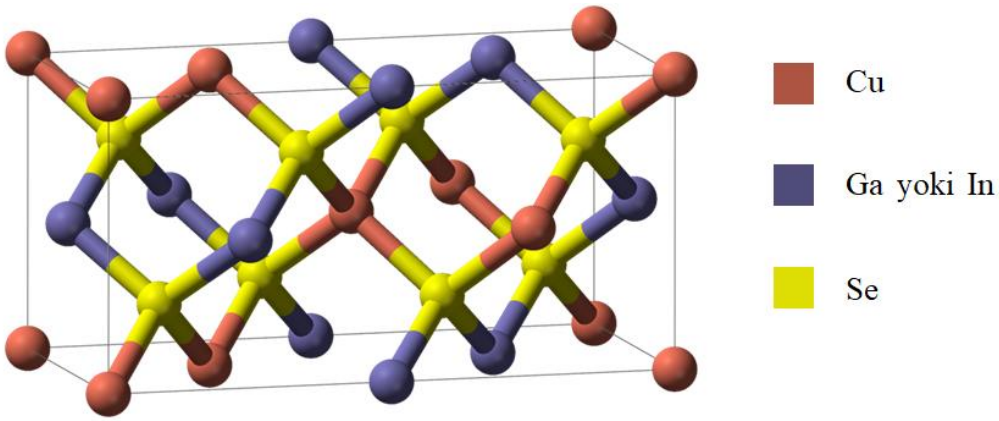
CdTe yupqa pardali quyosh elementlari odatda kadmiy tellurid va kadmiy sulfidining (CdS) yupqa qatlamlarini ftor bilan qoplangan qalay oksidi (FTO) bilan qoplangan shaffof o‘tkazuvchan taglikka cho‘ktirish orqali olinadi. CdS qatlami bufer yoki oyna qatlami rolini o‘ynaydi, CdTe qatlami esa asosiy foton yutuvchi sifatida xizmat qiladi. Bu qatlamlar katta maydonli va yuqori mahsuldorlikdagi ishlab chiqarish uchun mos bo‘lgan yaqin oraliqda sublimatsiya (CSS), bug‘ tashuvchisi cho‘kmasi (VTD) yoki kimyoviy bug‘ cho‘kmasi (CBD) kabi usullar yordamida yotqiziladi.

Ularning afzalliklariga qaramay, CdTe quyosh elementlari muayyan qiyinchiliklar va cheklovlarga duch keladi. Muhim muammolardan biri kadmiyning toksikligi va og‘ir metalligi bo‘lib, u to‘g‘ri boshqarilmasa, atrof-muhit va sog‘liq uchun xavf tug‘dirishi mumkin. Ushbu muammoni hal qilish uchun ishlab chiqaruvchilar qat'iy qayta ishlash protokollari va inkapsulyatsiya standartlarini qo‘llaydilar, ular ish paytida va ishdan bo‘shatilgandan keyin kadmiy oqishi oldini oladi. Bundan tashqari, tellur nisbatan kam uchraydigan element bo‘lib, ta’minot zanjiri rivojlanishiga va global talabga qarab uzoq muddatli miqyoslilikni cheklashi mumkin.

CdTe sohasidagi tadqiqotlar hujayra samaradorligini oshirish, uzoq muddatli barqarorlikni yaxshilash va ishlab chiqarishning atrof-muhitga ta’sirini kamaytirishga qaratilgan. Ishlashni yanada oshirish uchun tandem CdTe asosidagi hujayralar, yangi shaffof kontaktlar va muqobil oyna qatlamlari kabi innovatsiyalar o‘rganilmoqda. Bundan tashqari, kadmiyni almashtirish yoki ishlatishni minimallashtirish yoki muqobil changni yutish materiallarini topish bo‘yicha harakatlar texnologiyani kelajakda isbotlash uchun tekshirilmoqda.

CdTe quyosh texnologiyasi asosan kommunal miqyosdagi fotovoltaik tizimlarda, ayniqsa quyosh nurlari yuqori bo‘lgan katta maydonlarida qo‘llaniladi. First Solar kabi kompaniyalar CdTe modullarini sanoatda qo‘llashda ilg‘or bo‘lib, quyosh energiyasi quvvatining global kengayishiga sezilarli hissa qo‘shmoqda. Avtomatlashtirilgan jarayonlar va arzon materiallardan foydalangan holda modullarni ishlab chiqarish qobiliyati CdTe fotovoltaik sistemalarning tijorat muvaffaqiyatining kaliti bo‘ldi.

Kadmiy tellurid yupqa pardali quyosh elementlari an’anaviy kremniy asosidagi modullarga nisbatan yuqori samarali, arzon narxlardagi alternativni ta’minlaydi. Ularning mukammal o‘zgartirish xususiyatlari, raqobatbardosh real ishlash ko‘rsatkichlari va kengaytiriladigan ishlab chiqarish jarayonlari ularni keng ko‘lamli energiya ishlab chiqarish uchun juda mos keladi. Ish faoliyatini yanada yaxshilash va jiddiy muammolarni hal qilishga qaratilgan davom etayotgan tadqiqotlar bilan CdTe texnologiyasi keyingi avlod quyosh energiyasi muammolari yechimlarining diversifikatsiyalangan portfelining bir qismi sifatida o‘z dolzarbligini saqlab qolishi kutilmoqda.

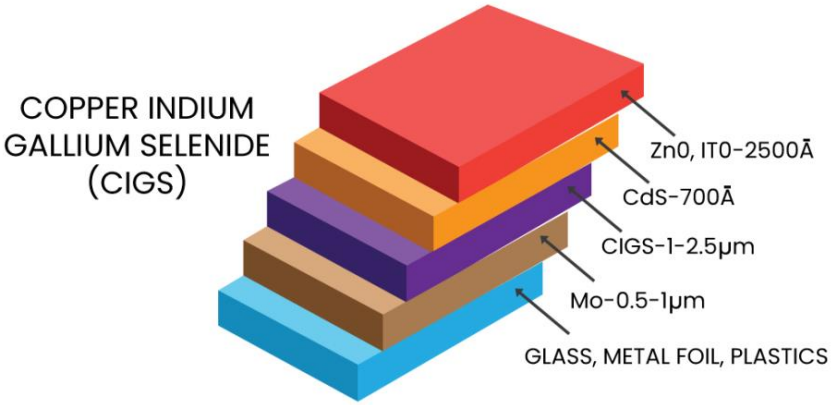


6.4-rasm. Xalkopirit tipidagi kristallar elementar yacheykasi.

Mis indiy galliy selenid (CIGS) quyosh elementlari mis, indiy, galiy va selen birikmali yana bir tur yuqori samarali yupqa pardali texnologiyani ifodalaydi. Bu mis indiy selenid va mis galliy selenidning qattiq eritmasi bo‘lib, uning tarkibi $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ formula bilan ifodalanadi. U xalkopirit tipidagi tuzilishda kristallanadi (6.4-rasm). CIGS to‘g‘ri zonali yarimo‘tkazgich bo‘lib, taqiqlangan zona kengligi tarkibiga qarab x=0 da 1,7 eV dan x=1 da 1,0 eV gacha sozlanishi mumkin. Ushbu sozlanishi quyosh spektrining turli qismlari uchun optimallashtirish imkonini beradi. CIGS elementlari laboratoriya sharoitida 23% dan ortiq samaradorlikni ko‘rsatgan.

CIGS quyosh elementining standart tuzilishi bir necha qatlamlardan iborat. Orqa tomondan boshlab, molibden (Mo) kontakt qatlami shisha yoki moslashuvchan taglikka yotqiziladi. Buning ustida CIGS absorber qatlami joylashgan bo‘lib, u fotonni yutuvchi asosiy material bo‘lib xizmat qiladi. *p-n* o‘tishni hosil qilish uchun

bufer qatlami – odatda kadmiy sulfid (CdS) qo‘llaniladi, undan keyin rux oksidi (ZnO) yoki indiy qalay oksidi (ITO) kabi shaffof o‘tkazuvchan oksid (TCO) qatlami elektr tokini o‘tkazish bilan birga qurilmaga yorug‘lik kirishiga imkon beradi. Ushbu qatlamlar odatda uzoq muddatli barqarorlikni ta’minlash uchun himoya qoplamasi bilan qoplanadi [7] (6.5-rasm).



6.5-rasm. CIGS quyosh elementi tipik strukturasi [7].

CIGS quyosh elementlarini ishlab chiqarishga turli usullar, shu jumladan birgalikda bug‘lanish va changlantirish kabi vakuumga asoslangan texnikalar, shuningdek eritma asosida bosib chiqarish kabi vakuum bo‘lmagan yondashuvlar orqali erishish mumkin. O‘tqazish usulini tanlash parda sifatiga, donachalar tuzilishiga va qurilmaning umumiy ishlashiga ta’sir qiladi. Birgalikda bug‘lanish yuqori samarali qurilmalarga erishishning eng muvaffaqiyatli usuli bo‘lib qolmoqda, chunki u elementar tarkibi va pardaning bir jinsliligini aniq nazorat qilish imkonini beradi.

CIGS texnologiyasining ajralib turadigan afzalliklaridan biri uning yuqori yutilish koeffitsiyentidir, bu esa atigi 1-2 mikrometr qalinlikdagi parda ichida tushayotgan quyosh nurlanishini to‘liq yutish imkonini beradi. Bu xususiyat zarur bo‘lgan material miqdorini sezilarli darajada kamaytiradi va yengil, moslashuvchan modullarni ishlab chiqarishni osonlashtiradi.

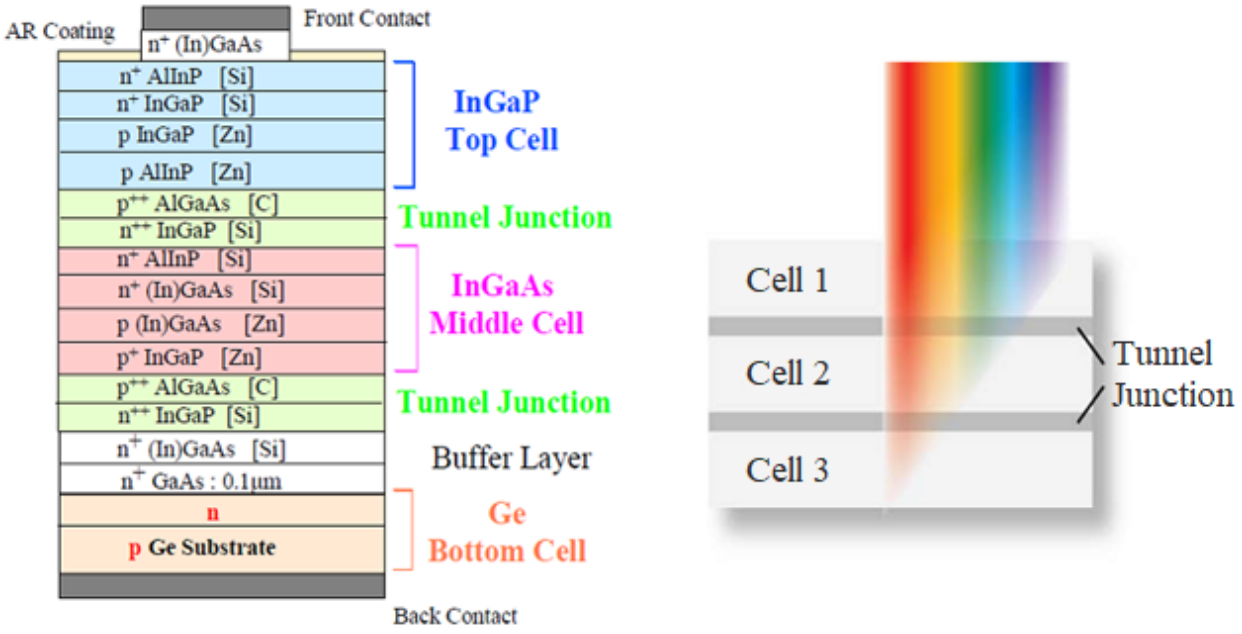
Mexanik moslashuvchanlik CIGS texnologiyasining yana bir muhim afzalligi hisoblanadi. CIGS modullari nisbatan past harorat koeffitsiyentiga ega (taxminan -0,35). Yupqa pardali qatlamlar polimerlar yoki metall pardalar kabi moslashuvchan asoslarga yotqizilishi mumkinligi sababli, CIGS modullari yengil, egiluvchan yoki egri sirtlarda birlashtirilishi mumkin. Bu binoga o‘rnatilgan fotovoltaik sistemalar (BIPV), portativ quyosh zaryadlovchi qurilmalari, avtomobil sirtlari va elektronika uchun yangi ilovalarni ochadi. Bundan tashqari, texnologiya kengaytiriladigan, uzluksiz ishlab chiqarish orqali xarajatlarni kamaytirishni ta’minlaydigan rulonli ishlab chiqarish jarayonlarini qo‘llab-quvvatlaydi.

Ushbu afzalliklarga qaramay, CIGS quyosh elementlari keng tarqalishini cheklaydigan ba’zi omillar mavjud. Indiy va galliy kabi noyob va qimmat

elementlarning mavjudligi – resurslarning yetarliligi va uzoq muddatli rejalashtirish bilan bog‘liq muammolarni keltirib chiqaradi. Bundan tashqari, kadmiyning bufer qatlamiga qo‘shilishi atrof-muhit va inson salomatligi bilan bog‘liq muammolarni keltirib chiqaradi, bu rux oksisulfidi (Zn(O,S)) va indiy sulfid (InS) kabi muqobil bufer materiallarini tadqiq qilishga undaydi.

Ko‘p kaskadli va ko‘p o‘tishli quyosh elementlari. Ko‘p o‘tishli va tandem (shuningdek, kaskadli yoki ko‘p qatlamli deb ham ataladi) quyosh elementlari bugungi kunda mavjud bo‘lgan eng ilg‘or va yuqori samarali fotovoltaik texnologiyalarni ifodalaydi. Ushbu elementlar bir nechta *p-n* o‘tishlarni hosil qilish orqali bir o‘tishli qurilmalarning samaradorligi cheklovlarini yengib o‘tish uchun maxsus ishlab chiqilgan bo‘lib, ularning har biri quyosh spektrining alohida sohasini o‘zlashtirish uchun optimallashtirilgan. Kengroq to‘lqin uzunligi diapazonida ko‘proq fotonlarni qamrab olish orqali ko‘p o‘tishli quyosh elementlari an’anaviy bir qatlamli quyosh elementlariga qaraganda ancha yuqori o‘zgartirish samaradorligiga erishishi mumkin.

Kaskadli quyosh elementlari monolitli ko‘p kaskadli monokristall strukturani o‘stirish yoki tayyor elementlarni mexanik birlashtirish orqali hosil bo‘ladi. Ushbu guruhdagi yuqori samarali quyosh elementlarining aksariyati ko‘p o‘tishli (kaskad) geterostrukturalar asosida ishlab chiqariladi. Ular molekulyar nurli epitaksiya (MBE) yoki metall-organik bug‘larni cho‘ktirish (MOCVD) texnologiyasi bilan olinadi. Uch kaskadli quyosh elementining tuzilishiga misol va quyosh energiyasini o‘zgartirishning energetik sxemasi 6.6-rasmda ko‘rsatilgan [8].



6.6-rasm. Ko‘p o‘tishli quyosh elementi va uning quyosh energiyasini o‘zgartirish sxemasi.

Ko‘p o‘tishli quyosh elementlarining asosiy prinsipi yarimo‘tkazgichlarning spektral taqsimlanishida yotadi. Har bir fotovoltaik material o‘ziga xos taqiqlangan zona kengligiga ega bo‘lib, u samarali yutiladigan foton energiyalari diapazonini belgilaydi. Bir o‘tishli elementda taqiqlangan zona kengligidan past energiyali fotonlar yutilmaydi, taqiqlangan zona kengligidan katta energiyali fotonlar esa ortiqcha issiqlik yo‘qotishlarini hosil qiladi. Ko‘p o‘tishli quyosh elementi ushbu muammoni har xil materiallarning bir nechta qatlamlarini ketma-ket birlashtirish orqali hal qiladi, bunda qatlamlar taqiqlangan zona kengligining kamayish tartibida joylashtiriladi.

Tandemli strukturada yuqori yacheyka katta energiyali (qisqa to‘lqinli) fotonlarni yutadi va past energiyali fotonlarni pastki qatlamlarga uzatadi. Har bir keyingi qatlam qolgan spektrning bir qismini yutadi va shu bilan issiqlik yo‘qotishlari minimallashtiriladi. Ushbu subelementlar tuzilishi va qo‘llanish sohasiga qarab ketma-ket (monolitik ikki kontaktli konfiguratsiya) yoki parallel ravishda (to‘rt kontaktli konfiguratsiya) ulanishi mumkin.

Eng yaxshi tasdiqlangan ko‘p o‘tishli quyosh elementlari galliy arsenid (GaAs), galliy indiy fosfidi (GaInP) va galliy indiy arsenid (GaInAs) kabi $A^{III}B^{V}$ birikmali yarimo‘tkazgichlarga asoslangan. Ushbu materiallar yuqori nurlanish samaradorligini ta’minlaydi va panjara parametrlari mosligi tufayli kontaktlarda nuqsonlarning shakllanishini kamaytirishi mumkin. Masalan, keng tarqalgan uchtalik o‘tishli konfiguratsiya GaInP (yuqori kaskad, 1,9 eV), GaAs (o‘rta yacheyka, 1,4 eV) va GaInAs (pastki kaskad, 1,0 eV) ni o‘z ichiga oladi. Ushbu kombinatsiya 45% dan ortiq nazariy samaradorlikni taminlaydi.

Germaniyada ishlab chiqarilgan (Fraunhofer ISE/Soitec) to‘rt kaskadli quyosh elementlari 500 ta quyosh kontsentratoridan foydalanganda holda 46,0% samaradorlikka erishdi. 2015-yil 14-yanvarda GOLDEN (Kolorado – AQSh Energetika vazirligi, NREL) 234 ta konsentratorli to‘rt kaskadli quyosh elementi uchun 45,7% samaradorlikni e’lon qildi. NREL ta’kidlashicha, bu har qanday turdagi quyosh elementi uchun erishilgan eng yuqori samaradorliklardan biridir. Shu bilan birga, 2013-yilda 942 ta konsentratorli Solar Junction tomonidan olingan uch kaskadli quyosh elementlarining maksimal samaradorligi 44,4% ni tashkil etdi.

Biroq yuqori samaradorlikni olish uchun kontsentratorlardan (Frenel linzalari) foydalanish katta optik yo‘qotishlarga olib keladi. Shuni esda tutish kerakki, laboratoriya elementlari maxsus yorug‘lik sharoitida o‘rganiladi. Konsentratorli ko‘p kaskadli elementlarning o‘zlari, tabiiy sharoitlarda ishlatilganda, mexanik murakkab qo‘llab-quvvatlovchi tuzilmalarni, shu jumladan kuzatuv sxemalaridan foydalanishni talab qiladi, sochilgan yorug‘lik ta’sirida yomon ishlaydi va lokal qizishi tufayli strukturani sovutishni talab qiladi.

Boeing-Spectrolab va Sharp tomonidan olingan ko‘p kaskadli konsentratorsiz quyosh elementlarining maksimal samaradorligi mos ravishda 38,8% (besh kaskadli) va 37,9% (uch kaskadli) ni tashkil etdi. Ko‘p kaskadli quyosh elementlarini olishning kamchiliklari texnologik jarayonning murakkabligi, qimmat uskunalar, monokristall Ge, GaAs tagliklari va boshqa asosiy materiallar va komponentlardan foydalanish hisoblanadi.

J.I. Alferov [9] kaskadli quyosh elementlari boshqa barcha yarimo‘tkazgichli qurilmalarga nisbatan struktura jihatidan eng murakkab ekanligini ta’kidlagan.

Tayyor elementlarni mexanik birlashtirish orqali ikki kaskadli quyosh elementlarini ishlab chiqarishda yuqori kaskad uchun GaAs asosidagi materiallar, pastki kaskad uchun Ge asosidagi materiallar ishlatilgan [10]. [11] mualliflar quyosh elementida yuqori kaskad uchun AlGaAs (E_g ~ 1,7 eV) va pastki kaskad uchun esa Si foydalanishgan. Shu bilan birga, rekord darajadagi 37% samaradorlik ko‘rsatkichlariga yuqori kaskadi GaAs asosdagi va pastki kaskadi GaSb asosdagi 100 ta quyosh konsentratorli mexanik birlashtirilgan quyosh elementlarida erishildi [12].

Mexanik birlashtirilgan quyosh elementlarining afzalligi shundaki, ular yaxshi ishlab chiqilgan bir o‘tishli quyosh elementlari asosida yaratilgan. Bunday holda, kaskadlardagi elektr tokini muvofiqlashtirish shart emas. Kamchiliklari qatoriga kaskadlarning kommutatsiya tizimining ancha murakkabligi, kaskadlar chegarasida yuqori optik yo‘qotishlar va pastki kaskadda yutiluvchi nurlanishni yuqori kaskad tomonidan yutilishini minimallashtirish talabi kiradi [13].

Yuqorida aytib o‘tilgan salbiy jihatlarga qaramay, ko‘p kaskadli quyosh elementlari quyosh energetikasida o‘zlarining bozorini topdi. Ular nafaqat kosmosda, balki yerdagi quyosh konsentratorli fotoelektrostansiyalarida ham samarali qo‘llaniladi. 2008-yilga kelib Boeing, Emcore va Spectrolab Inc. kompaniyalari har biri yiliga 1 MW dan ortiq ishlab chiqarish quvvatiga ega bo‘lgan ko‘p kaskadli quyosh elementlarini ishlab chiqarish texnologiyalarini ishlab chiqishdi, o‘rnatilgan savdo tizimi va 36-39% samaradorlikka ega bo‘lgan konsentratorli yer usti quyosh fotoelementlari uchun shakllangan bozorga ega bo‘lishdi.

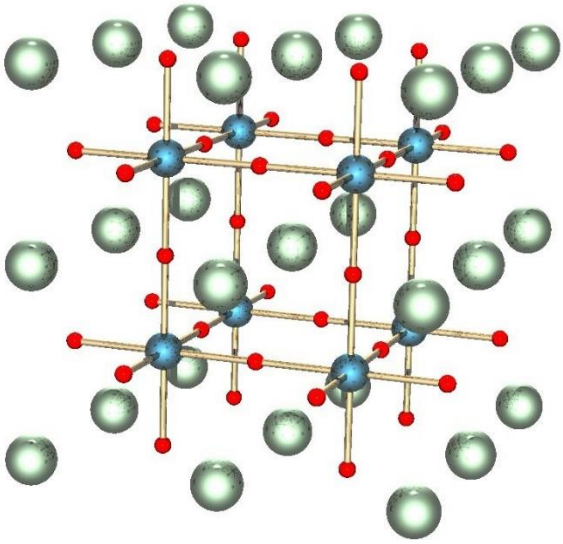
Birinchi texnologik guruhning bir kaskadli elementlari 27,5% gacha maksimal samaradorlikka ega, ammo bu kremniyga (25,6%) nisbatan bir oz yuqori, texnologik jarayon sezilarli darajada murakkab va ishlab chiqariladigan elektr energiyasining narxini oshiradigan materiallar va uskunalar narxlari yuqoridir. Shunday qilib, ushbu guruhning asosiy kamchiligi yuqori narx hisoblanadi.

Perovksid quyosh elementlari (PSC). Perovskit (yoki kalsiy titanat) yer yuzidagi eng keng tarqalgan minerallardan biridir. U 170 yil oldin nemis geologlari tomonidan kashf etilgan va yaqin vaqtgacha asosan dielektrik sifatida keng

qo‘llanilgan. Birinchi quyosh elementlari ixtiro qilinganida, ularni yaratish uchun perovskit elementlari hisobga olinmagan. Buning sababi energiya ishlab chiqarishda uning uzoq muddatli barqarorligiga erishishning mumkin emasligi edi, bu bugungi kunda ham murakkab muhandislik vazifadir.

Perovskit quyosh elementlari so‘nggi o‘n yil ichida eng istiqbolli yangi fotovoltaik texnologiyalardan biri sifatida paydo bo‘ldi, ular yuqori o‘zgartirish samaradorligi, ishlab chiqarish qulayligi va arzon ishlab chiqarish potensiali tufayli keng e’tiborni tortmoqda. Ushbu elementlar perovskit kristalli tuzilishga ega bo‘lgan materiallar sinfiga asoslanadi – odatda gibrid organik-noorganik qo‘rg‘oshin yoki qalay galogenid birikmalari – umumiy formulasi ABX_3 bo‘lib, bu yerda "A" – organik kation (masalan, metilamoniy yoki formamidiniy), "B" – metall kation (odatda Pb^2 yoki Sn^2) va "X" – galoid anionidir (Cl, Br yoki I).

Perovskit quyosh elementlarining muvaffaqiyati, birinchi navbatda, perovskit materiallarining ajoyib optoelektronik xususiyatlariga bog‘liq. Bularga ko‘rinuvchi spektrda kuchli yutilish, zaryad tashuvchilarning katta diffuziya uzunligi, eksitonning past bog‘lanish energiyasi va yuqori nuqsonlarga chidamlilik kiradi. Bu xususiyatlar yorug‘likni samarali yig‘ish, zaryadlarni ajratish va odatda qalinligi bir mikrometrdan kam bo‘lgan nisbatan yupqa qatlamlarda ularni tashish imkonini beradi. Ushbu yupqalik material sarfini kamaytirishga yordam beradi va egiluvchan va yengil qurilma konfiguratsiyasini osonlashtiradi.



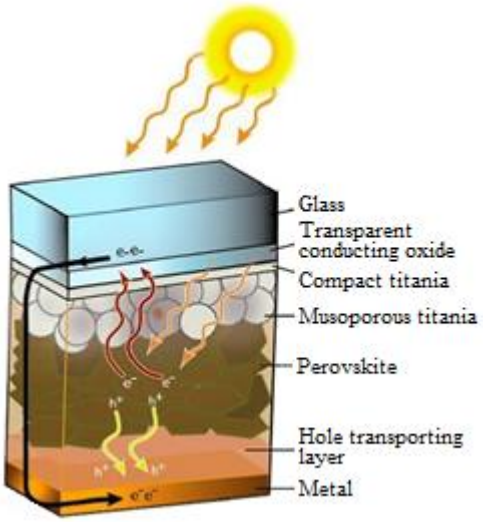
6.7-rasm. Perovskit ABX_3 ning tuzilishi: yashil sharlar A kationlari, ko‘k sharlar B kationlari, qizil sharlar X anionlari.

Perovskit quyosh elementining tipik tuzilishi shaffof o‘tkazuvchan oksidli (TCO) oldingi kontaktdan, undan keyin elektronlarni tashish qatlamidan (ETL), perovskit yutish qatlamidan, kovaklarni tashish qatlamidan (HTL) va orqa metall kontaktdan iborat. Qurilma strukturasiga qarab ETL (masalan, TiO, SnO yoki ZnO) va HTL (masalan, Spiro-OMETAD, PTAA yoki PEDOT:PSS) uchun turli materiallardan foydalanish mumkin. Perovskit quyosh elementlari ham planarli, ham mezoskopik konfiguratsiyalarda ishlab chiqarilishi mumkin, ikkinchisi zaryadni to‘plashni kuchaytirish uchun bor karkasni o‘z ichiga oladi.

Koreya kimyoviy texnologiyalar ilmiy-tadqiqot instituti ilmiy xodimi Seo Jang-won boshchiligidagi tadqiqot guruhi perovskit quyosh elementi uchun eng yuqori samaradorlikni qayd etdi – 22,7% (2017).

Bunday quyosh elementlari uchinchi avlodga tegishli bo‘lib, ular moslashuvchan va yengildir, ularning ishlab chiqarilishi nisbatan oddiy va arzon usullardan foydalanishni talab qiladi. Ammo shuni ta’kidlash kerakki, hozirgi vaqtda ular vaqtinchalik degradatsiyaga uchragan. Quyosh elementlariga germetiklash uchun talablarni oshirish kerak. Bugungi kunda ushbu texnologik guruh quyosh elementlarini sanoat ishlab chiqarishi mavjud emas. Bu laboratoriya tadqiqotlari bosqichida bo‘lgan quyosh elementlarini ishlab chiqarish uchun potensial eng arzon texnologik guruhdir.

Perovskit quyosh elementlarini ishlab chiqarish past haroratli eritmalarni qayta ishlash usullari, masalan, aylantirib qoplash (spin coating), tirqishli qoplama (slot-die coating) va inkjet bosib chiqarish (inkjet printing) yordamida amalga oshirilishi mumkin. Egiluvchan tagliklarda rulonli ishlab chiqarish bilan bunday muvofiqlik perovskit quyosh elementlarni kengaytiriladigan va tejamkor ishlab chiqarish uchun ayniqsa jozibador qiladi. Bundan tashqari, galogenid tarkibini o‘zgartirish orqali taqiqlangan zona kengligini sozlash imkoniyati tandem elementlar integratsiyasi va rang tanlash ilovalarini optimallashtirish imkonini beradi.



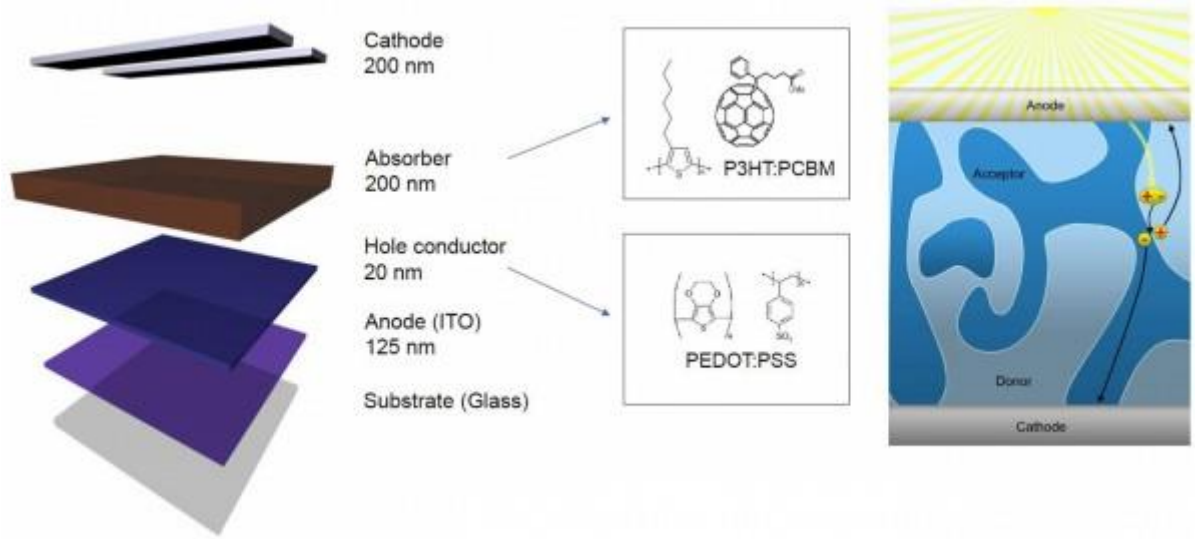
6.8-rasm. Perovskit quyosh elementlari mexanizmining oddiy sxemasi[1].

Ko‘pgina afzalliklariga qaramay, perovskit quyosh elementlari keng ko‘lamli ishlab chiqarilishdan oldin hal qilinishi kerak bo‘lgan bir qator muhim muammolar duch keladi. Barqarorlik eng muhim muammolardan biri bo‘lib qolmoqda, chunki perovskit materiallari namlik, kislorod, yorug‘lik va issiqlikka sezgir bo‘lib, bularning barchasi degradatsiyaga olib kelishi mumkin. Barqarorlikni oshirish strategiyalariga to‘liq noorganik kompozitsiyalardan foydalanish, inkapsulyatsiya usullari, kontakt o‘zgarishlari va qo‘shimcha muhandislik kiradi. Bundan tashqari, real sharoitlarda ishlash muddatini yaxshilash bo‘yicha harakatlar olib borilmoqda, ba’zi qurilmalar hozirda standart sinov sharoitida 1000 soatdan ortiq uzluksiz ishlaydi.

[1] https://ru.alfachemsp.com/info/an-overview-of-perovskite-solar-cells-42691096.html

Yana bir muhim masala – eng samarali perovskit kompozitsiyalarida qo‘rg‘oshin mavjudligi. Ishlatilgan qo‘rg‘oshin miqdori oz bo‘lsada, zaharliligi va atrof-muhitga ta’siri haqidagi xavotirlar qalay (Sn) yoki vismut (Bi) asosidagi qo‘rg‘oshinsiz muqobillarini o‘rganishga turtki bo‘ldi. Biroq ushbu muqobil materiallar hozirda past ishlash parametrlari va barqarorlikni namoyish etadi, bu ularni davom etayotgan tadqiqotlar mavzusiga aylantiradi.

Organik fotoelementlar (OPV). Organik quyosh elementlari deb ham ataladigan organik fotovoltaik sistemalar yorug‘likni yutish va zaryadni tashish uchun uglerod asosidagi yarimo‘tkazgich materiallardan foydalanadigan yupqa pardali quyosh texnologiyasi sinfini ifodalaydi. Ushbu qurilmalar mexanik moslashuvchanlik, past ishlab chiqarish xarajatlari, yengil konstruktsiya va ekologik toza ishlov berish potensialini o‘z ichiga olgan noyob afzalliklarni taklif etadi. Hozirgi vaqtda organik fotoelementlar samaradorlik va uzoq muddatli barqarorlik bo‘yicha noorganik fotoelementlardan orqada qolsada, davom etayotgan tadqiqotlar ularning ishlashi va tijoratlashtirishni barqaror ravishda yaxshilaydi.



6.9-rasm. Organik quyosh elementining tuzilishi va uni yaratishda ishlatiladigan materiallar[2].

Organik quyosh elementidagi faol qatlam odatda birlashgan polimerlar yoki kichik molekulalarning donor-akseptor aralashmasidan iborat. Yorug‘lik yutilganda, organik moddalarning past dielektrik o‘tkazuvchanligi tufayli erkin tashuvchilar emas, balki eksitonlar – bog‘langan elektron-kovak juftliklari hosil bo‘ladi. Shuning uchun samarali ishlash eksitonlar zaryadning ajralishi sodir bo‘lishi mumkin bo‘lgan donor-akseptor interfeysiga diffuziya qilish qobiliyatiga bog‘liq. Ushbu jarayonni maksimal darajada oshirish uchun organik fotoelementlar odatda hajmiy geteroo‘tish (BHJ) qurilmalari sifatida ishlab chiqilgan bo‘lib, ularda donor va

[2] https://habr.com/ru/articles/202836/

akseptor materiallar katta kontakt maydonini ta’minlash uchun nanoo‘lchamlarda aralashtiriladi.

Standart organik fotoelement qurilmasi strukturasi bir nechta qatlamlarni o‘z ichiga oladi (6.9-rasm): shaffof elektrod (ko‘pincha indiy qalay oksidi, ITO), kovaklarni tashish qatlami (masalan, PEDOT: PSS), faol donor-akseptor qatlami, elektron tashish qatlami (masalan, kalsiy yoki rux oksidi) va orqa metall elektrod (masalan, alyuminiy yoki kumush). Aniq materiallar va strukturani zaryadni ajratib olishni optimallashtirish, rekombinatsion yo‘qotishlarini kamaytirish va optik yutilishni yaxshilash uchun o‘zgartirilishi mumkin.

Organik quyosh elementlarining eng muhim xususiyatlaridan biri ularning eritmaga asoslangan ishlov berish texnikasi bilan muvofiqligidir. Aylantirib qoplash (spin coating), pichoqli tekislab qoplash (doctor blading), siyoh purkashli bosib chiqarish (inkjet printing) va rulondan rulonga qoplash (roll-to-roll coating) kabi usullar organik fotoelementlarni past haroratlarda egiluvchan plastik tagliklarda ishlab chiqarishga imkon beradi. Bu noan’anaviy sirtlarga va portativ elektronikaga birlashtirilishi mumkin bo‘lgan katta maydonli, yengil va yarim shaffof quyosh panellari uchun imkoniyatlar ochadi.

Samaradorlik nuqtai nazaridan, organik fotoelementlar so‘nggi yigirma yil ichida sezilarli yutuqlarga erishdi. Dastlabki qurilmalar faqat 1-2% samaradorlikka erishgandi.

Shunga qaramay, organik fotoelementlar tijoriy raqobatbardoshligini shubha ostiga qo‘yadigan bir qator cheklovlar mavjud. Ulardan asosiysi namlik, kislorod va ultrabinafsha nurlanish ta’sirida strukturaning buzilishiga moyilligidir, bu esa ularning ish faoliyatining tez yo‘qolishiga olib kelishi mumkin. Inkapsulyatsiya texnologiyalari va to‘siq pardalari bu ta’sirlarni kamaytirishga yordam bersa-da, ular tizimga murakkablik va xarajat qo‘shadi. Organik materiallarning ichki barqarorligini molekulyar dizayn va shakllantirish orqali yaxshilash esa hali ham asosiy ilmiy-tadqiqot yo‘nalishlaridan biri bo‘lib qolmoqda.

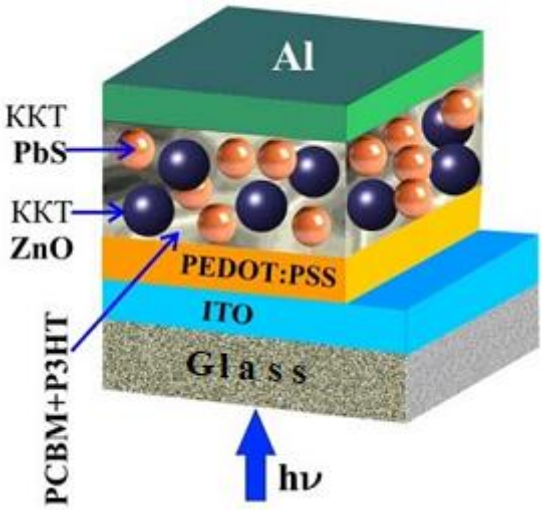
Yana bir cheklov – Si asosidagi an’anaviy fotovoltaika tizimlariga nisbatan organik modullarining ishlash muddati nisbatan qisqadir. O‘tkazilgan tadqiqotlar organik qurilmalar nazorat sharoitlarida 10000 soatdan ortiq ishlay olishini ko‘rsatgan bo‘lsa-da, haqiqiy tashqi muhitda uzoq muddatli barqarorlikka erishish bo‘yicha tadqiqotlar hali ham davom etyapti. Bundan tashqari, material partiyalaridagi farqlar va ishlab chiqarish parametrlari ta’siriga sezuvchanlik keng ko‘lamli ishlab chiqarish va sifat nazoratini murakkablashtirishi mumkin.

Ushbu qiyinchiliklarga qaramay, organik fotovoltaika texnologiyasining o‘ziga xos afzalliklari ixtisoslashtirilgan ilovalarga qiziqishni davom ettirmoqda. Bular tarkibiga binoga o‘rnatilgan fotoelektr tizimlar (BIPV), kiyiladigan elektron qurilmalar, portativ energiya manbalari va ichki muhitda energiya yig‘ish

texnologiyalari kiradi. Misol uchun, organik fotoelementlar kam yorug‘lik va tarqoq yorug‘lik sharoitida yaxshi ishlaydi, bu ularni ichki IoT qurilmalari va aqlli sensorlarda qo‘llashni qulay qiladi. Ularning estetik jihatdan moslashuvchanligi, jumladan shaffoflik va rangni sozlash imkoniyati ularni arxitekturaga integratsiya qilishda yanada jozibador qiladi.

Kvant nuqtali quyosh elementlari (quantum dot solar cells – QDSC) yorug‘likni yutuvchi material sifatida kvant nuqtalari (quantum dots – QDs) deb nomlanuvchi yarimo‘tkazgichli nanokristallardan foydalanadigan uchinchi avlod fotovoltaik texnologiyalarining yangi sinfidir. QDSC — bu fotovoltaik texnologiyaning zamonaviy shakli bo‘lib, kvant nuqtalar yordamida quyosh nurlarini elektr energiyasiga aylantiradi. Bu texnologiya an’anaviy kremniyga asoslangan quyosh panellariga nisbatan arzonroq, moslashuvchanroq va samaraliroq bo‘lishi mumkin. Ushbu nanoo‘lchamli zarralarda kvant cheklangan effektlar namoyon bo‘ladi, ya’ni ularda zaryad tashuvchilarning harakati uchta fazoviy o‘lchamda ham cheklanadi. Natijada kvant nuqtalari sozlanishi mumkin bo‘lgan elektrik va optik xususiyatlarga ega bo‘lib, ularning o‘lchamlari, tarkibi va sirt kimyoviy xususiyatlarini sozlash orqali aniq boshqarilishi mumkin.

Kvant nuqtalarining eng jozibali xususiyatlaridan biri ularning o‘lchamiga bog‘liq bo‘lgan taqiqlagan zona kengligidir. Hajmiy yarimo‘tkazgichlardan farqli o‘laroq, kvant nuqtalaridagi energetik sathlar ularning o‘lchamlariga bog‘liq holda o‘zgaradi, bu keng to‘lqin uzunliklari sohasida yutilish spektrini moslashtirishga imkon beradi. Bu kvant nuqtali quyosh elementlarini ma’lum spektral sohalar uchun loyihalash yoki quyosh energiyasini maksimal qamrab olish uchun ko‘p o‘tishli strukturalarda loyihalash imkonini beradi. Masalan, qo‘rg‘oshin sulfid (PbS), qo‘rg‘oshin selenid (PbSe), kadmiy selenid (CdSe) va indiy fosfidi (InP) kvant nuqtalari QDSC larda qulay optoelektronik xususiyatlari tufayli foydalaniladi.



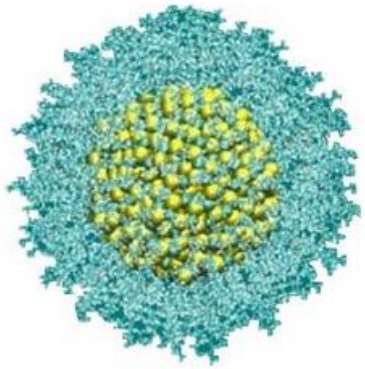
6.10-rasm. CQDPbS-PCBM-P3HT-CQDZnO geteroo‘tishga asoslangan kvant nuqtali quyosh elementi strukturasi [14].

QDSC ning asosiy tuzilishi odatda elektron va kovaklarni tashish qatlamlari orasiga biriktirilgan kvant nuqtalarining zich pardasidan tashkil topgan fotoaktiv qatlamdan iborat [14] (6.10-rasm). Elektron tashish qatlami (ETL) ko‘pincha titan dioksidi (TiO) yoki rux oksidi (ZnO) kabi materiallardan tayyorlanadi, kovaklarni

tashish qatlami (HTL) esa nikel oksidi (NiO) yoki organik polimerlar kabi materiallarni o‘z ichiga olishi mumkin. Ushbu qurilmalar kvant nuqta turiga va qo‘llanilishiga qarab, bir nechta strukturalarda, jumladan, Shottki o‘tishi, geteroo‘tishlar va sezgir tuzilmalarda ishlab chiqarilishi mumkin.

Kvant nuqtalarini kolloid usullar yordamida sintez qilish mumkin, ular eritmaga asoslangan va arzon, masshtabli ishlab chiqarishga mos keladi. Nanokristallar odatda kolloid barqarorlikni saqlash uchun organik ligandlar bilan qoplangan [15] (6.11-rasm), ammo bu ligandlar zaryad tashishga to‘sqinlik qilishi mumkin. Elektron ulanish va zaryadni ajratib olishni yaxshilash uchun ligand almashinuvi jarayonlari qo‘llaniladi, bu yerda izolyatsiyalovchi ligandlar qisqaroq yoki noorganik alternativlar bilan almashtiriladi. Quyosh elementi ishlab chiqarishda kvant nuqta pardalarini yig‘ish uchun aylantirib qoplash (spin coating), botirib qoplash (dip coating), qatlamli cho‘ktirish (layer-by-layer deposition) kabi parda hosil qilish usullari odatda qo‘llaniladi.

QDSC ning asosiy afzalliklaridan biri bu ularda kuzatiladigan multi-eksitonli generatsiya (multiple exciton generation – MEG) va tashuvchilarning ko‘payishi (carrier multiplication – CM) effektlaridir, bunda bitta yuqori energiyali foton ikki yoki undan ortiq elektron-kovak juftliklarini hosil qiladi va shu bilan an’anaviy bir o‘tishli quyosh elementlari samaradorligi uchun chegara bo‘lgan Shokkli-Kveyzer chegarasidan o‘tuvchi nazariy samaradorlikni namoyish qiladi.



6.11-rasm. Kolloid kvant nuqtaning sxematik tasviri. Binarli yarimo‘tkazgichga asoslangan yadro va stabilizator-ligand “po‘stlog‘i” (ligand qobig‘ining yuqori qismi olib tashlangan) [15].

QDSC larda yuqori chastotali fotonlarning yutilishi tashuvchilarning multieksitonli generatsiyasi tufayli kvant chiqishiga teng miqdorda kichik energiyali ikkilamchi fotonlarni ishlab chiqarish bilan kechadi. Ular o‘z navbatida yangi tok tashuvchilarni tug‘diradi. Uning mohiyati shundaki, uyg‘otilgan yuqori energiyali elektron energiyasining relaksatsiyasi bir nechta yangi elektron-kovak juftlarining tug‘ilishi bilan birga keladi. Bunda quyosh elementining samaradorligi hosil bo‘lgan bir qator ikkilamchi kam energiyali fotonlarning yutilishi hisobiga ortadi.

MEG va CM effektlari kvant nuqtalarda faqat ideallashtirilgan sharoitlarda namoyish etilgan bo‘lsada, qurilmalarda amaliy qo‘llash faol tadqiqot mavzusi bo‘lib qolmoqda.

QDSC ayniqsa, yaqin infraqizil sohada kuchli yorug‘lik yutilishini namoyish etadi, bu ularni perovskitlar yoki organik yarimo‘tkazgichlar kabi keng diapazonli materiallar bilan tandemli integratsiyasi uchun mos qiladi. Ularning qayta ishlanadigan tabiati va egiluvchan tagliklar bilan mosligi yengil, portativ va shaffof quyosh texnologiyalarida yangi ilovalarni yaratishga imkon beradi.

Biroq kvant nuqtali quyosh elementlari hali ham ularning keng tijoriy ishlab chiqarilishini cheklaydigan muammolar mavjud. Ulardan asosiysi materiallarning zaharliligi, ayniqsa qo‘rg‘oshin asosidagi QDs va qurilmalarning ekologik barqarorligi bilan bog‘liq muammolar. Yorug‘lik, kislorod va namlik ta’sirida buzilishlar ularning uzoq muddat faoliyat olib borishga jiddiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Ushbu muammolarni hal qilish uchun inkapsulyatsiya strategiyalari, sirt passivatsiyasi va ekologik jihatdan toza kvant nuqtalarini ishlab chiqish (masalan, indiy fosfidi yoki mis indiy sulfididan foydalanish) o‘rganilmoqda.

Rivojlanishning yana bir muhim yo‘li QDs ni gibrid yoki tandem konfiguratsiyalarga integratsiyalashni o‘z ichiga oladi. Masalan, QD-perovskit tandem elementlari har ikkala materialning bir-birini to‘ldiruvchi yutilish spektrlaridan foydalanishga qaratilgan bo‘lib, umumiy samaradorlikni oshirishga imkon beradi. Xuddi shunday, an’anaviy kremniy yoki yupqa parda quyosh elementlarining samaradorligini yaxshilash uchun QDs fotonni pastga siljituvchi qatlamlar sifatida o‘rganilmoqda.

6.2-§. Quyosh elementlari uchun materiallar

Quyosh elementlari (fotovoltaik elementlar) uchun ishlatiladigan materiallar quyidagi asosiy guruhlarga bo‘linadi:

1. An’anaviy yarimo‘tkazgich materiallar. Kremniy (Si) – eng ko‘p ishlatiladigan material. Uning monokristall, polikristall va amorf kremniy kabi modifikatsiyalari jahon fotovoltaika bozorida ustunlikni ta’minlamoqda.

2. Boshqa yarimo‘tkazgichli birikmalar (Yupqa pardali materiallar). CdTe (kadmiy tellurid), GaAs (galliy arsenid), CIGS ($Cu(In,Ga)Se_2$ – mis, indiy, galliy, selenid).

3. Organik materiallar (OPV – Organic Photovoltaics). Polimerlar va kichik molekulalar asosida ishlaydi.

4. Perovskitlar. Perovskit strukturali materiallar (masalan: $CH_3NH_3PbI_3$).

5. Kvant nuqtali materiallar. PbS, CdSe, InP kabi nanozarrachalar.

Quyida ulardan ayrimlari bilan batafsil tanishamiz.

Kremniy (Si) quyosh elementlarini ishlab chiqarishda eng ko‘p ishlatiladigan va katta ahamiyatga ega materialdir. IV guruh elementar yarimo‘tkazgich sifatida

kremniy elektr, optik va mexanik xususiyatlarining maqbul kombinatsiyasini, shuningdek, keng foydalanish va qayta ishlash texnologiyalarini taklif etadi.

Kremniyni fotoelektrik ilovalar uchun jozibador qiladigan asosiy xususiyati uning xona haroratida taxminan 1,12 eV taqiqlangan zona kengligiga ega bo‘lgan yarimo‘tkazuvchanlik tabiatidir. Ushbu taqiqlangan zona kengligi quyosh energiyasini o‘zgartirish uchun idealga yaqin bo‘lib, quyosh spektrining muhim qismini qamrab olish va issiqlik yo‘qotishlarini minimallashtirish imkonini beradi. Biroq kremniy to‘g‘ri emas zonali material bo‘lganligi sababli, quyosh nurini samarali yutish uchun u nisbatan qalin qatlamni talab qiladi – odatdagi kristall kremniyli quyosh elementlarida 150 dan 200 mikrometrgacha boradi. Bu to‘g‘ri zonali materiallardan farq qiladi, ular juda yupqa qatlamlarda xuddi shunday yutilishga erisha oladi.

Si bir nechta allotropik shakllarda mavjud, ammo fotoelektrik texnologiyada u asosan kristall fazada qo‘llaniladi. uchta asosiy toifa:

1. Monokristall kremniy (mono-Si). Choxralskiy metod yordamida ishlab chiqarilgan monokristall plastinalar bir kristalli ingotdan kesiladi va minimal nuqsonlar bilan bir xil atom tuzilishini namoyish etadi. Bu bir xillik zaryad tashuvchining yuqori harakatchanligiga va katta diffuziya uzunlikka olib keladi, bu esa elementning yuqori samaradorligiga yordam beradi (odatda 20-23%).

2. Polikristall kremniy (poli-Si). Eritilgan kremniyni kvadrat qoliplarga quyish va uni bir nechta kristall donalariga qotib qolishga imkon berish orqali ishlab chiqariladi. Tejamkor bo‘lishiga qaramay, poli-Si tarkibida rekombinatsiya markazlari vazifasini bajaradigan donachalar chegaralari mavjud bo‘lib, samaradorlik biroz pastroq bo‘ladi (odatda 15-18%).

3. Amorf kremniy (a-Si). Bularga qo‘shimcha ravishda kremniy amorf shaklda ma’lum yupqa pardali texnologiyalarida ham qo‘llaniladi. Amorf kremniy tartibsiz atom tuzilishiga ega va yuqori yutilish koeffitsiyenti tufayli juda yupqa qatlamlarga imkon beradi. Biroq a-Si past samaradorlikka ega (10-12%) va yorug‘lik ta’sirida degradatsiyaga ko‘proq moyil bo‘lib, bu uning keng qo‘llanilishini cheklaydi.

Bulardan tashqari kremniyning metallurgik, texnik kremniy kabi modifikatsiyalari ham mavjud. Kremniy asosidagi quyosh elementini ishlab chiqarishda tozalik juda muhim. Masalan, metallurgik kremniy (MG-Si) uchun taxminan 98-99 % ga teng.

Kremniy plastinalar funksional quyosh elementlarini hosil qilish uchun bir qator jarayonlardan o‘tadi. Bularga akslanishni kamaytirish uchun sirt teksturasi, *p-n* o‘tishni shakllantirish uchun fosfor diffuziyasi, akslanishni kamaytiruvchi qoplamani cho‘ktirish, elektr kontaktlarini ulash va himoya uchun inkapsulyatsiya (qadoqlash) kabi operatsiyalar kiradi. Passivlashtirilgan emitter va orqa yacheyka

(passivated emitter and rear cell – PERC) tuzilmalari, geteroo‘tish texnologiyasi (heterojunction technology – HJT) va tishsimon orqa kontakt (interdigitated back contact – IBC) kabi zamonaviy yutuqlar kremniyli quyosh elementlarining ishlashi sezilarli darajada yaxshiladi.

Mexanik va kimyoviy nuqtai nazardan, kremniy mustahkam, toksik bo‘lmagan va atrof-muhitning keng sharoitlarida barqarordir. Uning qattiqligi va issiqlik o‘tkazuvchanligi fotoelektrik modullarning uzoq muddatli chidamliligiga hissa qo‘shadi. Kremniy asosidagi quyosh panellari odatda 25 yildan ortiq ishlash muddatiga ega, yillik degradatsiya darajasi 0,5 % dan pastdir.

Mavjudligi nuqtai nazaridan, kremniy Yer qobig‘ida (kisloroddan keyin) ikkinchi eng ko‘p element bo‘lib, asosan qum, kvars va boshqa minerallarda kremniy dioksidi (SiO) shaklida topiladi. Yuqori toza kremniyni olish katta energiya sarfini talab qilsada, materialning ko‘pligi va qayta ishlash texnologiyasi uni keng miqyosda foydalanish uchun barqaror tanlovga aylantiradi.

Fotovoltaika bozorida kremniyning ustunligi o‘rnatilgan sanoat ekotizimlari, jumladan yetuk ta’minot zanjirlari, standartlashtirilgan ishlab chiqarish uskunalari bilan yanada mustahkamlanadi. Kremniy texnologiyasining kengayishi va innovatsiyalar hamda hajmiy iqtisodlar orqali doimiy xarajatlarni pasayishi quyosh energiyasini elektr energiyasiga tenglashtirilgan narxining barqaror pasayishiga olib keldi.

Kadmiy telluridi (CdTe) kadmiy (Cd) va tellur (Te) dan tashkil topgan aralash yarimo‘tkazgich materialdir va u yupqa pardali fotoelektrik texnologiyada markaziy rol o‘ynaydi. CdTe kristall kremniyga tijoriy nuqtai nazaridan muvaffaqiyatli muqobillardan biri bo‘lib, uning iqtisodiy samaradorligi, nisbatan sodda ishlab chiqarish jarayonlari va qulay optoelektronik xususiyatlari tufayli quyosh energiyasi qurilmalarida keng qo‘llanilmoqda.

CdTe taxminan 1,45 eV kenglikdagi to‘g‘ri zonali taqiqlangan zonaga ega, bu AM1,5 quyosh spektri ostida quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirishda nazariy jihatdan optimalga yaqindir. Ushbu optimal taqiqlangan zona CdTe ga tushadigan quyosh nurlanishining katta qismini minimal issiqlik yo‘qotishlari bilan yutish imkonini beradi va uning to‘g‘ri zonali tabiati yuqori yutilish koeffitsiyenti (10 cm^{-1} dan ortiq) qalinligi bir necha mikrometrli yupqa pardalarda yorug‘likni samarali yutish imkonini beradi. Natijada CdTe quyosh elementlarida kristall kremniyli fotoelementlarga nisbatan kamroq material sarflanadi, bu esa ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirishga olib keladi.

CdTe quyosh elementining standart strukturasi old kontakt sifatida shaffof o‘tkazuvchan oksid (TCO), masalan, ftor qo‘shilgan qalay oksidi (FTO), undan keyin kadmiy sulfidi (CdS) shisha qatlami, *p*-tur CdTe yutiluvchi qatlam va metall orqa kontakt (masalan, grafit, molibden yoki ko‘p qatlamli qotishma) dan iborat.

CdS qatlami CdTe bilan *p-n* o‘tishni hosil qiladi, bu esa fotogeneratsiyalangan elektron-kovak juftliklarini ajratish va ularni mos elektrodlarda yo‘naltirish imkonini beradi.

CdTe modullari uchun ishlab chiqarish jarayoni odatda kichik qadamli sublimatsiya (close-spaced sublimation – CSS), bug‘ tashuvchisi cho‘kishi (vapor transport deposition – VTD) yoki ionli purkash orqali cho‘ktirish (sputtering) kabi yuqori samarali vakuumli cho‘kdirish usullarini o‘z ichiga oladi. Ushbu usullar quvvatni gigavattlar miqyosida ishlab chiqarishni osonlashtirib, katta yuzalarda bir xil o‘lchamda parda yotqizish imkonini beradi. CdTe modullari ko‘pincha shisha tayyorlash, yarimo‘tkazgichli qatlamni joylashtirish, elementlarni ulash uchun lazerli yozish, inkapsulyatsiya va ramkalarni o‘z ichiga olgan to‘liq integratsiyalangan jarayonda ishlab chiqariladi.

Biroq CdTe texnologiyasi ba’zi sezilarli qiyinchiliklarga duch keladi. Asosiy muammolardan biri og‘ir metal bo‘lgan kadmiyning toksikligi bo‘lib, undan to‘g‘ri foydalanilmasa yoki utilizatsiya qilinmasa, atrof-muhit va sog‘liq uchun xavf tug‘diradi. Ishlab chiqaruvchilar ushbu xavfni qat’iy inkapsulyatsiya (qadoqlash) va faoliyat muddati oxirida qayta ishlash dasturlari orqali kamaytiradi. Tellurning ishlatilishi yana bir cheklovdir. Garchi u misni tozalashda qo‘shimcha mahsulot sifatida olinsada, uning global ta’minoti cheklangan va CdTe ga bo‘lgan talab ortib borishida muammoga aylanishi mumkin.

So‘nggi tadqiqotlar CdTe quyosh elementlarining samaradorligi va barqarorligini oshirishga qaratilgan. Bularga muqobil bufer qatlamlarini (masalan, ZnSe, SnO) o‘rganish, shaffof orqa kontaktlarni ishlab chiqish va yorug‘likdan samarali foydalanish uchun tandemli tuzilmalarini birlashtirish kabilar kiradi. Selen (CdTeSe) bilan qotishma kabi passivatsiyalar yutilish spektrini kengaytirish va nurlanishsiz rekombinatsiyani kamaytirish uchun qo‘llaniladi.

CdTe quyosh modullari keng ko‘lamli yer usti tizimlarida, ayniqsa quyosh nurlanishi kuchli bo‘lgan hududlarda keng qo‘llaniladi. Ular dala sharoitida o‘zining ishonchliligi isbotlagan va ba’zi boshqa yupqa pardali texnologiyalarga nisbatan past degradatsiya tezligini namoyon qiladi. First Solar kabi kompaniyalar CdTe fotoelektrik tizimlarni rivojlantirishda, ishlab chiqarishni bir necha gigavattlar darajasiga ko‘tarishda va global qayta tiklanuvchi energiya ta’minotiga sezilarli hissa qo‘shishda muhim rol o‘ynadi.

Galliy arsenid (GaAs) $A^{III}B^{V}$ birikmali yarimo‘tkazgich bo‘lib, uzoq vaqtdan beri o‘ziga xos elektrik va optoelektronik xususiyatlari bilan tanilgan va bu xususiyatlar uni yuqori samarali quyosh elementi texnologiyalarida asosiy materialga aylantiradi. Kremniyga nisbatan qimmat va ishlab chiqarish murakkab bo‘lsada, GaAs samaradorlik, radiatsiyaga chidamlilik va maxsus ilovalar uchun,

xususan, aerokosmik va konsentratorli fotoelektrik tizimlarda samaradorlik jihatdan ko‘p afzalliklarga ega.

GaAs xona haroratida taxminan 1,42 eV kenglikdagi to‘g‘ri zonali taqiqlangan zonaga ega, bu quyosh energiyasini yakka o‘tishli o‘zgartirishda optimal qiymatga yaqin hisoblanadi. Uning ushbu to‘g‘ri taqiqlangan zonasi yuqori yutilish koeffitsiyentlariga imkon beradi, bu esa fotonlarni qamrab olishni buzmasdan juda yupqa faol qatlamlardan (bir necha mikrometr) foydalanish imkonini beradi. Bu xususiyat yuqori qisqa tutashuv tok zichligiga olib keladi va GaAs elementlarining energiya o‘zgartirish samaradorligiga hissa qo‘shadi.

GaAs quyosh elementlarining eng diqqatga sazovor xususiyatlaridan biri ularning yuqori samaradorligidir. Laboratoriya sharoitida yakka o‘tishli GaAs elementlari 29 % dan yuqori samaradorlikka erishgan.

GaAs quyosh elementining asosiy tuzilishi odatda kuchli legirlangan *p*-tur yoki *n*-tur taglik, kuchsiz legirlangan faol yutuvchi qatlam va AlGaAs yoki GaInP kabi $A^{III}B^{V}$ birikmalari panjarasiga mos keladigan shisha/kontakt qatlamni o‘z ichiga oladi. Ushbu tuzilmalar qatlam qalinligi, tarkibi va legirlash ustidan atom darajasidagi nazoratni ta’minlaydigan metall-organik kimyoviy bug‘li cho‘ktirish (metal-organic chemical vapor deposition – MOCVD) yoki molekulyar nurli epitaksiya (molecular beam epitaxy – MBE) kabi epitaksial usullar yordamida o‘stiriladi. Natijada paydo bo‘lgan geteroo‘tish strukturasi minimal rekombinatsiya va aniq energetik zonalarni moslashtirishga imkon beradi.

GaAs asosidagi quyosh elementini ishlab chiqarishning muhim jihati taglikni qayta ishlatishdir. GaAs plastinalari qimmat bo‘lganligi sababli, ishlab chiqaruvchilar ko‘pincha taglikdan yupqa fotoelektrik qatlamni olib tashlash uchun epitaksial ko‘chirish (ajratish) (epitaxial lift-off – ELO) kabi usullardan foydalanadi, bu esa taglikni qayta ishlashga imkon beradi. Ushbu yondashuv moddiy xarajatlarni sezilarli darajada kamaytiradi va GaAs fotoelektrik texnologiyalarning iqtisodiy maqsadga muvofiqligini oshiradi.

GaAs quyosh elementlari ekstremal ekologik sharoitlarda mukammal ishlaydi. Radiatsiyaga yuqori chidamliligi tufayli ular sun’iy yo‘ldoshlar, kosmik zondlar va yuqori balandlikda uchuvchi uchuvchisiz dronlarni quvvatlantirish uchun eng maqbul material hisoblanadi. Ular shuningdek, past harorat koeffitsiyentiga ega (odatda -0,1 %/°C dan -0,2 %/°C gacha).

Konsentratorli fotoelektrik tizimlarda GaAs elementlari ko‘pincha ko‘p o‘tishli konfiguratsiyalarda qo‘llaniladi. Bunday tizimlarda linzalar yoki ko‘zgular yordamida quyosh nuri bir necha yuz barobargacha konsentratsiyalanadi. GaAs qurilmalari yuqori fotonlar oqimiga (yorug‘lik intensivligiga) chidamli bo‘lganligi uchun, ularning ishlashi sezilarli darajada yomonlashmaydi. Shu sababli ular kichik

maydon birligida maksimal quvvat olish juda muhim bo‘lgan konsentratorli fotoelektrik tizimlar uchun juda mos keladi.

Mis-indiy-galliy-selenid (copper indium gallium selenide – CIGS) va uning yaqin turi **mis-indiy-selenid (copper indium selenide – CIS)** yupqa pardali fotoelektrik tizimlar sinfiga mansub muhim materiallardir. Bu I-III-VI guruhli birikmalar to‘g‘ri taqiqlangan zonali yarimo‘tkazgichlar bo‘lib, yuqori yutilish koeffitsiyenti bilan ajralib turadi, bu ularni quyosh energiyasini samarali o‘zgartiruvchi materiallarga aylantiradi.

CIGS mis (Cu), indiy (In), galliy (Ga) va selen (Se) dan tashkil topgan to‘rtlamchi qotishma bo‘lib, CuInGaSe kimyoviy formulaga ega. Galliyning qo‘shilishi taqiqlangan zona kengligini taxminan 1,0 eV (sof SIC) dan 1,7 eV gacha (yuqori Ga tarkibi bilan) sozlash imkonini beradi. Optimal qurilma samaradorligi odatda 1,1÷1,3 eV oralig‘idagi taqiqlangan zona kengligi bilan erishiladi, bu esa kuchli yorug‘lik yutilishi va yuqori chiqish kuchlanishi orasidagi muvozanatni ta’minlaydi.

CIGS va CIS materiallari to‘g‘ri zonali yarimo‘tkazgichlar bo‘lib, ya’ni ular odatda qalinligi 1-2 mikrometrgacha bo‘lgan yupqa pardada yorug‘likni samarali yutishi mumkin. Ularning yuqori yutilish koeffitsiyenti (10 cm^{-1}) bu qisqa masofada quyosh spektrini deyarli to‘liq qamrab olish imkonini beradi. Bu ularni yengil, egiluvchan va kam materialli quyosh modullari uchun mos qiladi.

CIGS quyosh elementining odatiy qurilma strukturasi orqa kontaktni (ko‘pincha shisha yoki metall folga ustida joylashgan molibden), CIGS yutuvchi qatlamini, bufer qatlamini (odatda kadmiy sulfid, CdS) va shaffof o‘tkazuvchan oksid qatlamini (TCO), masalan, sink oksidi yoki indiy qalay oksidini o‘z ichiga oladi. CdS *p*-tur CIGS yutuvchi bilan geteroo‘tish hosil qilib, zaryadni ajratishni osonlashtiradi. Kadmiydan foydalanishni oldini olish uchun Zn(O,S) yoki InS kabi muqobil bufer qatlamlari ishlab chiqilmoqda.

CIGS va CIS quyosh elementlari uchun ishlab chiqarish texnikasi birgalikda bug‘lanish (co-evaporation), purkash (sputtering) va purkash asosida bosib chiqarish (inkjet printing) va purkash orqali qoplash (spray coating) kabi eritmaga asoslangan yondashuvlarni o‘z ichiga oladi. Birgalikda bug‘lantirish (co-evaporation) — bu jarayonda elementar boshlang‘ich materiallar bir vaqtning o‘zida qizdirilgan taglikda bug‘lantiriladi; bu esa tarkibni aniqlik bilan boshqarish imkonini beradi va laboratoriya sharoitida 23% dan yuqori samaradorlikka ega quyosh elementlarini yaratishda qo‘llaniladi.

CIGS va CIS materiallari ham moslashuvchan va yengil ilovalarga yaxshi yordam beradi. Faol qatlamlarni polimer yoki metall folga tagliklariga joylashtirish orqali ishlab chiqaruvchilar portativ elektronika, binoga o‘rnatilgan fotovoltaikalar

(BIPV), transport tizimlari va bo‘sh joy cheklangan muhitda foydalanish uchun ideal egiluvchan quyosh modullarini ishlab chiqarishi mumkin.

CIGS/CIS texnologiyalari uchun qiyinchiliklarga indiy va galliyning nisbiy tanqisligi va yuqori narxi kiradi, bu esa keng miqyosda joylashtirishga to‘siq bo‘lishi mumkin. Bundan tashqari, ba’zi bufer qatlamlarida kadmiy mavjudligi ekologik muammolarni keltirib chiqaradi va kadmiysiz muqobillarga o‘tishga harakat qiladi. Qo‘shimcha muammolarga kompozitsion bir xillikka erishishning murakkabligi va ishlab chiqaruvchanlik va modul rentabelligiga ta’sir ko‘rsatishi mumkin bo‘lgan nuqsonlar zichligini nazorat qilish kiradi.

So‘nggi tadqiqotlar yorug‘likni boshqarishni yaxshilashga, interfeyslarni passivlashtirishga va qurilma ishlashidagi donacha chegaralarining rolini kamaytirishga qaratilgan. CIGSni boshqa materiallar bilan birlashtiruvchi tandem tuzilmalari, shuningdek, ikki tomonlama dizaynlar va takomillashgan inkapsulyatsiya ham ishlab chiqilmoqda.

CIGS va CIS modullari uy-joy va tijorat bozorlarida, moslashuvchanligi va chidamliligi tufayli mobil va tarmoqdan tashqari tizimlarda o‘ziga xos ilovalar bilan keng tarqalgan. Solar Frontier, Avancis va MiaSoie kabi kompaniyalar CIGS asosidagi mahsulotlarni tijoratlashtirdi va texnologiyaning raqobatbardoshligini oshirishga hissa qo‘shdi.

Mis indiy galliy selenid (CIGS) va mis indiy selenid (CIS) yupqa pardali quyosh elementlari uchun istiqbolli materiallar bo‘lib, yuqori samaradorlik, taqiqlangan zona kengligining sozlanishi va mexanik ko‘p qirralilikni ta’minlaydi. Materiallarning noyobligi va atrof-muhitga ta’siri bilan bog‘liq muammolar saqlanib qolsa-da, materiallar muhandisligi, ishlov berish texnikasi va qurilmalar arxitekturasidagi davom etayotgan innovatsiyalar fotovoltaik texnologiyalarning rivojlanayotgan landshaftida ularning doimiy dolzarbligini qo‘llab-quvvatlaydi.

Gibrid organik-noorganik perovskitlar masalan, metilammoniy qo‘rg‘oshin yodid (methylammonium lead iodide – CH_3NH_3PbI yoki MAPbI) misolida keltirilgan fotovoltaik va optoelektronika sohasida inqilob yaratgan yangi materiallar sinfidir. Bu perovskitlar umumiy ABX formulasiga ega, bunda “A” organik kation (masalan, metilamoniy yoki formamidiniy), “B” metall kationi (odatda Pb^2) va “X” galogenid anioni (I, Br yoki Cl). Ularning o‘ziga xos strukturaviy va elektrik xususiyatlari, ishlov berish qulayligi bilan bir qatorda, quyosh elementlarining ishlashida tez o‘sishga olib keldi va keng ilmiy qiziqish uyg‘otdi.

Gibrid perovskitlarning kristall tuzilishi burchaklari umumiy bo‘lgan BX oktaedrlarining uch o‘lchamli tarmog‘idan iborat bo‘lib, A-holatdagi organik kation ularning orasidagi bo‘shliqlarni egallaydi. CH_3NH_3PbI (methylammoniy) birikmasida MA kationlar qo‘rg‘oshin-yodid ramkasini barqarorlashtirib, haroratga

qarab kubik yoki tetragonal panjarani hosil qiladi. Bu gibrid tuzilma organik birikmalarning ishlov berish qulayligi va sozlanish imkoniyatlarini noorganik ramkalarning barqarorligi hamda samarali zaryad tashish xususiyatlari bilan uyg‘unlashtiradi.

MAPbI va unga o‘xshash materiallar quyosh energiyasi ilovalari uchun xos bo‘lgan ajoyib optoelektron xususiyatlarga ega. Ular quyidagilarni o‘z ichiga oladi:

- Taxminan 1,55 eV ga teng to‘g‘ri zonali taqiqlangan zonaga ega, bu yakka o‘tishli quyosh elementlari uchun ideal hisoblanadi.
- Kuchli optik yutilish, bu yupqa qatlamlarda (300–600 nm) deyarli to‘liq foton yig‘ilishini ta’minlaydi.
- Tashuvchilarning yuqori harakatchanligi va katta diffuziya masofalari (~1 μm), bu rekombinatsion yo‘qotishlarni kamaytiradi.
- Past eksiton bog‘lanish energiyasi, bu xona haroratida samarali zaryad ajralishini ta’minlaydi.
- Nuqsonlarga chidamlilik — ya’ni, nuqsonli holatlar xizmat faoliyatga jiddiy ta’sir ko‘rsatmaydi.

Gibrid perovskitlarning asosiy afzalliklaridan biri shundaki, ular eritma asosidagi va past haroratli ishlab chiqarish jarayonlari bilan mos keladi. MAPbI kabi materiallar oddiy usullar — masalan, aylantirib qoplash (spin coating), pichoq qoplamasi (blade coating), siyoh purkashli bosib chiqarish (inkjet printing) orqali qoplanishi mumkin, bu esa ularni keng maydonli, egiluvchan va arzon quyosh panellari ishlab chiqarish uchun qulay qiladi.

Taqiqlangan zona kengligini sozlash imkoniyati — masalan, galogenni (Br yoki Cl bilan) yoki organik kationni (metilammoniy o‘rniga formamidiniy) almashtirish orqali — bu materiallarning tandem elementlar va rangni tanlaydigan qurilmalarda qo‘llanish doirasini yanada kengaytiradi.

Gibrid perovskitlar 2009-yildan boshlab fotovoltaikada qo‘llanila boshlaganidan beri, energiyani aylantirish samaradorligi 25% dan ortiq natijalarga erishgan.

Shunga qaramay, CH_3NH_3PbI kabi gibrid perovskitlar atrof-muhit omillariga — namlik, kislorod, issiqlik va ultrabinafsha nurlanishiga sezgirdir. Degradatsiya (yemirilish) organik kationning parchalanishi, galogen ionlarining harakati yoki materiallar orasidagi chegaralarda yuz beradigan reaksiyalar natijasida yuzaga kelishi mumkin. Bu muammolarga yechim sifatida tadqiqotchilar inkapsulyatsiya (qadoqlash) texnologiyalarini, tarkibiy muhandislikni (masalan, MA o‘rniga FA yoki Cs ishlatish) va qo‘shimcha modda orqali passivatsiya usullarini o‘rganib, strukturaviy barqarorlik va qurilma umrini uzaytirish ustida ishlamoqdalar.

CH_3NH_3PbI kabi gibrid organik-noorganik perovskitlar materialshunoslik sohasida inqilobiy yangilik hisoblanadi. Ularning yuqori samaradorlik, arzon ishlab

chiqarish jarayonlari va strukturaviy sozlanish imkoniyatlari kabi noyob kombinatsiyasi ularni yangi avlod fotovoltaik va optoelektron texnologiyalarining ilg‘or safiga olib chiqmoqda.

Barqarorlik va zaharlilik bilan bog‘liq muammolarni hal qilish uchun hali qo‘shimcha izlanishlar talab etilsada, tadqiqot va innovatsiyalar sur’atining tezligi perovskit asosidagi quyosh elementlari va boshqa ilovalarni tijoratlashtirish yo‘lida izchil taraqqiyotni ta’minlamoqda.

6.3-§. Quyosh energetikasida zamonaviy innovatsiyalar va istiqbolli materiallar

Zamonaviy gelioenergetika noan’anaviy innovatsion yondashuvlarni talab qiladi, holbuki bularsiz u uglevodorod energetikasi bilan raqobatlasha olmaydi. Quyosh energetikasining asosiy komponenti quyosh elementi bo‘lib, uning samaradorligi uchun javobgardir. Quyosh elementlarining yuqori samaradorligiga quyidagilar orqali erishish mumkin:

1. Ishlatiladigan materiallarning arzonlashtirish va texnologiyani soddalashtirish (bu quyosh elementlarining tannarxini arzonlashishiga olib keladi);
2. Xizmat muddatini oshirish;
3. Samarali yutiladigan yorug‘lik spektrini kengaytirish;
4. Foydali ish koeffitsiyenti (FIK) ni oshirish.

Shuning uchun quyosh energetikasi sanoati samaradorlikni oshirish, xarajatlarni kamaytirish va qo‘llanilish sohalarini kengaytirish maqsadida quyosh elementlarini ishlab chiqarish uchun innovatsion texnologiyalar va turli istiqbolli materiallardan foydalanishni taqozo qiladi.

Quyida aynan shunday texnologiya va materiallar haqida so‘z yuritiladi.

Tandem quyosh elementlari, ya’ni ko‘p o‘tishli (multijunction) yoki ko‘p kontaktli (multi-terminal) quyosh elementlari, yuqori fotovoltaik samaradorlikka erishish yo‘lida eng istiqbolli innovatsiyalardan biri hisoblanadi. Ushbu qurilmalar yakka o‘tishli quyosh elementlarining samaradorligi bo‘yicha asosiy chegarasi — Shockley-Queisser chegarasini yengib o‘tish uchun ishlab chiqilgan bo‘lib, o‘zaro to‘ldiruvchi energiya oralig‘iga ega bo‘lgan bir nechta qatlamlardan iborat bo‘ladi. Har bir qatlam (yoki kichik element) quyosh spektrining muayyan qismini yutib, uni elektr energiyasiga aylantirishga mo‘ljallangan. Bu esa tushayotgan quyosh nurlanishini to‘liqroq qamrab olishni ta’minlaydi.

Tandem strukturasida yuqori qatlam qisqa to‘lqinli (yuqori energiyali) fotonlarni ushlab qoladi, past energiyali fotonlar esa quyi qatlamlarga o‘tishiga imkon beradi. Bu issiqlikka aylanish (termalizatsiya) va yutilmagan energiya tufayli yo‘qotishlarni kamaytirib, nazariy jihatdan yuqoriroq samaradorlikka erishish

imkonini beradi. Elektrik konfiguratsiyasiga qarab, tandem elementlar monolitik (ikki kontaktli), mexanik yig‘ilgan (to‘rt kontaktli) yoki oraliq qaytargichlar yoki filtrlar orqali optik bog‘langan bo‘lishi mumkin. Monolitik tandem elementlar eng ixcham va sanoatga mos variant bo‘lsa-da, ularning subelementlari orasi tokning aniq muvofiqligini ta’minlashni talab qiladi.

Hozirgi kunda faol ishlab chiqilayotgan eng muhim tandem konfiguratsiyasi bu perovskit-kremniy tandem quyosh elementidir. Bu konstruksiyada keng taqiqlangan zonaga (1,7–1,8 eV) ega perovskitli yuqori qatlam odatiy kristall kremniy (1,1 eV) asosidagi quyi qatlamga qoplangan bo‘ladi. Bunday birikma perovskitlarning yuqori samaradorligini va taqiqlangan zona kengligini sozlash imkoniyatlarini kremniyning barqarorligi va sanoatdagi yetukligi bilan birlashtiradi. Perovskit-kremniy tandem quyosh elementlari 32% dan ortiq tasdiqlangan energetik samaradorlikka erishgan.

Perovskit-kremniy tandemlaridan tashqari, boshqa turdagi tandem kombinatsiyalar ham faol o‘rganilmoqda:

- **$A^{III}B^{V}$ guruhli ko‘p o‘tishli elementlar**: GaInP, GaAs, GaInAs kabi materiallar va ularning qotishmalarini o‘z ichiga oladi; ular 47% dan ortiq rekord samaradorlikka erishgan.

- **To‘liq perovskit tandemlar**: Bu qurilmalarda turli taqiqlangan zona kengligiga ega ikkita perovskit tarkibi yuqori va quyi yacheykalar sifatida ishlatiladi. Ular yuqori samaradorlik salohiyatiga ega bo‘lib, past haroratda ishlab chiqarish va egiluvchanlikni saqlab qoladi.

- **Perovskit–CIGS tandemlar**: Keng taqiqlangan zonaga ega perovskitlarni tor taqiqlangan zonali CIGS (mis–indiy–galliy–selenid) yutuvchi qatlamlar bilan birlashtirish orqali spektrdan maksimal foydalanish va mexanik jihatdan yaxshiroq moslik ta’minlanadi.

Tandem quyosh elementlarini ishlab chiqishda asosiy texnik muammolar quyidagilardir:

- **Tokning muvofiqligi va optik yo‘qotishlar**: Monolitik dizaynlarda kichik elementlar orasidagi tok ishlab chiqarishdagi nomuvofiqlik umumiy samaradorlikni cheklashi mumkin.

- **Yuza interfeyslarini muhandislik yo‘li bilan yaxshilash**: Oraliq qatlamlar va zaryad tashuvchi qatlamlar sifatini oshirish rekombinatsion va qarshiliklarda yo‘qotishlarni kamaytirish uchun muhimdir.

- **Barqarorlik va mustahkamlik**: Ayniqsa perovskitlar ishlatilgan tandemlar issiqlik, namlik va yorug‘lik ta’sirida degradatsiyaga uchramasligi kerak.

Hozirgi tadqiqotlar ilg‘or zaryad tashuvchi qatlamlar, mustahkam inkapsulyatsiya (qadoqlash) usullari va keng ko‘lamli ishlab chiqarish texnologiyalariga (masalan, pichoq bilan qoplash, bug‘li cho‘ktirish va siyoh

asosidagi gibrid texnikalar) qaratilgan. Oraliq qatlamlarni maxsus optik va elektr xossalarga ega qilish ham yuqori samaradorlikka erishishda muhim ahamiyatga ega.

Tijoratlashtirish jihatdan tandem quyosh elementlari tobora katta e'tibor qozonmoqda. Bir qancha startaplar va yirik quyosh energetikasi kompaniyalari perovskit–kremniy tandemlari uchun tajriba ishlab chiqarish liniyalariga sarmoya kiritmoqda. Dastlabki modullar yuqori samaradorlikni ko'rsatmoqda va arzon ishlab chiqarishga olib keluvchi yo'llarni namoyon etmoqda. Mavjud kremniy ishlab chiqarish infratuzilmasiga perovskit qoplama texnologiyalarini integratsiya qilish imkoniyati ushbu innovatsiyani sanoat uchun juda jozibador qiladi.

Organik fotovoltaika (OPV) keyingi avlod quyosh energiyasi ilovalari uchun istiqbolli nomzod sifatida rivojlanishda davom etmoqda. Bu sohada organik yarimo'tkazgichlar haqidagi chuqurroq tushunchalar va molekulyar strukturadagi yutuqlar muhim rol o'ynamoqda. So'nggi yillarda olib borilgan innovatsion tadqiqotlar organik qurilmalarining samaradorligi, barqarorligi va ommaviy ishlab chiqarish imkoniyatlarini sezilarli darajada oshirib, organik quyosh elementlarini egiluvchan elektronika, portativ energiya manbalari va binolarga o'rnatiladigan fotovoltaik tizimlar (BIPV) kabi yangi bozorlarda jiddiy raqobatchiga aylantirmoqda.

Zamonaviy organik fotovoltaika texnologiyasi rivojida muhim yutuqlardan biri fullerenga asoslangan akseptorlardan no-fulleren akseptorlarga (non-fullerene acceptors – NFAs) o'tish bo'ldi. An'anaviy fulleren hosilalari, masalan, [6,6]-fenil-C61-butirik kislota metil efiri (PCBM) cheklangan sozlanish va barqarorlikni taklif qilgan. Aksincha, ITIC, Y6 va ularning hosilalari kabi no-fulleren akseptorlar yaqin infraqizil sohada yorug'likning samarali yutilishini, morfologik barqarorlikni va sozlanadigan energetik sathlarni ta'minlaydi, bu esa qurilma samaradorligini sezilarli darajada oshiradi. No-fulleren akseptorlarning joriy etilishi natijasida bitta tugunli organik qurilmalarning quvvatni aylantirish samaradorligi (power conversion efficiency – PCE) 18 % dan oshdi.

Organik fotovoltaika materiallarini takomillashtirishda molekulyar muhandislik markaziy rol o'ynaydi. Donor va akseptorlarning kimyoviy tuzilmalarini o'zgartirish orqali tadqiqotchilar energetik sathlarni muvofiqlashtirish, yorug'lik yutilishini, kristallik darajasini va yadro gibrid zonasidagi fazaviy ajralishni optimallashtira oladi. Yangi donor-akseptor bog'langan polimerlar va kichik molekulalarning sinfi zaryad tashish qobiliyatini, eksitonlar dissotsatsiyasini va zaryad harakatchanligini yaxshilab, yuqori to'ldirish koeffitsiyentlari va salt yurish kuchlanishiga erishishda hissa qo'shadi.

Qurilma strukturasi ham sezilarli yangiliklarga uchradi. Tandem organik fotovoltaikalar – bir-birini to'ldiruvchi yutilish spektriga ega ikki yoki undan ortiq kichik elementlar ustma-ust joylashtirilgan tuzilmalar – yakka o'tishli qurilmalar

imkoniyatlarini oshirish maqsadida faol ishlab chiqilmoqda. Bunday tuzilmalar quyosh spektrini kengroq qamrab olib, nazariy jihatdan 20% dan yuqori samaradorlikka erisha oladi.

Yana bir muhim yo‘nalish organik fotovoltaika qurilmalarining ekologik barqarorligini va xizmat muddatini oshirish hisoblanadi. Strategiyalar takomillashgan himoya pardalari bilan qadoqlash, ichki barqaror organik yarimo‘tkazgichlardan foydalanish, barqarorlovchi qo‘shimchalar yoki oraliq qatlamlarni qo‘shishni o‘z ichiga oladi. Yaqinda ishlab chiqilgan qurilmalar 10 000 soatdan ortiq standart ish sharoitlarida ishlash muddatini ko‘rsatdi, bu esa oldingi avlod qurilmalariga nisbatan sezilarli yutuqdir.

Organik fotovoltaika texnologiyasini tijoriy joriy etishda masshtablilik muhim omil hisoblanadi. Eritmaga asoslangan, rulondan rulonga (roll-to-roll) ishlab chiqarish texnologiyalari – masalan, tirqishli qoplash (slot-die coating), chuqur bosib chiqarish (gravure printing) va purkagichli qoplash (spray coating) katta maydonli organik fotovoltaika modullarini yuqori birjinslilik va ishlab chiqaruvchanlik bilan ishlab chiqarish uvhun takomillashtirildi. Bu usullar egiluvchan, yengil va egri sirtlar hamda nostandart shakllarga mos quyosh panellarini ishlab chiqarishga yo‘l ochadi.

Kvant nuqtali quyosh elementlari (QDSC) quyosh nurlanishini fotoelektrik effekt orqali elektrga aylantirishda innovatsiyalarning istiqbolli yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Ular kvant-o‘lchamli effektlari orqali an’anaviy materiallar uchun samaradorlik chegaralaridan oshib o‘tish imkoniyatini beradi. So‘nggi yillarda materiallar sintezi, sirt passivatsiyasi va qurilma integratsiyasi bo‘yicha erishilgan yutuqlar kvant nuqta asosidagi fotoelektrik texnologiyalarining ishlash ko‘rsatkichlarini va amaliy qo‘llanilishini sezilarli darajada yaxshiladi. Bu innovatsiyalar QDSC larni kelajak avlod quyosh energiyasidan foydalanish texnologiyalari uchun raqobatbardosh platformaga aylantirmoqda.

QDSClar ishlashining asosiy konsepsiyasi yarimo‘tkazgich nanokristallarning o‘lchamlariga mos ravishda sozlanadigan elektrik xususiyatlariga asoslanadi. Kvant nuqtalar diametrini o‘zgartirish orqali ularning taqiqlangan zona kengligini (bandgap) sozlash mumkin bo‘lib, bu esa quyosh spektrining ma’lum sohalarini samarali yutishga imkon beradi. Natijada keng to‘lqin uzunligi diapazonini qamrab oluvchi va spektral foydalanishni maksimal darajaga yetkazadigan QDSClar ishlab chiqilishi mumkin. Hozirgi tadqiqotlar yuqori darajada bir xillikka ega kvant nuqtalarni sintez qilishga, ularning taqiqlangan zonasini aniq nazorat qilishga va energiya yo‘qotishiga olib keluvchi rekombinatsiya holatlarini kamaytirishga qaratilgan.

Sirt kimyosi sohasidagi innovatsiyalar kvant nuqtalarining samaradorligini oshirishda markaziy rol o‘ynamoqda. Kengaytirilgan ligand almashish strategiyalari

natijasida uzun zanjirli, izolyatsiyalovchi ligandlar qisqa yoki noorganik ligandlar bilan almashtirilib, kvant nuqtalar orasidagi zaryad tashish va elektron bog‘lanish yaxshilanmoqda. Bundan tashqari, nurlanishsiz rekombinatsiyani kamaytirish va fotobarqarorlikni oshirish uchun qobiq qatlamlari (masalan, PbS/CdS yoki InP/ZnS kabi yadro/qobiq tuzilmalari) yordamida sirt passivatsiyasi usullari qo‘llanilmoqda.

QDSClar sohasidagi eng istiqbolli yo‘nalishlardan biri — multieksitonli generatsiya (multiple exciton generation – MEG) effektidir. Bu mexanizmda bitta yuqori energiyali foton ikki yoki undan ortiq elektron-teshik juftliklarini hosil qilishi mumkin. Garchi MEG bir nechta kvant nuqta tizimlarida eksperimental tarzda namoyish etilgan bo‘lsa-da, uni samarali qurilmalarga to‘liq integratsiya qilish hanuz murakkab masala bo‘lib qolmoqda. Shunga qaramay, bu mexanizm bir yo‘nalishli (single-junction) fotoelementlar uchun belgilangan Shockley-Queisser chegarasidan oshib ketuvchi energiya aylantirish samaradorligiga erishish imkoniyatini beradi.

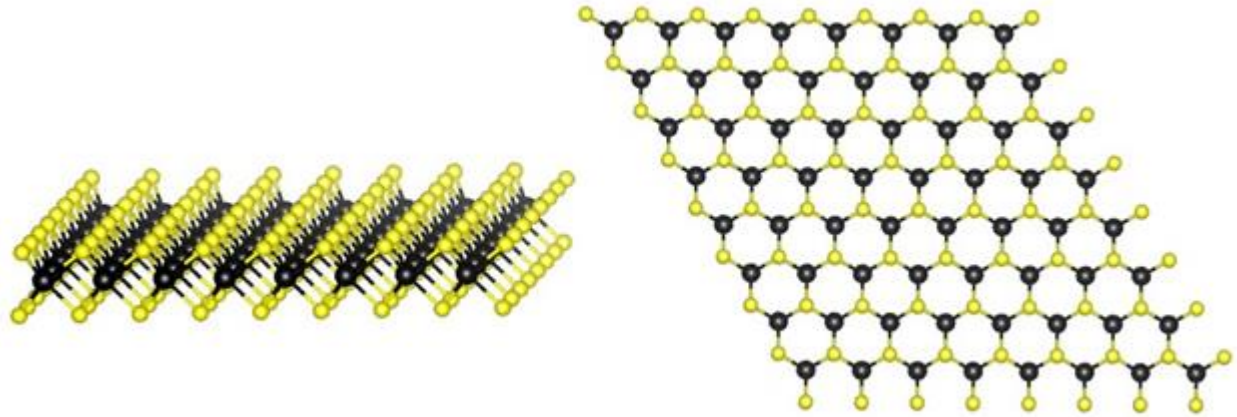
Qurilma arxitekturalari ham maksimal ishlash ko‘rsatkichlariga erishish uchun takomillashtirilmoqda. Yangi dizaynlar orasida depletlangan geterotugunlar, Shottki tugunlar, shuningdek, kvant nuqta-organik va kvant nuqta-perovskit gibrid konfiguratsiyalari mavjud. Bunday gibrid tizimlar kvant nuqtalarning sozlanadigan yutuvchanligi va yuqori tashuvchi ko‘paytirish xususiyatlarini organik yoki perovskit materiallarning yuqori zaryad tashish samaradorligi va mexanik egiluvchanligi bilan uyg‘unlashtirishga intiladi. Ayniqsa, bu strukturalar yengil, egiluvchan quyosh panellari va kiyiladigan energiya tizimlari uchun istiqbolli hisoblanadi.

Materiallar xilma-xilligi ham muhim innovatsion yo‘nalishdir. Dastlabki QDSC tadqiqotlarida o‘zining a’lo darajadagi optoelektron xususiyatlari sababli qo‘rg‘oshinli xalkogenidlar (PbS, PbSe) ustunlik qilgan. Biroq, qo‘rg‘oshinning toksikligi haqida xavotirlar ekologik xavfsiz alternativalarni ishlab chiqishga turtki bo‘ldi. Indiy fosfid (InP), mis-indiy sulfidi (CIS) va uglerod nuqtalari asosidagi kvant nuqtalari faol o‘rganilmoqda. Ushbu materiallar kvant cheklov effektining ijobiy jihatlarini saqlab qolgan holda xavfsizlik va barqarorlikni oshirishga xizmat qiladi.

QDSClar integratsiyasi keng ko‘lamli ishlab chiqarishga moslashgan. Eritma asosida tayyorlanadigan kvant nuqtalarini spin-qoplama, qatlamma-qatlam yig‘ish, siyoh purkash va purkash usullari orqali joylashtirish mumkin. Bu texnologiyalar rulonma-rulon ishlab chiqarishni qo‘llab-quvvatlaydi va QDSClarni egiluvchan substratlarga integratsiyalash imkonini beradi. Atrof-muhitga chidamlilikni oshirish uchun to‘siq plyonkalar va ultrabinafsha nurlarga barqaror polimerlar yordamida inkapsulyatsiya strategiyalari ham ishlab chiqilmoqda.

Yaqinda ishlab chiqilgan QDSC prototiplari 13–14 foizdan ortiq energiya aylantirish samaradorligiga erishdi. Qo‘llanilish jihatidan QDSClar binoga integratsiyalashgan quyosh elementlari (BIPV), ichki muhitda ishlatiladigan fotovoltaik tizimlar va mobil energiya yechimlari uchun ayniqsa mos keladi. Ularning sozlanadigan tashqi ko‘rinishi, shaffofligi va shakli ularga turli ilovalarda moslashuvchanlik beradi. Infraqizil nurlarga sezgirligi tufayli ular issiqlikdan elektr olish (termofotovoltaika) va fotodetektorlar kabi maxsus sohalarda ham qo‘llanishi mumkin.

Ikki o‘lchamli (2D) materiallar o‘ziga xos tuzilishi, elektrik va optik xususiyatlari tufayli fotoelektrik (quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish) ilovalarida istiqbolli va yangi turdagi yarimo‘tkazgichlar sifatida so‘nggi yillarda katta e’tiborni qozonyapti. Atom darajasida yupqa tuzilishga ega bo‘lgan bu materiallar o‘tayupqa, egiluvchan, yengil va shaffof quyosh elementlarini yaratish uchun yangi imkoniyatlarni taqdim etadi. Grafen, o‘tish metall dixalkogenidlari (transition metal dichalcogenides – TMDs), qora fosfor (black phosphorus – BP) va geksagonal bor nitridi (hexagonal boron nitride – h-BN) kabi materiallar yangi avlod quyosh energiyasi qurilmalari komponentlari sifatida tadqiqot obyektlariga aylanmoqda.



***a*)** ***b*)**

6.12-rasm. (*a*) Geksagonal TMD monoqatlamining tuzilishi. M atomlari qora rangda, X atomlari esa sariq rangda. (*b*) geksagonal TMD monoqatlamning yuqoridan ko‘rinishi[3].

O‘tish metalli dikalkogenid (transition metal dichalcogenide – TMD) monoqatlamlari MX_2 tipidagi atomik yupqa yarimo‘tkazgichlar bo‘lib, bu yerda M – o‘tish metall atomi (Mo, W va boshqalar) va X – xalkogenid atomi (S, Se yoki Te). M atomlarining bir qatlami X atomlarining ikki qatlami orasida joylashgan (6.12-rasm). Ular 2D materiallar oilasiga mansub bo‘lib, ular g‘ayrioddiy yupqalikni namoyon qilishadi. Masalan, MoS_2 monoqatlamining qalinligi atigi 6,5 Å.

[3] https://en.wikipedia.org/wiki/Transition_metal_dichalcogenide_monolayers#:~:text=Transition%2Dmetal%20dichalcogenides%20(TMDs),not%20have%20an%20inversion%20center.

TMDlar — masalan, molibden disulfid (MoS_2), volfram disulfid (WS_2) va molibden diselenid ($MoSe_2$) — fotoelektrik ilovalar uchun eng keng o‘rganilgan 2D yarimo‘tkazgichlar qatoriga kiradi. Ushbu materiallar qatlamlar soni va kimyoviy tarkibga qarab 1 eV dan 2 eV gacha bo‘lgan to‘g‘ri yoki to‘g‘ri emas taqiqlangan zona kengligiga (bandgap) ega bo‘lishi mumkin. Bir qatlamli (monoqatlam) TMDlar to‘g‘ri taqiqlangan zona va yorug‘lik bilan kuchli o‘zaro ta’sirga ega bo‘lib, ularni yuqori yutilishga ega, o‘tayupqa quyosh nurlanishi yutuvchilariga aylantiradi.

2D materiallarning nihoyatda yuqori sirt-hajm nisbati ularning yorug‘lik va elektron ta’sirlariga sezuvchanligini oshiradi, bu esa bir necha nanometr qalinlikdagi qurilmalarda samarali eksiton hosil bo‘lishi va zaryad ajralishiga olib keladi. Ularning mexanik egiluvchanligi va shaffofligi esa ularni taqiladigan va integratsiyalangan fotoelektrik ilovalar uchun ideal nomzodga aylantiradi. Bundan tashqari, 2D materiallar kristall panjarasi moslashuvini talab qilmaydigan Van der Waals geterotuzilmalarga integratsiyalashishi mumkin, bu esa moslashtirilgan energetik sathlari va yangi qurilma strukturalarini yaratish imkonini beradi.

Ijobiy yo‘nalishlardan biri bu — ikki xil 2D materiallar o‘zaro uyg‘unlashtirilgan 2D-2D geteroo‘tishlar yaratish bo‘lib, bunda elektron xossalari bir-birini to‘ldiradigan materiallar orqali samarali zaryad ajratish uchun II-tur interfeys hosil qilinadi. Masalan, MoS_2 va WSe_2 qatlamlaridan tashkil topgan vertikal stacklar interfeysda hosil bo‘ladigan ichki elektr maydoni evaziga fotoelektrik faollik ko‘rsatmoqda. Yana bir yondashuv — 2D yarimo‘tkazgichlarni kremniy, perovskit yoki organik yarimo‘tkazgichlar kabi an’anaviy materiallar bilan birlashtirish orqali zaryad tashish samaradorligi va barqarorlikni oshirishdir.

Grafen — nol taqiqlangan zonaga ega bo‘lgan 2D material bo‘lib, yuqori elektr o‘tkazuvchanligi va 97% gacha optik shaffofligi sababli ko‘pincha shaffof elektrod sifatida ishlatiladi.

Qora fosfor (BP) esa yana bir istiqbolli 2D yarimo‘tkazgich bo‘lib, uning taqiqlangan zonasi qatlam soniga bog‘liq holda 0,3 eV (hajmiy shaklda) dan 2 eV (monoqatlamda) gacha o‘zgaradi. Uning yuqori kovak harakatchanligi va anizotrop (yo‘nalishga bog‘liq) zaryad tashish xususiyatlari uni optoelektron ilovalar uchun jozibador qiladi, biroq havoga sezuvchanligi uning amaliy foydalanishini murakkablashtiradi.

2D materiallarga asoslangan bir qancha qurilma strukturalari namoyish etilgan, jumladan Shottki o‘tishli quyosh elementlari, planar *p-n* geteroo‘tishlar va gibrid qurilmalar. Biroq hozircha energiyani aylantirish samaradorligi nisbatan past bo‘lib, odatda 5% gacha tashkil qiladi.

Yana bir faol tadqiqot yo‘nalishi — 2D materiallarni tandem quyosh elementlari va fotonik tuzilmalarga integratsiyalashdir. Ularning yupqaligi ularni oraliq yutuvchilar yoki energetik filtrlari sifatida ishlatish imkonini beradi, bu esa

yorug‘likni boshqarish va qurilma unumdorligini oshirishga xizmat qiladi. Bundan tashqari, 2D materiallar plazmonik yoki kvant-o‘lchamli effektlarni namoyon qilishi uchun muhandislik asosida sozlanishi mumkin, bu esa yorug‘likni “tutib olish” va “qaynoq” tashuvchilarni ajratish imkonini beradi.

2D materiallarga asoslangan quyosh elementlari muammolariga atrof muhitga chidamlilik, kontakt qarshiligi, katta yuzada bir jinsli pardani o‘stirish va qatlamlar orasidagi nuqsonlarni nazorat qilish. Qurilmaning uzoq muddatli barqarorligi va takror ishlab chiqaruvchanligini yaxshilash uchun inkapsulyatsiya metodlari va taglik muhandisligi muhim ahamiyatga ega.

Muxtasar qilib aytganda, 2D materiallarga asoslangan quyosh elementlari o‘tayupqa, egiluvchan va sozlanadigan fotoelektrik platformalar uchun istiqbolli yechimdir. Hali rivojlanishning dastlabki bosqichlarida bo‘lsada, materiallar sintezi, geterotuzilmalar yig‘ilishi va qurilma muhandisligidagi tezkor taraqqiyot 2D materiallarni kelajak quyosh energiyasi texnologiyalarida muhim rol o‘ynashini ko‘rsatmoqda.

Bob bo‘yicha nazorat savollari

1. Quyosh elementi qanday fizik hodisalarga asoslanadi?
2. Quyosh elementlarida fotoelektrik effekt qanday ishlaydi?
3. Birinchi avlod (1G) quyosh elementlarining asosiy texnologik xususiyatlari qanday?
4. Ikkinchi avlod (2G) quyosh elementlarida qanday materiallar va texnologiyalar qo‘llaniladi?
5. Uchinchi avlod (3G) quyosh elementlari nimasi bilan avvalgi avlodlardan farq qiladi?
6. Monokristalli va polikristalli kremniy quyosh panellarining o‘zaro farqlari qanday?
7. Amorf kremniyga asoslangan quyosh elementlari qanday afzallik va kamchiliklarga ega?
8. Galliy arsenid (GaAs) asosidagi quyosh elementlarining yuqori samaradorligi nimaga asoslangan?
9. Tandem (ko‘p qatlamli) quyosh elementlari qanday ishlaydi va ularning samaradorligi qanday oshadi?
10. Organik quyosh elementlarining ishlash mexanizmi qanday va ular qaysi sohalarda qo‘llaniladi?
11. Quyosh elementlarida ishlatiladigan asosiy yarimo‘tkazgich materiallar nimalardan iborat?

12. Kremniy (Si) quyosh elementlarida qanday rol o‘ynaydi va uning afzalliklari nimalarda?
13. Perovskit materiallar qanday xossalarga ega va nima sababdan istiqbolli hisoblanadi?
14. CdTe (kadmiy tellurid) va CIGS (mis-indiy-galliy-selenid) quyosh elementlarining o‘ziga xosliklari qanday?
15. Organik fotovoltaik materiallarning yaroqlilik muddati va samaradorligi qanday omillarga bog‘liq?
16. Har bir quyosh elementi uchun “taqiqlangan zona kengligi” qanday ahamiyatga ega?
17. Yarimo‘tkazgich qatlamiga tushayotgan yorug‘likning yutilish koeffitsiyenti qanday materialga bog‘liq?
18. Akslantiruvchi qatlam (anti-reflective coating) qaysi materiallardan yasaladi va qanday foyda beradi?
19. Elektrodlarda ishlatiladigan materiallar (masalan, ITO — indiy qalay oksidi) qanday xossalarga ega bo‘lishi kerak?
20. Perovskit asosidagi quyosh elementlarining hozirgi yutuqlari va kamchiliklari qanday?
21. Kvant nuqtalariga asoslangan quyosh elementlarning ishlash prinsipi qanday?
22. Tandem elementlar samaradorligini oshirishda qanday texnologiyalar qo‘llaniladi?
23. Quyosh panellarining egiluvchan va shaffof variantlari qanday materiallar asosida ishlab chiqariladi?
24. Fotoelektrokimyoviy quyosh elementlarining ishlash mexanizmi qanday?
25. Zamonaviy quyosh batareyalarida nanotuzilmalar qanday afzalliklar yaratadi?
26. Quyosh elementlarining samaradorligini oshirish uchun qanday texnologik usullar qo‘llaniladi?
27. Quyosh elementlarining ekologik xavfsizligi va qayta ishlanishi bilan bog‘liq muammolar nimalardan iborat?
28. Kvant nuqtali quyosh elementlarining istiqbollari
29. 2D materiallarga asoslangan quyosh elementlarining afzalliklari va muammolari.
30. Yaqin istiqbolda quyosh energetikasida qanday yangi materiallar va texnologiyalar kutilmoqda?

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Peter Y. Yu, Manuel Cardona. Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties, Fourth Edition. Graduate Texts in Physics, Springer 2010, -p. 793. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00710-1.

2. Donald A. Neamen. Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, Fourth Edition, University of New Mexico, 2012, -p. 784

3. Li S.S. Optical Properties and Photoelectric Effects. In: Li, S.S. (eds) Semiconductor Physical Electronics. Springer, NY. 2006 -pp. 246-283 https://doi.org/10.1007/0-387-37766-2_9

4. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: учебник, 5-е изд. - СПб.: Лань, 2003. – 368 с.

5. Петрова Л.Г., Потапов М.А., Чудина О.В. Электротехнические материалы: Учебное пособие // МАДИ (ГТУ). – М., 2008. - 198 с.

6. Марончук, И. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 105–123. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123

7. Reinhard P. et al., Features of KF and NaF Postdeposition Treatments of Cu(In, Ga)Se_2 Absorbers for High Efficiency Thin Film Solar Cells. *Chemistry of Materials*, 27 (16), 2015, 5755–5764. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b02335

8. H. Cotal et al. III–V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics / // *Energy Environ. Sci*. 2009. Vol. 2, No 2. P. 174–192. https://doi.org/10.1039/B809257E

9. Alferov Zh. I., Andreev V. M., Rumyantsev V. D. Trends and Prospects for the Development of Solar Photovoltaics. *Semiconductors*, 38 (8), 2004, 899–908. https://doi.org/10.1134/1.1787110.

10. Fraas L. M., Partain L. D. (2010) *Solar Cells and their Applications*. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc., Publication. 648. https://doi.org/10.1002/9780470636886.

11. B. Browne et al., Tandem quantum well solar cells, *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, CA, USA, 2008, pp. 1-5, https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922474

12. Smith M. A., Sinharoy S., Weizer V. G., Khan O., Pal A., Clark E. B., Wilt D. M., Scheiman D. A., Mardesich N. Solar Cell for NASA Rainbow Concentrator. *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000* (Cat. No 00CH37036), 2000, 1139. https://doi.org/10.1109/pvsc.2000.916088.

13. R.P. Gale, R.W. McClelland, B.D. King, J.C.C. Fan, Thin-film solar cells with over 21% conversion efficiency // *Solar Cells*, Vol. 27, Iss. 1-4, 1989, -pp. 99-106, https://doi.org/10.1016/0379-6787(89)90020-3.

14. Dong R., Bi C., Dong Q., Guo F., Yuan Y., Fang Y., Xiao Z., Huang J. An Ultraviolet-to-NIR Broad Spectral Nanocomposite Photodetector with Gain // *Adv. Optical Mater.*, 2014, 2, 549-554. https://doi:10.1002/adom.201400023.

15. Brichkin S.B., Razumov V.F. Colloidal quantum dots: synthesis, properties and applications // *Russ. Chem. Rev*. 85 (12), 2016, 1297–1312. https://doi:10.1070/RCR4656.

16. В. П. Пономаренко, В. С. Попов, С. В. Попов. Фотоэлектроника на основе квазинульмерных структур (обзор) // *Успехи прикладной физики*, том 9, №1, 2021, -с. 25-67 https://doi:10.51368/2307-4469-2021-9-1-25-67.

17. Алиев И. И., Калганова С. Г. Электротехнические материалы и изделия: справочник / - М.: РадиоСофт, 2005. - 350 с.

18. Антипов Б.Л., Сорокин В.С., Терехов В.А. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы. – СПб.: Лань, 2001. –208 с.

19. Филикова В.А. Электротехнические и конструкционные материалы / – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 280 с.

20. Jiabao Yi, Sean Li. Functional Materials and Electronics // Apple Academic Press. USA 2018. -p. 366.

M U N D A R I J A

KIRISH.....3

I BOB. MODDALARNING TUZILISHI HAQIDA ASOSIY MA'LUMOTLAR.....5

1.1-§. Materiallar tasnifi. Atomlarning tuzilishi.....5

1.2-§. Kimyoviy bog'lanishning asosiy turlari.....13

1.3-§. Qattiq jismlar zonaviy nazariyasi elementlari.....22

II BOB. O'TKAZGICH MATERIALLARDAGI FIZIK JARAYONLAR VA HODISALAR.....33

2.1-§. O'tkazgichlar haqida umumiy ma'lumotlar. Metallarning elektr o'tkazuvchanligining fizik tabiati. Metall o'tkazgichlar qarshiligining haroratga bog'liqligi.....33

2.2-§. Kirishmalar va boshqa strukturaviy nuqsonlarning metallarning qarshiligiga ta'siri. Metall qotishmalarning elektrik xossalari.....41

III BOB. O'TKAZGICH MATERIALLARNING ASOSIY XOSSALARI VA QO'LLANILISHI.....50

3.1-§. O'tkazgich materiallarning tasnifi. Yuqori o'tkazuvchan materiallar, o'tao'tkazgich metallar va qotishmalar.....51

3.2-§. Fullerenlar, fulleridlar, grafit va uglerodning boshqa modifikatsiyalari. Kompozitsion va oksidli o'tkazgich materiallar.....59

IV BOB. YARIMO'TKAZGICHLI MATERIALLARDAGI FIZIK JARAYONLAR VA HODISALAR.....65

4.1-§. Yarimo'tkazgichlar haqida umumiy ma'lumotlar. Xususiy va kirishmali yarimo'tkazgichlar. Asosiy va noasosiy zaryad tashuvchilar.....65

4.2-§. Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining haroratga bog'liqligi.....77

4.3-§. Yarimo'tkazgichlarda optik va fotoelektrik hodisalar.....82

4.4-§. Kuchli elektr maydonidagi yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi.....90

V BOB. YARIMO'TKAZGICHLI MATERIALLARNING ASOSIY XOSSALARI, TEXNOLOGIK XUSUSIYATLARI VA QO'LLANILISHI.....95

5.1-§. Yarimo'tkazgichli materiallarning tasnifi. Kremniy, germaniy, kremniy karbid va yarimo'tkazgichli birikmalar.....95

IV BOB. QUYOSH ELEMENTLARI UCHUN ELEKTRON-TEXNIK MATERIALLAR.....109

6.1-§. Quyosh elementlarining asosiy turlari.....109

6.2-§. Quyosh elementlari uchun materiallar.....128

6.3-§. Quyosh energetikasida zamonaviy innovatsiyalar va istiqbolli materiallar.....136

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR.....145