

3175  
B-36

**M. S. BAHODIRXONOV, S. Z. ZAYNOBIDINOV  
X. M. MADAMINOV**



**ELEKTRON  
TEXNIKASI  
MODDALARI**

31.2  
B.36

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA  
O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI

M.S.BAHODIRXONOV, S.Z.ZAYNOBIDINOV  
X.M.MADAMINOV

# ELEKTRON TEXNIKASI MODDALARI

*O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'рта maxsus ta'lim  
vazirligining 2015-yil 30-maydagi 191-sonli buyrug'iga asosan  
oliy o'quv yurtlari talabalari uchun darslik sifatida tavsiya etilgan*

TOSHKENT  
"YANGI NASHR"  
2016

TerDU ARM  
№ 31992

UDK 821. 225. 6

84.6(50')

**Bahodirxonov M.S.**

**Elektron texnikasi moddalari:** universitetlar va texnika o'quv yurtlari uchun darslik / M.S. Bahodirxonov va boshq. – T.: “Yangi Nashr”, 2016. – 352 b.

**Taqrizchilar:**

**A.V. Umarov** – texnika fanlari doktori, professor,

**I. Abdug'ofurov** – kimyo fanlari doktori, professor.

Mazkur darslikda zamonaviy elektron asbobsozlik uchun zarur bo'lgan moddalar, ularning tasniflari, asosiy elektrofizik va kimyoviy xususiyatlari, olinish texnologiyalari, qo'llanilish sohalari haqida umumiy ma'lumotlar keltirilgan. Elektron texnikasining asosiy moddalari – tok o'tkazuvchi, yarimo'tkazgich, dielektrik, magnetik, nanomoddalar hamda elektron asboblarni ishlab chiqarishda qo'llaniladigan qo'shimcha kontakt va himoya, kimyoviy va mexanik ishlov berish vositalarining o'ziga xos xususiyatlari ta'riflangan.

Ushbu darslik Davlat ta'lim standartlaridagi universitetlar va texnika oliy o'quv yurtlari “Fizika”, “Elektronika va avtomatika” yo'nalishlarining “Elektron texnika materiallari”, “Elektron texnika materiallari va elementlari” fanlarining o'quv dasturlariga mos keladi hamda undan magistrlar, o'rta maxsus o'quv yurtlari talabalari va soha mutaxassislari ham foydalanishlari mumkin.

ISBN 978-9943-22-157-4

© “Yangi Nashr” – 2016

## SO‘ZBOSHI

Yarimo‘tkazgichli asbobsozlik va mikroelektronika nisbatan qisqa muddat ichida oddiy diodlardan boshlab murakkab integral sxema (IS)largacha bo‘lgan qizg‘in jarayonlarga boy davrni bosib o‘tdi. Bu o‘rinda aytish lozimki, zamonaviy nanoelektronikaning jadal sur‘atlar bilan rivojlanishi, ularning insonni hayratga solarli darajadagi xossalari butun dunyo olimlarining qiziqishiga sabab bo‘lmoqda. Olimlarning mikroelektronika nazariyasi sohasidagi, muhandis-texnologlarning esa ishlab chiqarishdagi tinimsiz izlanishlari tufayli hozirgi vaqtda oddiy, bir necha elektron qurilmalardan iborat integral sxemalardan bitta kristallda millionlab elementlari bo‘lgan katta integral sxema (BIS) va o‘ta katta integral sxemalar (SBIS) ishlab chiqarilmoqda. Kristalldagi elektron qurilmalarning ulanish darajasini orttirish, ularning xususiyatlarini yaxshilash va faoliyat imkoniyatlarini kengaytirish mikroelektronika rivojining asosiy qonuniyatlarini tashkil etmoqda. Hozirgi zamon talabi, avvalo, elektron qurilmalarning chiziqli o‘lchamlarini kichraytirish, submikron va nanoelektron texnologiyalarni yaratishni taqozo qilmoqda. Shu bilan bir paytda elektron qurilmalarning xossalari va faoliyat imkoniyatlarining chegarasi, ularni yaratishda foydalanilayotgan moddalarning turiga bog‘liqligini unutmazlik zarur. Agar elektron texnikasining xususiyatlarini belgilovchi asosiy modda – bu yarimo‘tkazgichlar ekanligini e‘tiborga olsak, birinchi navbatda ularning ko‘plab turlaridan maqsadga muvofiqlarini tanlab olish vazifasi turadi. Sanoatda ishlab chiqarilayotgan yarimo‘tkazgich moddalar – kremniy, germaniy, galliy arsenidi va boshqalar o‘z xossalari bilan elektron asboblari ishlab chiqarishning talablarini asosan qoldiradigan bo‘lsa ham, ularning yorug‘likka, issiqlikka,



radiatsion nurlanishlar va boshqa ta'sirlarga chidamliligini yoki aksincha, ularning sezgirligini oshirish uchun yarimo'tkazgichni maxsus kirishmalar bilan legirlash talab etiladi. Buning natijasida avvalgiga nisbatan butunlay boshqa xususiyatlarga ega bo'lgan yangi turdagi modda – kompensirlangan kremniy paydo bo'ladi. Yarimo'tkazgichli monokristallarni mos holdagi kirishma atomlari bilan legirlashda, uning hajmida hosil bo'ladigan nanobrikmalar tufayli ularni fotoelektrik va optik xususiyatlari o'zgarib, amaliyot uchun zarur bo'lgan yangi turdagi nanozarrali yarimo'tkazgich tuzilmalarni hosil qilish mumkin. Mana shunday noyob xususiyatli moddalarni olinish texnologiyalari va ularning xossalari boshqarish usullarini o'zlashtirish elektron asboblari ishlab chiqaruvchilar uchun yana ham kengroq imkoniyatlar yaratadi. Elektron asboblari va mikroelektronika qurilmalarini yaratishda dielektrik moddalarning roli yuqori ekanligi bilan bir paytda, dielektriklar elementlararo to'siqlar, tashqi ta'sirlardan himoya vositalaridan tashqari o'ziga xos xususiyatlari bilan integral sxemalarda maxsus funksiyalarni ham bajarishi mumkinligini ham e'tirof etish kerak. Shuning uchun, mikroelektronikada qo'llaniladigan turli xil dielektrik moddalarning olinish texnologiyalari va ularning xususiyatlarini bilish zarur masalalardan biridir. Ta'kidlash joizki, tayyor elektron qurilmalarni tashqi mexanik va kimyoviy ta'sirlardan himoyalash, olib yurish, shakli va xususiyatlari talablariga mos holda taxlash uchun qulay va qoplama idishlar qo'llanilishi zarur. Bu vazifalardan kelib chiqqan holda, elektron asbobsozlik uchun xilma-xil qo'shimcha moddalar zarurligini va ularning fizik-kimyoviy xususiyatlarini, har xil ishlovlarga moyillik darajalarini aniqlash kabi jarayonlar ham shu kunning dolzarb masalasi bo'lib kelmoqda.

Ushbu o'quv adabiyotini mana shu masalalarni qamrab olgan va texnika oliy o'quv yurtlari, universitetlar bakalavriyat va magistratura bosqichlarida o'qitiladigan "Elektron texnikasi

moddalari va elementlari”, “Yarimo‘tkazgichli asboblarning moddashunosligi”, “Radiotexnika va elektronika” kabi fanlarning o‘quv dasturlariga mos keluvchi darslik sifatida foydalanish tavsiya etiladi. Darslikning tegishli joylarida kerakli rasmlar, chizmalar, jadvallar, grafiklar kabi matnni oydilashiruvchi materiallardan foydalanildi. Har bir bob oxirida esa savol va mashqlar keltirib o‘tildi.

O‘quv adabiyotining so‘z boshi va I, II boblarini professor M.S.Bahodirxonov; III, IV boblari va xulosani professor S.Z.Zaynobidinov V, VI, VII, VIII boblari esa fizika-matematika fanlari nomzodi X.M.Madaminov tomonidan yozildi.

Mazkur darslikni diqqat bilan o‘qib chiqib, o‘zining qimmatli fikrlarini bildirgan texnika fanlari doktori, professor A.V.Umarov va kimyo fanlari doktori, professor I.Abdug‘ofurov, o‘z fikr va mulohazalari bilan kitobning sifati hamda mazmunini yaxshilashga qo‘shgan hissalar uchun fizika-matematika fanlari doktori I.N.Karimov, fizika-matematika fanlari nomzodlari Sh.A.Ermatov va E.A.Musayevlarga mualliflar o‘z minnatdorchiliklarini bildiradi.

# I bob. ELEKTRON TEXNIKASIDA QO‘LLANILADIGAN MODDALAR HAQIDA UMUMIY TUSHUNCHALAR

## 1.1. Elektron texnikasi moddalari turlari

Ma'lumki, elektron asbobsozlik va mikroelektronikada qo'llaniladigan barcha moddalar, ishlab chiqarilgan mahsulotlar faoliyatdagi o'zlarining ahamiyati bilan asosiy va qo'shimcha moddalarga bo'linadi. Asosiy moddalar elektron qurilmalarining xususiyatlarini belgilovchi vazifalarini bajarsa, qo'shimcha moddalar esa ularni ishlab chiqarishga tayyorlash va himoya vositalari bo'lib xizmat qiladi.

Asosiy moddalar elektr o'tkazuvchanlik xususiyatlari bo'yicha elektr o'tkazuvchan, o'tao'tkazuvchan, yarimo'tkazgich va elektr o'tkazmaydigan (dielektrik) moddalarga bo'linadi. Elektr o'tkazuvchanlarga metallar, metall qotishmalari, nometall o'tkazuvchan moddalar guruhidan iborat, elektr qarshiligi  $10^{-7}$  Om m atrofida bo'lgan moddalar kiradi. Ko'pgina metall va qotishmalar, ko'p tarkibli kimyoviy birikmalarda juda ham past (4--6 K) temperaturalarda ularning elektr qarshiligi keskin kamayib ketishi natijasida o'tao'tkazuvchanlik deb ataluvchi fizikaviy jarayon vujudga keladi. Hozirgi davrda ko'p tarkibli maxsus kimyoviy tuzilishga ega bo'lgan keramik moddalarda o'tao'tkazuvchanlikning kritik temperaturasini 160 K gacha yetkazishga, ya'ni yuqori temperaturali o'tao'tkazuvchanlik xususiyatiga ega bo'lgan moddalar yaratishga erishilmoqda.

Zamonaviy elektron texnikasining rivoji va yutuqlari asosini yarimo'tkazgichli moddalarning xususiyatlari va imkoniyatlari tashkil etadi deyilsa mubolag'a bo'lmaydi. Yarimo'tkazgichli

xususiyatga ega bo'lgan oddiy moddalar va kimyoviy birikmalar, ularning kristall, polikristall, amorf, suyuq va gazsimon holatlardagi o'ziga xos xususiyatlari xilma-xil elektron asboblari va qurilmalar ishlab chiqarish imkoniyatini bermoqda. Yarimo'tkazgichli moddalar xususiyatlarini tadqiq qilish, ularni yaratish texnologiyalarini va yarimo'tkazgichli elektron asboblari ishlab chiqarishning jadal rivojlanishi shu kunning taraqqiyot darajasini belgilab bermoqda.

Elektron ishlab chiqarish moddalarining yana bir katta guruhi – dielektriklar. Elektron texnikasida dielektriklarning nofaol va faol xossalardan keng foydalaniladi. Dielektriklarning nofaol xossalari ularni izolyatorlar, ya'ni tok o'tkazmaydigan moddalar va oddiy kondensator qoplamalari orasidagi qatlam sifatida ishlatish imkonini beradi. Faol (boshqariluvchi) dielektriklarga pyezoelektriklar, segnetoelektriklar, piroelektriklar, elektretlar, elektrolitlar, lazerlarning zatlari va nurlatkichlaridagi dielektriklar misol bo'la oladi.

Mikroelektronikaning rivojlanishi natijasida nanoolchamli moddalar ixtiro etildi va nanotexnologiyalar yordamida nanoelektromexanik tizimlar yaratila boshlandi. Bir necha atom, molekullardan tuzilgan nanozarralardan iborat sezgir qabullagichlar, qayd qilgichlar va boshqa nanoelektron asboblari yaratish imkoniyatlari paydo bo'ldi. Metall va inert gazlar atomlaridan hosil qilingan nanozarralar, uglerod atomlarining har xil bog'lanishli tizimlaridan tashkil topgan olmos, almazoid kabi noyob moddalar, ion, fraktal va molekulyar klasterlar nanoelektronika, nanofotonika va boshqa sohalarning rivojiga katta omil bo'lmoqda.

Bu moddalar qatoriga elektron asboblarning chastotaviy xususiyatlarini belgilovchi magnit moddalarni ham qo'shish zarur. Magnit moddalar tashqi magnit maydonining moddalarni ichki magnitik tartiblanishiga ta'siri mexanizmlari bo'yicha ferromagnitlar, paramagnitlar, diamagnitlar, antiferromagnitlar va ferritlardan iborat guruhlarga bo'linadi.

Elektron texnikasida murakkab tuzilishli qurilma va asboblarni ishlab chiqarish texnologiyalarida maxsus qo'shimcha moddalar va vositalar qo'llaniladi-ki, ularsiz mahsulotlar sifati kafolatlanmaydi. Bunday moddalarga tayyor mahsulotlarni tashqir ta'sirlardan himoyalash uchun qo'llaniladigan polimerlar, oksidlar, rezina va kauchuklar, kristallarni kesish, tekislash, yedirish va ularga shakl berish moddalari va vositalari, modda xususiyatlarini boshqarish uchun turli xil kirishmalar va usullar qo'llaniladi.

Ushbu darslikda yuqorida keltirilgan va yana boshqa moddalarning fizik-kimyoviy xususiyatlari, qo'llanish sohalari va texnologiyalari bayon etiladi.

## **1.2. Qattiq jismlarning tuzilishi**

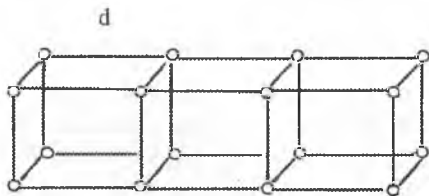
### **1.2.1. Kristall panjarasi**

Qattiq jismlar tuzilishi, tarkibi, ularni tashkil etgan zarralari orasidagi o'zaro ta'sir kuchlari, mexanik, elektr, magnit, optik va boshqa xossalari jihatidan turli guruhlariga bo'linadi. Masalan, qattiq jismlar elektr xossalari bo'yicha yaxshi o'tkazgichlar (metallar), yarimo'tkazgichlar va dielektriklar guruhlarini tashkil etadi. Magnit xossalari jihatidan esa diamagnit, paramagnit, ferromagnit, antiferromagnit va ferritlar deb ataladigan qattiq jismlar mavjud.

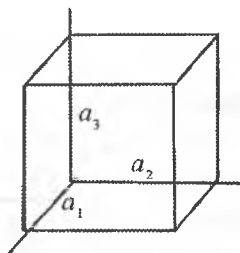
Qattiq jismlar ularni tashkil qilgan zarralarning joylashish tartibiga asosan kristall va amorf jismlar guruhlariga ajraladi. Amorf jismlarni (masalan, shishani) tashkil qilgan atomlar (ionlar, molekulalar)ning joylashishida qat'iy bir tartib yo'q. Bundan ularning fazalarini o'zgartirishda (masalan, suyuqlanishda) qat'iy o'tish nuqtalari (suyuqlanish temperaturalarini) mavjud bo'lmayligi kelib chiqadi: amorf jismlar bir holatdan ikkinchi holatga uzluksiz o'tib turadi. Ammo, kristall jismlarni tashkil qilgan atom (ion, molekula)lar joylashishida muayyan tartib mavjud: ma'lum yo'nalishlarda har qanday ikki qo'shni atom oralig'i bir xil. Shuning uchun ham kristall holatdagi qattiq jismlarning fazalarini

o'zgarishi (suyuqlanish, qotish va hokazo) qat'iy muayyan temperatura va bosimlarda sodir bo'ladi.

Mutlaq nol temperaturada kristall atomlari (masalan, uni tashkil qiluvchi har qanday zarralar)ning markazlari bir-biri bilan tutashtirilsa, fazoviy panjara hosil bo'ladi, uni kristall panjarasi deyiladi (1.1-rasm).



1.1-rasm. Kristall panjaraning ko'rinishi



1.2-rasm. Elementar hujayra

Demak, kristallarda atomlarning joylashishi fazoviy davriylik (yoki translatsion simmetriya) xossasiga ega. Har qanday kristalda bir tekislikda yotmagan uchta asosiy yo'nalish (bosh yo'nalishlar) bo'ladi: bu yo'nalishlarda bir xil o'rindagi (ekivalent vaziyatdagi) qo'shni atom (ion va molekulalar) orasidagi masofalar  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$  vektorlar orqali belgilanadi. Cheksiz kristall panjarasini har bir  $\vec{a}_i$  vektor yo'nalishida ularni karrali masofaga siljitish kristall panjarasi vaziyatini o'zgartirmaydi. Shuning uchun  $\vec{a}_i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots$ ) vektorlar asosiy (masshtab) vektorlar yoki translatsion davrlar deyiladi.

Shu uchta  $\vec{a}_i$  vektor ustiga qurilgan parallelepiped eng kichik katak eng oddiy hujayra deyiladi (1.2-rasm). Ma'lumki, bunday eng kichik hujayraning hajmi  $V_0 = \vec{a}_1 [\vec{a}_2, \vec{a}_3]$  bo'ladi. Kristall panjarasida absolut nol temperaturada atomlarning markazlari joylashgan nuqtalar – tugunlar, ular orasidagi soha tugunlararo soha deb ataladi.

Har qanday murakkab fazoviy panjara sodda panjaralar (Brave

panjaralari)dan tuzilgan bo'ladi, Brave panjaralari geometrik jihatdan mumkin bo'lgan sodda panjaralar bo'lib, ularning soni 14 ta.

Ideal kristallning asosiy xossasi — fazoda atomlarning davriy joylashishidan quyidagi munosabat kelib chiqadi, agar cheksiz kristall

$$\vec{a}_n = n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 + n_3 \vec{a}_3 \quad (1.1)$$

vektor qadar ko'chirilsa, u o'z-o'ziga mos tushadi, bunda  $n_i$  — butun sonlar.

Ma'lumki, koordinatalar funksiyasi bo'lgan barcha fizik kattaliklar kristall ichida uch o'lchovli davriy funksiya bo'ladi. Bunda  $r$  va  $r + \vec{a}_n$  vektorlar bilan belgilanadigan kristalldagi nuqtalarda mazkur kattaliklar bir xil qiymatga ega bo'ladi. Shuning uchun, masalan,  $V(r)$  elektrostatik potensialning davriylik sharti quyidagilar bo'ladi:

$$V(r) = V(\vec{r} + \vec{a}_n). \quad (1.2)$$

Bu uch o'lchovli davriy funksiyani Fure qatoriga yoyib, ba'zi bir almashtirishlar bajarilgandan keyin, uni

$$V(r) = \sum_b V_b e^{i(br)} \quad (1.3)$$

ko'rinishda ifodalash mumkin. (1.2) shartni (1.3) ifodaga tatbiq etib, vektorni aniqlash shartini topamiz:

$$\vec{b} \vec{a}_1 = 2\pi g_1, \quad \vec{b} \vec{a}_2 = 2\pi g_2, \quad \vec{b} \vec{a}_3 = 2\pi g_3, \quad (1.4)$$

bunda  $g_1, g_2, g_3$  — butun sonlar. Bu (1.4) shartlar asosida  $\vec{b}$  vektor quyidagi

$$\vec{b} = \vec{b}_g = r_1 \vec{b}_1 + r_2 \vec{b}_2 + r_3 \vec{b}_3 \quad (1.5)$$

ko'rinishda ifodalanadi. Bunda  $\vec{b}_1, \vec{b}_2$  va  $\vec{b}_3$  larni

$$\vec{b}_1 = 2\pi \frac{[\vec{a}_2 \vec{a}_3]}{V_0} \quad \vec{b}_2 = 2\pi \frac{[\vec{a}_3 \vec{a}_1]}{V_0} \quad \vec{b}_3 = 2\pi \frac{[\vec{a}_1 \vec{a}_2]}{V_0} \quad (1.6)$$

ko'rishda tanlab olish kerak.

Haqiqatan,

$$\vec{b}_i \vec{a}_i = \begin{cases} 0, & \text{agar } i \neq k \text{ bo'lsa,} \\ 2, & \text{agar } i = k \text{ bo'lsa.} \end{cases} \quad (1.7)$$

Agar panjara  $\vec{a}$  vektorlar asosida tuzilgan bo'lsa, bunday panjara to'g'ri panjara deyiladi va  $\vec{a}$  vektor to'g'ri panjara vektori deb yuritiladi va aksincha,  $\vec{b}_g$  vektorlar asosida tuzilgan panjara teskari panjara deyiladi va bu vektor teskari panjara vektori deb yuritiladi. Uchta vektordan yasalgan parallelepiped teskari panjaraning eng kichik katagi (eng oddiy hujayra) deyiladi; uning hajmi quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$V_{tes} = (b_1 [b_2 b_3]) = \frac{(2\pi)^3}{V_0}.$$

Teskari panjara tushunchasining tatbiqiga misol sifatida Bregg-Lauve qonunining tegishli ifodasini keltiramiz (bu masalaga keyingi bobda batafsil to'xtalib o'tamiz). Ma'lumki, kristall panjara rentgen nurlari uchun difraksion panjara vazifasini bajaradi (rentgen nurlari  $\lambda$  to'liq uzunligi kristall panjarasining  $\vec{a}$  doimiysi tartibida bo'ladi).

Kristallga  $\vec{k}$  to'liq vektori bilan aniqlanadigan rentgen nurlari tushayotgan bo'lsin. Bu holda interferension maksimumlar sharti quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\frac{1}{2} \vec{b}_n^2 + (\vec{b}_g \vec{k}) = 0. \quad (1.8)$$



## 1.2.2. Kristallardagi o‘zaro ta‘sir kuchlari

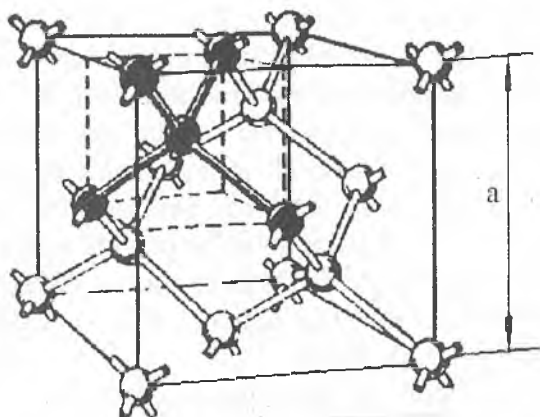
Kristalda atomlar, ionlar va molekullarni bir-biriga mustahkam bog‘lab turuvchi kuchlar tabiatiga qarab qattiq jismlar quyidagi turlarga bo‘linadi:

- 1) atom (gomeoqutbiy) bog‘lanishli;
- 2) ion (geteroqutbiy) bog‘lanishli;
- 3) metall bog‘lanishli;
- 4) molekular bog‘lanishli;
- 5) vodorod bog‘lanishli.

**Atom (gomeoqutbiy) bog‘lanishli kristallar.** Atom bog‘lanishli kristallar panjarasining tugunlarida biror moddaning atomlari joylashgan bo‘ladi. Bunday kristallarda ikki qo‘shni atom orasida bir juft umumlashgan valent elektronlar mavjud bo‘lishi oqibatida gomeoqutbiy (yoki kovalent) kimyoviy bog‘lanish hosil bo‘ladi. Bunday kristallarga elektronika sanoatida eng ko‘p qo‘llanilayotgan yarimo‘tkazgich – kremniy kristali misol bo‘la oladi. Kremniy atomida to‘rtta valent elektron bor. Kristalda har bir kremniy atomining to‘rtta eng yaqin qo‘shnisi bo‘ladi.

Ular tetraedr uyalarida, mazkur atom esa tetraedrning markazida joylashgan bo‘ladi. Bu panjara olmos panjarasi bilan aynan bir xil bo‘ladi (1.3-rasm). Kremniy kristalida har bir atom o‘zining to‘rtta qo‘shnisi bilan to‘rtta valent elektroni vositasida bog‘langan bo‘ladi. Bunda har ikki qo‘shni atomning bittadan valent elektroni ular orasida umumiy ikki elektronli (kovalent) bog‘lanish asosida kvant mexanikasidagi almashinish o‘zaro ta‘sir yoki almashinish effekti yotadi. Atom bog‘lanishli kristallarda atomlararo kovalent bog‘lanishning muhim xususiyatlari – uning yo‘nalgan (anizotrop) bo‘lishligi va to‘yingan bo‘lishligi, ya‘ni bu bog‘lanishda ikkitadan ortiq elektron qatnasha olmasligidir.

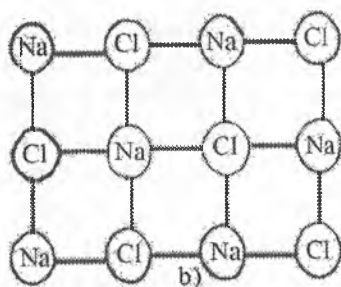
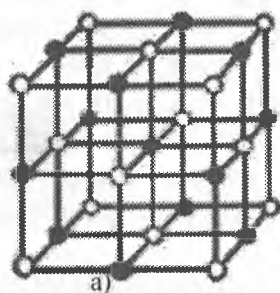
Bu bog‘lanish sababli qattiq jismlarda katta mustahkamlik hosil bo‘ladi.



1.3-rasm. Olmos panjarasining ko‘rinishi

**Ion bog‘lanishli kristallar.** Bunday kristallar panjarasi tugunlarida ionlar joylashgan bo‘ladi (1.4-a rasm). Bunda qarama-qarshi ishorali ionlar orasidagi elektrostatik o‘zaro tortishish kuchi bir xil ishorali ionlar orasidagi itarishish kuchidan kuchliroq bo‘ladi.

Mazkur kristallarga osh tuzi – NaCl kristali misol bo‘la oladi. Uning hosil bo‘lishida har bir Na atomi o‘zining birgina valent elektronini Cl atomiga beradi:



1.4-rasm. Ion bog‘lanishning ko‘rinishi:

a) ion bog‘lanishli kristall panjara; b) osh tuzi kristali ionlari

Na atomi musbat ( $\text{Na}^+$ ) ionga, Cl atomi esa manfiy ( $\text{Cl}^-$ ) ionga aylanadi. Bu ionlar panjarada navbatma-navbat joylashgan (1.4-b rasm). Ular orasida elektrostatik tortishish kuchlari mavjud bo'lishligi ravshandir. Ammo, bu kuchlar yagona kuchlar emas. Chunki, qarama-qarshi ishorali ionlar bir-biriga tortilib, yetarli darajada yaqinlashganida ularning elektron qobiqlari bir-biriga kirisha boshlaydi, bu esa shu qobiqlar orasida kvant tabiatli itarishish kuchlari paydo qiladi. Demak, shu tortishish va itarishish kuchlari birgalikda ion bog'lanishli kristall ionlarini bir-biri yaqinida mahkam tutib turadi.

Kristallda mazkur ion atrofidagi qarama-qarshi ishorali eng yaqin ionlar soni  $k$ -koordinatsion son deyiladi. Uning qiymati qarama-qarshi ishorali ionlar radiuslari nisbatiga bog'liqdir. NaCl kristali holida bu radiuslar

$$R_{\text{Na}^+} = 0,98 \text{ \AA}, \quad r_{\text{Cl}^-} = 1,81 \text{ \AA}, \quad \frac{R_{\text{Na}^+}}{r_{\text{Cl}^-}} = 0,54.$$

Bundan koordinatsion son  $k = 6$  bo'lishligi kelib chiqadi. Bino-barin, NaCl kristalida har bir ion atrofida qarama-qarshi ishorali 6 ta eng yaqin qo'shni ion joylashgan. CaCl kristali uchun  $k=8$  bo'lar ekan. Ionlar radiuslari nisbati (koordinatsion sonining qiymati) ion kristallar panjarasi qaysi turga mansub bo'lishligini taqozo qiladi. Shunday qilib, NaCl kristali sodda kub panjaraga ega, CaCl esa hajmiy markazlashgan kub panjaraga egadir.

**Metall bog'lanishli kristallar.** Li, Na, K, Cu, Ar, Fe, Ni va boshqalar singari metallar bir qator maxsus xossalarga ega. Ularning hammasida nisbatan katta elektr o'tkazuvchanlik, yorug'likni yutish qobiliyati, yuqori darajadagi plastiklik va hokazo xossalari mavjud.

Birinchi marta Drude taklif qilgan metallning sodda tasavvuri (keyinroq Lorents yaratgan klassik elektron nazariya) metallarning birmuncha maxsus xossalari yaxshi tushuntirib bera oladi. Bu tasavvurga, asosan, bittadan elektronidan ajralgan

atomlar--musbat ionlar kristall panjara tugunlarida joylashgan, ulardan ajralgan («erkin») elektronlar ionlar panjarasining ichida harakat qilib yuradi. Bunday kristallarga natriy kristalini misol qilib keltirish mumkin. Natriy (Na) atomining bitta valent elektroni bo'lib, bunday atomlardan kristall hosil bo'lishida bu valent elektronlar o'z atomlaridan ajralib, ularni musbat ionlarga aylantiradi va o'zlari panjara ichida «erkin» harakat qiladi (termodinamik muvozanat sharoitida bu harakat tartibsiz issiqlik harakati bo'ladi). Metallda «erkin» elektronlar soni uning hajmidagi atomlar soniga teng. Metalldagi «erkin» elektronlar soni boshqa turdagi kristallardagidan juda ko'p marta katta. «Erkin» elektronlar elektr maydon ta'sirida elektr tokida ishtirok eta oladi, binobarin, metallarning eng yaxshi o'tkazgichlar bo'lishligini taqozo qiladi. Musbat ionlar panjarasi hajmida tekis taqsimlangan «erkin» elektronlar mustahkam bog'lanishni ta'minlaydi.

Shuni ta'kidlash kerakki, metallarning klassik nazariyasi ularning ayrim nozik xossalari tushuntira olmaydi. Umuman, qattiq jismlar, xususan, metallarning kvant nazariyasigina ularda kuzatiladigan hodisalarni qoniqarli darajada ravshan tushuntirib berdi va bir qancha yangi hodisalarning kashf qilinishiga olib keldi.

**Molekular bog'lanishli kristallar.** Bunday kristallar panjarasi tugunlarida molekular joylashgan bo'ladi. Ma'lum sabablarga ko'ra kovalent ionlararo tortishish kuchlari hamda metallarga xos bog'lanish mavjud bo'la olmaydigan hollarda kristallni tashkil qilgan molekular orasida bo'ladigan nisbatan uncha kuchli bo'lmagan o'zaro ta'sir ularni panjara, tugunlarida ushlab turadi. Molekulalararo uch xil o'zaro ta'sir – Van - der - Vaals kuchlari mavjud bo'lishi mumkin.

1. Agar mazkur moddaning molekulari qutbli (elektrik dipollar) bo'lsa, dipollar orasidagi elektrostatik o'zaro ta'sir molekularni muayyan tartibda joylashtirishga intiladi. Bunday o'zaro ta'sir *oriyentatsion o'zaro ta'sir* deyiladi. Ammo molekularning issiqlik harakati ularning tartibli joylashishiga

ta'sir qiladi. Oqibatda molekular dipollar termodinamik muvozanat sharoitida kristall hajmida turlicha yo'nalgan bo'ladi. Temperatura ortishi bilan oriyentatsion o'zaro ta'sir kamayadi.

2. Ba'zi moddalarning qutbsiz molekulari tashqi elektr maydonining ta'sirida qutblanishi mumkin, bunda molekular induksion (ta'sir oqibatida) elektr momentga ega bo'ladi. Bunday molekular – dipollar ham o'zaro ta'sirlashadi. Induksion o'zaro ta'sir energiyasi temperaturaga bog'liq emas.

3. Neytral molekular bir-biriga yetarlicha yaqin joylashganida (ammo elektronlar qobiqlari bir-biriga kirishmagani sharoitida), ular orasida sezilarli darajadagi almashinuv o'zaro ta'sir kuchlari paydo bo'lishi mumkin (dispersion o'zaro ta'sir).

Haqiqatan ham, molekular kristallarda bir vaqtda har uchala o'zaro ta'sir namoyon bo'lishi mumkin. Van-der-Vaals kuchlari elektrostatik kuchlarga nisbatan juda qisqa masofalarda o'z ta'sirini ko'rsatadi. Elektrostatik kuchlar zaryadlar orasidagi masofaning kvadratiga teskari proporsional ( $f \sim r^{-2}$ ) bo'lsa, Van-der-Vaals kuchlari esa  $r^{-6}$  ga proporsional ravishda o'zgaradi.

Yuqorida aytilganlardan molekular o'zaro ta'sir yetarlicha past temperaturalarda mavjud bo'lishi mumkin degan xulosa kelib chiqadi. Molekular kristallarga geliy, argon, kripton, ksenon kristallari misol bo'ladi. Ko'p organik moddalar ham (parafin zanjirlari, yog' kislotalari) molekular kristallarini hosil qiladi.

**Vodorod bog'lanishli kristallar.** Bunday kristallarga muz va shakar kristallari misol bo'la oladi.

Ikki molekula orasida bog'lanish vodorod atomi yordamida hosil bo'lishi mumkin, bunda vodorod atomi bir molekula bilan (masalan, gidroksid orqali), kimyoviy bog'langani holda, bir vaqtda boshqa molekulaning kislorod atomi bilan ham o'zaro ta'sirlashadi. Vodorodning bunday alohida ahamiyati uning tuzilishidan kelib chiqadi. O'zining yagona elektronini biror bog'lanishga bergan vodorod atomi protonning o'zidan iborat bo'lib qoladi. Proton esa boshqa molekulani qutblab, u bilan ion – dipol bog'lanishi hosil qiladi. Bu bog'lanish kuchlari ancha katta

bo'lishi mumkin, chunki kichik proton manfiy ion (molekulaning manfiy qutbi)ga juda yaqin kelishi mumkin. Shunday qilib, proton ikki atom (molekula) orasida turganida u ikkala atomni qutblaydi, ularni bir-biri bilan bog'laydi.

Vodorod orqali bog'lanish organik moddalar kristallarida ko'p uchraydi, chunki vodorod bog'lanishli birikmalar polimerlashishga intilish xossasiga ega. Vodorod orqali bog'lanish suv molekulari orasidagi o'zaro ta'sirning muhim shaklidir, u suv va muzning ajoyib fizik xossalarning sababchisidir. Shuni aytib o'tish kerakki, u yo bu tur bog'lanish hech qanday kristalda mutlaq yakka holda mavjud bo'la olmaydi. Ammo, kristall zarralari orasida u yo bu bog'lanish asosiy bo'lishligi mumkin. Yuqorida keltirilgan bog'lanish turlari bo'yicha kristallarning guruhlanishini shu ma'noda tushunish lozim.

### 1.3. Kristallardagi nuqsonlar

#### 1.3.1. Haqiqiy kristalldagi nuqsonlarning turlari

Haqiqiy kristallar ideallashtirilgan modeldan, avvalambor, qattiq jismning kristall panjarasida atomlarning davriy joylashuvida ko'pgina buzilishlar bilan farq qiladi. Bu buzilishlarni tuzilish nuqsonlarining geometrik belgilari bo'yicha 4 ta sinfga bo'lish mumkin:

- 1) nuqtaviy (nol o'lchamli),
- 2) chizig'iy (bir o'lchamli),
- 3) yassi (ikki o'lchamli),
- 4) hajmiy (uch o'lchamli) nuqsonlar.

Nuqtaviy nuqsonlarga kristall panjaraning bo'sh tugunlari va tugunlararo atomlar, kristallga kirib qolgan begona atomlar, rangdorlik markazlari, shuningdek, bu nuqsonlarning birikmalari kiradi.

Nuqtaviy nuqsonlar – tuzilish nuqsonlari ichida eng keng tarqalgani hisoblanib, qizish (issiqlik nuqsonlari), tez zarralar bilan nurlanish (radiatsion nuqsonlar), kimyoviy birikmalar

tarkibida stexiometriyadan og'ishlar (stexiometrik nuqsonlar), kiritilgan yoki nazoratga olib bo'lmaydigan kirishmalar borligi tufayli vujudga keladi.

Chizig'iy nuqsonlar – dislokatsiyalarning paydo bo'lish sababi bo'lib, o'sish jarayonida kristalda hosil bo'luvchi yoki texnologik jarayonlarda yuzaga keluvchi nuqsonlar hisoblanadi.

Yassi nuqsonlarga kristallning donachalari va egizaklari chegarasi, taxlanish nuqsonlari, fazalararo chegaralar va kristall chegaralari kiradi.

Hajmiy nuqsonlarga boshqa faza qirindilari va mikrobo'shliqlar kiradi. Ular, odatda, kristall o'stirilayotgan suyulmada katta miqdorda kirishmalar, iflosliklar mavjudligidan yoki o'ta to'yin-gan qattiq eritmaning keyingi parchalanishidan hosil bo'ladi.

Ikki o'lchamli nuqsonlar shuningdek, suyulmada kirishmalar mavjudligi natijasida ham hosil bo'lishi mumkin. Ammo, ko'pincha ular kristall o'sishi sharoitlari tufayli hosil bo'ladi.

### **1.3.2. Ter modinamik muvozanatdagi nuqtaviy nuqsonlar**

Kristallni nurlantirish, unga kirishmalarni kiritish, deformatsiyalar va h.k. lar bilan bog'liq ravishda paydo bo'luvchi, nuqtaviy nuqsonlardan farqli ravishda, kristallarning termodinamik muvozanat holatlarida spontan (o'z-o'zidan) ravishda katta miqdordagi nuqsonlar yuzaga kelishi mumkin. Shuning uchun ular doimo va har qanday kristallarda ham mavjuddir. Kristallarda shunday termodinamik muvozanatdagi nuqsonlardan biri – issiqlik nuqsonlari bo'lib, ularni hosil bo'lish mexanizmi birinchi marta Ya.I. Frenkel tomonidan o'rganib chiqilgan. U bayon etgan ma'lumotlar quyida keltirilgan bo'lib, yetarli darajada sodda va ko'rgazmalidir. Fizikada sublimatsiya – qattiq jismlarning bug'lanish hodisasi yaxshi ma'lum. Qattiq jism ustida, xuddi suyuqlikdagidek, shu modda atomlaridan tuzilgan «bug'» hamisha mavjud. Agar qattiq jism og'zi berk idishga joylashtirilsa, qattiq jism yuzasidan bug'lanuvchi bug' bosimi temperatura ortishi

bilan oshib borishiga oson iqrор bo'lish mumkin. Qattiq jism yuza qatlamini tashkil etuvchi ba'zi atomlar, qizitish jarayonida kristall yuzasidan uzilib, uni o'rab turuvchi bo'shliqqa o'tish uchun yetarli bo'lgan kinetik energiyaga ega bo'lishi mumkin. Bu sublimatsiya hodisasidir. Ammo, bunday uzilishlar faqat yuza atomlari uchun emas, balki kristall ichidagi atomlar uchun ham o'rinli bo'lishi mumkin.

Darhaqiqat, statistik fizikaning asosiy qonunlaridan biri, energiya bo'yicha zarralar taqsimlanishining Maksvell qonuniga, asosan, atomlarning o'rtacha kinetik energiyasi juda kam bo'lgan holatda ham, kristallda kinetik energiyasi juda yuqori bo'lgan ma'lum miqdordagi atomlar bo'ladi. Bu holatda, ushbu hodisaning ehtimollik xarakteriga xos ravishda kristallning har qanday atomi ertami-kechmi o'rtacha kinetik energiyadan ancha ko'p bo'lgan energiyaga ega bo'lishi mumkin. Bunday atom kristalldagi o'zining muvozanat holatidan chiqib ketishi mumkin va o'zini o'rab turuvchi qo'shni atomlardan hosil bo'lgan potensial to'siqni yengib, qandaydir yangi muvozanat holatiga o'tishi mumkin. Bunda u kristall bo'ylab harakatlanib, o'zining ortiqcha energiyasini qaytib panjaraga (kristallning boshqa atomlariga) berish yo'li bilan yo'qotadi. Kristall ichida "bug'langan" atom qayerga ketishi mumkin? Agar panjaraning barcha yaqin tugunlari band bo'lsa, u tugunlar orasiga joylashishi mumkin.

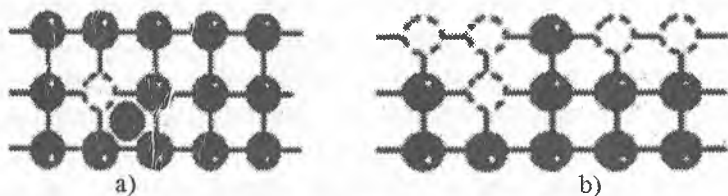
Kristall ichida atomlarning «bug'lanishi» bir vaqtning o'zida bo'sh, to'lmagan tugunlar - vakansiyalar hosil bo'lishiga olib keladi.

Kristalldagi tugunlar orasidagi atomlar va vakansiyalar juftlaridan iborat nuqsonlarni *Frenkel nuqsonlari* deb ataladi (1.5-a rasm).

Frenkel nuqsonlaridan tashqari kristallarda yolg'iz nuqtaviy nuqsonlar – vakansiyalar ham uchraydi, ularni birinchi marta Shottki ko'rib chiqqanligi uchun, uning nomi bilan ataladi. Shottki nuqsonlari kristallarda atomlarning zich joylashishi holatida



o‘rinlidir, bunda atomlarning tugunlar orasida joylanishi qiyin va energetik muvozanat nuqtayi jihatdan ma’qul emas. Bunday holda kristallda nuqsonning hosil bo‘lish jarayoni quyidagicha kechishi mumkin. Kristallarda sirtiy qatlamni hosil qiluvchi alohida atomlarning bir qismi issiqlik harakati natijasida qo‘shni atomlardan uzilib, “yanada yuzaroq” holatga o‘tishi mumkin (1.5-b rasm).



1.5-rasm. Kristallardagi nuqsonlar:

a—Frenkel nuqsonlari; b—Shottki nuqsonlari

Bu harakatga nisbatan kam energiya sarf qilinishi bois atomlarning qisman dissotsiatsiya ehtimolligi kristall yuzasidan to‘liq uzilish ehtimolligidan yuqoriligi o‘z-o‘zidan ko‘rinib turibdi.

Qisman bug‘lanish vaqtida kristall yuzasida ham vakansiyalar hosil bo‘ladi. Dastlab bu vakansiyalar to‘liq shakllanmagan, chunki ular ustida atomlar yo‘q. Keyinchalik ular kristall hajmiga ko‘chib, u yerda oddiy vakansiyalarga aylanadi. Shunday qilib, Frenkel nuqsonlaridan farqli o‘laroq Shottki nuqsonlari kristallning muntazam panjarasidagi bo‘sh tugunlari sifatida namoyon bo‘ladi.

Frenkel, Shottki nuqsonlari faqat qizdirilganda emas, balki kristallarni nurlantirilganda, plastik deformatsiyalar va boshqa bir qator ta’sirlar oqibatida ham paydo bo‘lishi mumkin, ammo ularning zichliklari termodinamik muvozanatli (temperaturaga bog‘liq) emas. Shu bilan bir vaqtda kristallarda issiqlik nuqsonlari zichligi doimo temperaturaga bog‘liq bo‘lib, temperatura ortishi bilan ortib boradi.

### 1.3.3. Radiatsion nuqtaviy nuqsonlar

Radiatsion nuqtaviy nuqsonlar kristallarni tez yadroviy zarralar - neytronlar, deytronlar,  $\alpha$ -zarralar, yadrolar bo'linishida chiqqan zarralar va tez elektronlar bilan nurlanganda yuzaga keladi. Kristallarni  $\gamma$  kvantlar bilan nurlashda yuzaga keluvchi foton va elektronlar ham tarkibiy nuqsonlar hosil bo'lishiga olib kelishi mumkin.

Radiatsion nuqtaviy nuqsonlar kristallarda doim juft holda – vakansiya va tugunlararo atom (Frenkel nuqsonlari) holida uchraydi. Yuqorida aytib o'tilganidek, radiatsion nuqtaviy nuqsonlar issiqlik nuqsonlaridan farqli ravishda termodinamik muvozanatli emas, nur bilan ta'sir etish to'xtatilganidan so'ng kristall holati barqaror emas.

Kristallni neytral va zaryadlangan tez zarralar bilan nurlantirishda radiatsion nuqsonlar hosil bo'lish mexanizmini ko'rib chiqamiz. Tez zarralarning kristallar orqali o'tishi murakkab jarayonlar bilan kechadi, jumladan, ular orasida muhimlari:

1) tez zarralarning kristall atomlari yadrolari bilan elastik to'qnashuvlari:

2) qo'zg'alish va ionizatsiya – tez zarralar yordamida kristall atomlarining elektron qobiqlarida joylashgan elektronlarning yuqori holatlarga o'tishi va ionlanishi;

3) yadroviy ayrilishlar – kristall atomlarining ba'zi qismlarini faollashuvi (ularning radiofaol holatga o'tishi), keyin ular radiofaol parchalanishdan kirishmaviy markazlarga aylanadi.

Umumiy holatda bir vaqtning o'zida barcha 3 jarayon kechadi. Ammo, atomlarning kristall panjaradagi bog'lanish xarakteri va nurlantirilayotgan kristallning boshqa xossalariga, shuningdek tez zarralarning tabiati va ularning energiyasiga bog'liq bo'lgan ayrim hollarda bir jarayon ikkinchisidan ustun bo'lishi mumkin. Masalan, elektronlarni yuqori holatlarga o'tish va valent elektronlarning ajralib ketishi jarayonlari dielektrik

yoki yarimo'tkazgich kristallarda katta rol o'ynaydi, metallarda bu jarayon deyarli sezilmaydi. Boshqa tomondan, metallarda tez zarralarning erkin elektronlar bilan o'zaro ta'siri ustivordir. U metallarda elektronlarning erkin yugurish yo'lini kamayishiga olib keladi.

Biz ko'rib chiqayotgan nuqtaviy radiatsion nuqsonlar hosil bo'lish jarayoni uchun tez zarralarning kristall atomlari bilan elastik to'qnashuvlari ko'proq ahamiyatlidir. Bu to'qnashuvlar quyidagi effektlarga olib keladi:

1) kristalda elastik to'liqlar hosil bo'ladi, ularning energiyasi atomlarning issiqlik harakati energiyasiga o'tadi;

2) tarkibiy buzilishlari hosil bo'ladi.

Buning uchun panjara tugunlarida joylashgan atomlar, harakat qilayotgan zarradan kristalda nuqson hosil bo'lish energiyasining chegaraviy qiymati  $U_d$  dan yuqori bo'lgan energiyani olishi kerak. Tadqiqotlarning ko'rsatishicha,  $U_d$  atomning panjaradagi normal holatidan tugunlar oralig'iga adiabatik o'tishiga yetarli bo'lgan energiyadan 2-3 marta yuqori bo'lishi kerak. Chunki, bu holatda nuqson hosil bo'lish energiyasi  $U_d = U_a + U_m + U_{op} + U_{muvo}$  dan iborat bo'ladi. Bunda  $U_a$  - atomni adiabatik o'tish energiyasi,  $U_m$  - atomni o'z joyidan siljib ketish (migratsiya) energiyasi,  $U_{op}$  - kristall panjarada vakansiyani qayta muvofiqlashish energiyasi,  $U_{muvo}$  - siljigan atomni kristall panjarani biror joyida muvozanat holatiga o'tish energiyasi. Ko'pgina kristallar uchun kristall panjaradagi atomlar bog'lanish energiyasi taxminan 10 eV ( $\sim 231$  kkal/mol) bo'ladi,  $U_d = 25$  eV ( $\sim 580$  kkal/mol) ga teng. Tez zarradan  $U \gg U_d$  energiyani olgan kristallning har bir atomi tugunlar oralig'iga siljishi mumkin, buning natijasida bir vaqtning o'zida bo'sh tugun va tugunlar oralig'ida atomlar vujudga keladi. Bunda, agar siljigan atomlar energiyasi kattaligi (ularni berish atomlari deb atash qabul qilingan)  $U_d$  dan ancha ko'p bo'lsa, unda bu birlamchi atomlar o'z navbatida ikkilamchi berish atomlarini, ikkilamchilari - uchlamchi atomlarni va hokazo paydo qilishi

mumkin, bu jarayon siljigan atomlar energiyasi chegaraviy atomlar  $U_d$  qiymatiga yaqinlashmaguncha davom etadi.

Kristallarda tez zarralarning elastik sochilishi, panjarada tuzilish nuqsonlarining paydo bo'lishiga olib keladi. Tabiiyki, bu jarayon zarralar energiyasiga bog'liq bo'lib, uning ortishi bilan sochilish kamayib boradi. Harakatlanuvchi zarralarning kinetik energiyasini hisoblashda qulaylik uchun quyidagi energetik parametr qabul qilingan:

$$\varepsilon = \frac{m}{M_1} E, \quad (1.9)$$

bunda  $M_1$  – harakatlanayotgan zarra massasi;  $m$  – elektron massasi;  $E$  – uning kinetik energiyasi.

Shunday qilib,  $e$  parametr tezligi og'ir zarra ega bo'lgan tezlikka teng bo'lgan elektron energiyasidir.  $E$  parametr yetarli darajada katta bo'lgan hollarda, harakatlanayotgan zarra energiyasining katta qismi atomlarning ionlanishi uchun sarf bo'ladi va ozgina qismi elastik to'qnashuvlarga sarf bo'ladi. Ammo, bu kinetik energiya  $e_i$  parametrdan ancha katta bo'lgan holatlarda to'g'ri,  $e_i$  nometall dielektrik va yarimo'tkazgich kristallardagi elektronlarning qo'zg'alish energiyasi. Ammo,  $e$  parametr  $e_i$  ga nisbatan kichik bo'lgan hollarda atomni ionlanishi va o'z o'rnidan siljishi to'xtaydi, bunda faqat elastik atomlarni va radiatsion to'liqlarni yuzaga keltiruvchi elastik to'qnashuvlar o'rin egallaydi.

Elastik to'qnashuvlarda tez zarralarning tarkibiy nuqsonlarni hosil qilishi va panjaraning issiqlik tebranishlari hosil qiladigan to'liqlar vujudga kelishi shu zarralar energiyasi va kristallning fizik-kimyoviy xossalriga ham bog'liq.

Kristalda elastik to'qnashuvlarda harakatlanuvchi zarra energiyasining yo'l birligida to'liq yo'qolishi quyidagicha ko'rinishga ega:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{elas} = \frac{2\pi Z_1^2 Z_2^2 e^4 N_0}{M_2 v^2} \ln \frac{E}{E^*}. \quad (1.10)$$

Bunda  $Z_1$  va  $Z_2$  – harakatlanuvchi va tinch turgan zarralarining atom nomeri;  $N_0$  – kristall xususiy atomlari zichligi;  $v$  – harakatlanuvchi zarra tezligi;  $E$  – uning kinetik energiyasi;  $e$  – elektron zaryadi;  $M_2$  – tinch turgan zarra massasi;

$$E^* = 0,618 \left( Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \right) \frac{2mM_1}{4\mu^2} R, \quad (1.11)$$

bunda  $R$  – Ridberg doimiysi 13,54 eV ga teng,  $m$  – harakatlanuvchi va harakatsiz zarraning keltirilgan massasi. Bu vaqtda tez zarraning kristall atomlari bilan elastik to'qnashuvlarda nuqsonlar hosil bo'lishiga yo'l birligida sarflagan energiyasi quyidagicha ifodalanadi:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{nuq.} = \frac{2\pi Z_1^2 Z_2^2 e^4 N_0}{M_2 v^2} \ln \frac{4E\mu^2}{U_d M_1 M_2}. \quad (1.12)$$

U holda

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{nuq.} / \left(\frac{dE}{dx}\right)_{elas} = \ln \left( \frac{E}{U_d M_1 M_2} \cdot \frac{4\mu^2}{E^*} \right) \quad (1.13)$$

nisbat harakatlanuvchi zarraning nurlantirilayotgan kristall atomlari bilan to'qnashganda tuzilish nuqsonlari hosil bo'lishiga sarf bo'lgan energiyasi bo'lagini ifodalaydi. Ko'p hollarda bu nisbat taxminan 0,5 ga teng.

Yuqorida aytib o'tilganidek, tez zarralarning radiatsion nuqson hosil bo'lishi uchun zarur bo'lgan energiyasining chegaraviy qiymati, kristallning fizik-kimyoviy xossalari, kristallning xususiy atomlari atom og'irliklari bilan belgilanadi.

1.1-jadvalda turli atom og'irliklariga ega bo'lgan atomlardan tuzilgan kristallardagi turli zarralarning radiatsion nuqsonlarni hosil qilish uchun zarur chegaraviy energiya miqdorlari keltirilgan.

1.1- jadval

**Turli atom og'irliklariga ega bo'lgan atomlardan tuzilgan kristallardagi turli zarralarning radiatsion nuqsonlarni hosil qilish uchun zarur chegaraviy energiya miqdorlari**

Zarralar	Atom og'irligi			
	10	50	100	200
Neytronlar, protonlar, (eV)	75	325	638	1263
Elektronlar, $\gamma$ -nurlari, (MeV)	0,10	0,41	0,68	1,10
$\alpha$ -zarralar, (eV)	31	91	169	325
Yadro bo'linish qoldiqlari, (eV)	85	30	25	27

$E$  energiyali va  $M_1$  massali bitta siljigan atom to'qnashib siljitgan atomlari soni  $N$  ni baholash uchun quyidagi taqribiy ifodadan foydalanish mumkin:

$$N = \frac{1}{U_d} \frac{M_1}{m} \varepsilon_t \left[ h \left( \frac{E}{U_d} \frac{4\mu^2}{M_1 M_2} \right)^{1/2} h \frac{E}{E^*} \right] \quad (1.14)$$

Bunda,  $\varepsilon_t$  – valent elektronlarini qo'zg'otish energiyasining chegaraviy qiymati.

Kristallarda nuqsonlar nurlantirishdan tashqari lokal isitish yoki suyultirish natijasida ham yuzaga kelishi mumkinligini aytib o'tish lozim. Lokal suyultirish joylarida  $10^3$ – $10^4$  atomlardan iborat nuqsonlar to'plami yuzaga keladi. Lokal suyultirish va keyingi sovutishda, nuqtaviy nuqsonlardan tashqari chizig'iy, yassi yoki hajmiy nuqsonlar – dislokatsiyalar, donadorlik chegarasi, mikrobo'shliq yoki mikroyoriq ko'rinishidagi nuqsonlar yuzaga kelishi mumkin.

### 1.3.4. Stexiometrik nuqsonlar

Ikki va undan ortiq atomlardan tashkil topgan birikmalar va murakkab kristallarda birorta tashkillovchining ortib ketishi yoki kamayishi tufayli kristallarni oʻstirish va ularni keyingi termik ishlovlarida stexiometrik nuqsonlar yuzaga kelishi mumkin. Nuqsonli tuzilishga ega kimyoviy birikmalardan tashkil topgan kristallarning kattagina sinfi mavjud. Ularda kristall panjara tugunlarining bir qismi (~30% gacha) atomlar bilan band boʻlmaydi.

Dielektrik va yarimoʻtkazgich kristallardagi rangdorlik markazlari ham stexiometrik nuqsonlarga kiradi (1.6-rasm). Bunday nuqsonlar, odatda, ion bogʻlanishli ikki elementdan tashkillangan binar birikma kristallarida paydo boʻladi. Masalan, ishqoriy-galoidli kristallarning ishqoriy kristall bugʻlarida qizishi spektrda oʻziga xos yorugʻlik yutish oraligʻi paydo qiladi, uning maksimumi spektrning koʻrinadigan qismiga toʻgʻri keladi.

Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>
Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	e <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>
Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>
Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>
Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>
<i>1.6-rasm. NaCl da rangdorlik markazi modeli</i>			

Bunday kristallar rangli koʻrinadi. (NaCl--sariq rangda, KCl--koʻk rangda va hokazo). Bunday kristallarni kimyoviy tahlilining koʻrsatishicha, ular tarkibida hamisha ishqoriy metall atomlarining ortiqcha miqdoriga ega boʻladi. Baʼzi ishqoriy-galoid kristallar ularni galoidlarining atmosferasida qizdirilganda ham oʻziga xos ranglarga ega boʻladi.

Ishqoriy-galoid kristallarning rangdorligi kristall elektronlarining energetik spektrlarida elektronlar (yoki galoidlar atmosferasida qizdirishda – kovaklar) bilan to'ldirilgan lokal holatlar paydo bo'lishiga bog'liq. Bunday holatlar ishqoriy-galoid birikmalar tarkibida qaysi bir tarkibiy qismning ortiqchligi hisobiga stexiometrik tarkibdan og'ishiga asoslanadi. Bunday vaqtda ionli kristallarda, odatda, vakant tugunli tuzilishlar hosil bo'ladi, ular tugunlar oralig'ida ortiqcha ionlar hosil bo'lgan tuzilishlarga nisbatan energetik jihatdan qulayroqdir.

Demak, ishqoriy metall bug'larida ishqoriy-galoid kristallarni qizdirishda hosil bo'luvchi rangdorlik markazi modelini galoidning vakant tuguni bilan ushlab qolingan lokal elektron sifatida tasavvur qilish mumkin. Shuningdek, ishqoriy-galoid kristallarni ishqoriy metall bug'larida qizdirish vaqtida hosil bo'luvchi rangdorlik markazini ishqoriy metall vakant tuguni ushlab qolgan kovak sifatida izohlash mumkin. Anion vakansiyalar tufayli yuzaga keluvchi rangdorlik markazini  $V_c^-$  bilan, kation vakansiya tufayli yuzaga keluvchi rangdorlik markazini  $V_c^+$  bilan belgilaymiz. Rangdorlik markazlariga ega kristallar holatlari energetik sxemasi kirishmali yarimo'tkazgichlardagi elektronlar holatining energetik sxemasiga o'xshash (yoki xuddi o'zi) bo'ladi.

Rangdorlik markazi turidagi tuzilish nuqsonlari ionli bog'lanish xarakteriga ega binar yarimo'tkazgich birikmalar kristallarida ham mavjud bo'ladi. Masalan, ZnO kristallari vakuumda qizdirilganda, kislorod yo'qotayotgan holatda, sariq rangga kiradi. Ammo, ko'pchilik yarimo'tkazgich kristallarda yorug'likni yutish oralig'i maksimumi, odatda, spektrning ko'rinmas infraqizil qismida yotadi. Bunday kristallarda rangdorlik markazlarining mavjudligi ular rangining sezilmas o'zgarishi bilan faqat elektrik xossalari o'zgarishiga olib keladi. Bunday yarimo'tkazgich kristallarda rangdorlik markazlarining mavjudligi ularning rangi sezilmas darajada o'zgarгани holda faqat elektrik xossalari



o'zgarishiga olib keladi. Bunday yarimo'tkazgich kristall sifatida PbS ni ko'rib chiqamiz. Ma'lumki, PbS kristallarini oltingugurt bug'larida qizdirish kovak o'tkazuvchanlikni oshiradi. Bunda kovaklar zichligi S bug'lari bosimi ortishi bilan oshib boradi. Agar qizdirishni yetarli sathdagi S bug'larining past bosimida yoki vakuumda bajarilsa, kristallar o'tkazuvchanligi elektron xarakterga ega bo'ladi, elektronlar zichligi esa S bug'lari bosimi pasayishi bilan ortib boradi. PbS ning elektrik xossalariga termik ishlovning bunday ta'sirini bu moddada rangdorlik markazlari paydo bo'lishi bilan bog'lash mumkin. Darhaqiqat, PbS ni oltingugurt bug'larida qizdirish kation vakansiyalar hosil bo'lishiga, vakuumda esa anion vakansiyalar hosil bo'lishiga olib keladi. Kation va anion vakansiyalarda kovak va elektronlarning joylashuvi  $V_c^+$  va  $V_c^-$  markazlarining hosil bo'lishiga olib keladi.

Tajribalarning ko'rsatishicha, PbS da har bir  $V_c^+$  markaz faqat bir kovakka,  $V_c^-$  markaz esa faqat bir elektronga ega, PbS ikki marta zaryadlangan  $Pb^{2+}$  va  $S^{2-}$  ionlardan iborat ekanligiga qaramasdan, tarkibiy atomning valentligi va rangdorlik markaz zaryadlari o'rtasidagi bunday nomutanosiblik ionlarning vakansiya yaqinida joylashish xarakteriga bog'liq.

Buni  $V_c^+$  turdagi rangdorlik markazlari hosil bo'lish misolida ko'rib chiqamiz. Kation vakansiyaning hosil bo'lishi ( $Pb^{+2}$  ionining ketishi) panjaraning neytralligini buzilishi degani emas. Uning buzilishi quyidagi yo'llar bilan yuzaga kelishi mumkin:

1. Kation vakansiya yaqinida oltingugurtning neytral atomi hosil bo'ladi, bunda vakansiyaning effektiv zaryadi nolga teng. Bunday holatni PbS ko'rinishda belgilaymiz.

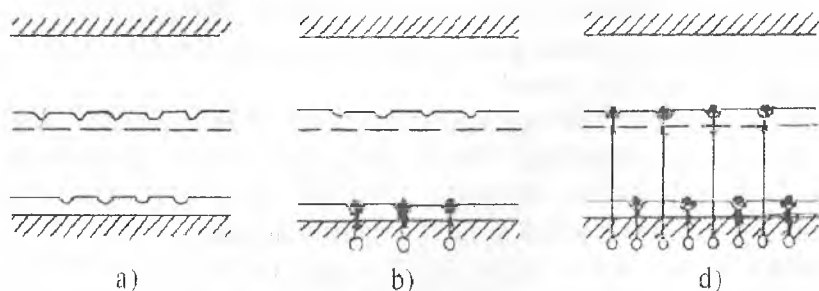
2. Kation vakansiya yaqinida  $S^-$  ioni paydo bo'ladi, bunda vakansiyaning effektiv zaryadi +1 ga teng. Bunday holatni

$[Pb^+ | S$  bilan belgilaymiz.

3. Kation vakansiya yaqinida  $S^{2-}$  ioni hosil bo'ladi, bunda

vakansiya effektiv zaryadi +2 ga teng. Buni  $[Pb^{2+}] S^{2-}$  ko'rinishida belgilaymiz.

Bu yerda mumkin bo'lgan holat 1.7-rasmda sxematik tarzda tasvirlangan. Birinchi holat man qilingan sohada ikki erkin sath mavjudligi (1.7-a rasm) faqat juda past temperaturada o'rinlidir. Undan yuqoriroq bir maromdagi temperaturalar uchun ikkinchi holat amalga oshadi, pastki sath elektronlar bilan to'ldiriladi va valent sohada kovaklar hosil bo'ladi (har bir pastki akseptor sathga bittadan kovak (1.7-b rasm). Ikkinchi sath to'ldirilishi valent sohada ikkita kovak hosil bo'lishi bilan faqat yuqori temperaturalarda amalga oshiriladi. Lekin, bunday temperaturalarda elektronlarning valent sohadan o'tkazuvchanlik sohasiga o'tishi ortadi, bu holda ehtimoli bor bo'lgan uchinchi holat sezilmay qoladi (1.7-d rasm). Bu bilan, ehtimol, tajribada kuzatilgan har bir kation vakansiyaga PbC da bittadan harakatchan kovak yuzaga kelishi bilan tushuntirilishi mumkin.



1.7-rasm. Rangdorlik markazlarning mumkin bo'lgan energetik holatlari

Xuddi shunday holat  $V_c^-$  turidagi rangdorlik markazlari hosil bo'lishi uchun o'rinlidir. Bunda har bir  $V_c^-$  markaz bittadan elektron manbayi bo'ladi.

Oksidlardan tashkil topgan kristallarda rangdorlik markazlari kristallarni vakuumda qizdirganda paydo bo'ladi. Kislorodning bir qismi bug'lanishi va kislorod atomlarining vakant tugunlarining

yuzaga kelishi  $\text{TiO}_2$  ni och ko'k rangga,  $\text{ZnO}$  ni sariq rangga kirishiga sabab bo'ladi. Oksidni kislorod atmosferasida qizdirish metall panjarasida vakant tugunlar hosil bo'lishiga olib kelishi mumkin, ular ham o'z navbatida rangdorlik markazlarini hosil qiladi. Masalan, mis oksidini kislorod atmosferasida qizdirishda o'ziga xos yorug'likni yutish oralig'i 0,6 eV ( $\sim 2$  mkm) sohasida eng yuqori bo'ladi.

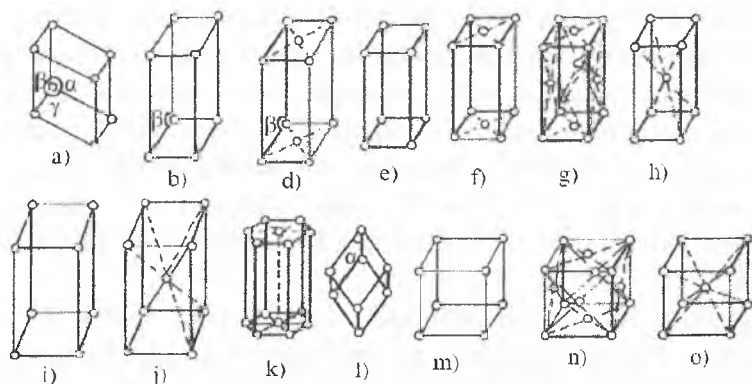
Kristallarda rangdorlik markazlari zichligi  $10^{19}, 10^{21} \text{ sm}^{-3}$  ga, ba'zi kristallarda ( $\text{CaF}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  va boshqalarda) – hatto  $10^{22} \text{ sm}^{-3}$  ga yetishi mumkin. Tajriba sharoitida rangdorlik markazlari hosil bo'lishi kristallar zichligining kamayishiga olib kelishi isbotlangan. Bu hodisa markazlar kristallarda vakansiyalarning hosil bo'lishi bilan bog'liqligini, ammo, tugunlar oralig'ida atomlar paydo bo'lishiga bog'liq emasligini ko'rsatadi.

#### 1.4. Monokristallar va polikristallar

Ko'pgina elektron texnikasi materiallari monokristallar va polikristallardan iboratligi uchun ushbu paragrafda ular tuzilishiga qisqacha to'xtalib o'tamiz.

*Kristallar* – kristall atomlari tartib bilan joylashgan qattiq jism. Ushbu tartib kristalldagi atomlarning elektrostatik maydonlari davriyligini keltirib chiqaradi. Kristall panjarada har doim shunday elementar katak ajratish mumkin-ki, u o'zida kristallning barcha xususiyatlarini saqlab qoladi va uni panjara o'qlari bo'ylab ko'chirishda kristall tuzilishini tiklash mumkin. Atom yoki molekullarning biror turdagi kristall panjara hosil qilishi atomlar o'lchami va tashqi elektron qobig'i tuzilishiga bog'liq bo'ladi.

Tabiatda kristallar juda ko'p bo'lishiga qaramay, geometrik nuqtayi nazardan ularning tuzilishi 7 ta kristall tizimiga (singoniyasiga) kiruvchi 14 xil geometrik imkoniy kristall panjaradan iborat bo'lar ekan. Bu panjaralar Brave panjaralari deb ataladi (1.8-rasm).



1.8-rasm. Brave panjaralarining ko'rinishi

Ushbu panjaralar bir-birlaridan elementar katak yonlari va ular orasidagi burchaklar bilan farq qiladi. Ular orasidagi munosabat 1.2-jadvalda keltirilgan.

1.2-jadval

### Kristall tizimning fazoviy panjaralari

Kristall tizimlari	Fazoviy panjara	Yoqlar orasidagi burchaklar
Triklin	a – sodda	$a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$
Monoklin	b – sodda	$a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90^\circ \beta \neq 90^\circ$
	d – yoqiy markazlashgan	
Rombik	e – sodda	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
	f – yoqiy markazlashgan	
	g – hajmiy markazlashgan	
	h – yoqiy markazlashgan	
Geksogonal	i – sodda	$a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$
	j – romboedrik	
Tetrogonal	k – sodda	$a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
	l – hajmiy markazlashgan	
Kubik	m – sodda	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
	n – hajmiy markazlashgan	
	o – yoqiy markazlashgan	

Geometrik sinflashta kristallar to'la farqlanmaydi. Masalan, bir xil geometrik tuzilishga ega bo'lgan kristallar ham pyezo-, piroelektrik xossalari yoki ikkilanma nur sindirish qobiliyati bo'yicha farqlanishi mumkin. Bunga sabab, ular turli xil nuqtaviy simmetriyaga tegishli ekanligidir. Kristallardagi nuqtaviy simmetriya turi 32 xil bo'lib, ular nuqtaviy va translatsiya simmetriyalari bo'yicha 230 xil fazoviy panjara guruhlarini hosil qiladi.

Tabiatda ba'zi minerallarning katta yaxlit kristallari ham uchraydi. Ularda atomlarning joylashishi kristall panjaraning biror xiliga mos keladi. Bunday kristallar *monokristallar* deb yuritiladi. Monokristall bir markazdan o'sgan kristalldir.

Agar eritmada kristallanish markazlari ko'p bo'lsa, bu markazlar atrofida juda ko'p kristallitlar o'sadi. Natijada hosil bo'lgan kristall jismning tashqi ko'rinishi uning ichki tuzilishini ifodalay olmaydi, chunki bu kristallitlar ixtiyoriy ravishda oriyentatsiyalanganligi uchun bir-birlariga yaqinlashganlarida chegaralaridagi atomlarning joylashishi ma'lum tartibga ega bo'lmaydi. Binobarin, har bir markazdan o'sgan kristallit berilgan qattiq jism kristall tuzilishining biror xiliga to'g'ri keladigan shaklni ololmaydi. Ular ixtiyoriy shaklga ega bo'lib, ixtiyoriy tartibda joylashadi. Bunday kristallitlar to'plagidan iborat bo'lgan modda polikristall bo'ladi.

Polikristallar izotrop qattiq jismlardir, ya'ni ularning fizik xossalari barcha yo'nalishlar bo'yicha bir xildir. Monokristallar esa, aksincha, anizotrop moddalar bo'lib, ularning fizik xossalari kristallning turli yo'nalishlarida turlicha bo'ladi. Shuning uchun monokristallning fizik kattaliklarini aniqlaganda ularni qanday yo'nalishda o'lchanganligi ko'rsatib o'tiladi.

Polikristall qattiq jismlarda kristallitlar chegaralarining mavjudligi ularning mexanik, optik, elektr va boshqa xossalari kuchli ta'sir ko'rsatadi. Haqiqatan, kristallitlar eritmada o'sish jarayonida ba'zi boshqa elementlarning atomlarini siqib chiqaradi.

Natijada bu elementlar kristallitlar chegarasiga joylashib qoladi va polikristallarning fizikaviy xossalari o'zgarib ketishiga sabab bo'ladi.

### 1.5. Amorf va polimer moddalar

Amorf moddalarda kristallar uchun xarakterli bo'lgan atomlarning barcha yo'nalishlari bo'yicha aniq tartibli joylashuvi kuzatilmaydi, ya'ni ularda uzoq tartib bo'lmaydi (yunoncha "amorfos" so'zi shaklsiz degan ma'noni bildiradi). Amorf moddalarda qo'shni atomlarning joylashuvida suyuqliklardagi kabi yaqin tartib o'rinli bo'ladi. Shuning uchun, amorf moddalarda turli yo'nalishlar bo'ylab atomlar o'rtacha bir xil zichlik bilan joylashadi. Bu esa amorf moddalar uchun xarakterli bo'lgan izotropik xossasini namoyon qiladi. Bunday xossa shishasimon qattiq jismlarga ham tegishlidir (shishasimon bilan amorf qattiq jismlar strukturasi bir-birlaridan farqi, atomlarni barcha yo'nalishlar bo'yicha tartibli darajasining har xilligidir). Amorf moddalarga misol qilib - shisha, smola, turli plastmassalar va boshqa shunga o'xshash moddalarni ko'rsatish mumkin.

Berilgan bosim va temperaturada jismlar energiyasining minimumga mos kelgan muvozanat holatga erishishi, jism atomlari orasida ma'lum masofalar qaror topishi, shuningdek ularning ma'lum konfiguratsiyada joylashishi bilan bog'liq. Shuning uchun amorf moddalar qandaydir muvozanatda bo'lmagan (metastabil) holatda bo'ladi va vaqt o'tishi bilan kristallanib qolishi kerak. Ammo, odatdagi sharoitlarda muvozanat holatga o'tish vaqti juda katta bo'lishi mumkin va u amalda cheksiz uzoq vaqt o'zini muvozanatdagi qattiq jism kabi tutadi (ya'ni amorf moddalarni o'ta sovigan qattiq jismlar deyish mumkin).

Polimer organik qattiq moddalar makromolekulalar deb nom olgan, juda katta chiziqli yoki tarmoqlangan molekulalardan tashkil topgan bo'ladi.

Ba'zi organik birikmalarda molekular uglerod atomlari kimyoviy qo'sh bog'lanishlar bilan o'zaro bog'langan bo'ladi. Bunday qo'sh bog'lanishlar ma'lum sharoitlarda uzilishi mumkin va ayrim molekular bir-birlari bilan birikib, polimerning makromolekulasini hosil qiladi.

Polimerlarda bir xil molekular o'zaro ketma-ket birikib, ancha yirik molekularni hosil qiladi. Bu jarayon *polimerlanish* deyiladi. Polimerlanish reaksiyasiga kirishadigan boshlang'ich modda esa *monomer* deyiladi.

Makromolekular tarkibiga kiradigan monomer molekular soni *polimerlanish darajasi* deyiladi. Polimerlanish darajasi ( $n$ ) ga qarab, bir xil monomerning o'zidan turli xossalarga ega bo'lgan materiallar tayyorlash mumkin ( $n = 20$  bo'lgan polietilen moylash xossalari ega bo'lgan suyuqlik;  $n = 1500 - 2000$  bo'lgan polietilen qattiq, lekin egiluvchan plastik material, undan plyonkalar, butilkalar va elastik trubalar yasash mumkin;  $n = 5000 - 6000$  bo'lgan polietilen qattiq modda bo'lib, undan quyma buyumlar va qattiq trubalar tayyorlash mumkin).

Polimerlanishga teskari jarayon, ya'ni polimer makromolekularining buzilishi *destruksiya* deb ataladi. Polimer destruksiyasi ularning fizik va kimyoviy xususiyatlarining o'zgarishiga olib keladi.

Polimerning molekular massasi juda katta bo'ladi. Chunki uning molekulari bir xil tuzilgan va takrorlanuvchi ko'p sonli monomer molekularlardan iborat.

Polietilen makromolekulari, bir-biri bilan qo'sh bog'lanish hisobiga birikkan 5000 ta ayrim etilen  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$  monomer molekularining zanjiridan iborat bo'ladi.

Makromolekular, molekular kabi moddaning kimyoviy xossalari tashib yuruvchi eng kichik zarra emas (agar makromolekularlardan qisqa zanjirlar tuzilganda bunday xossalari saqlanadi desa bo'ladi). Polimerlarning mexanik xossalari yetarlicha qaytar mexanik deformatsiyalanishga

ega. Xona temperaturasida va undan pastroq temperaturalarda yuqori elastiklik namoyon qiladigan fazoviy panjara strukturali polimerlar, odatda, *rezinalar* deb ataladi.

Kristallanish temperaturasi shishalanish temperaturasidan yuqori bo'lgan polimerlar kristall holatda bo'la oladi. Kristallanishda polimerlarning juda ko'pchiligi polikristallga aylanadi. Bu polimer zanjir bo'laklari orasidagi bog'lanishning turli makromolekulalarga tegishli bo'laklarining tartibli joylashuviga to'sqinlik qilishi tufayli sodir bo'ladi.

### 1.6. Epitaksial pardalar va ko'pqatlamli epitaksial tuzilmalar

O'tgan asrning 70-yillaridan boshlab radiotexnika, televideniye, radioaloqa, elektron asbobsozlikda asosan yarimo'tkazgichli asboblari ishlatila boshlandi. Bu soha rivojlanib faol elementlar hosil qilishda qalinligi 100–200 mkm dan oshmaydigan epitaksiya usulida olingan pardalardan foydalanish mumkinligi aniqlandi. Bunga asoslangan elektronikani esa *mikroelektronika* deb atala boshlandi.

Hozirgi paytda *nanoelektronika* rivojlanmoqda, ya'ni qalinliklari o'nlab nanometr ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) bo'lgan pardalarni ishlatish ustida ishlar olib borilmoqda. Bunday pardalar ustma-ust, qatlam-qatlam qilib joylashtirilib faol va nafaol elementlar hosil qilishda ishlatilishi mumkin. Fan va texnika rivojlanib, uch o'lchamli tizimlar hosil qilinmoqda. Bunday tizimlarda  $1 \text{ sm}^3$  hajmda yuz minglab-millionlab yupqa pardalarga asoslangan elementlarni joylashtirish mumkin.

Demak, kerakli maqsadlarda ishlatilishi mumkin bo'lgan yupqa pardalarni hosil qilish, ularning tarkibini, kristall va elektron tuzilishini, fizik va kimyoviy xususiyatlarini o'rganish fanning ahamiyatini belgilasa, olingan yupqa pardalarning asbob sifatida ishlatilishi uning xalq xo'jaligi va texnikada qo'llanilishini aks ettiradi.



Yupqa pardali materiallarning elektronika sohasida ishlatilishida eng asosiy o'rinni epitaksial pardalar egallaydi. Bunday pardalar katta va o'ta katta integral sxemalar ishlab chiqarishda, lazer asboblari yaratishda, yuqori va o'ta yuqori chastotali generatorlar, quyosh elementlarini olishda, umuman eng zamonaviy va eng noyob mikroelektron asboblari ishlab chiqarishda alohida rol o'ynaydi. U kelajak elektronikasi, ya'ni nanoelektronikaning ham asosini tashkil etishi tabiiy.

**“Epitaksiya”** atamasi kristall sirtida oriyentirlangan holatdagi kristall o'stirish jarayonini bildiradi. Epitaksiyali qatlam kristall taglikka o'tkazilgan monokristall material bo'lib, taglikning strukturasi (morfologiyasi) ni saqlab qoladi.

### **Epitaksiya jarayonining 3 turi ma'lum**

1. **Avtoepitaksiya** — taglikda uning tarkibi va kristall tuzilishi bilan bir xil bo'lgan moddaning o'stirilishi bo'lib, ular bir-biridan kirishmalarining konsentratsiyasi bilangina farq qiladi. Masalan, kremniy monokristali yuzasida kremniy o'stirish.

2. **Geteroepitaksiya** — monokristall taglik yuzasida uning tarkibidan boshqa bo'lgan monokristall plyonkaning o'stirilishi. Masalan, Si yuzasida GaAs o'stirish.

3. **Xemoepitaksiya** — taglik moddasidan farq qiladigan moddani oriyentirlangan o'stirish jarayoni bo'lib, hosil bo'layotgan yangi faza taglikning moddasi bilan tashqaridan kelayotgan moddaning kimyoviy ta'sirlanishi natijasida hosil bo'ladi. Buning natijasida hosil bo'lgan *xemoepitaksial qatlam* tarkibi jihatdan taglik moddasi va o'tkazilayotgan moddadan farq qiladi.

Epitaksiya usuli 60-yillarning boshida ishlab chiqildi va mukammal asboblari hamda qurilmalar yaratishda paydo bo'lgan ko'pgina qiyinchiliklarni yengib o'tish imkoniyatini yaratdi. Bu usul bilan yupqa qatlam va tuzilmalar hosil qilinadi.

Epitaksiya usuli kuchli legirlangan, yarimo'tkazgichli plastina-taglikda shu yarimo'tkazgichning kam kirishmali yupqa qatlamini

hosil qilish imkoniyatini beradi. Jumladan bu qatlamlar diodlarda baza, tranzistorlarda kollektor sifatida ishlatiladi.

Integral mikrosxemalar tayyorlashda quyidagi epitaksial tuzilmalar – epitaksial qatlamlar o‘stirilgan tagliklardan foydalaniladi: bir qatlamli, ko‘p qatlamli, yashirin qatlamli va geteroepitaksiyali. Epitaksiyali tuzilmalar quyidagicha belgilanadi: K – kremniy; D, E – kovak va elektron turli o‘tkazuvchanlik; B, S, M, F – legirovchi elementlar: bor, surma, margimush, fosfor.

**Bir qatlamli epitaksial** tuzilmalar o‘tkazuvchanligi  $n$ -tur bo‘lgan kremniyli monokristall plastinalarga  $p$ -turli qatlamni avtoepitaksiya qilish jarayonida tayyorlanadi. Bir qatlamli epitaksial tuzilmalar sonli koeffitsiyentli kasr ko‘rinishida belgilanadi. Masalan,

$$76 \frac{8KDB - 0,5}{400KES - 0,01}$$

Sonli koeffitsiyent epitaksiyali tuzilmaning diametrini ko‘rsatadi (76 mm), suratdagi birinchi son epitaksiyali qatlam qalinligini belgilaydi (8 mkm), maxrajdagi – qatlam qalinligini ko‘rsatadi (400 mkm). Suratdagi va maxrajdagi ikkinchi son epitaksiyali qatlam (0,5 Om·sm) va taglikning (0,01 Om·sm) solishtirma qarshiligiga mos keladi.

**Ko‘p qatlamli epitaksiyali** tuzilmalar  $p$ -turli kremniy plastinasining ikki tomoniga o‘tkazuvchanlik turlari har xil bo‘lgan qatlamlarni avtoepitaksiya qilish usulida tayyorlanadi. Ko‘p qatlamli epitaksiyali strukturalarning belgilanishi bir qatlamli tuzilmalarning belgilanishiga o‘xshash bo‘lib, uch sathli bo‘ladi.

**Yashirin qatlamli epitaksiyali** tuzilmalar  $p$ -turli kremniy plastinalarida kichik qarshilikli  $n^+$ -kremniyli lokal uchastkalarda fosfor bilan legirlangan  $n$ -turli o‘tkazuvchanlikli qatlamni o‘stirish yo‘li bilan tayyorlanadi. Tuzilmaning belgilanishi yozilish tartibi

bo'yicha quyidagicha: suratda - epitaksial qatlamning qalinligi (mkm); material; o'tkazuvchanlik turi va epitaksial qatlamni legirlovchi element; uning solishtirma qarshiligi (Om·sm); qalinligi (mkm); yashirin qatlamning materiali; o'tkazuvchanlik turi va legirlovchi element; uning sirt qarshiligi (Om/sm); maxrajda - epitaksial qatlamning umumiy qalinligi (mkm); material; o'tkazuvchanlik turi; legirlovchi element; taglikning solishtirma qarshiligi (Om·sm); taglikning oriyentatsiyasi va undan og'ish burchagi (graduslarda); asosli qirqimning oriyentatsiyasi va og'ish burchagi; tuzilmaning nominal diametri (mm). Bunday belgilashga misol:

$$\frac{12KEF - 0,8 / 3,5KES - 30}{312KDB - 10(111) - 8, \left| 112 \right| - 45}$$

**Geteroepitaksiyali tuzilmalar** monokristall taglikda o'tkazuvchanligi  $n$ -turli yoki  $p$ -turli bo'lgan monokristall qatlamlarni o'stirish bilan tayyorlanadi.

Geteroepitaksiyali tuzilmalarni belgilashga misol:

$$\frac{10KDB - 0,5}{60S250}$$

bunda suratda qatlamning parametri keltirilgan -- qalinligi 10 mkm, material - kremniy  $p$ -turli, bor bilan legirlangan, qatlamning solishtirma qarshiligi 0,5 Om·sm; maxrajda birinchi son tuzilmaning diametrini belgilaydi - 60 mm, S harfi - taglik materialini ko'rsatadi - sapfir, ikkinchi son - taglikning qalinligi - 250 mkm.

### **Bobga doir savol va mashqlar**

1. *Moddashunoslik fani nimani tadqiq etadi?*
2. *Elektron texnikasi moddalari necha turga bo'linadi?*

3. *Atomlar, ionlar va molekullarni bir-biriga bog'lab turuvchi kuchlar tabiatiga qarab qattiq jismlar qanday turlarga bo'linadi?*
4. *Haqiqiy kristalldagi nuqsonlarning turlarini ko'rsating.*
5. *Monokristall va polikristallni bir-biridan farqlovchi asosiy belgilarini ko'rsating.*
6. *Stexiometrik nuqsonlarning yuzaga kelish sabablarini ko'rsating.*
7. *Rangdorlik markazlari deganda nimani tushunasiz?*
8. *Kristallni neytral va zaryadlangan tez zarralar bilan nurlantirishda yuz beradigan muhim jarayonlarni ayting.*
9. *Monomer nima?*
10. *Polimerlanish darajasi deb qanday kattalikka aytiladi?*
11. *Amorf moddalar uchun xarakterli bo'lgan belgilarni ko'rsating.*
12. *Epitaksiya jarayonining nechta turi mavjud?*
13. *Sodda kub panjarali kaliy brom kristalining zichligini toping ( $a=6,59 \text{ \AA}$ ).*
14. *Geksagonal panjarali kristallning elementar katagi hajmini toping.  $a_1$  va  $a_3$  lar berilgan deb hisoblang.*
15. *Kadmiy kristali zich geksagonal kristall panjaraga ega. Agar  $a_1=2,97 \text{ \AA}$ ,  $a_3=5,61 \text{ \AA}$  bo'lsa, uning zichligini aniqlang.*
16. *Birinchi Brilluyen zonasi hajmini aniqlang. Kubik panjara uchun  $a=3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  deb hisoblang.*

## II bob. TOK O'TKAZUVCHI MODDALAR

Tok o'tkazuvchi moddalar sifatida qattiq jismlar, suyuqliklar va ma'lum sharoitlarda esa gaz ham qo'llanilishi mumkin. Elektr texnikada qo'llaniladigan aksariyat qattiq o'tkazuvchi moddalarga metall va uning qotishmalari kiradi.

Yuqori elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan o'tkazgich moddalarga normal temperatura sharoitda solishtirma qarshiligi  $\rho \leq 0,05 \text{ mkOm}\cdot\text{m}$  bo'lgan metallar kiradi. Normal temperaturada solishtirma qarshiligi kamida  $0,3 \text{ mkOm}\cdot\text{m}$  bo'lgan qotishmalar *yuqori qarshilikka ega qotishmalar* deyiladi. Yuqori o'tkazuvchanlikka ega metallar sim, tok o'tkazuvchi kabellarda, elektr mashinasi va transformatorlarning chulg'amlari va boshqa asbob-uskunalarda ishlatiladi. Yuqori qarshilikka ega metall va qotishmalar rezistorlar, elektr isitkich asboblari, cho'g'lanma lampalarning tolalarini tayyorlashda foydalaniladi.

O'ta past (kriogen) temperaturalarda solishtirma qarshiligi o'ta kichik bo'lgan moddalar – o'ta o'tkazgichlar va krioo'tkazgichlar alohida ahamiyatga ega.

### 2.1. Metallarning tuzilishi va asosiy xossalari

Qattiq o'tkazgich ion panjarali kristall sistema ko'rinishida bo'lib, ichki qismida ozod elektronlar joylashgan deb faraz qilinadi. Odatda, bu elektronlar issiqlik ta'sirida betartib, elektr maydoni ta'sirida esa aniq yo'nalish bo'yicha harakatlanadi. Elektronlar harakati davomida kristall panjara tugunlari bilan to'qnashishi natijasida ajralib chiqadigan energiyani ta'riflovchi Joule-Lens qonuni keltirib chiqarilgan, ya'ni metallarda elektr o'tkazuvchanlik va elektr energiya isrofi tushuntirib berilgan.

Bundan tashqari, mazkur qonun metallarning elektr va issiqlik o'tkazuvchanliklari orasidagi bog'lanishni ham izohlaydi. 2.1-jadvalda metallarning asosiy xossalari keltirilgan.

2.1-jadval

Ayrim metallarning asosiy xossalari

Metall nomi	Zichligi, $\times 10^3, \text{kg/m}^3$	Erish temperaturasi, $^{\circ}\text{C}$	Solishtirma issiqlik sig'imi, $\text{J/kg}\cdot\text{K}$	Chiziqli kengayishi $\text{TK}_p, \times 10^6 \text{K}^{-1}$	Solishtirma qarshiligi, $\text{mkOm}\cdot\text{m}$	Elektronlarning chiqish ishi, eV	Qayishqoqlik moduli, GPa
Simob	13,60	-38,9	138	61,0	0,958	4,5	-
Seziy	1,87	26,5	234	95,5	0,210	1,9	1,8
Talliy	5,91	29,7	381	18,0	0,560	-	-
Kaliy	0,87	63,7	753	80,0	0,09	2,2	-
Natriy	0,97	97,6	1260	70,0	0,046	2,3	10
Indiv	7,28	156,0	243	25,0	0,090	-	10,5
Litiy	0,53	186,0	3620	-	-	-	4,9
Qalay	7,31	232,0	226	23,0	0,120	4,4	54,0
Kadmiy	8,65	321,0	230	30,0	0,076	4,0	62,3
Qo'rg'oshin	11,4	32,0	130	29,0	0,210	-	15,7
Ruh	7,14	420,0	90	31,0	0,059	-	92,2
Magniy	1,74	651,0	1040	26,0	0,045	3,6	44,3
Aluminiy	2,7	657,0	922	24,0	0,028	4,3	70,8
Bariy	3,5	710,0	268	17,0	0,500	-	12,6
Kumush	10,5	961,0	234	19,0	0,016	4,4	80
Oltin	19,3	1063	126	14,0	0,024	4,8	77,5
Mis	8,94	1083,0	385	16,0	0,017	4,3	129
Berilliy	1,85	1284,0	200	13,0	0,04	3,9	287
Nikel	8,9	1455,0	444	13,0	0,073	5,0	196
Kobalt	8,71	492,0	435	12,0	0,062	-	200
Temir	7,87	1535,0	452	11,0	0,098	4,5	211

Palladiy	12,1	1554,0	243	12,0	0,110	-	121
Titan	4,5	1724,0	577	8,1	9,480	-	104
Xrom	7,1	1850,0	-	6,5	0,210	-	245
Platina	21,4	1770,0	134	9,0	0,105	-	170
Toriy	11,5	1850,0	113	11,2	0,186	3,3	79,2
Sirkoniy	6,5	1860,0	276	5,1	0,410	3,7	68,4
Iridiy	22,5	2350,0	-	-	-	-	528
Niobiy	8,57	2410,0	272	7,2	0,140	4,1	100
Molibden	10,2	2620,0	264	5,0	0,057	4,2	294
Tantal	16,7	2850,0	142	6,5	0,35	4,1	177
Reniy	20,5	3180,0	138	4,7	0,210	4,8	405
Volfram	19,3	3380,0	218	4,4	0,055	4,5	407

O‘tkazgich moddalarning xossalari ni ifodalaydigan asosiy ko‘rsatkichlar quyidagilardan iborat:

1) solishtirma qarshilik ( $\rho$ ) yoki solishtirma o‘tkazuvchanlik ( $\gamma = 1/\rho$ );

2) solishtirma qarshilikning temperatura koeffitsiyenti  $\alpha_p$ ;

3) issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti ( $\gamma_T$ );

4) kontakt potensiallar farqi va termoelektr yurituvchi kuch (TEYuK);

5) elektronlarning metall dan chiqish ishi;

6) cho‘zilishdagi mustahkamlik chegarasi ( $s$ ) va uzilish oldidagi nisbiy cho‘zilish ( $\Delta l/l$ ).

O‘tkazgichdagi tok zichligi va elektr maydon kuchlanganligi o‘zaro quyidagicha bog‘lanishga ega:

$$J = \gamma \cdot E,$$

bunda:  $J$  – tok zichligi, A/m<sup>2</sup>;  $\gamma$  – o‘tkazgich moddaning solishtirma elektr o‘tkazuvchanligi, V/m.

Metallarda solishtirma o‘tkazuvchanlik elektr maydoni kuchlanganligiga bog‘liq bo‘lmaydi. Solishtirma o‘tkazuvchanlikka teskari kattalik solishtirma qarshilik  $\rho = 1/\gamma$  deyilib, qarshiligi

$R$  uzunligi bir va o'zgarmas kesim yuzasi  $S$  bo'lgan o'tkazgich uchun u quyidagicha hisoblanadi:

$$\rho = R \cdot S / l.$$

Metallarning klassik qonuniyatiga asosan metall o'tkazgichlarning solishtirma o'tkazuvchanligi quyidagichadir:

$$\gamma = e^2 n_0 / 2 m u_{or}$$

bunda:  $e$  – elektronning zaryadi;  $n_0$  – metallning hajm birligidagi ozod elektronlar soni;  $l$  – elektron erkin bosib o'tgan yo'lining o'rtacha uzunligi;  $u_{or}$  – metalldagi ozod elektron issiqlik harakatining o'rtacha tezligi.

Turli xil metallar uchun elektronlarning betartib issiqlik harakat tezligi  $u_{or}$  taxminan bir xildir. Shu sababli, solishtirma o'tkazuvchanlik qiymati elektronlar erkin bosib o'tgan yo'ning o'rtacha tezligi va o'tkazgich moddaning tuzilishiga bog'liq bo'ladi. Nisbatan to'g'ri kristall panjarali sof metallarning solishtirma qarshiligi eng kichik qiymatga ega. Agar metall tarkibiga qo'shimcha kiritilsa, uning kristall panjarasi deformatsiyalanib,  $\rho$  qiymatining o'sishiga olib keladi.

## 2.2. Metallar elektr o'tkazuvchanligining temperatura va nuqson konsentratsiyasiga bog'liqligi

Metallar elektr o'tkazuvchanligi (qarshiligi) temperaturaga bog'liq ravishda o'zgaradi. Temperatura ortishi bilan elektr o'tkazuvchanlik (qarshilik) kamayib (ortib) boradi, pasayganda esa ma'lum temperaturagacha ortib (pasayib) boradi. Juda past temperaturalarda metallarning solishtirma o'tkazuvchanligi (qarshiligi) ma'lum bir tayinli qiymat  $\sigma_A$  ( $\rho_A$ ) ga erishadi va u



temperatura o'zgarishiga bog'liq bo'lmaydi.  $\sigma_A$  ( $\rho_A$ ) metalldagi yot aralashmalar va nuqsonlarga bog'liq bo'lib, uni qoldiq o'tkazuvchanlik (qarshilik) deb ham yuritiladi.

Hozirgi tasavvurlarga ko'ra, metallning solishtirma elektr qarshiligi elektronlarning fonon va nuqsonlar bilan ta'sirlashuvidan kelib chiqadi, ya'ni

$$\rho = \rho_f + \rho_n \quad (2.1)$$

yoki o'tkazuvchanlik orqali yozsak,

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\sigma_f} + \frac{1}{\sigma_n} \quad (2.2)$$

Oxirgi ikki ifoda Mattisen qoidasi deb nomlanadi.

Yuqori (xona) temperaturalarda solishtirma qarshilikning temperaturaga bog'liqligi quyidagi ko'rinishida bo'ladi:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (2.3)$$

bunda  $\alpha$  – solishtirma elektr qarshilikning temperatura koeffitsiyenti deb ataladi. 2.2-jadvalda ba'zi metallar va metall birikmalari uchun  $\alpha$  ning qiymatlari keltirilgan.

2.2-jadval

**Ba'zi metallar va metall qotishmalari uchun solishtirma elektr qarshilikning temperatura koeffitsiyenti qiymatlari**

№	Metall nomi	$\alpha, 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	№	Metall nomi	$\alpha, 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
1.	Alyuminiy	1.2	12.	Qalay	4.4
2.	Volfram	5	13.	Platina	3.9

## 2.2-jadvalning davomi

3.	Temir	6	14.	Qo'rg'oshin	3.7
4.	Oltin	4	15.	Simob	1.0
5.	Konstantan	0.05	16.	Kumush	4.1
6.	Jez	0.1-0.4	17.	Ruh	4.2
7.	Magniy	3.4	18.	Po'lat	1-4
8.	Mis	0.39	19.	Mangan	0.01
9.	Nikelin	0.1	20.	Cho'yan	1.0
10.	Nikel	6.5	21.	Fekral	0.1
11.	Nixrom	0.1			

Mutloq nolga yaqin temperaturalarda (2.3) ifoda bajarilmaydi, unda solishtirma qarshilik quyidagisi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\rho = \rho_A + AT^2 + BT^5. \quad (2.4)$$

Ushbu munosabatdagi  $BT^5$  qo'shiluvchi elektronlarning panjara tebranishlari bilan o'zaro ta'siri tufayli,  $AT^2$  esa elektronlarning o'zaro to'qnashuvini hisobiga hosil bo'lgan solishtirma qarshiliklar.  $A$  va  $B$  lar temperaturaga bog'liq bo'lmagan doimiylar.

### 2.3. Metall qotishmalari va birikmalari

Toza metallar, odatda, mustahkamligi past va uncha yuqori bo'lmagan texnologik xususiyatlarga ega bo'ladi. Shu sababli texnikada metall qotishmalari qo'llaniladi. *Metall qotishmasi* deb, bir qancha tur moddalarni birga eritishdan hosil bo'lgan murakkab moddaga aytiladi. Qotishmaning tarkibiy moddalari sifatida metallar, nonmetallar va kimyoviy birikmalar olinadi. Qotishmaning tarkibiy moddalari soniga qarab ular ikki tarkibli, uch tarkibli va

ko'p tarkibli bo'lishi mumkin. Qotishmaning tarkibiy moddalari soni va turi fizik-kimyoviy o'zaro ta'sirlashuvda, qotishmaning holatini xarakterlovchi fazalar hosil qiladi.

**Faza** — qotishmaning muayyan tarkibi, kristall panjarasi turi va bo'laklar sirtining bir-biridan ajralishi bilan xarakterlanadigan birjinsli qismi. Tarkibida mavjud fazalar miqdoriga bog'liq ravishda qotishmalar bir fazali, ikki fazali va ko'p fazali qotishmalarga ajratiladi. Qotishmaning tarkibidagi suyuq holatdagi tarkibiy moddalari, odatda, bir-birida cheklanmagan miqdorda eriydi va suyuq eritma hosil qiladi. Qattiq holatdagi tarkibiy moddalar esa qattiq eritmalar, mexanik aralashmalar, kimyoviy birikmalar hosil qiladi.

Agar qotishmaning tarkibiga kiruvchi elementlar, suyuq holatdan qattiq holatga o'tganda bir-birida erimasa va o'zaro ta'sirlashmasa, u holatda mexanik aralashma (masalan, qalay-qo'rg'oshin, aluminay-mis) hosil bo'ladi. Bunday mexanik aralashmalarda tarkibiga kiruvchi har ikki element kristall panjarasining turi mavjud bo'ladi.

Tuzilishiga ko'ra kimyoviy birikmalar ularni hosil qiluvchi elementlar xossalariidan tubdan farq qiluvchi, muayyan erish temperaturasiga ega bo'lgan bir jinsli qattiq jism hisoblanadi. Kimyoviy birikmalarning tarkibi stexiometrik proporsiyada sodda  $A_m B_n$  formula bilan ifodalanadi. Kimyoviy birikmalarning ikki turi mavjud: metall-nometall va metall-metall. Metall-nometall kimyoviy birikmalarga ion bog'lanishli fazalar: sulfidlar, oksidlar, fosfidlar va suqilish fazalari: karbidlar, nitridlar, boridlar va gidridlar mansub. Metall-metall tizimlarga esa elektronli birikmalar misol bo'ladi. Elektronli birikmalar bir valentli metallar (mis, kumush, litiy) bilan bir tomondan o'tish guruhi metallari (temir, marganets, kobalt) bilan hosil bo'lsa, ikkinchi tomondan esa valentligi 2 dan 5 gacha qiymatlarni qabul qiladigan metallar (aluminium, berilliy, magniy, ruh) bilan hosil qilinadi. Elektronli birikmalar muayyan elektron konsentratsiyaga, ya'ni

valent elektronlari sonining atomlar soniga nisbatiga ega bo'ladi. Agar bu nisbat – 3/2 ga teng bo'lsa, bunday birikmalar hajmiy markazlashgan kub (HMK) ko'rinishidagi kristall panjara hosil qiladi, bundaylarga CuZn, CuBe, Cu<sub>3</sub>Al qotishmalari; 21/13 ga teng bo'lsa, bunday birikmalar murakkab kubik panjara hosil qiladi, ularga Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>, Co<sub>5</sub>Zn<sub>21</sub>, Fe<sub>5</sub>Zn<sub>21</sub> qotishmalari; 7/4 ga teng bo'lsa, ularga geksagonal panjara hosil qiladi ular CuZn<sub>3</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>, Cu<sub>3</sub>Si qotishmalari misol bo'ladi. Elektronli birikmalar misli qotishmalar (latun va bronza) uchun xarakterlidir.

Tarkibiy moddalaridan biri (erituvchi) o'zining kristall panjara shaklini saqlagan holda, boshqa tarkibiy modda (eruvchi) uning kristall panjarasiga joylashib, qisman uni egrilanishi yuz beradigan birikmaga *qattiq qorishma* deyiladi. Qattiq qorishmalar ikki turda bo'ladi: o'rinbosar (o'rin almashinish) qattiq qorishma va suqilma (suqilish) qattiq qorishma. O'rinbosar qattiq qorishmalar nisbatan tartibli strukturaga ega bo'ladi va o'zining xususiyatlari bo'yicha kimyoviy birikmalarga yaqin turadi, cheklanmagan eruvchanlikka ega bo'lishi mumkin. So'qilma qattiq qorishmalarda esa eruvchanlik nasbatan cheklangandir.

Muvozanat holatidagi turg'un fazalarning mavjudlik shartlari Gibbsning fazalar qoidasi bilan aniqlanadi. Ushbu qoida fazalar soni  $F$ , tarkibiy moddalari miqdori  $K$  va erkinlik darajasi soni  $S$  o'rtasidagi miqdoriy munosabatni o'rnatib, qotishmani qizdirish va sovutish jarayonida yuz beruvchi jarayonlarni oldindan aytish imkonini beradi va berilgan shartlarda tizimning fazalar sonini aniqlaydi. Fazalar qoidasi quyidagi sodda formula  $S = K + P - F$  bilan ifodalanadi.

Tizimning erkinlik darajasi yoki tizimning variantlilikligi  $S$  deyilganda, muvozanat holatida turgan fazalar sonini o'zgartirmagan holda o'zgarishi mumkin bo'lgan tashqi (temperatura, bosim) va ichki (zichlik) omillarning soni tushuniladi. Metall qotishmalari uchun tashqi omil temperatura ekanligini e'tiborga olsak, unda fazalar qoidasi  $S = K + I - F$  ko'rinishiga keladi.

Tizimning erkinlik darajasi, yoki tizimning variantliliği S manfiy bo'lmashligini e'tiborga olsak, metall qotishmalarining muvozanati uchun, ular tarkibiy tuzilmasidagi fazalar soni  $F$ , tarkibiy moddalar soni  $K$  dan ko'pi bilan birga ortiq bo'lishi mumkin.

Toza metallning kristallanishida ikkita – qattiq va suyuq fazalar mavjudligini inobatga olsak, uning erkinlik darajalari soni  $\theta$  ga teng bo'ladi, ya'ni mazkur tizim invariant hisoblanib, tizimdagi har ikkala faza qat'iy temperaturada muvozanatda bo'ladi. Toza metall suyuq holatda  $l$  ga teng bo'lgan erkinlik darajasiga ega (monovariant tizim), ya'ni fazalar sonini o'zgartirmasdan temperaturaning ma'lum chegaralarda o'zgartirish imkoniga ega.

Gibbsning fazalar qoidasidan, ikki tarkibli sistemalarda bir vaqtning o'zida mavjud bo'ladigan fazalar soni 3 ta bo'lishi kelib chiqadi va tarkibiy moddalar soni ko'p bo'lgan qotishmalarda muvozanatli holat mavjud bo'lmashligi ham mumkin.

## 2.4. Nometall moddalarda elektr o'tkazuvchanlik

### 2.4.1. Dielektriklarning elektr o'tkazuvchanligi

Jismda elektr zaryadlarining tartibli harakati elektr tokini hosil qiladi. Zaryadlarning bunday tartibli harakati elektr maydon kuchlanganligi ta'sirida vujudga keladi. Dielektrikda elektr o'tkazuvchanlik uning tarkibidagi erkin zaryadlar hisobiga sodir bo'ladi. Hajm birligidagi  $n$  ta zaryad tashuvchisi bo'lgan va zaryad qiymati  $q$  ga teng bo'lgan dielektrikka tashqi elektr maydoni ( $E$ ) ta'sir ettirilsa, shu elektr maydon ta'sirida zaryad kuch chiziqlari yo'nalishida ma'lum tezlik  $J$  oladi. Jismning ko'ndalang yuzasidan vaqt birligida o'tadigan elektr miqdori, ya'ni tok zichligi:

$$J = nqJ \quad (2.5)$$

yoki

$$J = \frac{E}{\rho} \quad (2.6)$$

$\rho = 1/\gamma$  ekanligini hisobga olsak:

$$J = \gamma E, \quad (2.7)$$

bunda  $\rho$  – solishtirma elektr qarshilik ( $\text{Om}\cdot\text{m}$ );  $\gamma$  – solishtirma elektr o'tkazuvchanlik ( $\text{Om}^{-1}\text{m}^{-1}$ ).

Jism elektr o'tkazuvchanligi elektronli, ionli (yoki elektrolitik) va molionli (yoki elektroforetik) ko'rinishlarga egadir. Dielektrlarda, asosan, ionli elektr o'tkazuvchanlik kuzatiladi. Odatda, dielektrik oz bo'lsada, ma'lum miqdordagi elektr tokini o'zidan baribir o'tkazadi. Bu esa erkin zaryad tashuvchilar mavjudligi bilan tushuntiriladi.

Izolatsiya moddasi, odatda, juda katta solishtirma qarshilikka ega bo'ladi. Bu qiymat qancha yuqori bo'lsa, dielektrikdan shuncha kam miqdorda elektr toki o'tadi. Bunday xossaga ega dielektrlar yuqori sifatli hisoblanadi. Elektr maydoni ta'sirida gaz, suyuqlik va qattiq holatdagi dielektrlardan qandaydir miqdorda elektr toki o'tib, dielektrikda elektr energiya isrofi kuzatiladi. Bunday isroflarni aniqlashda dielektrlarning elektr o'tkazuvchanligini o'rganish katta amaliy ahamiyatga egadir. Elektr o'tkazuvchanlikni o'rganishda izolatsiya moddasidan yasalgan va metall elektrodlar bilan jihozlangan namunaga kuchlanish beriladi. Namuna, asosan, yassi taxtacha shaklida tayyorlanib, elektrodlar uning bir yoki qarama-qarshi ikki yuzasiga o'rnatiladi. Dielektrikning hajmiy qarshiligini aniqlash uchun elektr toki namunaning hajmi bo'yicha o'tkaziladi va elektrodlar qarama-qarshi yuzaga o'rnatiladi. Mazkur elektrodlar galvanometr orqali elektr manbayiga ulanadi. Dielektrikning yuza qarshiligini aniqlashda esa elektrodlar namunaning bir yuzasiga o'rnatilishi mumkin.

Dielektrikka o'zgarmas kuchlanish ulangandan so'ng ma'lum vaqt (bir daqiqa) o'tgandan so'ng, tok o'zining qandaydir o'zgarmas qiymatiga erishadi va u tok ichki tok ( $I_{\text{ich}}$ ) deyiladi. Dielektrikning qarshiligi  $R$  berilgan kuchlanish ( $U$ ) ga to'g'ri proporsional, dielektrikdan o'tayotgan ichki tokka esa teskari proporsional bo'ladi:

$$R = \frac{U}{I_{ich}} \quad (2.8)$$

Dielektrikning elektr o'tkazuvchanligi, aksincha, qarshilikka teskari proporsionaldir:

$$\gamma = \frac{1}{R} = \frac{I_{ich}}{U} \quad (2.9)$$

Dielektrik sirti bo'ylab o'tadigan tokni sirt toki ( $I_s$ ) deb atalib, bu tok miqdorining hajmiy tok  $I$  miqdori bilan yig'indisi esa dielektrikdan o'tadigan umumiy tok ( $I_u$ ) ni tashkil etadi:

$$I_{ich} = I_s + I, \quad (2.10)$$

bunda

$$I = U\gamma = \frac{U}{R}; \quad I_s = U\gamma_s = \frac{U}{R_s}$$

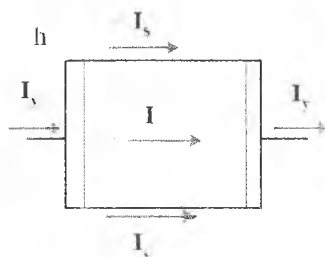
Dielektrikning umumiy elektr o'tkazuvchanligi quyidagicha aniqlanadi:

$$\gamma_y = \gamma + \gamma_s \quad (2.11)$$

yoki

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_s}; \quad R_y = \frac{R \cdot R_s}{R + R_s}$$

ya'ni dielektrikning umumiy qarshiligi bir-biriga parallel ravishda ulangan hajmiy va yuza qarshiliklar yig'indisidan iborat bo'ladi.



2.1-rasm. Dielektrik orqali o'tayotgan ichki va yuza tok oqimlari

Ko'ndalang kesim yuzasi  $S$  va uzunligi  $h$  bo'lgan dielektrikning hajmiy qarshiligi  $R$  quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$R = \rho \frac{h}{S} . \quad (2.12)$$

Dielektrikning solishtirma yuza qarshiligi esa:

$$\rho = R \frac{S}{h} . \quad (2.13)$$

Xalqaro birliklar tizimi (SI) ga asosan bu qarshilik  $\text{Om}\cdot\text{m}$  yoki  $\text{Om}\cdot\text{mm}^2/\text{m}$  birliklarda olinadi:

$1 \text{ Om}\cdot\text{m} = 100 \text{ Om}\cdot\text{sm} = 10^6 \text{ Om}\cdot\text{mm}^2/\text{m} = 10^6 \text{ mkOm}\cdot\text{m} = 10^8 \text{ mkOm}\cdot\text{sm}$ .

Dielektrikning solishtirma hajmiy o'tkazuvchanligi uning solishtirma hajmiy qarshiligiga teskari proporsionaldir. Elektr o'tkazuvchanlik jismning holati (gaz, suyuq, qattiq) ga, unga ta'sir etuvchi kuchlanish turi va miqdoriga, muhit temperaturasi, namligi va boshqa ta'sirlarga bog'liq bo'ladi. O'zgaruvchan elektr maydoni ta'siridagi dielektrikdan o'tuvchi tok oqimi ichki va absorbsiya toklari yig'indisidan tashkil topadi. O'zgarmas kuchlanish ta'sirida bo'lgan dielektrikdan faqat ichki tok o'tib, absorbsiya toki faqat kuchlanishni ulash yoki uzish paytida kuzatiladi. Past sifatli suyuq va qattiq izolatsiya moddalarida  $\rho = 10^6 - 10^8 \text{ Om}\cdot\text{m}$  bo'lib, yuqori (oliy) sifatlilarida esa, bu qiymat  $10^{14} - 10^{18} \text{ Om}\cdot\text{m}$  ga teng bo'lishi mumkin. Yaxshi sifatli dielektrik va elektr o'tkazgich modda orasidagi solishtirma hajmiy qarshiliklar farqi  $10^{22} - 10^{25} \text{ Om}\cdot\text{m}$  ga yetib boradi. Dielektrikning solishtirma yuza qarshiligi elektrodlar o'zaro teng va yuzaga parallel ravishda o'rnatilganda:

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l} , \quad (2.14)$$



bunda:  $R_5$  – dielektrikning yuza qarshiligi ( $Om$ );  $d$  – elektrodning uzunligi ( $m$ );  $I$  – mazkur elektrodlar orasidagi masofa ( $m$ ).

Bu kattalik yordamida dielektrikning solishtirma yuza o'tkazuvchanligi ( $\gamma = I/\rho$ ) aniqlanadi. Elektr o'tkazuvchanlikning o'lchov birligi sifatida simens ( $Sm$ ) qabul qilingan. Qattiq dielektrikning to'liq elektr o'tkazuvchanligi uning yuza va hajmiy elektr o'tkazuvchanliklari yig'indisidan iboratdir. Kuchli va kuchsiz elektr maydonlarida joylashgan dielektrlarda zaryad tashuvchilar turli holda sodir bo'ladi. Dielektrikning agregat holatiga qarab, kuchsiz elektr maydoni ta'sirida ionli elektr o'tkazuvchanlikka egadir. Elektr o'tkazuvchanlikka dielektrik tarkibidagi qo'shimcha va begona zarralar ham sababchi bo'ladi. Bular dielektrikning elektr o'tkazuvchanligini oshiribgina qolmay, uning elektr mustahkamligining pasayishiga ham olib keladi. Kuchli elektr maydoni ta'sirida zaryad tashuvchilar neytral zarralar bilan to'qnashib, ularni ionlashtiradi va natijada, urilish ionlashishi sodir bo'ladi.

Elektr maydoni o'zining kritik qiymatidan o'tganida, erkin zaryad tashuvchilar miqdori keskin ortadi va dielektrik o'zining izolatsiyalash xossasini yo'qotadi. Bunday holatda dielektrikda teshilish hodisasi sodir bo'ladi. Qattiq va suyuq dielektrlar uzoq vaqt kuchlanish ta'sirida bo'lganda, ulardan o'tadigan tok miqdori kamayishi yoki ortishi mumkin. Birinchi holda dielektrikdagi elektr o'tkazuvchanlikni, asosan, turli xil qo'shimchalar keltirib chiqarib, vaqt o'tishi natijasida namunada elektr tozalanishi sodir bo'ladi va dielektrikdan o'tayotgan tok miqdori kamayadi. Aksincha, vaqtga nisbatan tokning ortishi esa dielektrikdagi zaryadlar hisobiga ro'y beradi. Uzluksiz ta'sir etadigan kuchlanish dielektrikning eskirishiga olib keladi va bu jarayon uning teshilishi bilan yakunlanadi.

Kondensatorning doimiy zaryadsizlanish vaqti amaliy jihatdan keng foydalanadigan kattalik bo'lib, u quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\tau_0 = R_{iz} \cdot C = \rho \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_k, \quad (2.15)$$

bunda:  $R_{iz}$  – kondensator izolatsiyasining qarshiligi, Om;  
 $C$  – kondensatorning sig‘imi, F.

### 2.4.2. Gazlarning elektr o‘tkazuvchanligi

Gazlarda elektr toki erkin elektronlar yoki ionlar hisobiga sodir bo‘ladi. Kuchsiz elektr maydonidagi gaz neytral elektr zarralar – molekula yoki atomlardan tashkil topadi. Tashqi ta‘sir-ionizator orqali sodir bo‘ladigan o‘tkazuvchanlik *gazning elektr o‘tkazuvchanligi* deyiladi. Ikkita yassi elektrod ionlashtirilgan gaz muhitiga kiritilib, ularga kuchlanish berilsa, ionlar harakatga kelib zanjirdan elektr toki o‘tadi.

Normal sharoit ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=65\%$ ,  $p=760$  mm sim. ust) da havoda to‘yingan tok zichligi  $I$  juda kichik qiymatga, ya‘ni kuchlanishning 0,6 V/m qiymatida  $10^{-15}$  A/m<sup>2</sup> ga to‘g‘ri keladi. Shuning uchun ham, havo yaxshi dielektrik hisoblanadi. Gazlarda mustaqil bo‘lmagan elektr o‘tkazuvchanlik tashqi ionizatorlar – kosmik yoki radioaktiv nurlar bartaraf etilsagina to‘xtaydi. Bunda zaryad tashuvchilar keskin kamayishi sababli, gazdan o‘tayotgan tok nolga intiladi.

Yuqori qiymatli elektr maydonining erkin zaryad tashuvchilarga kuchli ta‘sir etishi natijasida zaryadlarning harakat tezligi ortadi. Gaz molekullarini bilan to‘qnashuvi oqibatida mazkur zaryadlarning kinetik energiyasi molekullarining ionlashish energiyasidan ortib ketadi. Tezkor elektronlarning neytral molekula bilan to‘qnashuvi natijasida molekula musbat ion va elektrodlarga parchalanadi. Har bir to‘qnashuvda ikkita elektron hosil bo‘lib, ular o‘z navbatida yana ikki molekulanı parchalaydi va hokazo. Bu jarayon *urilish ionlashishi* deyiladi.

*Fotoionlashish* deganda, molekullarning uyg‘ongan holatidan asl holatiga o‘tishi tushuniladi. Bu jarayonda ma‘lum miqdordagi

energiya nurlanishga sarf bo'ladi. Nur molekulaga ta'sir etib, yangidan-yangi erkin zaryad tashuvchilarni keltirib chiqaradi. Urilish ionlashishi va fotoionlashish jarayonlari bir vaqtning o'zida sodir bo'ladi.

Agar ionlashtirilgan gaz o'zaro parallel joylashgan ikkita yassi elektrod oralig'ida bo'lib, bu elektrodarga kuchlanish berilsa, mazkur kuchlanish ta'sirida ionlar maydon yo'nalishi tomon siljiydi va zanjirdan tok o'ta boshlaydi. Bunda ionlarning bir qismi elektrodlarda neytrallanadi, qolgan qismi esa rekombinatsiya hisobiga yo'qoladi. Kuchlanish oshirib borilsa, ionlar elektrodarga tomon yo'naladi va rekombinatsiya bo'lishiga ulgurmaydi. Bunda, gazdagi elektrodlar oralig'idagi barcha ionlar kuchlanishning ma'lum qiymatida faqat elektrodlarda zaryadsizlanadi.

To'yinish toki normal sharoitdagi havo uchun elektrodlar oralig'i 10 mm va maydon kuchlanganligi 0.6 V/m bo'lganda sodir bo'ladi. Bu tok qiymati havoda juda kam bo'lib, taxminan  $10^{-15}$  A/m<sup>2</sup> ga teng bo'ladi. Shu sababli, urinish ionlashishi sodir bo'ladigan holatga qadar havo yaxshi dielektrik hisoblanadi. Urilish ionlashishi sodir bo'lganda gazlarda mustaqil elektr o'tkazuvchanlik hosil bo'ladi. Kuchlanishning  $U_i$  qiymatidan yuqori holatlarida va kuchlanish o'sishi bilan tok keskin o'sa boshlaydi. Havoda bu holat maydon kuchlanganligi  $E_i = 10^5 - 10^6$  V/m ga teng bo'lgan paytda sodir bo'ladi.

### 2.4.3. Suyuq dielektriklarning elektr o'tkazuvchanligi

Suyuqlikning elektr o'tkazuvchanligi uning molekula tuzilishi va tarkibidagi qo'shimchlarga bog'liqdir. Qutbli suyuqlik qutbsiz suyuqlikdan o'zining kam elektr o'tkazuvchanligi bilan farqlanadi. Aksariyat suyuqliklarning molekulari ionlashmaganligi sababli, ularning elektr o'tkazuvchanligida qo'shimcha (nam, tuz, ishqor, kislota va hokazo) larning ta'siri katta bo'ladi. Suyuqlik tarkibida juda oz miqdorda bo'lgan bunday qo'shimchalar dielektrikning

elektr o'tkazuvchanligini sezilarli darajada oshiradi. Suyuqlikda ionlarning yoki zaryadlangan kolloid zarralarning siljishi undan tok o'tishini ta'minlaydi.

Qutbli suyuqliklar yuqori elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lib, ularning dielektrik singdiruvchanligi ortishi natijasida dielektrikning elektr o'tkazuvchanligi ham ortadi. O'ta qutbli suyuqliklar yuqori elektr o'tkazuvchanlikka egaligi sababli bunday suyuqliklar ionli elektr o'tkazuvchanlikka ega o'tkazgichlar deb qaraladi. Suyuq dielektrik tarkibidagi qo'shimchalardan tozalansa, uning solishtirma qarshiligi birmuncha ortadi. Masalan, qutbsiz suyuq dielektrik orqali uzoq vaqt elektr toki o'tkazilsa, ionlarning elektrodlarida yig'ilishi natijasida mazkur suyuqlik qo'shimchalardan tozalanadi va dielektrik qarshiligi ortadi. Natijada suyuq dielektrikda elektr tozalanishi sodir bo'ladi.

Suyuq dielektriklarning solishtirma o'tkazuvchanligi temperaturaga uzviy ravishda bog'langan bo'lib, temperaturaning ortib borishi bilan uning qovushqoqligi kamayadi. Oqibatda ionlarning siljivchanligi ortib, suyuqlikning elektr o'tkazuvchanligi ko'payadi.

Suyuq dielektrikning solishtirma o'tkazuvchanligi quyidagicha aniqlanadi:

$$\gamma = A \exp\left(-\frac{a}{T}\right), \quad (2.16)$$

bunda:  $A$ ,  $a$  – berilgan suyuqlikni ifodalaydigan o'zgarmas kattaliklar.

Suyuqlikning solishtirma o'tkazuvchanligi va qovushqoqligi orasidagi bog'lanish qovushqoq muhitda doimiy kuch ta'sirida siljuvchi shar harakatiga asoslangan Stoks qonunidan foydalanib o'rganiladi. Ushbu qonunga, asosan, suyuq muhitda joylashgan sharning harakat tezligi:

$$\mathcal{G} = \frac{F}{6\pi r \eta}, \quad (2.17)$$

bunda:  $F$  – kuch,  $N$ ;  $r$  – shar radiusi, m;  $\eta$  – suyuqlikning dinamik qovushqoqligi.

Agar ion shar ko‘rinishli, uning zaryadi  $q$  va harakatlantiruvchi kuchi  $F = Eq$  deb olsak, u holda suyuqlikning solishtirma elektr o‘tkazuvchanligi Om qonuniga, asosan, quyidagicha aniqlanadi:

$$\gamma = \frac{n_0 q^2}{6\pi r \eta}, \quad (2.18)$$

bunda:  $n_0$  – zaryad tashuvchilar miqdori.

Ushbu ifodaga, asosan, suyuqlik qiziganda, uning qovushqoqligi kamayishi sababli, dielektrikning elektr o‘tkazuvchanligi ortadi. Elektr o‘tkazuvchanlik kolloid birikmalarida ham kuzatilib, ularda zaryad tashuvchi vazifasini molionlar bajaradi. Elektr texnikasida kolloid birikmalaridan asosan emulsiya, suspenziya (suyuqlikdagi qattiq zarralar) va aerezollar (gaz tarkibidagi qattiq va suyuq zarralar) ishlatiladi. Elektr maydonida ionlar harakati elektroforez ko‘rinishida bo‘ladi va jarayon elektrolizdan yangi modda hosil qilmasligi bilan farqlanadi. Elektroforetik elektro o‘tkazuvchanligi tarkibida suv zarrasi bo‘lgan yog‘da, qatron (smola)li organik suyuqliklarda kuzatiladi.

2.3-jadvalda ba’zi suyuq dielektriklarda  $\rho$  qiymatining  $\epsilon_r$  qiymatiga bog‘liqligi keltirilgan.

2.3-jadval

**Ba’zi suyuqliklarning 20°C dagi solishtirma hajmiy qarshiligi va dielektrik singdiruvchanligi**

Suyuqlik	Tuzilish xususiyati	$\rho$ ; Om·m	$\epsilon_r$
Transformator moyi	Qutbsiz	$10^{10}$ - $10^{13}$	2,3
Benzin			2,0
Kanakunjut	Qutbli	$10^8$ - $10^{10}$	4,5
Atseton		$10^4$ - $10^5$	22
Distillangan suv	O‘ta qutbli	$10^3$ - $10^4$	81

#### 2.4.4. Qattiq dielektriklarning elektr o'tkazuvchanligi

Qattiq jismlarning elektr o'tkazuvchanligi ular tarkibidagi ionlar yoki boshqa zarralarning siljishi hisobiga sodir bo'ladi. Ba'zi qattiq jismlarda esa elektr o'tkazuvchanlikni erkin elektronlar keltirib chiqaradi. Kuchli elektr maydoni ta'sirida jismda elektronli elektr o'tkazuvchanlik kuzatiladi. Elektr o'tkazuvchanlik turi Faradey qonunini qo'llash orqali tajriba yo'li bilan aniqlanadi. Ion tuzilishli dielektriklarda elektr o'tkazuvchanlik, asosan, issiqlik harakati ta'sirida ozod bo'ladigan ionlar siljishi hisobiga ro'y beradi. Past temperaturada kristall panjarada bo'sh bog'langan ionlarga, xususan, qo'shimchalarning ionlari siljiydi. Atom yoki molekula panjarali dielektrikning elektr o'tkazuvchanligi qo'shimchalari hisobiga ro'y beradi. Bu holda uning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi juda kichik qiymatni tashkil etadi. Har bir muayyan hol uchun elektr o'tkazuvchanlik jarayoni zaryad tashuvchining aktivatsiya energiyasi qiymatiga asoslanib aniqlanadi.

Dielektrikdagi elektronlarning siljuvchanligi ionlarning siljuvchanligidan ancha yuqori bo'ladi. Ion tizimli dielektrikning elektr o'tkazuvchanligi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\gamma = A \exp(-b/T), \quad (2.19)$$

bunda:  $b = (W_0 + W_c)k$ ;  $W_0$  – ionlarni ozod etish energiyasi;  $W_c$  – ionning siljish energiyasi;  $b$  – koeffitsiyent (qattiq jismlarda  $b = 10000 - 22000 \text{ K}$  ga teng);  $T$  – temperatura,  $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  – Bolsman doimiysi.

(2.19) ga, asosan, dissotsiatsiya va siljish energiyalari qancha katta qiymatga ega bo'lsa, solishtirma elektr o'tkazuvchanlik bilan temperatura shuncha kuchli ravishda o'zgaradi.

Agar dielektrikdagi tok turli xil ionlar siljishidan kelib chiqsa, (2.19) ifoda quyidagicha ko'rinishga keladi:

$$\gamma = \sum_i A_i \exp\left(\frac{W_i}{kT}\right). \quad (2.20)$$

Ushbu ifodada  $\gamma$  ni  $1/\rho$  ga almashtirib soddalashtirsak, solishtirma hajmiy qarshilikning temperaturaga bog'lanishini aniqlaymiz:

$$\rho = B \exp\left(\frac{b}{T}\right) \text{ yoki } \rho = \rho_0 \exp(-at). \quad (2.21)$$

(2.21) ifodaga, asosan, solishtirma qarshilikning temperatura koeffitsiyenti quyidagi ko'rinishga ega:

$$TK\rho = \alpha\rho = -\frac{b}{T^2}. \quad (2.22)$$

Ion panjarali kristall tuzilishga ega jismlarda elektr o'tkazuvchanlik ion valentligi bilan bog'liq. Bir valentli ionli kristallarning elektr o'tkazuvchanligi ko'p valentli ionli kristallarga nisbatan yuqori bo'ladi. Masalan, NaCl kristallarining elektr o'tkazuvchanligi MgO yoki  $Al_2O_3$  kristallarining elektr o'tkazuvchanligiga qaraganda yuqori bo'ladi.

Kristallarda elektr o'tkazuvchanlik kristall o'qlari bo'yicha bir xil bo'lmaydi, amorf jismlarda esa elektr o'tkazuvchanlik turli yo'nalish bo'yicha bir xil bo'ladi. Yuqori molekularli organik polimerlarda solishtirma elektr o'tkazuvchanlik ularning polimerlanish va vulkanlanish darajasi bilan aniqlanadi. Organik qutbsiz amorf dielektrik (polistiroil va hokazo)ning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi ancha kichikdir. Shishaning elektr o'tkazuvchanligi uning kimyoviy tarkibiga bog'liq bo'lgani sababli mazkur qiymatni texnologik jarayonda boshqarish mumkin bo'ladi. Masalan, kvarsli shisha juda kichik solishtirma elektr o'tkazuvchanlikka ega. Agar uning tarkibiga turli xil metall oksidlari kiritilsa, shishaning elektr o'tkazuvchanligi birmuncha o'zgaradi. Shisha tarkibiga Mendeleyev jadvalining birinchi

guruhidagi ishqoriy metall oksidlari kiritilsa, uning solishtirma o'tkazuvchanligi keskin o'sadi va bu o'sish qiymati metall ionning radiusiga bog'liq bo'ladi. Ion radiusi qancha kichik bo'lsa, solishtirma o'tkazuvchanlik qiymati shuncha yuqori bo'ladi.

Agar shishaga og'ir oksidlar (bariy, qo'rg'oshin oksidlari) kiritilsa, uning solishtirma o'tkazuvchanligi anchaga pasayadi. Quyida ba'zi shishalarning 200°C dagi solishtirma hajmiy qarshiligi keltirilgan:

Natriy peroksidi .....	2·10 <sup>6</sup> Om·m
Kaliy peroksidi .....	8·10 <sup>9</sup> Om·m
Qo'rg'oshinli shisha .....	2·10 <sup>10</sup> Om·m

Tarkibida shisha bo'lgan elektrotexnika chinnisiga bariy oksidi kiritilganda dielektrikka oz miqdorda nam kirishi natijasida uning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi keskin ortadi. Agar nam muhitda saqlangan bunday dielektrik quritilsa, uning solishtirma qarshiligi ko'tariladi.

Qattiq jismning yuqorida keltirilgan elektr o'tkazuvchanligi elektr maydon kuchlanganligining kichik qiymatlariga nisbatan tegishlidir. Maydon kuchlanganligi qiymati oshirilsa, kristall tuzilishga ega jismlarda elektronli tok oqimi hosil bo'ladi va natijada Om qonuni buziladi. Maydon kuchlanganligi 10 – 100 MV/m dan yuqori bo'lganda elektr o'tkazuvchanlikni kuchlanganlikka bog'liqligi Pulning empirik formulasi orqali ifodalanadi:

$$\rho = \rho_0 \exp(bE), \quad (2.23)$$

bunda;  $E$  – maydon kuchlanganligi, MV/m;  $\gamma$  – Om qonuni buzilmaydigan sohaga tegishli solishtirma elektr o'tkazuvchanlik,  $\text{sm}^{-1}$ ;  $b$  – moddaning xususiyatlariga bog'liq koeffitsiyent.

Maydon kuchlanganligining qiymati teshilish kuchlanganligiga yaqin bo'lganida solishtirma o'tkazuvchanlik Frenkel ifodasi orqali aniqlanadi:



$$\rho = \rho_0 \exp(b\sqrt{E}). \quad (2.24)$$

Elektr maydoni ta'sirida bo'lgan dielektriklar eskirish xususiyatiga ega bo'lib, bunda moddalarning dielektrik, mexanik va boshqa xossalari yomonlashadi. Sopolda bunday o'zgarish juda kam bo'lsa ham, lekin unda elektrkimyoviy eskirish kuzatiladi, bu jarayon sopolning kristall panjarasidan kislorod chiqib ketishi va elektr o'tkazuvchanlikda ionning ishtiroki bilan tushuntiriladi.

#### 2.4.5. Qattiq dielektrlarda sirtiy elektr o'tkazuvchanlik

Dielektrik sirtiga chang yoki nam qatlam o'tirishi natijasida sirtiy elektr o'tkazuvchanlik sodir bo'lib, uning qiymati mazkur qatlamlar qalinligi bilan aniqlanadi. Suvning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi yuqori bo'lganligi sababli, uning dielektrik yuzasidagi juda yupqa qatlami ham sirtiy elektr o'tkazuvchanlikning sezilarli darajada ortishiga olib keladi.

Dielektrikning solishtirma sirtiy qarshiligini aniqlash uchun halqa ko'rinishdagi ikkita elektroddan foydalanish mumkin.

Bunda dielektrikning yuza qarshiligi  $R$  va solishtirma yuza qarshiligi  $R_s$  orasidagi bog'lanish quyidagicha bo'ladi:

$$R_s = \frac{Ps}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{Ps}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (2.25)$$

bunda;  $r_1, d_1$  – birinchi ichki halqa radiusi va diametri, sm;  $r_2, d_2$  – ikkinchi tashqi halqa radiusi va diametri, m;

Agar  $r_2 - r_1 \ll r_1$  bo'lsa, yuqoridagi ifodani quyidagi ko'rinishda yozilish mumkin:

$$R_s = \frac{Ps(r_2 - r_1)}{\pi(r_1 + r_2)} = \frac{Ps(d_2 - d_1)}{\pi(d_1 + d_2)}. \quad (2.26)$$

Qutbli dielektrikning sirtiy qarshiligi atrof-muhitning namlik darajasi qancha yuqori bo'lsa, shuncha kam bo'ladi. Qutbli dielektrikka chang qatlami yaxshi o'tiradi va bu qatlarning to'yinib namlanishi  $R_s$  qiymatini keskin tushirib yuboradi. G'ovak jismda namlik butun yuza bo'yicha uning hajmiga singib, sirtiy qo'shimcha suv pardasi hosil qilishi natijasida dielektrikning sirtiy qarshiligi pasayib ketadi. Dielektrikning sirtiy qarshiligini yuvish, issiqda toblash va boshqa turli usullar orqali ko'tariladi. Dielektrik sirtini tozalash usullaridan biri uni distillangan suvda qaynatishdan iboratdir. Dielektrikning sirtini loklash bilan ham uning sirtiy qarshiligini oshirish mumkin. Agar jism sirti turli birikma va iflosliklardan halos qilinsa, u katta sirtiy qarshiligiga erishadi va bu qiymat ( $P_s$ ) namlik muhitda ko'p o'zgarmaydi. Dielektrik tarkibida dissotsiatsiyalanadigan ionli qo'shimchalar bo'lsa, namlik ta'sirida uning solishtirma sirtiy qarshiligi keskin pasayadi.

Atrof-muhit havosi tarkibida ma'lum miqdorda suv bug'i bo'ladi. Normal sharoitda havoning nisbiy namligi 65% ni tashkil etadi. Dielektriksirtigao'tirganyokiungasingigannamlikizolatsiya qarshiligini keskin ( $10^6$  martagacha) pasaytiradi, bu suvning past solishtirma qarshiligi ( $\rho=10^3-10^4$  Om·m) bilan tushuntiriladi. Suv dielektrikka singib borishi natijasida uning tarkibida erkin ionlar miqdori ko'payadi. Dielektriklar namlikka bo'lgan chidamliligi jihatidan quyidagi uch turga: nam singdiradi yoki namlanadigan, nam singdirmaydigan lekin sirti namlanadigan, namlanmaydigan va nam singdirmaydigan dielektriklarga bo'linadi. So'nggi turdagi moddalar kam uchraydi. Bularga misol tariqasida parafin, serezin, ftoroplast kabi qutbsiz dielektriklarni ko'rsatish mumkin.

Metallarning o'ziga nam singdirish qobiliyati ularning tarkibidagi makro yoki mikro, yoxud submikroskopik bo'shliqlarga bog'liq bo'ladi va u gigroskopiklik yoki suv singdirish bilan ifodalanadi. Modda yuzasining namlanishi izolatsion qutblanish tabiatiga bog'liqdir. Ionli qutblanuvchi jism sirtida qarama-qarshi ishorali ionlar joylashib, ular qutbli suv molekularini o'ziga

tortadi va izolatsiya yuzasida bir necha molekulalar qatlamini hosil qiladi. Dipol qutblanuvchi jism sirtida zaryadlangan dipollar betartib joylashib, suvni yuqoridagi (ion qutblanish) ga nisbatan kamroq miqdorda o'zida singdiradi yoki yupqa qatlam hosil qiladi. Faqatgina elektron qutblanishga moyil neytral sirtga ega bo'lib, suv molekulalarini o'ziga mutlaqo tortmaydi. Shu sababli, ionli dielektrik suv bilan yaxshi namlanadi, dipollisi nisbatan kamroq namlanadi, neytral dielektrik esa umuman namlanmaydi.

Issiqlik ta'sirida dielektrikda erkin ionlar ko'payishi natijasida uning solishtirma qarshiligi keskin pasayadi. Dielektrikda solishtirma sirt qarshiligining temperaturaga nisbatan o'zgarishi quyidagicha ifodalanadi:

$$\lg p_t = \lg p_{20} - \beta(t - 20^\circ\text{C}). \quad (2.27)$$

Anorganik moddalarda  $\beta \approx 0,01 - 0,02$ , organiklarida esa  $\beta \approx 0,03 - 0,04$ . Agar temperatura  $15^\circ\text{C}$  dan  $25^\circ\text{C}$  gacha o'zgartirilsa, u holda  $r_s$  qiymati ikki barobar o'zgaradi. Bu qiymat  $100^\circ\text{C}$  ga farq qilsa, dielektrikning  $r_s$  qiymati katta, ish temperaturasida esa undagi tok oqimi kam bo'lishi kerak.

Elektr mashina va apparatlarning izolatsiya qarshiligi deganda, sim izolatsiyasi va shu jihoz qismlari orasidagi qarshilik tushuniladi. Izolatsiya qarshiligining o'lchov birligi qilib  $1 \text{ T}\Omega = 10^6 \text{ }\Omega$  qabul qilingan. Izolatsiyaning umumiy solishtirma qarshiligi sirt va ichki qarshiliklari yig'indisidan iboratdir. Shu sababli izolatsiya qarshiligi namlik va temperatura ta'sirida o'zgaradi. Amalda izolatsiya qarshiligi tayyor elektr uskunasi uchun ish sharoitida temperatura va namlik ta'sirida tekshiriladi. Dielektrikda solishtirma qarshilik ( $\rho$ )ning qiymati moddaning o'zgarimas kuchlanish ta'sirida ishlashi mumkinligini ifodalaydi. Uning qiymati qancha yuqori bo'lsa, izolatsiya shuncha yaxshi bo'ladi. Ammo bu xarakteristika dielektrikning o'zgaruvchan kuchlanishda ishlashi yoki ishlay olmasligini ifodalamaydi.

## 2.4.6. Nometall o'tkazgichlar

Qattiq nometall o'tkazgichlar orasida uglerod asosidagi moddalar muhim ahamiyatga egadir. Uglerodning allotropik o'zgargan shakllari bo'lib, bunda olmosdagi uglerod atomlari tetraedr ko'rinishida bir-biridan aniq masofada (2.5 A) joylashadi, grafitda ular bir tekislikda yotib, tomonlari 2.5 A li olti burchak hosil qiladi, mazkur tekisliklar orasidagi masofa (3.4 A) atomlar orasidagi masofadan kattadir. Shuning uchun, grafit atomlari orasidagi bog'lanish nisbatan bo'shligi natijasida, elektronlarning bir qismi ozod bo'lishiga imkon yaratiladi. Grafitning solishtirma qarshiligi 10 mkOm·m, ya'ni nixromnikidan 10 marta yuqoridir.

Uglerod amorf holatda bo'lishi yoki mayda kristallardan tashkil topishi mumkin. Yupqa qatlamli uglerodda  $\rho=50 - 55$  mkOm·m,  $\alpha_p=(200 - 500)\cdot 10^{-6}$  grad<sup>-1</sup> bo'ladi. Uning yupqa qatlamidan foydalanib (vakuumda 900 – 1000°C da parchalab), sopol o'zak sirtida qiymati 30 – 50 kOm bo'lgan kichik hajmli qarshiliklar olinadi. O'zakning uglerodlangan sirti qayroq tosh yordamida spiralsimon qilib o'yiladi va kerakli kenglik (uzunlik) da ma'lum qarshilikka ega qatlam olinadi (2.4-jadval). O'zakning uchlariga kontaktli qalpoqchalar kiygiziladi va ular yuzasi yupqa lok qatlami bilan qoplanadi.

2.4-jadval

Ko'mir elektrodning parametrlari

Elektrod turi	Zichligi, 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	Solishtirma qarshiligi, mkOm·m	Massaga nisbatan kukuni %	Cho'zilishdagi mustahkamlik, s, MPa	Siqilishdagi mustahkamlik, MPa
Ko'mirli	1,5	50	5 – 12	700 – 1100	2300 – 4100
Grafitlangan	2,0	15	0,03 – 0,2	600 – 700	200 – 500

Silit uglerod, sof kremniy va kremniy karbidi aralashmasidan olinib, undan ish temperaturasi 1500°C ga mo'ljallangan,

solishtirma qarshiligi ( $\rho$ ) qiymati 0,001– 0,01 Om·m li o‘zaklar tayyorlanadi.

Uglerodli moddadan elektr mashinalarning cho‘tkasi, projektor uchun elektrodlar, galvanik element anodlari kabi detallar yasaladi. Ko‘mir kukuni mikrofonlarda tovush bosimiga qarab o‘zgaradigan qarshiliklar tayyorlashda ishlatiladi. Elektrod o‘zaklar olish uchun mahsulot maydalangan bog‘lovchi xomashyo (qatron, suyuq shisha) bilan aralastirilib, bosim ostida ishlov beriladi. So‘ngra u pishirish jarayonini o‘taydi. Pishirish jarayoni oddiy elektr mashina cho‘tkalarini tayyorlashda 800°C da, grafitlangan cho‘tkalarni tayyorlashda esa 2200°C da amalga oshiriladi.

Cho‘tkalar elektr mashinasining aylanuvchan va qo‘zg‘almas qismlari orasida elektr kontakt hosil qilib beradi. Ular ko‘mir-graftitli (KG), grafitli (G), elektr grafitlangan (EG), mis-graftitli (MG) turlarga bo‘linadi.

Chiziqli bo‘lmagan va simsiz rezistorlarda o‘tkazgich modda sifatida tabiiy grafit qorakuyasi, pirolitik uglerod hamda yuqori qarshilikka ega metall qotishmalari qo‘llaniladi (2.5-jadval).

2.5-jadval

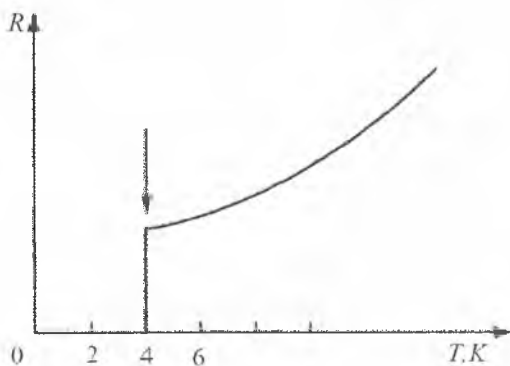
### Grafit va pirolitik uglerod parametrlari

Modda	Zichligi, $\times 10^3$ kg/ $m^3$	Solishtirma qarshiligi, mkOm·m	Solishtirma qarshiliklar- ning tempe- ratura ko- effitsiyenti, $10^4, K^{-1}$	Chiziqli kenga- yish tempe- ratura koeflit- siyenti $10^6, K^{-1}$
Polikristalli grafit	2,26	8	-10	7,5
Monokristalli grafit: bazis tekisliklari yo‘nalishida	2,24	0,4	-9	6,6
Bazis tekisliklariga ko‘ndalang yo‘nalishda	2,24	100	-400	2,6
Pirolitik uglerod	2,10	10–50	-2	6,5–7,0

Qurum mayda dispersli uglerod bo'lib, unga lok qo'shilganda solishtirma qarshiligi kichik mahsulot hosil bo'ladi. Undan yuqori kuchlanishli elektr mashinalarida elektr maydonini tekislashda foydalaniladi.

## 2.5. O'ta o'tkazuvchan va krioo'tkazgich moddalar

1911-yil golland olimi Kamerling-Onnes simob (Hg) qarshiligining temperaturaga bog'liqligini o'rganish jarayonida, temperatura 4.15 K dan pasayganda, birdan qarshilik yo'qolganini aniqladi (2.2-rasm). Tez orada ba'zi boshqa metallarda ham shunday hodisa kuzatildi. Metallarning qarshiligi yo'qolgan holatini "o'ta o'tkazuvchanlik", shu metallarni esa "o'ta o'tkazuvchan" moddalar deb atashdi. Normal holatdan o'ta o'tkazuvchanlik holatiga o'tish temperaturasini kritik temperatura  $T_c$  deyiladi.



2.2-rasm. Simob qarshiligining temperaturaga bog'liqligi

O'ta o'tkazuvchanlik bir qancha moddalarda: metallar, qattiq qorishmalar, kimyoviy birikmalar va boshqalarda kuzatilgan. Misol tariqasida 2.6-jadvalda ba'zi moddalarning kritik temperaturalarining qiymatlari keltirilgan.

## Ba'zi moddalarning kritik temperaturalari

Moddaning nomi	$T_c$ , K	Moddaning nomi	$T_c$ , K
Metallar		Kimyoviy birikmalar	
Al	1,175	NbN	17,3
Be	0,026	$(Y_{0,7}Th_{0,3})_2C_3$	17,0
Hg ( $\alpha$ )	4,15	MoN	13,0–14,8
Hg ( $\beta$ )	3,95	$PbMo_6S_6$	15,0
Nb	9,25	$B_5Mo_{1,6}Zr_{0,31}$	15,2
Pb	7,23	SnTe*	0,02–1,1
Ta	4,47	$La_2Se_3$ *	1,0
Te	7,78	InTi*	1,0–3,5
V	5,43	NbSe <sub>2</sub> **	7,0
Qattiq qorishmalar		NbS <sub>2</sub> **	5,4
$Nb_{0,75}Zr_{0,25}$	11,0	TaS <sub>2</sub> (triton-13)***	5,0
$Nb_{0,75}Ti_{0,25}$	10,0	Oksidlar	
Intermetallidlar		$Li_{1-x}Ti_{2-x}O_4$	13,7
$Nb_3Ge$	23,2	$SrTiO_{3-x}$	1,0
$Nb_3Sn$	18,3	$BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ ( $x=0,25$ )	14,0
$Nb_3Al$	18,9	$TiBa_2CuO_5$	4,2
$Nb_3Te_3$	10,5	$Bi_2Si_2CuO_6$	12
$Mo_{0,35}Re_{0,62}$	14,6	Polimer birikmalar	
BiNI	4,25	(SN)	0,26
Geln	4,7	$(TMTSF)_3PF_6$	11
$Pb_3Zr_5$	4,6	$(BEDT-TTF)_2I_3$	8
*Yarimo'tk azgich xo'ssali birikmalar **qatlam tuzilis'li birikmalar *** interkalitlar.		$(BEDT-TTF)_2IBr_2$	2,8

Zamonaviy nazariyalar asosida metallar o'ta o'tkazuvchanligi hodisasini quyidagicha tushuntirish mumkin. Mutloq nolga yaqin temperaturalarda elektronlarning o'zaro va kristall panjara tugunlaridagi atomlar bilan ta'sirlashuv xarakteri o'zgarib, bir xil zaryadlangan elektronlarning o'zaro tortishish imkoniyati paydo bo'ladi va elektronlarning (Kuper) juftlashishi yuz beradi. O'ta o'tkazuvchanlik holatida Kuper juftlarining juda katta bog'lanish energiyasiga ega bo'lishi sababli, ularning o'zaro va kristall panjara tugunidagi atomlar bilan energetik impuls almashinishi yuz bermaydi. Shu holatda metallarning qarshiligi nolga tenglashib qoladi. Temperaturaning ko'tarilishi bilan elektronlarning bir qismi termik qo'zg'alib, odatdagi metallarga xos bo'lgan yakkalangan holatga o'tadi. Ma'lum  $T_c$  kritik temperaturaga erishilganda esa metalldagi barcha Kuper juftlari parchalanadi va o'ta o'tkazuvchanlik holati barham topadi (Bardin-Kuper-Shriffel [BKSh] modeli).

Yuqoridagi kabi holat o'tkazgichning xususiy va tashqi manbalari toki tufayli yuzaga keluvchi magnit maydonining muayyan ( $H_c$  – kritik kuchlanganlik yoki  $V_c$  – kritik induksiya) qiymatlarida kuzatilishi mumkin.

Agar toza metall  $T$  temperaturada va magnit maydoni yo'qligida ( $H=0$  da) – o'ta o'tkazuvchan holatda bo'lsa, u holda shunday kritik magnit maydoni kuchlanganligi  $H_c$  mavjud ekanki,  $H > H_c$  bo'lganda metallda o'ta o'tkazuvchanlik buzilib, u normal o'tkazgich holatiga o'tadi. Agar magnit maydon pasayib  $H < H_c$  bo'lsa, metall yana o'ta o'tkazuvchan holatga qaytadi. Bu qonuniyat quyidagi empirik formula bo'yicha aniqlanadi:

$$H_c(T) = H_c(0) \left[ 1 - (T/T_c)^2 \right]. \quad (2.28)$$

Hozirgacha 35 ta o'tkazuvchan metallar, mingga yaqin o'ta o'tkazuvchan qotishmalar va turli elementlarning kimyoviy birikmalari aniqlangan. Bundan tashqari, ayrim yarimo'tkazgichlar, masalan indiy antimonid InSb, kumush antimonid AgSb,



ksenon antimonid XeSb kabilarda o'ta o'tkazuvchanlik kuzatilgan. Kumush, mis, oltin, platina kabi ko'plab o'tkazgichlarda, hatto juda past temperaturalarda ham o'tao'tkazuvchanlik holatiga erishilganicha yo'q.

O'zlarining fizik-kimyoviy xossalariga ko'ra elementar o'tao'tkazgichlar (toza metallar)ni yumshoq o'ta o'tkazgichlar (Hg, Sn, Pb, In) va qattiq o'tao'tkazgichlar (Ta, Ti, Zr, Nb) ga bo'lish mumkin. Yumshoq o'ta o'tkazgichlar uchun erish temperaturasining pastligi va ichki mexanik kuchlanishlarga ega emasligi xos bo'lsa, qattiq o'tao'tkazgichlarda yetarlicha katta ichki kuchlanishlar mavjud bo'ladi.

O'tao'tkazgichlarni termodinamik nuqtayi nazardan I, II va III turga ajratish qabul qilingan.

I tur o'tao'tkazgichlar uchun solishtirma issiqlik sig'imining sakrab o'zgarishi xos bo'lib, juda past kritik temperaturada va taxminan 1 kA/m magnit maydon kuchlanganligida yo'qoluvchi o'tao'tkazuvchan holatga o'tishning muayyan temperaturasiga egaligi, ulardan foydalanishni birmuncha qiyinlashtiradi. Bunday o'ta o'tkazgichlarda Meysner-Oksenfeld effekti kuzatiladi. Uning mohiyatiga ko'ra, namuna o'tao'tkazuvchan holatga o'tishida o'zidan magnit maydonini siqib chiqaradi, ya'ni ideal diamagnitga aylanadi.

II tur o'tao'tkazgichlarda esa o'tao'tkazuvchan holatga sakrash bilan emas, balki asta-sekin o'tishi bilan farqlanadi. Ular uchun magnit maydonining  $T_c < T_0$  temperaturada ikkita kritik qiymatiga ega bo'lishi xosdir. Agar tashqi maydondagi magnit induksiyasi quyi kritik induksiya qiymatidan orta boshlasa, o'tao'tkazgich namunaning butun qalinligi bo'yicha magnit maydonining qisman singishi yuz beradi. Bunda Lorens kuchi ta'siridagi elektronlar aylana bo'ylab, uyurmalar hosil qilib harakatlana boshlaydi. Uyurmaning ichida aylanish tezligi aylanish o'qiga yaqinlashgan sari magnit maydoni kritik qiymatiga erishguncha va o'tao'tkazuvchanlikning "uzilishi" gacha ortib boradi. Tashqi magnit maydoni ortgan sari uyurmalar soni ortib,

ular quyuqlashadi. Uyurmalar orasidagi masofa Kuper juftlari o'Ichamiga tenglashganda, namuna to'lig'icha normal holatga o'tadi, ya'ni magnit maydoni namunaga to'liq singiydi. II tur o'tao'tkazgichlarga toza metallarga mansub niobiy Nb, vanadiy Va va texnesiy Te larni ko'rsatish mumkin.

III tur o'tao'tkazgichlarni noideal II tur o'tao'tkazgich (qattiq o'tao'tkazgich) lar sifatida qarash mumkin. Ularda faza ajralishi yoki plastik deformatsiyalanishda yuzaga keluvchi yirik nobirjinslik mavjud bo'ladi. Bunday tuzilish nuqsonlari uyurmalarini tutuvchi tugunlar vazifasini bajaradi, bu esa namunadan o'tuvchi tokning qiymatini birmuncha orttiradi. III tur o'tao'tkazgichlarga, asosan, qotishma va kimyoviy birikmalar mansub.

1986-yilda suyuq azot temperaturasiga yaqin temperaturada o'tao'tkazuvchan holatga o'tuvchi  $La_{2-x}M_xCuO_4$  ( $M=Ba, Sr$ ) moddalar aniqlandi. Keyinroq  $YBa_2Cu_3O_7$  qotishmalarida o'tao'tkazuvchanlikka o'tishi  $-173^\circ C$  va undan yuqorida kuzatildi. Ushbu moddalarni yuqori temperaturali o'tao'tkazgichlar deb atashdi. Ular perovskit ko'rinishli struktura ( $CaTiO_3$  – tabiiy mineral)ga ega va atomlari o'ziga xos joylashgan keramik moddalardir. Bunday moddalarni ittiriy oksid bilan misli borkarbonat aralashmasining mayda tuyib pishirish orqali olinadi. Bu usulda olingan o'tao'tkazuvchan keramika ikki faza (birikma)dan iborat. Birinchi faza 2:1:1 nisbatdagi ittiriy, bariy va misni, ikkinchi faza esa ko'p miqdordagi misni o'z ichiga oladi. Undagi ittiriy, bariy va misning nisbati 1:2:3 kabi. Xuddi shu faza o'tao'tkazuvchanlik xususiyatiga ega.

Hozirgi kunda eng mukammal o'rganilgan Y-Ba-Cu-O tizimning o'tao'tkazuvchanlik xususiyati ikki va uch valentli misning  $Cu^{2+}/Cu^{3+}$  nisbatiga bog'liq. Yuqoridagi nisbatning qiymatini o'zgartirish bilan o'tao'tkazuvchan tizimning xususiyatini boshqarish mumkin va  $-163^\circ C$  gacha o'tish temperaturasiga va "an'anaviy" metall o'tao'tkazgichlardagidan kichik qiymatli  $10^4 A/sm^2$  gacha tok zichligiga ega bo'lgan o'tao'tkazgichlar olinadi.

Bu holat odatdagidek, past temperaturalarda o'tkazgichning solishtirma qarshiligi moddada kirishmalar va kristall panjara nuqsonlari mavjudligi bilan belgilanishi orqali tushuntiriladi. Solishtirma qarshilik kristall panjaraning issiqlik tebranishlari hisobiga energiya sochilishi tufayli yuzaga keluvchi tashkil etuvchisining e'tiborsiz darajada kichikligi, krioo'tkazgich sifatida  $-240^{\circ}\text{C}$  dan  $-190^{\circ}\text{C}$  gacha ishchi temperatura oralig'ida minimal solishtirma qarshilikka ega bo'lgan, yaxshilab qizdirib, so'ng sovutilgan yuqori toza metallni ishlatish zaruratini hosil qiladi.

Eng arzon sovuq tashuvchi – suyuq azot temperaturasida minimal solishtirma qarshilik xususiyatiga berilliy ega. Biroq, ushbu metall texnologik ishlov jihatdan noqulay, tannarxi qimmat va yuqori darajada zaharli. Krioo'tkazgich modda sifatida (A999 markali, suyuq azot temperaturasida 0,001% gacha kirishmali, solishtirma qarshiligi ko'pi bilan  $1...2 \cdot 10^{-6}$  mOm·m bo'lgan) aluminiy nisbatan qulay va texnologik ustunroq hisoblanadi. Elektr mashinalar, apparatlar va elektrotexnik qurilmalarda o'tao'tkazgichlar o'rniga krioo'tkazgichlarning qo'llanilishi issiqlik himoyasining soddalashuvi va arzonlashuvi, sovutishga sarflanadigan quvvatning kamayishi, temperatura ortishi bilan qarshilikning bir maromda ortishi kabi afzal jihatlarni ko'rsatish mumkin. Krioo'tkazgichlar, asosan, suyuq vodorod ( $-252,6^{\circ}\text{C}$ ), suyuq neon ( $-245,7^{\circ}\text{C}$ ) va suyuq azot ( $-195^{\circ}\text{C}$ ) temperaturasida ishlovchi kabel simlari, o'tkazgichlar tayyorlash uchun ishlatiladi.

## **2.6. O'tkazuvchanligi yuqori bo'lgan toza metall va metall qotishmalarining qo'llanilishi**

Elektr o'tkazuvchanligi yuqori bo'lgan moddalarning solishtirma qarshiligi nisbatan kichik bo'ladi. O'tkazgichdan tok o'tayotganda bunday moddalarda energiya isrofi ham ancha kam bo'ladi. Ana shunday xususiyatlar tarkibida qo'shimchalar bo'lmagan sof metallarga xosdir.

yoki yorug'lik energiyasi) hisobiga o'z atomidan ajraladi. Bu valent elektronning ajralishi kovakning hosil bo'lishiga olib kelmasligini bilish qiyin emas. Agar temperatura past bo'lsa, kremniyning xususiy o'tkazuvchanligi hal qiluvchi ahamiyat o'ynamaganligidan, o'tkazuvchanlikda asosan aralashma atomlaridan ajralgan elektronlarga qatnashadi. Yarimo'tkazgichning bunday o'tkazuvchanligini *elektron n-tipli o'tkazuvchanlik* deb ataladi. Kristall panjaraga o'z elektronlarini berishga intiluvchi aralashma atomlari esa *donorlar* deb yuritiladi.

Bu holda kremniy panjarasidagi atomlardan birining o'rnini uch valentli Bor atomi egallagan bo'ladi. Ammo kremniyning to'rtinchi valent elektroni juft bog'lanish hosil qilishi uchun Borda bitta elektron yetishmaydi. Bor atomi bu holda kremniy atomi bilan to'liq bog'lanish hosil qilishga intilib, qo'shni bog'lanishdan bitta elektronni tortib oladi va o'z navbatida manfiy ionga aylanib qoladi, elektron ketgan bog'lanishda esa bo'sh o'rin -- kovak hosil bo'ladi va tashqi elektr maydoni qo'yilganda ketma-ket hosil bo'luvchi kovaklar harakati hosil bo'ladi. Bunday o'tkazuvchanlikda asosiy rolni kovaklarning ko'chishi o'ynaganligidan *kovak o'tkazuvchanlik* yoki *p-tipli o'tkazuvchanlik* deb yuritiladi. Asosiy elementlarning kristall panjarasidan elektronlarni olish uchun intiluvchi aralashma atomlari *akseptorlar* deb yuritiladi.

Tekshirishlar shuni ko'rsatdiki, kremniyning xususiy o'tkazuvchanligida elektronni ajratish uchun kamida 1,1 eV energiya kerak bo'lsa, aralashma atomlaridan elektronlarni ajratish uchun esa ~ 0,04 – 0,08 eV energiyagina kifoya qiladi.

Aralashma atomlardan elektronlar ajralishi osonlashishining fizik sababi, aralashma atomlari kiritilgan muhitning qutblanishidir. Moddiy muhitning bu xususiyati dielektrik doimiyligi bilan xarakterlanadi. Muhitning qutblanishi kristallning umumiy energiyasini kamaytirib, aralashma atomida esa elektron bilan yadro orasidagi bog'lanishni kuchsizlantiradi. Natijada aralashma atomi elektronlarining harakatlanish orbitalari kattalashadi.

Orbitaning kattalashishi esa o'z navbatida elektronni atomdan ajratish ishini, ya'ni ionlashtirish ishini kamaytiradi.

Shuni qayd qilish kerakki, kristall panjaraga kirib olgan aralashma atomlari, ideal kristall panjarasining qat'iy davriyligini buzadi va ular elektronlar uchun o'ziga xos energetik holatlarni hosil qiladi. Bu holatlar, aralashma zichligi juda katta bo'lmagan holda, mahalliy holatlar bo'ladi, ya'ni ular aralashma atom (ion) lar yaqinidagi mahalliy joylarda joylashgan bo'ladi (elektronlar energiyalari sohalar ta'sirida), mahalliy holat sohalari ta'qiqlangan soha ichida joylashadi. Agar kirishma hosil qilgan mahalliy soha o'tkazuvchanlik yoki valent sohasiga yaqin joylashgan bo'lsa, bunday soha *sayoz soha* deyiladi.

Sayoz sohalari hosil qiladigan aralashmalar erkin zaryad tashuvchilar (erkin elektronlar va erkin kovaklar) miqdori (zichligi)ni oshirish imkonini yaratib, yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligini bevosita o'zgartirishi mumkin (buni fosfor va bor misolida ko'rdik). Chuqur sathlar paydo qiladigan aralashmalar esa yarimo'tkazgichning birmuncha boshqa xususiyatlariga bevosita yoki bilvosita ta'sir ko'rsatadi.

Yarimo'tkazgichga ham donor aralashma, ham akseptor aralashma kiritilgan bo'lsa, donor sathdagi elektronlar akseptor sathlariga o'tadi. Agar donor zichligi ( $N_D$ ) akseptor zichligi ( $N_A$ ) ga teng bo'lsa ( $N_D = N_A$ ) bunday yarimo'tkazgich *to'la kompensirlangan yarimo'tkazgichlar* deyiladi.

Yuqorida aytilgan mulohazalar aralashma atomlarining zichligi uncha katta bo'lmagan va bunda qo'shni aralashma atomlari bir-birlaridan yetarlicha uzoqda bo'lgan hollarga tegishlidir. Ammo, aralashma atomlarining zichligi yetarlicha katta bo'lsa, yuqoridagi shartlar bajarilmasligi mumkin. Bunda qo'shni aralashma atom elektronlar qobiqlari bip-biriga tushishi va ular o'rtasida o'zaro ta'sirlashish kuchlari hosil bo'lishi mumkin, buning natijasida aralashma hosil qilgan alohida energetik sathlar parchalanib, elektronlar uchun aralashma hosil qilgan energetik sohalarni vujudga keltiradi. Yarimo'tkazgichlarda aralashmalar hosil qiladigan sohani

Havo orqali elektr uzatkichlarda alumin-po'lat simlari keng miqyosda qo'llaniladi. Bunday simning o'zagi bir-biriga o'ralgan po'lat simlardan iborat bo'lib, uning ustidan esa aluminiy simlari o'raladi. Mazkur simlarda mexanik kuchlanish po'lat, elektr kuchlanishi esa aluminiy moddalari zimmasiga tushadi. Qog'ozli va pardali kondensator tayyorlashda izolatsiya qatlamlari orasida 5–10 mkm qalinlikka ega yupqa aluminiy zarvaraqlari ishlatiladi. Sof aluminiydan (tarkibidagi aluminiy (99,95–99,99%) tayyorlangan zarvaraqlar elektrolitik kondensatorlarda ishlatilib, izolatsiya modda sifatida esa mazkur zarvaraqlar sirtiga aluminiy oksidi yuritiladi. Bunday izolatsiya qatlamining qalinligi o'zining juda ham kichik qiymati bilan ajralib turadi.

Aluminiy tarkibiga ba'zi boshqa elementlar kiritilishi orqali nisbatan yuqori mexanik mustahkamlikka ega va o'tkazuvchanligi deyarli o'zgarmaydigan ( $\rho \approx 0,03 - 0,032$  mkOm·m) metall olish mumkin. Bunga misol qilib aldrey (0,5±0,7% Mg, 0,5±0,6% Si, 0,3% Fe, qolgani Al) moddasini keltirish mumkin.

Temir o'tkazuvchi modda sifatida narxi arzonligi va yuqori mexanik mustahkamligi bilan ajralib turadi. Hatto, sof temirning ham solishtirma qarshiligi mis va aluminiyga nisbatan ancha yuqori ( $\rho = 0,1$  mkOm·m) bo'lib, mazkur qarshilik o'zgaruvchan tok ta'sirida yanada ortadi. Temir (po'lat) simlarning asosiy kamchiligi korroziyaga bo'lgan chidamsizligidir. Shu sababli, bunday simlar sirti himoya qoplamasi (ruh pardasi) bilan qoplanadi. Sof temirning mexanik mustahkamligi nisbatan past bo'lganligi uchun, aloqa va elektr uzatkichlarda (qishloq sharoitida) tarkibida 0,1–0,35% uglerod, cho'zilishdagi mustahkamligi 700±750 MPa bo'lgan yumshoq po'lat ishlatiladi. Bunday po'lat, asosan, kichik quvvatli havo elektr uzatkichlarning simlari sifatida ishlatiladi. Po'latdan o'tkazuvchi modda sifatida tramvay va elektrlashtirilgan temir yo'l (metro)da rels ko'rinishida foydalaniladi.

O'tkazuvchan bimetall (qo'shmetall) – sirtiga bir tekis qilib mis qoplangan po'lat simdir. Bunday sim tarkibidagi mis miqdori 44 – 45% bo'lib, simning solishtirma qarshiligi 0,03–0,04 mkOm

ga teng. Bimetall simlarning tashqi diametri 1,4 mm,  $\sigma_p$  ning o'rtacha qiymati (simning butun kesimi bo'yicha) 550,700 MPa,  $i = \Delta l/l = 21\%$  bo'ladi. Bir kilometr uzunlikdagi bunday simning diametriga nisbatan qarshiligi (normal sharoitda va o'zgarmas tokda) 60 Om/km ni ( $d = 1$  mm bo'lganda) va 4 Om/km ( $d = 4$  mm bo'lganda)ni tashkil etadi. Bunday simlar elektr va aloqa liniyalarida ishlatiladi.

### **Bobga doir savol va mashqlar**

1. Tok o'tkazuvchi moddalar sifatida qanday moddalarni qo'llash mumkin?
2. Yuqori o'tkazuvchanlikka ega metallar qayerlarda ishlatiladi?
3. Yuqori qarshilikka ega moddalardan nimalar tayyorlanadi?
4. Metallar elektr o'tkazuvchanligining klassik talqinini aytib bering.
5. Kimyoviy birikmalarning tarkibi stexiometrik proporsiyada qanday formula bilan ifodalanadi?
6. Invariant va monovariant tizimga ta'rif keltiring.
7. Dielektrik moddalarning qanday turlarini o'rgandingiz?
8. Turli ko'rinishdagi dielektriklar elektr o'tkazuvchanligini qiyosiy tahlil qilib bering.
9. O'ta o'tkazuvchanlik hodisasining mohiyatini ayting.
10. O'ta o'tkazgich moddalardan qanday amaliy maqsadlarda foydalaniladi?
11. 2 va 3 atomli qattiq jismlarning molar issiqlik sig'imini klassik yaqinlashuvda aniqlang.
12. Tovush tezligi  $5 \cdot 10^3$  m/s, elementar yacheyka hajmi  $2 \cdot 10^{-29}$  m<sup>3</sup> bo'lganda Debay temperaturasi nimaga teng?
13. Agar fononlarning erkin yugurish yo'li xona temperaturasida NaCl kristall panjarasi doimiysi  $a$  dan 4 marta katta bo'lsa, bu kristallning issiqlik o'tkazuvchanligini hisoblang.
14. 30 K da olmosning solishtirma issiqlik sig'imi aniqlansin.
15. Aluminiy kristali uchun  $T=0$  dagi Fermi energiyasini toping.

Har bir aluminiy atomiga uchta erkin elektron to'g'ri keladi deb olinsin.

16. Temperaturasi  $18^{\circ}\text{C}$  bo'lgan metalldagi Fermi energiyasidan  $0,01\text{ eV}$  pastdagi sathning to'lish ehtimolligini toping.

17. Ko'ngdalang kesim yuzasi  $1\text{ mm}^2$  bo'lgan mis sim o'rami berilgan. Hamma simning massasi  $m=0,3\text{ kg}$ . Simning qarshiligini toping.

18. Kuchlanish manbaya qisqichlariga uzunligi  $l=2\text{ m}$  bo'lgan mis sim ulangan. Simdan o'tayotgan tok zichligi  $j=10\text{ A/m}^2$ . Qisqichlardagi kuchlanish topilsin.

19. Ko'ndalang kesimining yuzasi  $S=0,5\text{ sm}^2$  bo'lgan metall simdan tok o'tmoqda. Agar har bir kub santimetrda  $n=5\cdot 10^{21}$  erkin elektron bo'lsa, metalldagi elektronlarning o'rtacha tartibli harakat tezligi topilsin.



### III bob. YARIMO‘TKAZGICH MODDALAR

Elektr o‘tkazuvchanligi qiymati metallar ( $\sigma=10^{10}$ – $10^8$  Om<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>) va dielektriklar ( $\sigma=10^{10}$ – $10^8$  Om<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>) orasida joylashgan moddalarni *yarimo‘tkazgichlar* deb ataladi. Yarimo‘tkazgichlarning yana bir muhim farqlovchi xususiyati shundan iboratki, temperatura ko‘tarilishi bilan ularning elektr o‘tkazuvchanligi ortib boradi.

Ushbu moddalarning dastlab o‘rganish boshlanganda kiritilgan ta’rifga hozirgi kunda bir qator aniqliklar qo‘shilgan. Bu aniqliklar ularning energetik sohalarini tuzilishi, zaryad tashuvchilarning xossalari bilan kelib chiqadi.

Temperaturaning yetarlicha katta oralig‘ida yarimo‘tkazgichlarning elektr o‘tkazuvchanligi eksponensial o‘zgaradi:  $\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-E_A / kT)$ . Bunda  $E_A$  o‘tkazuvchanlikning faollanish energiyasi deb nomlanadi va elektronni atomlar bilan bog‘lanishining o‘rtacha energiyasini bildiradi. Har qanday temperaturada issiqlik harakati energiyasi ta’sirida yarimo‘tkazgichdagi valent elektronlarning  $\exp(-E_A / kT)$  ga proporsional qismi erkin zaryad tashuvchilar bo‘ladi. Yarimo‘tkazgichlarning o‘tkazuvchanligi boshqa ta’sirlar (masalan, yorug‘lik oqimi, zarralar oqimi, kirishmalar, elektr maydon) natijasida ham, ko‘p hollarda, eksponensial o‘zgaradi.

Shuning uchun ular temperatura, kirishma miqdori va boshqa ta’sirlarga juda sezgirdir. Yarimo‘tkazgichlarning bu xossasidan turli xil vazifalarni bajaruvchi asboblari, sezgir qurilmalar tayyorlashda foydalaniladi.

### 3.1. Yarimo'tkazgichli moddalar turlari

Yarimo'tkazgichli moddalarni shu yarimo'tkazgichlarni tashkil etgan atomlarning kimyoviy bog'lanishi va kristall tuzilishi jihatidan quyidagi asosiy turlarga ajratish mumkin.

1. Elementar yarimo'tkazgichlar. Kristall panjarasi atom bog'lanishli yarimo'tkazgichlarga germaniy, kremniy, qo'ng'ir qalay, olmos, selen, oltingugurt va tellurlar kiradi. Ular bir element atomlaridan tuzilgani uchun elementar (sodda) yarimo'tkazgichlar deyiladi.

2. Binar birikmalardan iborat yarimo'tkazgichlar. Bu guruh-larga juda ko'p moddalar kiradi:

I va VII guruh elementlaridan tashkil topgan birikmalar: NaCl, KCl, AgCl (bu ion bog'lanishli kristallardir).

III va V guruh elementlaridan tashkil topgan birikmalar: InSb, InP, InAs, GaSb, GaP, GaAs, AlSb, AlP, AlAs (bu kristallarda kovalent bog'lanish asosiy bo'lib qolmay, balki qisman ionli bog'lanish ham bo'ladi),

II va VI guruh elementlaridan tashkil topgan birikmalar: ZnS, CdS, HgSe, ZnSe, ZnTe, ZnO, MgO (bu kristallarda ion bog'lanish kuchli bo'ladi)

IV va VI guruh elementlaridan tashkil topgan birikmalar: PbS, PbSe, PbTe.

IV va IV guruh elementlaridan tashkil topgan birikmalar: SiC, SiGe, SiSn (bu kristallarda kovalent bog'lanish mavjud).

3. Suyuq yarimo'tkazgichlarga natriy va kaliyning ammiakdagi eritmaları, kremniyli suyuq polimerlar (polisiloksanlar) kiradi.

Hozirgi vaqtda yuqorida keltirilgan yarimo'tkazgich moddalar-dan tashqari uchta va to'rtta element atomlaridan tarkib topgan yarimo'tkazgich birikmalari mavjud. Bularga  $HgPS_2$ ,  $CdP_2S_4$ ,  $ZnSnP_2$ ,  $TlInS_2$ ,  $TlGaSe_2$ ,  $CdGaAs_2$ ,  $CdGeSbAs$ ,  $SiTiGeAs$ ,  $TlGaSSe$ ,  $CuInGaS_2$ ,  $TlInGaTelar$  kiradi.

Yuqoridagi yarimo'tkazgichlarning asosiy turlari orasida amaliy ahamiyatga ega bo'lgan yarimo'tkazgichlar, asosan, kristall holda uchraydi va bunday yarimo'tkazgichlar qatoriga hozirgi vaqtda kremniy, germaniy va selen elementlarini keltirish mumkin.

### 3.2. Yarimo'tkazgichlarning asosiy xususiyatlari

Ma'lumki, metallardan yarimo'tkazgichlarning asosiy farqi, yarimo'tkazgichlarda o'tkazuvchanlik elektronlarni hosil qilish uchun tashqaridan qo'shimcha energiya sarf etilishining zarurligidir.

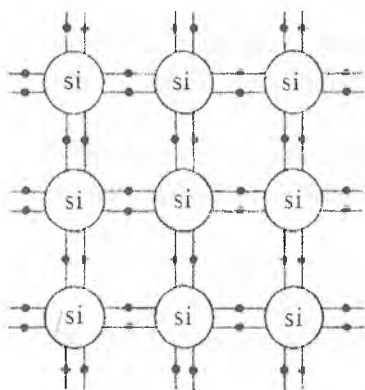
Yarimo'tkazgichlar elektr o'tkazuvchanligiga qarab xususiy va aralashmali turlarga bo'linadi.

**Yarimo'tkazgichlarning xususiy o'tkazuvchanligi.** Xususiy o'tkazuvchanlikni tushunish uchun kimyoviy jihatdan toza yarimo'tkazgich kristali, masalan, kremniy kristalini olish mumkin. U juda past temperaturada tekshirilgan. Kremniy elementining atomi to'rtta valent elektroniga ega bo'lib, har bir atom o'zidan bir xil uzoqlikda joylashgan qo'shni to'rtta atom bilan valent elektronlari orqali bog'langan (3.1-rasm).

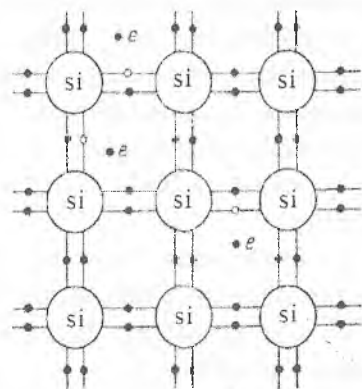
Agar kremniy yarimo'tkazgichini elektr zanjiriga ulasak, bu zanjirdan past temperaturada tok o'tmaganligini ko'ramiz. Bunga sabab, barcha valent elektronlari atomlararo o'zaro bog'lanishda bandligidir. O'tkazuvchanlik elektronlarini hosil qilish uchun valent bog'lanishlarning ayrim joylarini buzish kerak. Buning uchun qo'shimcha energiya zarur. Elektron bunday energiyani kristallni qizdirganda yoki yorug'lik bilan yoritilganda oladi.

Haqiqatan ham, kristallni qizdira boshlasak yoki unga yorug'lik tushira boshlasak, zanjirdan elektr toki o'ta boshlaganini ko'ramiz. Buning sababi, tashqaridan olingan qo'shimcha issiqlik energiyasi hisobiga bog'lanishlarning buzilishi natijasida ajralayotgan erkin elektronlarning ko'payishidir. Bog'lanishlardan chiqib ketuvchi bunday elektronlar hisobiga elektronlar chiqqan joylarda atomlar

orasida to‘liq bo‘lmagan bog‘lanishlar vujudga keladi (3.2-rasm). Elektronlarning valent bog‘lanishidan chiqib ketishi natijasida hosil bo‘lgan va musbat zaryadi ortib qolgan bunday to‘liqmas bog‘lanishdagi bo‘sh o‘rinlarni “kovak” lar deb yuritilishini yuqorida aytib o‘tgan edik. Zaryadlarning tortilish kuchlari ta’sirida istalgan bo‘sh o‘ringa qo‘shni bog‘lanishdan elektron o‘tishi mumkin. Natijada bu o‘rinda to‘liq bog‘lanish tiklanib, kovak qo‘shni bog‘lanishga ko‘chadi. Boshqacha aytganda, elektr toki o‘tishida o‘tkazuvchanlik elektronlari - erkin elektronlardan tashqari, kovaklarni ketma-ket to‘ldirib boruvchi bog‘langan elektronlar ham qatnashadi.



3.1-rasm. Bir tekislikda sxematik ravishda keltirilgan kremniy elementi panjarasidagi valent bog‘lanish



3.2-rasm. Bir tekislikda sxematik ravishda keltirilgan kremniy elementi panjarasidagi kovak va erkin elektron

Kristall kimyoviy toza va hech qanday nuqsonga ega bo‘lmasa, ajraluvchi elektronlar va kovaklar soni o‘zaro bir biriga teng bo‘ladi. Bunday o‘tkazuvchanlikni yarimo‘tkazgichlarning xususiy o‘tkazuvchanligi deb yuritiladi va u yuqori temperaturalaridagina kuzatiladi.

Xususiy yarimo'tkazgichlarning elektro'tkazuvchanligi faqatgina nazariy xarakterga ega bo'lib, amalda ishlatiladigan yarimo'tkazgichli asboblarning hammasi ozmi - ko'pmi aralashma (kirishma)ga asoslanib ishlaydi.

Shuning uchun biz aralashmali yarimo'tkazgichlarning o'tkazuvchanligini qarab chiqaylik.

**Yarimo'tkazgichlarning aralashmali o'tkazuvchanligi.** Aralashmalar yordamida yarimo'tkazgichlarning qarshiligini minglarcha (hattoki millionlarcha) marta kamaytirish mumkin. Masalan, kremniy elementi ichiga undagi atomlar soniga nisbatan 0.001% miqdoridagi fosfor atomlarining kiritilishi bilan, xona temperturasida uning qarshiligini juda toza kremniyga nisbatan bir necha ming martacha kamaytiradi.

Aralashmalar tok tashuvchilarning ishorasini belgilaydi, yarimo'tkazgichlarning amalda kuzatiladigan elektr o'tkazuvchanligini vujudga keltiradi.

Aralashma deyilganda biz quyidagilarni nazarda tutamiz:

- 1) asosiy modda tarkibiy qismlaridan birining ortiq yoki kamligi;
- 2) kristallning biror tugunidagi atom yoki ionning o'rnini boshqa element atomi tomonidan egallanishi;
- 3) kristall panjara tugunlarining oralig'iga kiritilgan boshqa element atomlari.

Yarimo'tkazgichlarda aralashmaning qanchalik muhim ahamiyatga ega ekanligini tushunish uchun kremniy kristalli panjarasidagi ixtiyoriy biror tugunni, 5 valentli bo'lgan Fosfor (P) yoki 3 valentli bo'lgan Bor (B) element atomi egallagan hollarini chuqurroq o'rganishga harakat qilaylik.

Bu vaqtda fosforning to'rtta valent elektroni kremniyning to'rtta valent elektroni bilan mustahkam valent bog'lanish hosil qiladi. Valent bog'lanishda fosforning beshinchi valent elektroni qatnashmaydi, u faqat o'z yadrosi bilan kuchsiz bog'lanishda bo'ladi xolos. Shuning uchun ham, bu beshinchi valent elektron tashqaridan berilgan ozgina qo'shimcha energiya (issiqlik

Kumush solishtirma qarshiligi eng kichik ( $\rho=0,016 \text{ mkOm}\cdot\text{m}$ ) metallidir. Kumushning oksidlanishga chidamliligi yuqoridir. Kumushning narxi yuqori bo'lganligi sababli, undan faqat juda zarur hollardagina foydalaniladi.

Elektr texnikada qo'llaniladigan asosiy o'tkazgich moddalaridan biri mis hisoblanadi. U tabiatda keng tarqalgan modda bo'lib, mexanik mustahkamlikka va yaxshi o'tkazuvchanlikka egadir. Misning solishtirma qarshiligi ( $\rho$ ) qiymati kumushnikiga nisbatan biroz yuqoridir. Elektr texnikada, asosan, "Elektrolitik" misdan foydalaniladi. Bunday mis elektroliz usuli bilan yaxshilab tozalanish natijasida uning tarkibidagi qo'shimchalar miqdori 0,05 – 0,07% dan ortmaydi. Xalqaro standartga muvofiq tozalangan misning normal sharoitdagi solishtirma o'tkazuvchanligi 58  $\text{mkSm}/\text{m}$ , ya'ni  $\rho=0,017241 \text{ mkOm}\cdot\text{m}$  bo'lishi kerak.

Sanoat sharoitida mis sim ishlab chiqarish jarayonida qattiq mis (QM) uchun  $\rho=0,0178 \text{ mkOm}\cdot\text{m}$ , yumshoq mis (YuM) uchun  $\rho=0,0175 \text{ mkOm}\cdot\text{m}$  qilib olingan. Ushbu simning mexanik xossalari 2.7-jadvalda keltirilgan.

2.7-jadval

**O'tkazuvchanlik xususiyati yuqori bo'lgan moddalar**

Ko'rsatkich	Mis		Aluminiy	
	QM	YuM	QA	YuA
Cho'zilishdagi mustahkamligi, MPa	250–500	200–280	160/170	80
Nisbiy uzayishi, %	0,5–2,5	18–35	0,5–20	10–25
Solishtirma qarshiligi $\text{mkOm}\cdot\text{m}$	0,0179–0,0182	0,01754	0,0283	0,0280
Statik qayishqoqlik moduli, GPa	122–132	177	72	66

Agar metallning mexanik mustahkamligi ( $\sigma_s$ ) qiymati katta va  $\Delta/l$  qiymati kichik bo'lsa, zarur mexanik mustahkamlikni ta'minlash uchun moddaning kesim yuzasini kichikroq olsa ham

bo'лади. Tozalangan mis simlarni tayyorlashda metallning mexanik xossalari hisobga olinadi. Qattiq misning egiluvchanlik chegarasi 300 MPa ga to'g'ri keladi, bu esa mazkur metall dan elektr o'tkazuvchi prujina tayyorlash imkonini bermaydi. O'tkazgich moddalarning mexanik xossalarini yaxshilash maqsadida mis qotishmalari (jez va bronza) dan foydalaniladi.

Jez -- mis bilan ruhning birikishidan hosil bo'lgan qotishma. Bunday moddani shtampovkalash ancha qulaydir. Jezning ba'zi maxsus turlariga qirqish usuli bilan ishlov beriladi. Jezning turiga qarab undagi ruh miqdori 10 – 40% atrofida bo'лади. Jezning solishtirma qarshiligi sof misnikidan yuqori bo'lib, bu qiymat 0,04 – 0,35 mkOm·m ni tashkil etadi.

Bronza, asosan, mis bilan qalay birikmasidan tashkil topgan qotishma bo'lib, o'tkazuvchi prujina tayyorlash maqsadida uning maxsus fosforli (P - 0.05, 0.1%, Sn - 3–7%, Al - 2.5%, Zn - 2%) va boshqa turlari qo'llaniladi. Bronzaning mexanik mustahkamligi  $\sigma_f = 800, 1200$  MPa ga yaqin bo'lib, bu qiymat qattiq misning qiymatidan ikki barobar yuqoridir. Berilliyli bronza (Be - 2.25%) nisbatan egiluvchan bo'lib, uning mexanik mustahkamligi ( $\sigma_f$ ) qiymati 1350 MPa gacha ko'tariladi. Bronzaning aksariyat turlarida solishtirma qarshilik  $\rho = 0.03 \div 0.22$  mkOm·m bo'лади. Kadmiyli bronzaning (0.9÷1.0% Cd) solishtirma qarshiligi 0.019÷0.21 mkOm·m, cho'zilishdagi mustahkamligi 650÷700 MPa bo'lib, uning yedirilishga chidamliligi nisbatan yuqoridir. Mazkur turdagi bronza elektr tortkich simlari va ko'tarma kranlar uchun mo'ljallangan simlarni tayyorlashda ishlatiladi.

Aluminiy o'zining elektr o'tkazuvchanlik xususiyati jihatidan misdan keyingi o'rinda turadigan o'tkazuvchi moddadir. Qattiq aluminiyning mexanik mustahkamligi yumshoq aluminiyga nisbatan 2 barobar ortiq, solishtirma qarshiligi esa 60% yuqoridir. Mis bilan bir xil o'tkazuvchanlikka ega bo'lishi uchun aluminiy simining ko'ndalang kesim yuzasini 60% ga oshirish talab qilinadi. Bu esa aluminiy ishlatilgan elektr mashina va jihozlarning hajmi va tannarxi nisbatan katta bo'lishiga olib keladi.

Yetarlicha yuqori temperaturalarda nomahalliy sathlarga ega bo'lgan (ruxsat etilgan) sohalardagi ( $N > N_0$ ) zaryad tashuvchilar ko'chishi elektr o'tkazuvchanlikni aniqlaydi:

$$\sigma \sim \exp[-E_i / 2kT]. \quad (3.2)$$

Ammo, temperatura pasayib, qandaydir  $T = T_m$  bo'lib qolganda elektronlar mahalliy sathlarga o'tib oladi va elektr o'tkazuvchanlikni, asosan, sakrama o'tishlar aniqlaydi, uning temperaturaga bog'lanishi

$$\sigma \sim \exp\left[-(T / T_m)^{1/2}\right] \quad (3.3)$$

ko'rinishda bo'ladi, bundagi  $T_m$  ni *Mott temperaturasi* deyiladi.  $T_m$  faollashtirish o'tkazuvchanligidan sakrama o'tkazuvchanlik holiga o'tish temperaturasidir.

Optik va fotoelektrik xossalarni tahlil qilishda amorf yarimo'tkazgichlar ikki ( $A$  va  $B$ ) turga ajratiladi.

$A$  turga mansub bo'lgan amorf yarimo'tkazgichlarda yorug'lik yutilishining keskin chegarasi bor, bunda  $h\omega \sim E_i$  binobarin, bu hol sof kristall yarimo'tkazgichlardagiga o'xshash. Bu turga mansub amorf yarimo'tkazgichlarda esa yorug'lik yutilishining dumi (yoyilib ketgan chegarasi) kuzatiladi, uni holatlar zichligining dumi bilan bog'lab tushuntiriladi, bunda  $h\omega < E_i$  fotonlar ham yutiladi, elektronlar valent soha dumidan o'tkazuvchanlik soha dumiga o'tadi. Bu turdagi amorf yarimo'tkazgichlarda Mott o'tishi oshkor bo'ladi.

Shunisi qiziqki, amorf yarimo'tkazgichlarning har ikki turida ham kirishmalar uncha ahamiyatli emas, ammo ularni tayyorlash usuli amorf yarimo'tkazgichlar xossalariiga muhim ta'sir ko'rsatadi. Binobarin, kristall tuzilishidagi nuqsonlar mazkur xossalarni shakllantirishga katta hissa qo'shadi.

Istisno tariqasida vodorod bilan to'yintirilgan amorf kremniyni ko'rsatish mumkin, bunda vodoroddan mazkur modda xossalarini aniqlashda foydalaniladi.



Haqiqiy amorf yarimo'tkazgichlarda bip-biridan farqlanuvchi mahalliy sohalar mavjud bo'ladi, ular orasida ajralish chegaralari bor bo'lib, bu joylarda zaryad tashuvchilar uchun potensial energiya to'siqlari hosil bo'ladi. Bu to'siqlar metall-yarimo'tkazgich chegarasidagidek Shottki to'siqlari, umuman aytganda, elektron-ko'vak o'tishlari ko'rinishida namoyon bo'lishi mumkin. Ba'zi amorf pardalarda anomal fotokuchlanish hodisasi kuzatilgan:  $Sb_2S_3$  yoki  $Sb_2Se_3$  pardaviy qatlamlarida 100 V chamasida fotoEYuK paydo qilingan.

Amorf yarimo'tkazgichlar kristallarda bo'lmagan ba'zi xossalarga ega. Bunga qayta ulanish hodisasi misol bo'ladi: amorf yarimo'tkazgichda elektr maydoni hosil qilinganda uning elektr o'tkazuvchanligi bir necha tartib qadar kuchli o'zgarishi mumkin. Bu o'zgarish qaytuvchan va juda tez yuz beradi. Qayta ulanish – kam o'tkazuvchanlikdan katta o'tkazuvchanlikka va aksincha o'tish vaqti  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  s chamasida bo'ladi. Bu aytilganlar amorf yarimo'tkazgichlarning amalda muhim qo'llanishlari imkoniyatlari borligidan dalolat beradi.

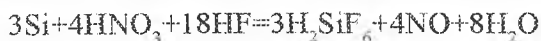
**Shishasimon yarimo'tkazgichlar.** Bunday moddalarning katta guruhi yetarlicha o'rganib chiqilgan. Ularga mansub bo'lgan eng ko'p o'rganilgan moddalar xalkogenid shishalardir. Ularning asosiy tashkil etuvchilari elementlar davriy tizimining VI guruhiga kiruvchi oltingugurt (S), selen (Se) va tellur (Te) bo'lib, bu elementlar boshqa metallar bilan birikib, xalkogenid shishalar hosil qiladi.

Mazkur moddalarning elektr o'tkazuvchanligi elektronlar harakati bilan bog'liq, ular katta fotoo'tkazuvchanlikka ega va infraqizil yorug'likni yaxshi o'tkazadi. Xalkogenid shishalarning elektr va fotoo'tkazuvchanligini keng oraliqda o'zgartirish maqsadida ularning tarkibi o'zgartiriladi va ularga qo'shimcha boshqa elementlar kiritiladi.

Xalkogenid shishasining solishtirma elektr o'tkazuvchanligi  $10^{-13}$ – $10^{-7}$   $Om^{-1}\cdot sm^{-1}$  oraliqdagi qiymatlarga ega bo'ladi,

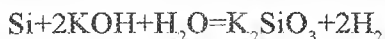
qattiq kremniyning zichligi  $2,33\text{g}/\text{sm}^3$ , dielektrik singdiruvchanligi  $\epsilon=11,7$ , diamagnetik.

Xona temperaturasida kremniy kimyoviy jihatdan barqaror, suvda erimaydi, ko'p kislotalarga nisbatan bardoshli. Ammo, u nitrat va ftorid kislotalar aralashmasida yaxshi eriydi:



Kremniyning sirtini tozalash maqsadida ishqoriy yediruvchilar qo'llanadi. Silliqlash uchun yuqoridagi aralashma asosidagi yediruvchilar ishlatiladi.

Ishqoriy eritmalarda kremniy quyidagi reaksiya bo'yicha yaxshi eriydi:



Kremniy havo  $900^\circ\text{C}$  gacha qizdirilganda barqaror qoladi. Ammo, yuqoriroq temperaturalarda oksidlanadi. Vodorod bilan kremniy  $2000^\circ\text{C}$  chamasidagi temperaturada bevosita reaksiyaga kirishadi,  $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$  silanlar hosil bo'ladi.

Azot bilan kremniy  $1100^\circ\text{C}$ – $1300^\circ\text{C}$  da reaksiyaga kirishib, nitridlar hosil qiladi.

Kremniy galogenlar bilan oson ta'sirlashadi: ftor bilan xona temperaturasida, xlor bilan  $200^\circ\text{C}$ – $300^\circ\text{C}$  da, brom bilan  $450^\circ\text{C}$ – $500^\circ\text{C}$  da, yod bilan  $700^\circ\text{C}$ – $750^\circ\text{C}$  da. Suyulgan kremniy yuqori kimyoviy faollikka ega bo'ladi. Kremniy monokristallarini o'stirish uchun eng maqbul modda sintetik kvars –  $\text{SiO}_2$  dir.

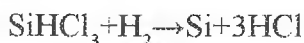
Yarimo'tkazgichlarning elektrik o'tkazuvchanligi  $\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$  ifoda bilan tavsiflanishi ma'lum.

$n$ -tur yarimo'tkazgichda o'tkazuvchanlik  $\sigma = en\mu_n$ , bunda (kirishma to'la ionlashadigan temperaturalarda) elektronlar zichligi  $n$  donor kirishma zichligi  $N_d$  ga teng, ya'ni  $N_d$  bo'lishi kerak edi. Bu tenglik kirishmalarning muayyan miqdorigacha

saqlanadi. Ammo, kirishmalar zichligi yetarlicha yuqori bo'lganda bu tenglik saqlanmaydi ( $n < N_d$  bo'ladi). Bu hodisani "legirlovchi kirishmalarning politropiyasi" deyiladi. Uning sababi - yetarlicha ko'p miqdorda yarimo'tkazgichga kiritilgan kirishma unda turli holatda bo'lishi mumkin. Masalan, kirishma yarimo'tkazgichning atomlari yoki uning tuzilishi nuqsonlari bilan birlashmalar hosil qilishi, tugunlar orasiga joylashishi va h.k. bo'lishidir. Bunday holatlarning birida kirishma kristallda elektrik faol, boshqalarida esa neytral holatda bo'lishi mumkin. Politropiya hodisasi yuz bera boshlaydigan legirlovchi kirishmalar zichligini *bo'sag'aviy zichlik* deyiladi. Undan yuqori zichliklarda yarimo'tkazgich kuchli legirlangan bo'lib qoladi.

Kremniyning (K) elektron (E) turdagi monokristallari fosfor (P) bilan legirlanadi, kovak turdagisi bor (B) bilan legirlanadi. Shuning uchun ular KEF yoki KDB tarzda belgilanadi.

Trixlorsilanni vodorod bilan tiklab kremniy olinadi:



### 3.3.2. Germaniy (Ge)

U elementlar davriy tizimida 32-o'rinda turadi, atom og'irligi 72,5, eng katta valentligi 4, suyulish temperaturasi  $936^\circ\text{C}$ , zichligi  $5,3 \text{ g/sm}^3$ , dielektrik singdiruvchanligi 16, diamagnetik.

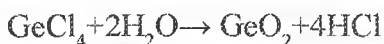
Xona temperaturasida germaniy kimyoviy jihatdan barqaror. Suvda deyarli erimaydi. 2–3 mol/l zichlikdagi nitrat kislotasi eritmasida sezilarli eriydi, ammo kislota zichligi kattalashganda sirtida  $\text{GeO}_2$  oksid pardasi hosil bo'lib, eruvchanlik juda kamayib ketadi.

Xona temperaturasida germaniyni shox arog'i (HF), vodorodning  $\text{H}_2\text{O}_2$  oksidi va oksidlovchi yediruvchilar faol eritadi.

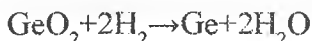
Havoda  $700^\circ\text{C}$  dan yuqorida qizdirilsa, germaniy oksidlanadi, shu temperaturalarda uni uglerod oksidi ham oksidlab qo'yadi.  $\text{GeO}$  oksid qora kukun, uni  $700^\circ\text{C}$  dan yuqorida oson haydash mumkin.

1100°C dan yuqorida germaniy vodorod bilan reaksiyaga kirishib,  $\text{Ge}_n\text{H}_{2n+2}$  birikmalar hosil qiladi. Ammo u azot bilan ta'sirlashmaydi. Suyuq germaniy 1500°C gacha temperaturalarda na uglerod (C), na kremniy oksidi ( $\text{SiO}_2$ ) bilan ta'sirlashmaydi. Bu xususiyati tufayli germaniyni grafit (C) va kvarts ( $\text{SiO}_2$ ) idishlarida saqlash mumkin. Germaniyning elektrik xossalari ko'p jihatdan kremniynikiga o'xshash, chunki, ularning har ikkalasi ham IV guruh elementlaridir.

Tozalangan  $\text{GeCl}_4$  tetraxloridni suvda gidroliz qilish yo'li bilan dastavval germaniy IV oksidi olinadi:



so'ngra  $\text{GeO}_2$  oksidini toza vodorod bilan tiklab, elementar germaniy olinadi:



### 3.3.3. Galliy fosfidi (GaP)

Galliy fosfidi yuqori kimyoviy barqarorlikka ega: u 700°C–800°C gacha havodagi kislorod bilan ta'sirlashmaydi: ko'p kislota va ishqor eritmalarga nisbatan ham barqaror. Galliy fosfidining erish tezligi azot kislotada (xona temperaturasida) 0,16 mg/sm<sup>2</sup>soat, qaynayotgan tuz kislotada (110°C) 0,01 mg/sm<sup>2</sup>soat, nitrat va tuz kislotalari qaynayotgan (1:3) aralashmasida 7,8 mg/sm<sup>2</sup>. Kislotalar aralashmasiga vodorod peroksid qo'shilsa, GaP ning eruvchanligi keskin ortib ketadi.

Galliy fosfidi kislotalarda eriganida kuchli zaharlovchi fosfin  $\text{PH}_3$  ajraladi.  $A^{III}B^V$  birikmalarning boshqalari ham kislotalar bilan ana shunday ta'sirlashadi.

GaAs va InAs – apsin  $\text{AsH}_3$ ; InP – fosfin  $\text{PH}_3$  va InSb – stabin  $\text{SbH}_3$  dan iborat zaharli moddalar ajratadi.

Suyuq GaP barcha konteyner moddalari bilan faol ta'sirlashadi, chunki, uning suyulish temperaturasi ~1500°C. Polikristall GaP

sintez qilish uchun toza grafit, monokristall GaP sintez qilish uchun esa kvarts konteyner vazifasini bajaradi.

Yarimo'tkazgich  $A^{III}B^V$  birikmalarda (GaAs, GaP) II guruh elementlari akseptor, VI guruh elementlari donor bo'ladi.

IV guruh elementlari atomlari galliy atomlari o'rniga joylashgan bo'lsa, ular donor, agar fosfor arseniy o'rniga joylashsa akseptor vazifasini o'taydi.

Legirlanmagan GaP elektron turdagi o'tkazuvchanlikka ega, bunda  $n > 10^{17} \text{sm}^{-3}$ ,  $\mu < 120 \text{sm}^2/\text{Vs}$ . Te va S bilan legirlangan GaP kristallarida asosiy zaryad tashuvchilar – elektronlar zichligi  $(1,25 \div 40) \cdot 10^{17} \text{sm}^{-3}$ , harakatchanligi  $(110 - 60) \text{sm}^2/\text{Vs}$ . Kovak turdagi GaP da kovaklar harakatchanligi  $20 \text{sm}^2/\text{Vs}$ . Ba'zi kirishmali GaP ning solishtirma qarshiligi  $10^6 \text{Om} \cdot \text{sm}$  dan ortiq.

### 3.3.4. Galliy arsenidi (GaAs)

Galliy arsenidi suv bilan ta'sirlashmaydi, kislotalar bilan faol ta'sirlashib, zaharli  $\text{AsH}_3$  arsin modda ajratadi. Galliy arsenid eruvchanligi kislotalar aralashmasidagidan ancha katta bo'ladi. Uning eruvchanligi tuz kislota eritmasida  $2 \cdot 10^{-5} \text{mg}/\text{sm}^2$  soat, tuz va nitrat kislotalar suvli aralashmasida (1:1:1) –  $60 \text{mg}/\text{sm}^2$ -soat, nitrat va fosfid kislotalar suvli eritmasida  $1200 \text{mg}/\text{sm}^2$ -soat gacha bo'ladi.

$300^\circ\text{C}$  gacha qizdirilganda GaAs oksidlanmaydi,  $600^\circ\text{C}$  dan boshlab u parchalanib, arseniyni ajratadi. Suyuq GaAs juda faol. GaAs texnologiyasida sintetik kvarts ( $\text{SiO}_2$ ) eng ko'p qo'llaniladi.

GaAs ning zichligi  $5.32 \text{g}/\text{sm}^3$  suyulish temperaturasi  $1238^\circ\text{C}$ .

Legirlanmagan GaAs monokristallari  $n$ -tur o'tkazuvchanlikka ega, bunda  $n < 6 \cdot 10^{16}/\text{sm}^{-3}$  va harakatchanlik  $\mu < 4200 \text{sm}^2/\text{Vs}$  ( $300 \text{K}$ )  $n$ -GaAs monokristallarni Te yoki Sn bilan legirlanadi.  $p$ -GaAs monokristallarni Zn bilan legirlanadi. Ko'p holda GaAs (yarim-izolatsiyalovchi) monokristallarni xrom Cr bilan legirlansa,

Te va Sn bilan legirlangan InAs monokristallari  $p$ -tur o'tkazuvchanlikka ega,  $n=(1,10^{16}+8 \cdot 10^{19}) \text{ sm}^{-3}$  (77 K). InAs kristallari [111] yo'nalishda o'stiriladi.

### 3.3.7. Indiy antimonidi (InSb)

InSb suvda erimaydi, kristallarda yaxshi yediriladi: azot kislotada yedirilish tezligi  $360 \text{ mg}/(\text{sm}^2 \cdot \text{min})$ ,  $\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 1$  aralashmada -  $480 \text{ mg}/(\text{sm}^2 \cdot \text{min})$  va h.k. InSb kislotalarda erishganda zaharli  $\text{SbH}_3$  stibin ajraladi. InSb zichligi  $5.78 \text{ g}/\text{sm}^3$ , suyulish temperaturasi  $525^\circ\text{C}$ . InSb ning havoda oksidlanishi  $500^\circ\text{C}$  yuqorida boshlanadi.

Legirlanmagan yoki Ge, Zn yoki Mn bilan legirlangan InSb monokristallari  $p$ -tur o'tkazuvchanlikka ega:

$$\rho = (1 \cdot 10^{12} + 1 \cdot 10^{18}) \text{ sm}^{-3}, \rho \approx 500 \text{ Om} \cdot \text{sm}$$

$$\mu = (3+5) 10^3 \text{ sm}^2/\text{Vs}(77\text{K})$$

Tellur bilan legirlangan InSb<Te> monokristallar  $n$ -tur o'tkazuvchanlikka ega:

$$n = (8 \cdot 10^{13} + 5 \cdot 10^{18}) \text{ sm}^{-3},$$

$$\rho \approx 500 \text{ Om} \cdot \text{sm}, \mu = (7+8) \cdot 10^{-5} \text{ sm}^2/\text{Vs}(77\text{K}).$$

Indiy antimonidi InSb monokristallarini (211) kristallografik yo'nalishda o'stiriladi.

### 3.4. Shishasimon va amorf yarimo'tkazgichlar

Tabiat va texnikada barcha qattiq jismlar kristallardan iborat emas. Molekula va atomlari tartibsiz joylashgan qattiq jismlar **amorf qattiq jismlar** deb nomlanadi. Amorf qattiq jismlar izotrop moddalardir. Ularning kristallardan asosiy farqlaridan biri aniq erish temperaturasiga ega emas. Amorf qattiq jismlarga shisha va plastik materiallar yaqqol misol bo'la oladi. Shisha atomlari tartibsiz joylashsada, ularda ma'lum bir yaqin tartibni kuzatish mumkin. Yaqin tartib shundan iboratki, bir atom yoki molekula

atrofida ma'lum bir sondagi atomlarning joylashish tartibi mavjud. Shishani qattiq sovutilgan suyuqlik deb qarashimiz mumkin. Suyuqlik qattiq soviganda uning qovushqoqligi ortib, atom va molekulalarning diffuzion faolligiga xalaqit beradi va kristall pajara hosil bo'lishiga to'sqinlik qiladi. Lekin, bu faza turg'un emas. Ba'zan amorf qattiq jismlar qizdirilganda kristallanish sodir bo'ladi.

Yunoncha "amorfos" so'zi shaklsiz degan ma'noni anglatadi. Kristallardan farqli ravishda amorf moddalarda atomlar joylashishida qat'iy tartib bo'lmaydi (buni boshqacha qilib uzoq tartib yo'q deyiladi). Ammo, amorf holatdagi moddalarda qo'shni atomlar (ion va molekulalar) moslashib joylashgan bo'ladi. Buni yaqin tartib deyiladi. Masofa ortishi bilan mazkur moslashuv kamayib boradi va bir necha panjara doimiysi chamasidagi masofada yaqin tartib yo'qoladi.

Yaqin tartib suyuqliklarda ham mavjud, lekin ularda qo'shni zarralar orasida almashinish yuz berib turadi, bu esa qovushqoqlik oshishi bilan qiyinlashadi. Shuning uchun ham amorf holatni juda yuqori qovushqoqlikka ega bo'lgan o'ta sovigan suyuqlik deb qarasa bo'ladi. Masalan, kvarts kristalini eritib, so'ngra tez sovutib, amorf holatdagi kvarts shisha hosil qilish mumkin. Yarimo'tkazgichlar fizikasi va texnikasida yarimo'tkazgichlik xossalari ega bo'lgan amorf holatdagi moddalar (amorf yarimo'tkazgichlar) sohasi rivojlanib borayotgan sohalardan bo'lib hisoblanadi.

Amorf yarimo'tkazgichlar sinfiga kovalent bog'lanishli moddalar (amorf holatdagi kremniy, germaniy va boshqalar), xalkogenid shishalar (masalan,  $As_{31}Ge_{30}Be_2Te_{18}$ ) va oksid shishalar (masalan,  $V_2O_5-P_2O_5$ ) kiradi.

Sohalar nazariyasining umumiy tasavvurlari (o'tkazuvchanlik sohasi, valent sohasi, taqiqlangan soha va hokazo) amorf holat uchun muayyan ma'noda tatbiqlanishi mumkin. Ammo, kuchli legirlangan yarimo'tkazgichlardagidek, taqiqlangan sohaning «holatlar zichligining dumlari» mavjud bo'ladi.

To'liqin vektor va dispersiya qonuni bilan bog'liq bo'lgan tushunchalar (to'g'ri va noto'g'ri o'tishlar va hokazo)ni amorf yarimo'tkazgichlarga qo'llab bo'lmaydi.

O'tkazuvchanlik sohasi tubidan yuqorida va valent soha shipining pastida elektronlar uchun lokallanmagan (kollektivlashgan) holatlar mavjud bo'lib, taqiqlangan sohada mahalliy sathlarning kvaziuzluksiz spektri bor bo'ladi.

Masalan, amorf yarimo'tkazgich shisha (S, Se, Te larning R, As, Sb, Bi, Ge, Si, Sn lar bilan turli birikmalari — xalkogenidlar) uchun quyidagi sxema taklif qilingan (3.3-a,b,drasm): taqiqlangan sohadagi mahalliy holatlar o'tkazuvchanlik va valent sohalar «dumlari», dan iborat, chegaraviy holatlar zichligi  $N_c$  mahalliy holatlar sohasini nomahalliy holatlar sohalaridan ajratib turadi (bu chegaralar  $E_v$  va  $E_c$  va tariqasida belgilangan).  $N < N_c$  bo'lgan sohada zaryadlarning ko'chishi mahalliy holatlar bo'yicha sakrama ko'chish tariqasida amalga oshadi, bu sohada harakatchanlik kichkina bo'lib, o'rtacha nol atrofida bo'ldi:

$$\mu = \frac{e}{kT} R^2 v \exp\left(2\frac{R}{\lambda} - \frac{\Delta E}{kT}\right),$$

bunda  $\lambda$ —sakrama o'tishda yutiladigan (yoki chiqariladigan) fononning to'liqin uzunligi, boshqa belgilashlar esa yuqoridagiday.



a) amorf yarimo'tkazgich shisha uchun mahalliy holatlar

b) amorf yarimo'tkazgich shisha uchun harakatchanlik

d) amorf yarimo'tkazgich shisha uchun elektr o'tkazuvchanlik



paydo bo'lishi boshlanadigan aralashma atom zichligi quyidagi ifoda bilan hisoblanadi:  $N_k = 2,2 \cdot 10^{24} (m^*/m_0)^3$ , bunda  $m^*$  – effektiv massa (misol uchun, kremniyda elektron uchun  $m^* = 0,33m_0$ , kovak uchun  $m^* = 0,55m_0$  [1]). Kremniy uchun  $N_k = 5 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ .

$n$ -tip aralashma zichligi yetarlicha katta bo'lganda aralashma hosil qilgan soha kengayib, o'tkazuvchanlik yoki valent sohalar bilan tutashib ketadi. Bunday yarimo'tkazgich *kuchli legirlangan yarimo'tkazgich* deyiladi. U yo  $n$ -turdagi, yoki  $p$ -turdagi elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi.

Chuqur energetik sohalar hosil qiladigan aralashma yarimo'tkazgichga kiritilganda, ta'qiqlangan sohaning o'rta qismida, o'tkazuvchanlik sohasi va valent sohadan uzoqroqda joylashgan, elektronlar uchun energiya sathlari hosil qiladi (xona temperaturasida, tashqi ta'sir bo'lmaganda o'tkazuvchan va valent sohalariga o'zidan elektron bermaydigan va bu sohalardan elektron qabul qilmaydigan energetik sathlarni chuqur energetik sathlar desa bo'ladi). Chuqur sathlar yo donorlik, yoki akseptorlik xossalari ega bo'ladi. Ba'zi aralashmalar bir nechta sathlar hosil qilishi mumkin, ularning ba'zilar donor bo'lsa, boshqalari akseptor bo'lishi mumkin. Bunday aralashmalar amfoter aralashmalar deyiladi. Bu aralashmalarining atomlari nafaqat tugunlarda, balki tugunlar orasida ham joylashadi. Ularning muayyan bir qismi elektr jihatdan faol (aktiv) bo'lsa, boshqa qismi esa elektr jihatdan nofaol bo'ladi. Agar ta'qiqlangan sohada aralashma bir nechta energiya sathlari paydo qilsa, bunday aralashmalar *ko'p zaryadli aralashmalar* deb yuritiladi.

Ko'p zaryadli aralashma ikkita  $E_1 = E_s - 0,2 \text{ eV}$  va  $E_2 = E_s - 0,4 \text{ eV}$  donor tabiatli energetik sathga ega bo'lsin. Agar ikkala energetik sath elektron bilan to'lgan bo'lsa, bu donor neytral holatda (bu holda  $F$ -Fermi sathi  $E_1$  energiya sathi bilan o'tkazuvchan soha orasida bo'ladi), donor bir karra ionlashgan bo'lishi uchun  $F$ 'uning  $E_1$  va  $E_2$  sathlari orasida, ikki karra ionlashgan bo'lishi uchun esa  $E_2$  dan pastida (chuqurroqda) bo'lishi zarur. Temperatura, sayoz va chuqur sath beradigan aralashma zichligini o'zgartirish bilan

1Р.Смит. Полупроводники. М.:ИЛ, 1962. 467 с

Fermi sathini keng oraliqda o'zgartirish mumkin. Fermi sathi<sup>2)</sup> quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$F = E_c - kT \cdot \ln(N_c/n), F = E_v + kT \cdot \ln(N_v/p), \quad (3.1)$$

bunda  $n$ -,  $p$ -o'tkazuvchan sohalardagi erkin elektronlar va valent sohalardagi erkin kovaklar zichligi;  $k$ -Bolsman doimiysi;  $N_c$  - o'tkazuvchan va  $N_v$  - valent sohaning holat zichligi bo'lib, ular quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:  $N_c = 2,7 \cdot 10^{19} (T/300)^{3/2}$ ,  $N_v = 1,05 \cdot 10^{19} (T/300)^{3/2}$ ,  $T$  - ko'rilayotgan temperatura.

Yarimo'tkazgichlardagi chuqur sathlar qanday vazifalarni bajaradi degan o'rinli savol paydo bo'lishi mumkin.

Ular zaryad tashuvchilar uchun rekombinatsiya va yopishish markazlari bo'lib xizmat qilishi mumkin. Bu markazlar fotoo'tkazuvchanlik (yorug'lik o'tkazuvchanlik) hodisasida asosiy o'rin tutadi hamda yarimo'tkazgich asboblarning ishlashi mumkin bo'lgan sohalarni aniqlashda hal qiluvchi omil bo'ladi.

### 3.3. Muhim yarimo'tkazgichlar

Yarimo'tkazgichlar elektronikasi sanoatida eng ko'p qo'llanilayotgan yarimo'tkazgich moddalar bilan tanishib chiqaylik.

#### 3.3.1. Kremniy (Si)

Yarimo'tkazgichli asboblarda va tizimlar ishlab chiqarishda eng ko'p ishlatilayotgan modda kremniydir. U elementlar davriy tizimida 14-o'ringda turadi. Atom og'irligi 28, uning eng katta valentligi 4, suyulish temperaturasi (normal bosimda) 1414°C,

<sup>2)</sup> Fermi sathi ( $F$ ) aynimagan yarimo'tkazgichlarda elektronlarning energetik spektriga, elektronlar soni va temperaturasiga bog'liq bo'lgan kattalik. Elektronlar yoki kovaklarning zichligi yetarlicha katta bo'lgan yarimo'tkazgich aynigan yarimo'tkazgich deyiladi. Asosiy zaryad tashuvchisi elektronlar bo'lgan ( $n$ -tur) aynigan yarimo'tkazgichda Fermi sathi o'tkazuvchanlik sathida, agar  $p$ -tur bo'lsa, valent sohada bo'ladi. Aynimagan yarimo'tkazgichlarda  $F$  ta'qiqlangan soha ichida bo'ladi.

yorug'likning to'liqin uzunligi  $\lambda_{\max} = 0,6 - 1,25$  mkm bo'lganida maksimal fotosezgirlikka erishadi.

Yuqorida amorf moddalarning yarimo'tkazgich xossalari ega bo'lishligi aytilmagan edi. Bunday moddalarning bir necha xil guruhleri bor: kovalent amorf yarimo'tkazgichlar (amorf holatdagi Ge va Si, GaAs va boshqalar), oksid shishalar ( $V_2O_5 - P_2O_5$ ), xalkogenid shishalar ( $AS_{31}Ge_{30}Se_{21}Te_{30}$ ), dielektrik pardalar ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$  va boshqalar). Amorf yarimo'tkazgichni kuchli darajada kompensirlangan yarimo'tkazgich deb qarash mumkin, bunda o'tkazuvchanlik sohasi "tubi" va valent sohaning "shifti" fluktuatsiyalanadi, ular taqiqlangan soha  $E_g$  kengligi tartibida bo'ladi. O'tkazuvchanlik sohasida elektronlar va valent sohasidagi kovaklar yuqori to'siqlar bilan ajralgan potensial chuqurlarda joylashgan "tomchi"larga bo'linib ketadi. Past temperaturalarda amorf yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi mahalliy holatlar orasida sakrama tarzda bo'ladi (sakrama o'tkazuvchanlik). Yuqoriroq temperaturalarda amorf yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligini elektronlarning umumlashgan holatlariga issiqlik harakati energiyasi evaziga o'tkazilishi aniqlaydi. Amorf yarimo'tkazgichlarning bir qator ajoyib xossalari turli amaliy maqsadlarda foydalanish mumkin. Xalkogenid shishalar spektrining infraqizil (IQ) sohasida shaffof bo'lganligi, yuqori elektr qarshilikka va fotosezgirlikka egaligi tufayli televizion trubkalarining elektrofotografik plastinkalarini tayyorlashda va gologrammalarni yozishda qo'llaniladi.

Amorf yarimo'tkazgichlarda yuqori omli holatdan past omli holatga va aksincha qayta ulanish effekti yorqin ifodalangan. U ishga tushish vaqti  $t \leq 10^{-10} - 10^{-12}$ s bo'lgan elementlar yaratish imkonini beradi.

Amorf moddalar tashqi ta'sirlar – temperatura elektr, magnit maydonlar, yorug'lik, deformatsiya, kirishmalar ta'sirida o'z xossalari o'zgartira olishligi bilan bir qatorda ularni olishdagi

texnologiya jarayonlarning qanday borishi va qanday sharoitda o'tkazilishiga bog'liq bo'ladi.

70-yillarda (XX asr) amorf tuzilishli kremniydan amaliy maqsadlarda samarali foydalanish mumkinligi isbotlangandan keyin bu moddani hosil qilish va uning fizik-texnik xossalarini o'rganish bo'yicha jadal tadqiqotlar o'tkazila boshladi. Hozir bu yo'nalishda anchagina nazariy va amaliy natijalar bor.

Muayyan taglikda o'stirilayotgan kremniy (Si) pardasiga (yupqa qatlamiga) vodorod (H) kiritilsa, u o'sayotgan pardadagi uzilgan kimyoviy bog'lanishlar sonini kamaytirishi mumkin. Bunday kremniy gidridlangan amorf kremniy deyiladi va a-Si:H shaklda belgilanadi.

Odatda, a-Si:H bir necha usulda tayyorlanadi: miltillama zaryadsizlanishda gazlarni parchalash, ionlar kiritish va katod purkash (changlatish) usullari ishlab chiqilgan.

Miltillama zaryadsizlanish usulini qaraylik. Bu usulda silan ( $\text{SiH}_4$ ) gazini geliy (He) yoki argon (Ar) gazlari atmosferasida  $\text{N}_2$  gazi bilan birgalikda parchalash orqali a-Si:H pardalari o'stiriladi. Yuqori takroriylikni miltillama zaryadsizlanishda qo'zg'atuvchi induktivlik g'altagi va zaryadsizlanish kamerasi (bo'lmasi) qurilma asosi bo'ladi. Bunday takroriylik oralig'i 0,5–13,5 MHz, bosim 0,1–2,0 mm. sim. ust., gazning sarfi 0,2–5,0  $\text{sm}^3/\text{min.}$ , o'stirish tezligi 100 – 1000 ayl/min bo'ladi.

Toza bir jinsli tuzilish hosil qilish uchun ikki elektrodli qurilmadan miltillama zaryadsizlanish yo'li bilan gazlar parchalanadi, bunda zaryadsizlanish bo'lmasida ikkita parallel elektrod joylashgan, u 13,5 MHz takroriylikda ishlaydi.

O'zgarmas tok zaryadsizlanishidan ham a-Si:H olishda foydalanish mumkin. Agar taglik katod vazifasini bajarsa, u holda o'stirish tezligini 0,1 dan 1,0 mkm/min gacha yetkaziladi.

a-Si:H pardalarni anod taglikda ham o'stirish mumkin. Bu holda o'stirish tezligi katod taglik holidagidan kichik bo'ladi, u gazning bosimi, tokning kattaligi va elektrodning holatiga bog'liq.

Taglikni qizdirish chegarasi taxminan  $600^{\circ}\text{C}$  gacha mumkin deyilsada, ammo ayrim hollarda taglik temperaturasi  $200 - 400^{\circ}\text{C}$  oraliqda bo'lganda parda nuqsonli bo'lib qolishi mumkinligi ham qayd qilingan,  $\text{SiH}_4$  ning bosimi yuqori bo'lganda millitilama zaryadsizlanish qurilmalarida o'stirilgan pardalarda turli radikallar paydo bo'ladi, yoki polimerlanish kuzatiladi.

Gidridlangan amorf kremniy namunalari legirlanmasdan tayyorlanadi, ammo o'stirish paytidagi texnologik jarayon shartlarini o'zgartirish hisobiga Fermi sathi  $E_F$  siljitish mumkin. Bu hodisani *pseudolegirlash* deyiladi. Bunda namuna panjarasining o'zgarishlari holatlar zichligi  $g(E)$ ni o'zgartiradi, bu esa o'tkazuvchanlik elektronlari zichligini o'zgartiradi, zaryad tashuvchilarning faollanish energiyasi  $\Delta E = E_c - E_F$  ham o'tkazuvchanlikni o'zgartiradi.

Pseudolegirlash usuli bilan a-Si:H parda (qatlam)larini o'stirish uchun triodli tizim qo'llaniladi. Triod to'ri kuchlanishi shunday tanlanadi-ki, bunda kuchli zaryadsizlanish anod-to'ri oralig'ida bo'ladi, gazlar aralashmasining parchalanishi ham shu oraliqda yuz beradi.

Shunday qilib, amorf kremniy olish kristall kremniy olishga nisbatan ancha arzon, binobarin, uning qo'llanish imkoniyatini oshiradi. Amorf moddalarning fizik, texnologik, texnik jihatdan o'rganilishi ularning qo'llanish sohalarini tobora kengaytirmoqda. Bunday materiallar yangi hisoblash mashinalarida, yozuv va aloqa vositalarida, ayniqsa, Quyosh energiyasidan foydalanishda samarali ravishda ishlatilmoqda, yangi qo'llanish jabhalari ochilmoqda.

### 3.5. Suyuq yarimo'tkazgichlar

Avvalo, shuni ta'kidlash kerakki, yarimo'tkazgichlar eritilganida ularning kristall panjarasi buziladi. Modda qattiq holatdan suyuq holatga o'tganda uning yarimo'tkazgichlik

xossasining qolish-qolmasligini kimyoviy bog‘lanish tabiati aniqlaydi.

Agar erish jarayonida, ya’ni kovalent bog‘lanishlar uzilayotganida, sohalardagi elektronlar yana o‘z atomlari atrofida joylashsa, bu holda modda yarimo‘tkazgichlik xossasini saqlaydi. Albatta, uning elektr o‘tkazuvchanligi kristallnikidan farq qiladi, ammo temperaturaga bog‘lanish qonuni saqlanadi.

Agar erish jarayonida sohadagi elektronlar umumlashganicha (mahalliyashmagan holda) qolsa, bu holda suyulma metall bog‘lanishga ega bo‘ladi, binobarin uning o‘tkazuvchanligining temperaturaga bog‘lanishi metallniki kabi bo‘ladi.

Olmos kristali tuzilishiga ega bo‘lgan moddalar (germaniy, kremniy) suyulganida o‘z yarimo‘tkazgichlik xossalarini yo‘qotadi. Tellur, selen, ko‘p sulfidlar va metallar oksidlari esa suyultirilganda ham o‘z yarimo‘tkazgichlik xossalarini saqlaydi.

Misol uchun tellurni olib qaraylik. Bu moddaning kristali geksagonal panjaraga ega, unda atomlar zanjirchalar ko‘rinishida joylangan. Zanjirchani tashkil qilgan atomlar orasida kovalent bog‘lanish mavjud, zanjirchalar orasida esa Van-der-Vaals o‘zaro ta’siri mavjud. Erish temperaturasidan pastda ( $T < 500^{\circ}\text{C}$ ) temperatura ortishi bilan kristall holatdagi tellurning elektr o‘tkazuvchanligi ortib boradi. Erish temperaturasidan o‘tishda elektr o‘tkazuvchanlik sakrab ko‘tariladi, yana temperaturaning ortishi davom etganda u oshib boraveradi. Tadqiqotlarning ko‘rsatishicha, erish vaqtida dastlab kuchsiz Van-der-Vaals bog‘lanishlari uziladi, ammo zanjirchalar ko‘rinishida yaqin tartibda joylashish saqlanadi. Tellurni  $1000^{\circ}\text{C}$  ga yaqin temperaturagacha isitganda atomlar zanjirlari uziladi, endi uning suyuqligi yarimo‘tkazgichlik xossasini yo‘qotadi.

Tellurning Xoll koeffitsiyentining temperaturaga bog‘lanishini tekshirganda ham erish jarayonida bu koeffitsiyentning keskin kamayib ketishi va qizdirish davom ettirilganda, u yana ham kamaya borishi kuzatilgan. Erish nuqtasining har ikki tarafida Xoll

koeffitsiyenti  $R_H$  ning ishorasi musbat (bu kovak o'tkazuvchanlikni bildiradi). Ammo,  $575^\circ\text{C}$  yaqinida  $R_H$  ning ishorasi manfiy bo'lib qoladi. Demak, bu sohada tellur aralash elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi.

Selen ham erigandan so'ng muayyan temperaturagacha yarimo'tkazgichlik xossasini saqlaydi. Tellur holidan farqli ravishda, erish nuqtasida selenning elektr o'tkazuvchanligi sakrab kamayadi, ammo temperaturaning yana ortib borishi bilan u ortib boradi.

Eritilgan aluminiy antimonid AlSb ning elektr o'tkazuvchanligi ham temperatura bilan birgalikda ozroq ortib borishi aniqlangan. Lekin, ZnTe va CdTe suyuq holatda ham o'z yarimo'tkazgichlik xossalarini saqlar ekan. Bunday moddalar guruhiga yana bir qancha moddalarni qo'shish mumkin (HgSe, HgTe,  $\text{Sb}_2\text{Cl}_3\text{Te}$ -Se qotishma va boshqalar).

### **3.6. Kompersirlangan kremniy – yangi turdagi yarimo'tkazgich modda**

Yarimo'tkazgichli elektronika va miroelektron asboblari ishlab chiqarish sanoatining eng asosiy xomashyosi bo'lib, asosan, monokristall va polikristall kremniy moddasi xizmat qilayotgani sir emas. Ma'lum bir texnologik jarayonlar na'munalariga termik va mexanik ishlovlar berib, ularni kerakli o'lchamlardagi plastinkalarga kesilib, sirtiga kimyoviy ishlov va sayqal berilgandan keyin ular kimyoviy toza, har xil kirishma atomlari zichligi  $10^{-7}\%$  dan ortmaydigan sirti planar texnologiyalar o'tkazish imkonini beradigan darajadagi holatga keladi.

Mana shunday yarimo'tkazgichli kremniy kompyuter mikroprotessorlaridan boshlab Quyosh energiyasini qayta ishlovchi batareyalargacha bo'lgan zamonaviy elektron asboblari ishlab chiqarishning asosiy moddasi sifatida ko'plab yuqori texnologiyalarda qo'llanilmoqda. Shu tufayli mana bir necha o'n

yillar davomida kremniy ishlab chiqarish yiliga oʻrtacha 20% li surʼatlar bilan oʻsmoqda. Hozirgi davrda uni ishlab chiqarishning umumiy hajmi 20 ming tonnadan oshdi. Toza kremniy va uning turli birikmalarini – kremniy organik moddalar – silikonlar ishlab chiqarish yiliga 8% surʼatlar bilan ortib bormoqda.

Anʼanaviy usullarda (Choxralskiy, Brijmen, sohama-soha eritish) orqali olingan kremniy monokristallarining sanoat uchun zaruriy parametrlarini (solishtirma qarshilik, tok tashuvchilar harakatchanligi va yashash vaqti, oʻtkazuvchanlik turi) hosil qilish uchun ularni oʻstirish jarayonida aralashma atomlari bilan legirlanadi. Bunda aralashma sifatida, asosan, kremniy atomlari tuzilishiga yaqin va elektron tuzilishga ega boʻlgan Mendeleyev davriy sistemasining III yoki V guruh elementlari atomlari qoʻllaniladi. Ularning faollanish energiyalari juda kichik ( $0,05 \div 0,09$ ) boʻlgani uchun 8 – 12 K. temperaturalardayoq ionlanib, undan yuqori temperaturalarda qoʻshimcha tok tashuvchilar hosil boʻlmaydi.

Oxirgi oʻn yilliklar davomida yarimoʻtkazgich asbob va qurilmalar xususiyatlarini tashqi taʼsirlar (yorugʻlik, issiqlik, radiatsiya) yordamida boshqarish zarurati tugʻilishi munosabati bilan kremniy taʼqiqlangan sohasida oddiy sharoitlarda ionlanmaydigan, lekin maʼlum bir tashqi energiya berilganda faollashadigan energetik sathlar hosil qilish ehtiyoji tugʻildi. Bu muammoni hal qilish uchun atomlari elektron tuzilishi kremeniynikidan koʻproq farq qiladigan elementlar atomlaridan foydalanildi. Bu atomlarning kremniy kristalida harakatlanishi nisbatan osonroq boʻlgani uchun ularni tayyor monokristallarga issiqlik taʼsirida diffuziya tezlantirilgan ionlar shaklida va katta energiyali zarralar bilan nurlantirish usullari bilan kiritish texnologiyalari ishlab chiqarildi. Bu jarayonda avvaldan mavjud boʻlgan donor yoki akseptorli sathlarga teskari energetik holatlar hosil qilish imkoniyati boʻlgani uchun bunday yarimoʻtkazgich – *kompensirlangan yarimoʻtkazgich* deb atala boshlandi.



Dastlabki kirishma atomlari zichligi  $N_c$  ga nisbatini qiymatiga qarab, chala kompensirlangan  $N_c/N_z > 1$ , to'la kompensirlangan  $N_c/N_z = 1$  va o'ta kompensirlangan  $N_c/N_z < 1$  yarimo'tkazgichli modda olish mumkinligi aniqlangan.

Kompensirlangan kremniyni oddiysidan farqlari, asosan, uning xususiyatlarini tashqi ta'sirlar yordamida boshqarish imkoni tug'ilgani bo'ldi.

Yarimo'tkazgich ta'qiqlangan sohasida tok tashuvchilar hosil qiluvchi yoki ularni tutib oluvchi sathlarning paydo bo'lishi ularda yangi fizikaviy jarayonlarni vujudga keltiradi. Jumladan, bunday energetik chuqur holatlar oddiy sharoitlarda elektron bilan to'la bo'lib,  $E_d$  ( $E_a$ ) ga teng issiqlik yoki yorug'lik (radiatsiya) ta'sirida qo'shimcha elektron (kovak)lar hosil qiladi. Monokristall hajmida zaryadlangan markaz (ion)larning paydo bo'lishi tok tashuvchilarni tutib olinishi yoki sochilishi tufayli ularning harakatchanligi va yashash vaqtlari o'zgarishiga olib keladi. Demak, yarimo'tkazgichni kompensirlash orqali uning xususiyatlarini avvaldan berilgan yo'nalishda o'zgartirish imkoniyatlariga erishish mumkin.

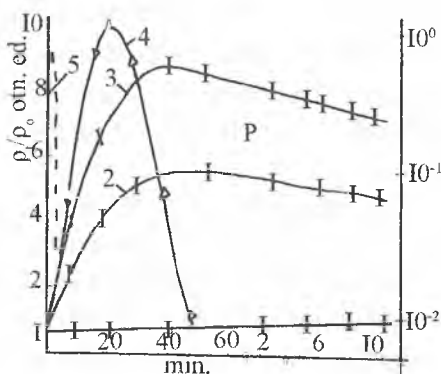
Misol uchun, nikel bilan legirlangandan keyin n-Si<Ni> namunalarda (ya'ni  $N_c/N_z = N_d/N_a = K > 1$ ) tashqi temperaturaning ta'sirida  $\rho_i/\rho_c$  ni o'zgarishi 3.4-rasmda keltirilgan. Bunday ko'rinishga nisbatan past temperaturalarda (100 – 400°C)  $\rho_i/\rho_c$  qariyb o'zgarmaydi (3.4-rasm, 1-chiziq). Temperaturaning ortishi bilan (450 – 800°C) bu bog'lanish ekstremumga ega bo'lgan egri chiziqdan iborat (3.4-rasm, 2–4-chiziq) va nihoyat 850°C dan ortiq temperaturalarda  $\rho_i/\rho_c$  ning keskin kamayishi (3.4-rasm, 5-chiziq) kuzatiladi.

Shu jarayonlarning p-Si<Ni> da ( $K > 1$ ) ko'rinishi 3.5-rasmda ko'rsatilgan. Bu jarayonlardagi sathlar va sohalararo elektronlar o'tishining batafsil tahlili bilan qiziquvchilarga maxsus adabiyotlarni tavsiya etamiz.

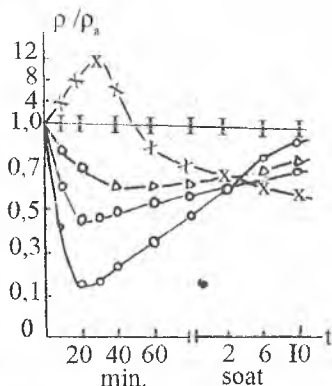
Shunga o'xshash jarayonlar kremniyda boshqa chuqur sathlar hosil qiluvchi aralashma atomlari mavjud bo'lganda ham yuz berishini kuzatish mumkin.

Aytish kerak-ki, oddiy, ya'ni kompensirlangan kremniyda shunday temperaturalarda ishlov berilganda  $\rho$  ning issiqlik nuqsonlari hosil bo'lishi bilan bog'liq bo'lgan kichik o'zgarishlarinigina kuzatamiz.

Kompensirlangan kremniyda tok tashuvchilar harakatchanligi ham o'ziga xos tabiatga ega: ularning qiymati avvalgisidan kamayadi va u kompensirlanganlik darajasi  $K$  ga bog'liq. Misol uchun  $K < 1$  bo'lgan marganets bilan legirlangan kremniyda harakatchanlik  $\mu$  ning temperaturaga bog'liqligini ko'raylik (3.6-rasm, 2-chiziq).



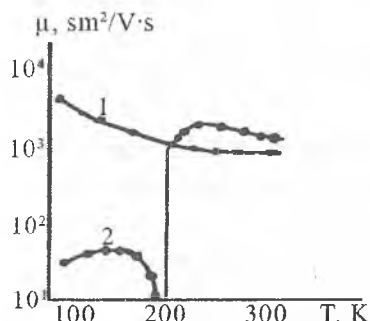
3.4-rasm. n-Si<Ni> namunadagi solishtirma qarshilikning o'zgarishi



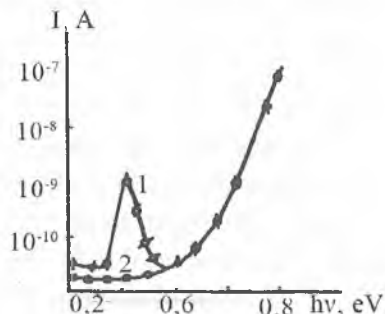
3.5-rasm. p-Si<Ni> namunadagi solishtirma qarshilikning o'zgarishi

Temperatura 100 K dan orta boshlaganda  $\mu$  marta orta boshlaydi, keyin kamayib, 180 – 190 K larda o'lchab bo'lmaz darajadagi miqdorga ega bo'ladi. 200 K dan boshlab orta boshlaydi va oddiy kremniydagi qiymatiga erishadi. Bunday ko'rinishli  $\mu(T)$  bog'lanish o'ta kompensirlangan kremniyni past

temperaturalarda chala kompensirlangan temperatura ortishi bilan to'la kompensirlangan holatlarga o'tishi mumkinligini ko'rsatadi.



3.6-rasm. Si<Mn> namunadagi harakatchanlikni temperatura ta'sirida o'zgarishi



3.7-rasm. Past temperatura va qorong'ulikda turgan n-Si<Mn> namuna fototokining hv bog'lanishi

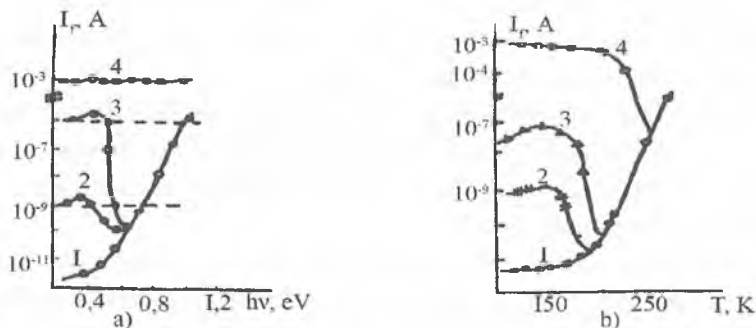
Tok tashuvchilarning kompensirlangan kremniydagi yashash vaqtlarini eng sodda hisoblashlar orqali qaraganimizda, quyidagi natijani ko'rishimiz mumkin. Agar elektronlar yashash vaqti  $\tau_n = 1/N_p S \cdot v_n$  bo'lsa, u holda, kovaklar zichligi  $N_p = 10^{15} \text{sm}^{-3}$ , elektronlarni tutib olish ko'ndalang kesim yuzasi  $S \approx 10^{-15} \text{sm}^2$  va ularning o'rtacha issiqlik tezligi  $v_n \approx 10^{15} \text{sm}^{-3}$ ni kiritsak va u ionlashganda  $N_d^+$  bo'lib,  $S_d = 10^{-13} \text{sm}^2$  ga teng bo'lsa,  $\tau_n = 10^{-7} \text{s}$  bo'ladi. Demak, elektronlarning yashash vaqti 100 marta kamayadi va aksincha  $N_d$  emas,  $N_a$  bo'lsa,  $\tau_n = 10^{-3} \text{s}$ , ya'ni, 100 marta ortadi. Maqsadga muvofiq holda boshqarish imkoniyati mavjud. Kompensirlangan yarimo'tkazgichlarning solishtirma qarshiligi ortib borib,  $K \approx 1$  da xususiy solishtirma qarshiligiga yaqin qiymatga erishish mumkin.

An'anaviy diffuziya yarimo'tkazgichni kirishma modda bilan birga qizdirish va toblash usulida diffuziya temperaturasi va toblash tezligi kirishma atomlarining butun hajm bo'yicha bir tekis taqsimlanishini yuqori darajada ta'minlashi qiyin bo'lgani uchun, zaruriy holatlarda uzunroq paralelepiped shaklidagi na'munaning bir qirrasini toblash usuli qo'llaniladi.

Diffuziya muhiti, na'muna xossalari va sovutish tezligini tanlash orqali namunaning turli qirralarida qarama-qarshi turdagi o'tkazuvchanlik hosil qilinadi va  $n$ -dan  $p$ -turga o'tish qandaydir soha  $K \approx 1$  bo'lishiga erishiladi. Shunday usulda to'la kompensirlangan yarimo'tkazgich na'munasini olish mumkin. Ammo, uni ommaviy holda qo'llash noqulayroq bo'lgani uchun sanoatda kam qo'llaniladi.

Kompensirlangan yarimo'tkazgichlar solishtirma qarshiligi uy temperaturalarida oddiy yarimo'tkazgichlarnikidan ko'p farq qilmasa ham past temperaturalarda ( $77 \text{ K} >$ ) ular keskin farq qiladi. Misol uchun,  $n\text{-Si} < \text{Mn} >$  ni  $77 \text{ K}$  da solishtirma qarshiligi ( $\rho$ )  $10^{10} \text{ Om} \cdot \text{sm}$  ni tashkil qilishi mumkin. Bunday na'munalarda noodatiy fizik jarayonlarni kuzatish mumkin. Ularning yorug'likka sezgirligi keskin ortadi. Past temperatura va qorong'ulikda turgan na'munani fotoo'tkazuvchanligining  $h\nu$  bog'lanishini ko'rib chiqaylik (3.7-rasm). Unda oddiy kremniydan farqli ravishda kirishma atomining energetik sathga yaqin energiyalarda induksirlangan fotoo'tkazuvchanlik vujudga kelganini ko'ramiz.

Fizikaviy tabiati bo'yicha yana ham qiziqroq hodisalarni bu namunalarni har xil jadallikdagi oq yorug'lik bilan yoritib, unga  $h\nu$  va  $kT$  ga bog'liq holda o'zgarishini kuzatamiz (3.8-rasm).



3.8-rasm. Qorong'ulik (1) va turli intensivlikdagi oq yorug'lik (2-4) bilan yoritilgan namunalar fototokining spektral (a) va temperaturaga (b) bog'lanishi

Bunda biz oq yorug'likning jadalligini o'zgartirish bilan,  $h\nu$  va  $kT$

ni kirishma atomi energetik sathiga yaqin qiymatlarida fototokni  $10^3$ – $10^4$  martagacha kamayishini kuzatamiz. Bunday anomal fotohodisalarni faqat kremniyni kompensirlash orqali hosil qilish mumkin.

Kompensirlangan kremniyda kirishma atomlari hosil qilgan energetik sathlar xususiyatlariga asoslangan yana bir necha fizikaviy jarayonlarni ko'rish mumkin. Kremniyda  $K \approx 1$  bo'lganda past temperaturalarda barcha elektronlar ( $n$ -tur Si da) kirishma atomlari sathlarida joylashadi.  $T$  ni ortishi bilan  $kT$  energiya elektronlarni o'tkazuvchanlik sohasiga chiqarishga yetarli bo'lmagan sohada elektronlar kirishmaviy sath bo'ylab sakrab o'tishi imkoniga ega bo'ladi va natijada kompensirlangan kremniyda "sakrab o'tish" bilan bog'liq bo'lgan tok oqa boshlaydi. Bu jarayonning to'liq mohiyati va hisob-kitoblari bilan qiziquvchilarga maxsus adabiyotlarni tavsiya etgan holda, uni faqat yuqori darajada to'la kompensirlangan yarimo'tkazgichlarga xos ekanligini ta'kidlab o'tamiz.

Bu hodisalarning nazariy tahlillari kompensirlangan kremniy aslida bir jinsli bo'lmagan tizim degan xulosaga olib keladi. Haqiqatan ham, bunday tizimlarda nomuvozanatniy elektr o'tkazuvchanlikning relaksatsiyasi juda uzoq vaqt ( $10^5$  s) davom etishi mumkinligi aniqlandi. Uning mohiyati yuqori Omli kompensirlangan yarimo'tkazgichlarda tashqi ta'sirlar to'xtatilgandan keyin ham kirishmaviy sathdagi elektron uzoq vaqt davomida o'tkazuvchanlikni katta qiymatlari hisobiga saqlanib qoladi va bu hodisani *qoldiq o'tkazuvchanlik* deb ataladi. Kirishma atomi xossalari va kremniy kristali xususiyatlarini mos holda tanlab olish orqali qoldiq o'tkazuvchanlikni yana ham ko'proq vaqtga cho'zish imkoniyatlari mavjud ekanligi ko'rsatilgan va bu hodisa kompensirlangan yarimo'tkazgichlarda xotira effekti nomini olgan.

Tahlillarning ko'rsatishicha, yuqori darajada kompensirlangan

( $K \approx 1$ ) kremniy past va yuqori Omli sohalardan tashkil topgan tizimdan iborat bo'lib, bunday bo'lishiga sabab kirishma atomlarining kristalldagi har xil ionlarining bo'lishi va ularning tashqi ta'sirlarga har xil sezgirligidir.

Bunday fizikaviy hodisalar odiy yarimo'tkazgich kristallarida kuzatilmaganligi sababli kompensirlangan kremniyni yangi turdagi yarimo'tkazgich modda sifatida ta'riflash mumkin.

### **Bobga doir savol va mashqlar**

1. Yarimo'tkazgichlar deb qanday moddalarga aytiladi?
2. Yarimo'tkazgichni tashkil etgan atomlarning kimyoviy bog'lanishi va kristall tuzilishi jihatidan qanday turlarga ajratish mumkin?
3. Eng muhim yarimo'tkazgichlardan qaysilarini bilasiz?
4. Yarimo'tkazgichdagi "aralashma" deganda nimani tushunasiz?
5. Politropiya qanday hodisa? U qanday moddalarda kuzatiladi?
6. Kremniyning qanday xossalarini bilasiz?
7. Germaniyning qanday xossalarini bilasiz?
8. Galliy fosfidi va galliy arsenidining kimyoviy xossalari to'g'risida nimalarni eslab qoldingiz?
9. Yarimo'tkazgichlardagi chuqur sathlar qanday vazifalarni bajaradi?
10. Amorfy yarimo'tkazgichlar va ularning turlarini ayting.
11. Kremniyning ishlatilish sohalari haqida nimalarni bildingiz?
12. Kompensirlangan kremniy va uning qo'llanilishi haqida nimalarni bilasiz?
13. Temperaturasi 400 K bo'lgan xususiy yarimo'tkazgichda elektronlar zichligi  $n = 1,38 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ . Ta'qiqlangan zona kengligi

$E_g = 0,785 \dots 4 \cdot 10^{-4} T$  (eV) qonuniyat asosida o'zgaradigan deb hisoblab, mazkur yarimo'tkazgich uchun elektron va kovaklarning effektiv massalari ko'paytmasini toping.

15. Energiyasi  $E(k) = E_c + (\hbar k)^2 / 2m$  ifoda bilan aniqlangan bir o'lchovli, aynimagan elektron gazi uchun holatlar zichligi  $g(E)$  topilsin.

16. Bor (B) atomi kiritilgan ( $N_a = 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $m_p = 0,59 m_e$ ,  $\mu_p = 100 \text{ sm}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $g_0 = 1$ ) kremniydagi kovaklar zichligi topilsin. Bor atomlari uchun  $E_v = +0,045 \text{ eV}$  deb hisoblang.

17. Yarimo'tkazgichdagi elektronlar zichligi  $T = 400 \text{ K}$  da  $n = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ,  $T = 350 \text{ K}$  da esa  $n = 6,2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$  bo'lsa, ta'qiqlangan soha kengligi  $E_g$  ni aniqlang.  $E_g$  ni temperaturaga chiziqli bog'langan deb hisoblang.

18. Toza germaniydagi elektron harakatchanligi  $T = 300 \text{ K}$  da  $\mu_n = 3800 \text{ sm}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $m_n = 0,55 m_e$  va  $\mu = a T^{3/2}$  bo'lsa, germaniyaning  $T = 30 \text{ K}$  dagi solishtirma qarshiligini toping. Ta'qiqlangan soha kengligi  $E_g = 0,785 \dots 4 \cdot 10^{-4} T$  (eV) qonuniyat bo'yicha o'zgaradi,  $\mu_n / \mu_p = 2,1$  va  $a$  – doimiy kattalik deb olinsin.

## IV bob. DIELEKTRIK MODDALAR

### 4.1. Dielektrik moddalardagi asosiy fizik va kimyoviy jarayonlar

Dielektrik soʻzi yunoncha *dia* – orqali va inglizcha *elektrik* – elektr soʻzlaridan tuzilgan.

Metallarning solishtirma elektr oʻtkazuvchanligi  $\sigma \sim 10^8 - 10^6 \text{ Om}^{-1}\text{m}^{-1}$  tartibida, dielektriklarniki esa  $10^{-10} - 10^{-15} \text{ Om}^{-1}\text{m}^{-1}$  tartibida boʻladi. Bu tafovutni klassik fizika metallarda erkin elektronlar boʻladi, dielektriklarda esa barcha elektronlar bogʻlangan boʻlib, ularni elektr maydon oʻz atomlaridan ajratib ololmaydi, balki, biroz siljitadi deb tushuntirar edi. Qattiq jismlarning kvant fizikasi elektronlar energiya sohalarining turlicha toʻldirilganligidan qattiq jismlarning elektr, optik va boshqa koʻp xossalari kelib chiqishligini tushuntirib bera oldi. Xususan, dielektriklarda valent sohalar toʻla toʻldirilgan boʻlib, ularning yuqorisidagi boʻsh soha toʻldirilgan sohadan ancha yuqorida joylashgan, toʻla toʻldirilgan soha elektronlari elektr oʻtkazuvchanlikda qatnasha olmaydi, ularning boʻsh sohaga oʻtib olib, oʻtkazuvchanlikda qatnasha olishi uchun yengib oʻtilishi zarur boʻlgan energetik toʻsiq (taʼqiqlangan soha kengligi) ancha katta, bunday oʻtish imkoniyati, odatda, juda kichik, shuning uchun dielektriklar elektr tokini deyarli oʻtkazmaydi. Ularda elektr maydon elektronlar zichligini qayta taqsimlaydi (atom va molekular ichida elektronlarni siljitadi) – qutblanish hodisasini yuzaga keltiradi.

Sohalar nazariyasiga, asosan, dielektriklar bilan yarimoʻtkazgichlar orasidagi farq yuqorigi toʻldirilgan soha bilan boʻsh soha orasidagi taqiqlangan soha kengligining har xil boʻlishligidan iborat. Yarimoʻtkazgichlarda  $E_g < 3 \text{ eV}$ , dielektriklarda  $E_g > 3 \text{ eV}$  deb shartli hisoblanadi.

Dielektriklarda zaryadlarning erkin koʻchishi mumkin



bo'lmaganligi tufayli uning ichkarisiga yetarlicha kuchli tashqi elektr maydonlar kira oladi. Bunda kristall panjarasining davriy elektr maydoniga qo'shimcha (tashqi) maydon qo'shilganda uchta muhim holat dielektrikning ichki tuzilishi (elektronlar va ionlar vaziyatlari)ning o'zgarishini aniqlash imkonini berishi mumkin.

Agar dielektrik namunasini statik elektr maydon (masalan, kondensator plastinalari orasidagi maydon)ga joylashtirilsa, kristallning statik dielektrik singdiruvchanligi  $\epsilon_0$  ni aniqlab, kristallning ichki tuzilishi o'zgarishi haqida muhim ma'lumot olish mumkin. Kristallning statik dielektrik singdiruvchanligi  $\epsilon_0$  ni mikroskopik nazariya hisoblaydi.

Dielektrikning optik xossalarini, ya'ni uning yuqori takroriylikli elektromagnit maydon bilan o'zaro ta'sirini aniqlash uchun dielektrik singdiruvchanlikning takroriylikka bog'lanishi, ya'ni  $\epsilon = \epsilon(\omega)$ ni hisoblash zarur. Bundan sindirish ko'rsatkichi  $n = \sqrt{\epsilon}$  ni aniqlash mumkin.

Mazkur masalalarni tadqiqlashda muhit uchun yozilgan Maksvell tenglamalaridan foydalanish qulaydir. Keyin qattiq jismdagi mahalliy maydonlarni muhokamaga kiritib, tashqi maydon ta'sirida qutblanish hodisalarini atomlar darajasida bayon qilinadi.

Ma'lumki, klassik elektrodinamika muhitlardagi elektromagnitik hodisalarni, tashqi maydondan boshqa, yana muhit xossalarini ifodalovchi tushuncha va kattaliklar yordamida tadqiq qiladi.

$\vec{E}$  – elektr maydon kuchlanganligi - maydonning mazkur nuqtasiga joylashtirilgan birlik musbat zaryadga ta'sir etuvchi kuch;  $\vec{P}$  – qutblanish vektori - dielektrik birlik hajmining elektrik momenti;  $\vec{D}$  – elektrik induksiya (elektrik siljish) vektori muhit ichida tashqi maydon va uning ta'sirida paydo bo'lgan qutblanish elektrik maydonining birgalikda birlik musbat zaryadga ta'sir etuvchi kuch;  $\epsilon$  – muhitning nisbiy dielektrik singdiruvchanligi (dielektrik doimiy) – Gauss birliklar sistemasida izotrop muhitda  $\vec{D}$  va  $\vec{E}$  orasida proporsionallik koeffitsiyenti  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ ;

$\epsilon_0$  – vakuumning dielektrik doimiysi,

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

Izotrop muhitda Gauss sistemasida

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P} = \epsilon\vec{E} \quad (4.1)$$

yoki

$$\vec{P} = \frac{\epsilon - 1}{4\pi} \vec{E} \quad (4.2)$$

bunda:  $\chi$  – nisbiy dielektrik qabul qiluvchanlik,  $\vec{P}$  qutblanish vektori bilan elektr maydon kuchlanganligi orasidagi proporsionallik koeffitsiyenti:

$$\vec{P} = \chi\vec{E} \quad (4.3)$$

(4.1) va (4.3) ifodalardan quyidagilar kelib chiqadi:

$$\chi = \frac{\epsilon - 1}{4\pi}$$

yoki

$$\epsilon = 1 + 4\pi\chi. \quad (4.4)$$

SI (xalqaro) birliklar sistemasida (4.1) o'rniga

$$\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0(1 + \chi)\vec{E} = \epsilon_0\epsilon\vec{E} \quad (4.5)$$

(bunda  $\epsilon = 1 + \chi$ ) ifoda yoziladi.

Anizotrop muhit bo'lganda ( $\vec{D}$ ) va ( $\vec{E}$ ) vektorlar parallel bo'lmashligi mumkin, bu holda dielektrik qabul qiluvchanlik va singdiruvchanlik tenzor kattaliklar bo'ladi.

Maksvellning quyidagi tenglamasini eslatamiz:

$$\operatorname{div} \vec{D} = 4\pi\rho \quad (\text{SI da } \operatorname{div} \vec{D} = \rho). \quad (4.6)$$

Izotrop muhitda

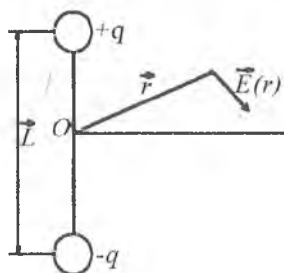
$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{4\pi}{\epsilon} \rho \quad (\text{SI da } \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}). \quad (4.6,a)$$

Ma'lumki, mazkur tenglama Kulon qonunini  $\rho$  zichlikda uzluksiz taqsimlangan zaryadlar holi uchun umumlashtirishdan kelib chiqqan.

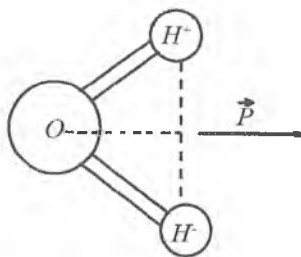
Miqdor jihatdan teng va bir-biriga bog'langan ikki zaryad *dipol* deyiladi. Dielektrik qabul qiluvchanlikni, binobarin, dielektrik singdiruvchanlikni yakkalangan zaryadlar emas, balki dielektrik dipollar aniqlaydi. Dipolning elektrik momenti quyidagi ko'rinishda aniqlanadi:

$$\vec{p} = q\vec{L}, \quad (4.7)$$

bunda  $q$  – dipolni tashkil etgan zaryadlar miqdori;  $\vec{L}$  – ularning oralig'i (4.1-rasm).



4.1-rasm. Dipol maydonini hisoblashga doir



4.2-rasm. H<sub>2</sub>O molekulasining dipol momenti

Dipol yelkasi  $\vec{L}$  ning  $\vec{E}(\vec{r})$  maydoni aniqlanayotgan nuqtaga bo'lgan  $\vec{r}$  masofadan ancha kichik ( $|\vec{L}| \ll |\vec{r}|$ ) bo'lganda mazkur nuqtada

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{3(\vec{p}\vec{r})\vec{r} - r^2\vec{p}}{er^5}. \quad (4.8)$$

Elektrik manfiylik sezilarli farqlanadigan atomlardan tarkiblangan har qanday nosimmetrik molekula doimiy elektrik dipol momentga ega bo'ladi.

Masalan, suvning  $H_2O$  molekulasida  $p=6,33 \cdot 10^{-30}$  Kl·m dipol momentiga ega, u kislorod ionidan ikkita vodorod atomini birlashtiruvchi to'g'ri chiziq o'rtasi tomonga yo'nalgan (4.2-rasm).  $HCl$  molekulasida dipol momenti bundagi ikki atomni tutasharuvchi chiziq bo'yicha yo'nalgan. Dielektrik muhitda tashqi ta'sir (elektrik maydon, bosim va hokazo) ostida elektrik dipollar vujudga kelishi (induksiyalanilishi) mumkin. U holda, qutblanish vektori birlik hajmda hosil bo'lgan dipollar momentlari yig'indisiga teng bo'ladi:

$$\vec{P} = \sum_i P_i. \quad (4.9)$$

Agar yassi kondensator qoplamalari orasiga dielektrik joylansa va kondensatorga kuchlanish berilsa, dielektrik molekulari qutblanadi.

Bunda potensial va maydon kuchlanganligi kamayadi, qoplamalar sirtida induksiyalangan qoldiq zaryadlar paydo bo'ladi. Zaryadning sirtiy zichligi:

$$q_s = -\vec{P}\vec{n}. \quad (4.10)$$

bunda:  $\vec{n}$  – sirtga normal birlik vektor.

Ko'pincha atom yoki ionda qutblanishni aniqlaydigan mahalliy effektiv maydonni hisoblash zarur bo'ladi. Bunda qaralayotgan atom berk sirt bilan o'ralgan deb faraz qilinadi. Shu sirt ichidagi dipollar ayrim-ayrim hisobga olinadi.

Demak, tashqi zaryadlar ta'sirida atomda vujudga kelgan effektiv mahalliy maydon  $E_{\text{eff}}$  ni to'rt qo'shiluvchidan iborat shaklda yozish mumkin:

$$\vec{E}_{eff} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{nok} + \vec{E}_s + \vec{E}_{dip}. \quad (4.11)$$

Bunda  $\vec{E}_0$  – tashqi zaryadlar maydoni,  $\vec{E}_{nok}$  – qutblanishni buzuvchi effektlar maydoni,  $\vec{E}_s$  – faraziy berk sirtida induksiya-langan zaryadlar mazkur sohaning markazida vujudga keltirgan maydon,  $\vec{E}_{dip}$  – sohaning ichidagi barcha dipollar hosil qilgan maydon

$$\vec{E}_0 + \vec{E}_{nok} = \vec{E}_1 = V_1 / d$$

bo‘lib,  $V_1$  – kondensator qoplamalari orasidagi kuchlanish,  $d$  – qoplamalar oralig‘i. Demak,

$$\vec{E}_{eff} = \vec{E}_1 + \vec{E}_c + \vec{E}_{dip}. \quad (4.12)$$

Agar atom atrofida tanlangan hajmni sfera desak,

$$\vec{E}_s = \left( 4\pi\vec{P} / 3 \right). \quad (4.13)$$

Bu holda, agar panjara kub shaklida bo‘lsa,  $\vec{E}_{dip} = 0$  bo‘lib qoladi. Binobarin,

$$\begin{aligned} (\vec{E}_1 = \vec{E}) \\ \vec{E} = \vec{E} + 4\pi\vec{P} / 3 \end{aligned} \quad (4.14)$$

(4.2) ifodadan  $\vec{P}$  ni (4.14) ga qo‘ysak, kubik (izotrop) panjaraning atom joylashgan tugunida effektiv mahalliy maydon quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\vec{E}_{eff} = \frac{\epsilon + 2}{3} \vec{E}. \quad (4.15)$$

## 4.2. Dielektriklarning qutblanishiga ko'ra turlari

Dielektriklar qutblanishiga ko'ra turlarga bo'linadi. Shuning uchun dielektriklar qutblanishining uchta holini ko'rib chiqamiz.

1. Qutbli molekullar dipol momentlarining mahalliy elektr maydoni bo'ylab qisman yoki to'la tizilishi holi. Yuqorida aytganimizdek, muayyan simmetrik bo'lmagan molekullar doimiy elektr dipol momentga ega. Elektr maydon o'z yo'nalishi tomon bu molekullarni buradi. Bu jarayonlarni dipollar oriyentirlanishi yoki paraelektr qabul qiluvchanlik deyiladi. Biroq, molekullarning issiqlik harakati (tebranishi) ularning maydon bo'ylab tuzilishiga to'sqinlik qiladi. Bu ikki jarayon raqobati oqibatida muayyan oriyentirlanish yuz beradi.

2. Qattiq jismlarda elektr maydon va manfiy ionlarning bir-biriga nisbatan siljishi sodir bo'ladi. Bu hodisani ionlar qutblanishi deyiladi.

3. Hamma dielektriklarda yuz beradigan qutblanish—elektronlar qutblanishidir: elektr maydon ta'sirida atomning elektronlari yadroga nisbatan siljiydi, ya'ni elektr maydon har bir atomning elektronlari qobiqlarini deformatsiyalaydi. Bunda yadrolar oralig'i o'zgarishi ham mumkin.

Dielektrik singdiruvchanlik umumiy holda  $\epsilon = \epsilon_p + \epsilon_i + \epsilon_e$ .

Endi bu hollarni ayrim-ayrim ravishda batafsilroq qaraymiz.

**Oriyentatsion qutblanish.** Umuman, doimiy dipollarning burilishi oqibatida qutblanish, asosan, gazlar va suyuqliklarga xosdir. Qattiq jismlarda qutbli molekullar bo'lsada, ular elektr maydon ta'sirida erkin burila olmaydi. Bunday jarayonni molekullarning bir turg'un holatdan ikkinchisiga sakrab o'tishi oqibatida dipol moment bilan elektr maydon orasidagi burchakning kichrayish tarzida qarash mumkin.

Birlik hajmida har biri  $r$  momentli  $N$  ta doimiy elektr dipollari bor biror muhitni qaraylik. Elektr maydon yo'qligida dipollar tartibsiz yo'nalgan. Endi  $E$  statik maydon dipollarni tartiblashga

urinadi. U holda birlik hajmning qutblanishi (maydon yoʻnalishiga elektr momentning proyeksiyasi) bunday yoziladi:

$$P_{\theta} = \sum p \cos \theta_N = N_p \langle \cos \theta \rangle.$$

Bunda  $\theta$  -- har bir dipol va elektr maydon yoʻnalishlari orasidagi burchak.

Dipollar tartiblanishi jarayoniga zarralar issiqlik harakati halaqit beradi. Issiqlik harakatini Bolsmanning energiyalar boʻyicha taqsimot funksiyasi tavsiflaydi deb hisoblasak,  $\cos \theta$  ning oʻrtacha qiymati quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\langle \cos \theta \rangle = \frac{\int_0^{\pi} 2\pi \sin \theta \cos \theta \exp(-U/kT) d\theta}{\int_0^{\pi} 2\pi \sin \theta \exp(-U/kT) d\theta} \quad (4.16)$$

bunda  $U$  dipolning  $E$  maydonidagi energiyasi:

$$U = \vec{p}\vec{E} = -pE \cos \theta \quad (4.17)$$

(4.17) ifodani (4.16) dagi integrallarga qoʻyib, hisoblashni bajarsak, quyidagi ifoda hosil boʻladi:

$$\langle \cos \theta \rangle = \frac{1 + \exp(-2pE/kT)}{1 - \exp(-2pE/kT)} = \operatorname{cth} \left( \frac{pE}{kT} \right) = \frac{kT}{pE} = L \left( \frac{pE}{kT} \right). \quad (4.18)$$

Agar tashqi maydon  $E$  yetarlicha katta boʻlsa,  $L \rightarrow 1$ . Ammo, kuchsiz maydonlar ( $E \ll kT/p$ ) holda

$$\langle \cos \theta \rangle \approx \frac{pE}{3kT}. \quad (4.19)$$

Demak, birlik hajmning qutblanishi

$$P = \left( \frac{Np^2}{3kT} \right) E. \quad (4.20)$$

Bunga mos dielektrik qabul qiluvchanlik

$$\chi = P/E = NP^2/3kT, \quad P/E = NP^2/3kT, \quad (4.21)$$

Qutbli suyuqliklar va qattiq jismlar uchun bu qabul qiluvchanlik hissasi 1 bilan taqqoslanarli bo'lishi mumkin.

Doimiy dipollarga ega bo'lgan qattiq jismda uchala mexanizm ham qutblanish (dielektrik doimiy)ga hissa qo'shadi. Past takroriyliklarda ularning hissaları turlicha. Yuqori takroriyliklarda ularning dielektrik doimiysi kompleks  $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$  kattalik bo'lib, uning haqiqiy qismi tashqi maydon bilan bir fazada o'zgaruvchi dielektrik qutblanishini ifodalaydi, mavhum qismi esa tashqi maydondan faza bo'yicha orqada qolayotgan mexanizm paydo qiladigan dielektrik yo'qotishlarni aks ettiradi. Mazkur qismlar Kramers-Kroning dispersion munosabatlari bilan bog'langan:

$$\epsilon' - 1 = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\epsilon''(x)}{x - \omega} dx, \quad (4.22)$$

$$\epsilon'' = -\frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\epsilon''(x) - 1}{x - \omega} dx. \quad (4.23)$$

Bu ifodalardagi  $P$  – integralning bosh qiymati belgisi;  $\omega$  – elektromagnit maydon takroriyligi.

Umuman aytganda,  $\epsilon'$  va  $\epsilon''$  o'zgaruvchan elektr maydon takroriyligiga bog'liq. Dielektrik doimiyning moduli  $|\epsilon| = \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2}$  induksiya vektori  $D$  ning tebranishlari amplitudasini aniqlaydi. Doimiy elektr maydonda  $\epsilon'' = 0$ ,  $\epsilon' = \epsilon$  bo'ladi.

Doimiy dipollar oriyentlanishi bilan bog'liq qutblanish 10 Hz dan yuqori takroriylikdagi elektr maydon o'zgarishlari ketidan ulgura olmaydi. Bu holda  $\epsilon'$  kamayib ketadi, ammo  $\epsilon''$  noldan farqli bo'ladi, ya'ni ancha dielektrik yo'qotishlar paydo bo'ladi.



Kattaroq  $\omega$  larda bu mexanizm hissasi yo'q darajada bo'ladi.

Optik diapazondagi yuqori takroriyli elektr maydonlarda modda dielektrik xossalarini sindirish ko'rsatkichi  $n$  va yutish ko'rsatkichi  $k$  orqali tavsiflanadi.  $n$ ,  $k$ ,  $\epsilon$  orasida quyidagi bog'lanish bor:

$$n(1 + ik) = \sqrt{\epsilon' - i\epsilon''}. \quad (4.24)$$

Ionlar kristallarida  $\omega \sim 10^{13}$  Hz yaqinida  $\epsilon'$  yana ham kamayadi. Bu takroriylikdan yuqorida ionlar ham maydon o'zgarishi ketidan ulgura olmaydi. Yanada yuqoriroq  $\omega > 10^{15}$  Hz takroriyliklarda elektronlar qutblanishi hisobiga  $\epsilon'$  birdan katta bo'lib oladi. Ammo,  $\omega > 10^{15}$  Hz larda bu mexanizm ham maydondan orqada qoladi. Bu holda qattiq jism 1 ga yaqin dielektrik singdiruvchanlikka ega bo'ladi.

**Elektron qutblanuvchanlik.** Sinusoidal tashqi maydon ta'sirida siljiydigan elektron harakatini qaraylik. Siljigan elektronni o'z vaziyatiga qaytaruvchi kvazi elastik kuchni  $\beta x$ , uning xususiy takroriyligini  $\omega_0 = (\beta/m)^{1/2}$  deb belgilasak,  $E_{\text{eff}} = eE_0 \exp(i\omega t)$  mahalliy elektr maydon ta'sirida elektronning harakat tenglamasi

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \beta x = eE_0 \exp(i\omega t) \quad (4.25)$$

ko'rinishda bo'ladi.

Bu tenglamaning majburiy tebranish amplitudasi  $x_{\text{max}}$  uchun yechimi

$$x_{\text{max}} = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (4.26)$$

bu esa  $|p| = ex_{\text{max}}$  dipol momentiga mos keladi. Induksiyalangan elektron dipol momenti mahalliy maydonga proporsional, ya'ni

$$\vec{p} = \alpha \vec{E}_{\text{eff}} \text{ yoki } |p| = \alpha_e E_0.$$

Proporsionallik koeffitsiyenti – elektron qutblanuvchanlik:

$$\alpha_e = ex_{max} / E_0 = \frac{e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (4.27)$$

Bu qutblanuvchanlik mexanizmining dielektrik singdiruvchanlikka hisssasi  $\omega \ll \omega_0$  takroriyliklarda bir xil:

$$\alpha_e = e^2 / m\omega_0^2. \quad (4.27')$$

U ko'rinadigan yorug'lik sohasida (optik sohada) dielektrik doimiy va sindirish ko'rsatkichi  $n = \sqrt{\epsilon}$  ni 1 dan katta bo'lishining yagona sababidir. Bu holda Klauzius-Mosotti munosabatini quyidagicha yozish mumkin:

$$\alpha_e = \frac{3}{N_e} \left( \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) = \frac{3}{N_e} \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right), \quad (4.28)$$

bunda  $N_e$  – elektronlar zichligi. (4.27') va (4.28) ifodalar asosida hisoblashdan  $\omega_0 \approx 1,7 \cdot 10^{16}$  Hz, bu takroriylik elektromagnit spektrning ultrabinafsha sohasiga mos tushadi. Yana bir mulohaza yuqoridagi hisobga tuzatma kiritadi: ma'lumki, tebranayotgan elektron energiya chiqarishi kerak, bundan tashqari bu elektron noelastik to'qnashish (ishqalanish)ga duchor bo'lib turadi. Bu omillarni hisobga olsak, (4.25) tenglama quyidagi ko'rinishni oladi:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + m\gamma \frac{dx}{dt} + \beta x = eE_0 \exp(i\omega t). \quad (4.29)$$

Bu tenglamaning yechimi:

$$x = \frac{eE_0 \exp(i\omega t)}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega)}, \quad (4.30)$$

Bunda elektron qutblanuvchanlik

$$\alpha_e = \frac{e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega)}. \quad (4.31)$$

(4.28) va (4.31) ifodalardan:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \left[ 1 + \frac{e^2 N_e}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega) - e^2 N_e / 3} \right]. \quad (4.32)$$

Endi belgilashni amalga oshirib,  $\omega_1 = [\omega_0^2 - (e^2 N_e / 3m)]^{1/2}$   $\varepsilon'$  va  $i\varepsilon''$  ni topamiz:

$$\varepsilon' = \left[ 1 + \frac{e^2 N_e / (\omega_1^2 - \omega^2)}{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \right], \quad (4.33)$$

$$-i\varepsilon'' = i \left[ \frac{(e^2 N_e / m)\gamma\omega}{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \right]. \quad (4.34)$$

Ionlar qutblanuvchanligi.  $N_i$  ta qutblanuvchi elektronga va  $N_e$  ta qutblanuvchi ionlar juftiga ega bo'lgan ion bog'lanishli qattiq jismni qaraylik. Bu holda (4.28) Klauzius-Mosotti tenglamasi asosida statik dielektrik singdiruvchanlik  $\varepsilon_0$  va qutblanuvchanliklar  $\alpha_i$  va  $\alpha_e$  orasida bog'lanishni quyidagicha yozib olamiz:

$$3 \left( \frac{\varepsilon_0 - 1}{\varepsilon_0 + 2} \right) = N_i \alpha_i + N_e \alpha_e. \quad (4.35)$$

Induksiyalangan ionlar dipollari hissasi juda kichik bo'ladigan, ammo elektronlar qutblanuvchanligi sezilarli kamayadigan yuqori takroriylikda yuqoridagi munosabat quyidagi ko'rinishni oladi:

$$3 \left( \frac{\varepsilon_{\infty} - 1}{\varepsilon_{\infty} + 2} \right) = N_e \alpha_e. \quad (4.36)$$

Ionlar qutblanuvchanligi shu ikki ifoda ayirmasidan aniqlanadi:

$$\alpha_i = (3/N_i) \left[ \frac{\varepsilon_0 - 1}{\varepsilon_0 + 2} - \frac{\varepsilon_{\infty} - 1}{\varepsilon_{\infty} + 1} \right]. \quad (4.37)$$

Ion bog'lanishli qattiq jismlarda  $\alpha_i$  kattalik  $10^{-40} \text{ F} \cdot \text{m}^2$  tartibida. Masalan, NaCl kristali uchun  $\alpha_i = 3,8 \cdot 10^{-40} \text{ F} \cdot \text{m}^2$ .

$M^+$  va  $M^-$  massali ionlar jufti uchun elektr maydon ta'sirida vujudga kelgan majburiy tebranishlar tenglamasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\left( \frac{M_+ M_-}{M_+ + M_-} \right) \left[ \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma_i \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x \right] = e E_{eff}, \quad (4.38)$$

bunda  $\gamma$  – energiya sochilishini tasvirlaydi;  $\omega_0$  – xususiy takroriylik.

Bu tenglamaning yechimi kompleks kattalik bo'ladi. Qutblanishning ikkala turi hisobga olinganda Klauzius-Mosotti munosabati quyidagi ifodani beradi:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \omega_0^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega)}. \quad (4.39)$$

Bu ifodaning haqiqiy va mavhum qismlarini ajratish mumkin. Dielektrik singdiruvchanlik haqiqiy qismining o'zgarishi, oldingi holdagidek, so'nish jarayonini aks ettiradi. Qaralayotgan holda  $i\varepsilon''$  mavhum qism, u  $\omega$  takroriylikda yetarlicha yuksak maksimum qiymatga ega bo'ladi, bu maksimum mazkur spektral sohada qattiq jismlarning yaxshi ma'lum bo'lgan optik xossalarini aniqlaydi. Masalan, bo'ylama va ko'ndalang optik tebranishlar takroriyliklari  $\omega_L$  va  $\omega_T$  statik dielektrik doimiy ( $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_{\infty}$ ) bilan bog'liq (4.1-jadval):

$$\omega_L^2 = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_\infty} \omega_T^2, \quad (4.40)$$

bundagi  $\omega_T^2$  ning o'zi ham  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_\infty$  larga bog'liq bo'ladi:

$$\omega_T^2 = \omega_0^2 \left( 1 - \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{\epsilon_0 + 2} \right). \quad (4.41)$$

(4.40) ifoda ancha keng qo'llanish sohasiga egadir.

#### 4.1-jadval

**Ba'zi ishqoriy-galoid ion kristallariga tegishli ma'lumotlar**

Kristall	$\epsilon_0$	$\epsilon_\infty$	$h\omega_j/k, K$
LiF	9.01	1.96	442
NaF	5.05	1.74	354
NaCl	5.90	2.34	245
NaBr	6.28	2.59	195
LiI	16.85	3.80	-

Dielektrik singdiruvchanlik  $\epsilon$  yarimo'tkazgichlarda, kirishma sathlar nazariyasida juda muhim o'rin tutganligi uchun ba'zi kovalent (yarimo'tkazgich xossali) va kovalent-ion kristallar uchun  $\epsilon$  ning qiymatlarini keltiramiz.

#### 4.2-jadval

**Ba'zi kovalent, kovalent-ion kristallarning statik dielektrik doimiylari**

Kristall	Tuzilishi	$\epsilon_0$
Kremniy Si	olmos	12,0
Germaniy Ge	olmos	16,0
Qalay Sn	olmos	23,8
Kremniy karbidi	vyursit	6,7
Galliy fosfidi	olmos	8,4

Galliy arsenidi	olmos	10,9
Indiy arsenidi	olmos	12,2
ZnS	vyursit	5,1
Surmali indiy InSb	vyursit	15,7
ZnSe	olmos	5,8
ZnTe	olmos	8,3
CdS	vyursit	5,2
CdSe	olmos	7,0
CdTe	vyursit	7,1

Kovalent kristallarda elektronlar zaryadining ancha qismi atom (ion)lar oralig'ida joylashgan. Bu tashkil etuvchi qutblanishga muhim hissa qo'shadi. Shuning uchun kovalent kristallarning dielektrik xossalari hisoblanganda sohalar nazariyasiga yoki "bog'lanishlar qutblanuvchanligi" deb nomlangan usulga murojaat qilinadi.

### 4.3. Pyezoelektriklar

Ba'zi dielektrik kristallarning qutblanishini mexanik deformatsiya ta'sirida o'zgarishini va aksincha elektrik maydon ta'sirida deformatsiya paydo bo'lishini *pyezoelektrik hodisa* deyiladi, mazkur kristall moddalar *pyezoelektriklar* deb ataladi. Faqat mexanik deformatsiya ta'sirida elektr qutblanish vujudga kelishini *to'g'ri pyezoeffekt*, aksincha bo'lishini esa *teskari pyezoeffekt* deyiladi.

Teskari pyezoelektrik effekt deb, kristall dielektriklar, jumladan kvars plastinkasi (pyezokvars) elektrik maydonga kiritilganda uning yoqlarida qutblangan zaryadlarning induksiyalanishi sababli o'lchamlarining o'zgarish hodisasiga aytiladi. Pyezoelektrikda ham bo'ylama va ko'ndalang teskari pyezoelektrik effekt kuzatiladi. Agar pyezokvarsning  $X$  o'qi bo'ylab elektrik maydon yo'naltirilsa, plastinkaning  $X$  o'qi bo'ylab sodir bo'lgan deformatsiyaga bo'ylama teskari pyezoelektrik effekt deyilib,  $U$

o'qi bo'ylab hosil bo'lgan deformatsiyaga esa ko'ndalang teskari pyezoelektrik effekt deyiladi.

Teskari pyezoelektrik effekt maydonning yo'nalishiga bog'liq bo'lib, maydonning yo'nalishi o'zgarganda, deformatsiyaning yo'nalishi ham qarama-qarshi tomonga o'zgaradi. Teskari pyezoelektrik effekt chiziqiy, ya'ni maydon kuchlanganligining birinchi darajasiga proporsional bo'lib, faqat ba'zi dielektriklar (pyezoelektriklar)da kuzatiladi. Pyezoelektrik xossalar juda ko'p dielektrik moddalarda kuzatiladi.

Pyezoelektrik hodisani oshkor qilish uchun kristall plastinkasi yoqlariga metall qoplamalar o'rnatiladi. Agar qoplamalar bir-biriga tutashmagan bo'lsa, plastina deformatsiyalanganda ular orasida potenciallar ayirmasi paydo bo'ladi. Agar qoplamalar tutashgan bo'lsa, qoplamalarda plastina sirtlaridagi zaryadlarga teng va qarama-qarshi ishorali zaryadlar paydo bo'ladi va zanjirda tok oqa boshlaydi. Qoplamalarga tashqi EYuK ulansa, kristall deformatsiyalanadi.

Pyezoelektrik hodisalar faqat simmetriya markazlari bo'lmagan kristalllarda kuzatiladi. Ammo, ba'zi simmetriya elementlari (masalan, simmetriya tekisligi) bo'lishligi ayrim yo'nalishlarda yoki deformatsiyalashda qutblanish paydo bo'lishini man qiladi, pyezoelektriklar sonini cheklaydi. Faqat 20 ta simmetriya nuqtaviy guruhlariga tegishli moddalar pyezoelektriklar bo'la oladi.

Pyezoeffektni tavsiflovchi kattalik – elektrik kattaliklar bilan mexanik kattaliklar orasidagi proporsionallik koeffitsiyentidir. Masalan,  $\sigma$  mexanik kuchlanish ta'sirida pyezoelektrikda vujudga keladigan  $R$  qutblanish unga proporsional:  $R = a\sigma$ . To'la qutblanishga yana elektrik maydon hissasi ham kiradi:  $R = a\sigma + \chi$ .

Umumiy holda 18 ta turli pyezodoimiylar bo'lishi mumkin.

Turli kristallar uchun pyezodoimiylar qiymatlari kuchli darajada farq qiladi. Masalan, segnet tuzining pyezoelektrik koeffitsiyentlari nisbiy qiymati juda katta, biroq turmalin va  $\alpha$ -kvarsniki ancha kichik. Ammo, kvarsning yuqori mexanik

va termik mahkamligi tufayli uni yuqori darajada barqaror pyezoelektrik generatorlar tayyorlashda eng ma'qul modda sifatida ishlatiladi. Bu asboblari radiouzatkichlar, kvarts soatlar takroriyligini barqarorlashtiradi. Boshqa amaliy maqsadlar uchun yuqori darajada pyezoelektrik samaradorlik zarur. Shuning uchun segnet tuzi ko'p yillar davomida sezgir o'zgartirgichlar uchun asosiy modda bo'lib xizmat qildi.

Eng yangi qurilmalarda bariy titanati-stronsiydan ishlangan maxsus shaklli keramik plastinalar qo'llaniladi, chunki bu moddalar katta pyezoelektrik samaradorlikka ega, qizdirish va namiqishga nisbatan bardoshlidir. Bu moddalardan tozalash vannalarida ultratovush manbalari va suv osti tovush qurilmalarida uzatkich hamda qabullagich sifatida foydalaniladi. Birinchi tarkibda elektrik maydonda dielektrikning deformatsiyalanishi chiziqiy bog'lanishli va mexanik kuchlanish paydo qilgan qutblanish deformatsiyasiga proporsional bo'ladi. Ionlardan tarkiblangan har qanday qattiq jismda, uning pyezoelektrik bo'lish-bo'lmasligidan qat'iy nazar, elektrik maydon kuchlanganligi kvadratiga proporsional bo'lgan qisilish (elektrostriksiya) kuzatiladi. Bu eng umumiy elektrostriksiya hodisasi tashqi maydon qo'yilganda ionlararo masofaning o'zgarishini tavsiflaganda Guk qonunining buzilishi bilan bog'liq. Demak, elektrostriksiya kuzatiladigan qattiq jismda angarmonik effektlar kristall panjarasining tebranishlari xossalriga sezilarli ta'sir ko'rsatadi.

#### 4.4. Segnetoelektriklar

Segnetoelektriklar muayyan temperaturalar oralig'ida tashqi ta'sirlar ostida muhim darajada o'zgaradigan spontan (o'z-o'zidan) qutblanishli kristallsimon dielektriklardir. Segnetoelektriklik xossalari birinchi marta (1920-yil) segnet tuzi  $\text{NaC}_4\text{H}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  kristallarida kuzatilgan. Hozir bir necha yuz segnetoelektrik moddalar ma'lum.

Segnetoelektriklik xossalari paydo bo'lishi uchun kristall



tuzilishida inersiya markazi bo'lmashligi va hech bo'lmaganda bitta noekvivalent yo'nalish bo'lishi zarur. Pyezoelektrik xossalari mavjud bo'lgan kristallarning 20 ta nuqtaviy guruhlaridan 10 tasi ikkinchi shartni qanoatlantiradi. Demak, segnetoelektrik modda pyezoelektrik bo'lishi kerak, ammo har qanday pyezoelektrik ham segnetoelektrik bo'la olmaydi. Segnetoelektriklarni ba'zan ferroelektretlar ham deyiladi. Buning sababi shuki, ferromagnitlardagi domenlar kabi segnetoelektriklarda ham domenlarning – katta spontan qutblangan (tashqi elektr maydoni bo'lmaganida ham elektr dipollar tartiblangan katta elektr momentlari bo'lgan) sohalarning bo'lishligidir. Segnetoelektriklar uchun maxsus Kyuri nuqtalari deb ataladigan  $T_c$  temperaturalar mavjud. Bu nuqtadan yuqori temperaturada segnetoelektrik holat (domenlar) buziladi, chunki bu holda issiqlik tebranishlari amplitudasi elektr dipollar tartibli joylashishiga yo'l bermaslik darajasida kattalashib ketadi. Past temperaturada segnetoelektrik bo'lgan qattiq jism Kyuri nuqtasi  $T_c$  dan yuqori temperaturada  $\chi = C / (T - T_c)$  qabul qiluvchanlikka ega bo'lgan paraelektrik bo'lib qoladi.

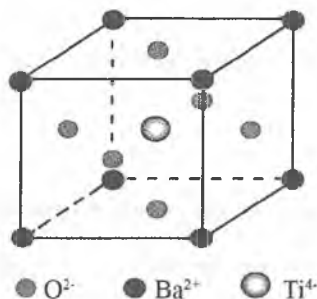
#### 4.3-jadval

#### Ba'zi segnetoelektriklarning xarakteristik kattaliklari

Modda	Kimyoviy ifodasi	$T_c$ , K	$P_s$ , C/m <sup>2</sup>
Bariy titanati	BaTiO <sub>3</sub>	393	$2.6 \cdot 10^{-1}$ (300 K)
Stronsiy titanati	SrTiO <sub>3</sub>	32	$3.0 \cdot 10^{-2}$ (4.2 K)
Kaliy niobati	KNbO <sub>3</sub>	710	$3.0 \cdot 10^{-1}$ (600 K)
Ammoniy sulfati	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	223	$4.5 \cdot 10^{-3}$ (220 K)
Segnet tuzi	NaKC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> · 4H <sub>2</sub> O	296 (yuqorisi) 255 (pastkisi)	$2.5 \cdot 10^{-3}$ (275 K)

4.3-jadvalning oxirgi ustunidagi  $P_s$  kattalik  $C/m^2$  birliklarida spontan hajmiy qutblanishni ifodalaydi.  $BaTiO_3$  ning spontan qutblanishi kelib chiqishini qaraylik. Bu birikma perovskit tuzilishga ega (4.3-rasm).

$BaTiO_3$  ning panjarasi  $T_c = 393$  K dan yuqorida kubsimon shaklda bo'ladi, segnetoelektrik holatga o'tishda kubdan tetragonal chetlanishlar paydo bo'ladi.  $T_c$  dan past temperaturada elementar yacheykada o'zgarishlar yuz beradi: u bir (c) o'qi yo'nalishi bo'ylab 1% qadar cho'ziladi, bu yo'nalishga tik o'qlar bo'ylab taxminan 0,5 qadar qisiladi. Bariy va titanning barcha kationlari panjarachasi kislorod anionlari panjarachasiga nisbatan c o'q bo'ylab yuqoriga yoki pastga siljiydi, bu esa kristall energiyasini pasaytiradi. Shu ikki panjarachalarning o'zaro siljishi taxminan 0,1 Å ga teng bo'lib, katta hajmiy qutblanish vujudga kelishligi uchun yetarlidir.



4.3-rasm. Bariy titanati ( $BaTiO_3$ )ning kristall panjarasi

Tetragonal segnetoelektrik  $BaTiO_3$  kristallda  $P_s$  panjarachalar nisbiy siljishi yo'nalishiga bog'liq ravishda, yo "yuqoriga" yoki "pastga" siljiydi. Titan yoki (yoki bariy) har bir ioni kristall panjarasida energiyasi eng kichik bo'ladigan ikki vaziyatga ega, ularni energetik to'siq bir-biridan ajratib turadi.  $T_c$  dan yuqori temperaturalarda bu to'siq yo'q bo'ladi. Turli segnetoelektrik

moddalar guruhlari uchun ularning tabiati turlicha tushuntiriladi, ammo barcha tushuntirishlar kristall energiyasining ionlar vaziyatiga bog'lanishi ikki minimumli egri chiziq ko'rinishida bo'ladi.

Yuqorida aytilganidek,  $T_c$  dan yuqori temperaturalarda segnetoelektrikning spontan qutblanganligi yo'q bo'ladi, ammo qattiq jism juda katta dielektrik doimiyya ega bo'ladi. Masalan,  $BaTiO_3$  dan tayyorlangan keramikada nisbiy dielektrik singdiruvchanlik ( $\epsilon$ )ning qiymati to 6000 gacha borib yetadi.  $T_c$  dan past temperaturada segnetoelektriklar statik qutblanishi boshqa ilmiy maqsadlarda ishlatiladi. Qutblangan segnetoelektrikli kondensator mikrofonni talabgorlari ko'p.  $BaTiO_3$  va boshqalar lazer nurini optik nurtola ichida ham, tashqarisida ham modullash va og'dirish uchun qo'llaniladi.

#### 4.5. Piroelektriklar va elektretlar

Qizdirilganda yoki sovutilganda sirtida elektr zaryadlar paydo bo'ladigan ba'zi kristallarni *piroelektriklar* deyiladi. Piroelektrning bir tomoni qizdirilganda manfiy zaryadlanadi, ikkinchi tamonida aksincha bo'ladi. Bu hodisa shunday tushuntiriladi. Piroelektriklar elektr maydon yoki boshqa tashqi ta'sir bo'lmaganida ham o'z-o'zidan (spontan)  $\vec{P}_s$  qutblanishga ega bo'ladi, buning sababi musbat va manfiy zaryadlar markazlarining mos tushmasligidir. Odatda  $\vec{P}_s$  spontan qutblanish emas, balki o'zgarishi  $\Delta\vec{P}_s$  kuzatiladi, bu esa temperaturaning tez  $\Delta T$  o'zgarishida yuz beradi (piro-elektr effekt).

Paydo bo'ladigan sirtiy zaryad zichligi  $\sigma = r\Delta T$  ifodasidagi  $r$  ning piroelektr doimiyligi deyiladi. Eng yorqin piroelektrik-turmalin, unda temperatura  $1^\circ$  qadar o'zgarganda  $E \sim 40000 \text{ V/m}$  chamasidagi elektr maydon vujudga keladi. Agar temperaturaning o'zgarish tezligi zaryadning relaksatsiya vaqtidan yuqori bo'lsa, bu holda

elektrlanish intensivligi eng katta bo'radi. Barcha piroelektriklar pyezoelektriklar bo'radi, ammo, hamma pyezoelektriklar ham piroelektriklar bo'lavermaydi. Ba'zi piroelektriklar segnetoelektrik xossalarga molik bo'radi. Texnikada piroelektriklardan yorug'lik indikatorlari va qabullagichlari sifatida foydalaniladi.

*Elektret* deb, uzoq vaqt qutblanish xususiyatini o'zida saqlaydigan va o'zining atrofidagi fazoda elektr maydoni hosil qiladigan dielektrik moddalarga aytiladi. Shu ma'noda elektretlarni doimiy magnitga o'xshatish mumkin.

Elektret termini 1896-yilda ingliz fizigi Xevisayd tomonidan muomalaga kiritilgan bo'lib, dastlabki elektret namunalari 1922-yilda yapon tadqiqotchisi Eguchi tomonidan kuchli elektr maydonida sovutilgan qutbli dielektriklar – palma mumi va kanifollarning aralashmasidan tayyorlangan.

Yuqoridagi texnologiya asosida hosil qilingan elektretlar *termoelektretlar* deb ataladi. Termoelektretlar o'zining atrofidagi fazoda bir necha oylab, hatto yillar davomida elektr maydonini hosil qilib tura oladi.

Fotoo'tkazuvchanligi yuqori bo'lgan (oltingugurt, kadmiy sulfid va boshqalar) materiallarga bir vaqtning o'zida ham yorug'lik, ham elektr maydoni ta'sir ettirish orqali hosil qilingan fotoelektretlarga qiziqish ayniqsa kuchli. Fotoelektretlar qorong'ulikda uzoq vaqt zaryad saqlay oladi va yoritilganda tez zaryadsizlanadi.

Dielektriklarda elektretlik holatini hosil qilishning yana boshqa usullari ham mavjud. Masalan, elektroelektretlar dielektrikka (qizdirishlarsiz, nurlantirishlarsiz) faqat elektr maydonini ta'sir ettirish orqali hosil qilinadi. Ushbu usulda elektr maydoni kuchlanganligi qiymati shu darajada katta qilib tanlanadi-ki, natijada dielektrik sirtida gaz razryad hosil bo'radi; maydon tomonidan tezlanish olgan ionlar, dielektrik sirtini bombardimon qilishi natijasida tuzilish nuqsonlari va sirt zaryad hosil bo'radi. Dielektrikning elektrlanishi toj razryadda gaz bosimining

pasayishi tufayli osonlashadi. Bunday elektretlar *toʻj elektretlar* deyiladi.

Odatdagi sharoitlarda, e'lektretlarning mavjud bo'lish vaqti bir necha o'n yilga yetishi mumkin. Temperatura va atrof-muhit namligining ortishi bu vaqtni yetarlicha tez kamaytiradi. Buning sababi, qizdirishda tutqichlardagi zaryad tashuvchilar bog'lanmagan holatga o'tadi va shu bilan birga dielektrikning elektr o'tkazuvchanligi hisobiga hajmiy zaryadlarning neytrallashuvi sodir bo'ladi. Bu jarayon o'ta yuqori solishtirma qarshilikka ega bo'lgan materiallarda, chuqur sathli tutqichlarda mahalliylashgan zaryadning relaksatsiyasi tufayli juda sekin yuz beradi.

Hozirgi vaqtda polimer plyonkalar (politetraforetilen, polietilenterftalat, polikarbonat, polimetilmetakrilat va boshqalar) asosidagi elektretlar keng qo'llanilmoqda. Namlik yuqori bo'lgan sharoitlarda politetraforetilendan olingan elektretlar nisbatan turg'un hisoblanadi.

Elektretlar mikrofon va telefonlar tayyorlash, mexanik titrashlarni o'lchash uchun; changtutqich va radiatsion dozimetrlar sifatida; tugmali hisoblash mashinalarida, elektrofotografiya va boshqa sohalarda muvaffaqiyatli qo'llanilmoqda.

#### 4.6. Shishasimon dielektrik kristallar

Shisha murakkab tuzilishli birikmalardan tashkil topgan bo'lib, uning tarkibiga turli metall oksidlari kiradi. Shisha tuzilishi jihatidan bir jinsli bo'lmagan amorf moddalar qatoridan o'rin olgan. Boshqa anorganik moddalardan farqli o'laroq, shisha quyidagi xossalari bilan ajralib turadi: yupqa parda va tolalar olinishi; optik jihatdan tiniqligi; turli xil metallar bilan birikishi; yuzasining tekisligi; mo'rtligi; nanga chidamliligi.

Shisha tarkibiga shisha hosil qiluvchi oksidlar ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) hamda uning erish temperaturasini pasaytiradigan ishqorli oksidlar ( $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) ishqorli yer metallarining oksidlari

(CaO, MgO, BaO va ZnO,  $Al_2O_3$ , BeO) shuningdek, shisha tarkibini o'zgartiradigan boshqa qo'shimchalar kiradi. Shisha hosil qiluvchi oksidlar silikatli ( $SiO_2$ ), aluminsilikatli ( $Al_2O_3-SiO_2$ ), borsilikatli ( $B_2O_3-SiO_2$ ), titansilikatli ( $SiO_2-TiO_2$ ), sirkonatsilikatli va alumin-borsilikatli ( $SiO_2-ZnO_2$ ,  $Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$ ) turlarga bo'linadi.

Texnik shisha quyidagi xillarga bo'linadi:

- 1) tarkibida og'ir metall oksidi bo'lmagan ishqorli shisha;
- 2) tarkibida bir qancha og'ir metall oksidlari bo'lgan ishqorli shisha;

- 3) tarkibida ishqor bo'lmagan sof shisha (kvars)larga bo'linadi. Silikatli va borli sof shishalar tarkibida  $SiO_4$ , B-O<sub>3</sub> elementlari bo'ladi. Tarkibiga oksidlar kiritilgan shisha g'ovaklashadi. Bir valentli metall ionlari shishaning dielektrik xossalarning issiqqa va namlikka chidamliligini keskin kamaytiradi.

Shishaning yumshash temperaturalarining oralig'i katta bo'lganligi sababli, undan mahsulot tayyorlash jarayoni oddiy bo'ladi. Suyuq shisha temperaturasi 800 – 900°C atrofida bo'lganda undan turli xil mahsulotlar tayyorlanadi. Shisha mahsulotlari puflash, siqish, cho'zish va bosim bilan ishlov berish usuli yordamida tayyorlanadi. Tayyor shisha mahsuloti tezlik bilan sovitilsa, unda ichki mexanik kuchlanganlik yuzaga keladi. Shisha yemirilishining oldini olish maqsadida uni qayta qizdirilib, ichki kuchlanganlik bartaraf etiladi.

Odatda, shishaning bir qancha turiga pardozi berish mumkin bo'lib, ular kesilish xossasiga ham egadir. Shishadan aniq o'lchamli juda yupqa mahsulot ishlab chiqarish uchun uning tarkibiga mis, kumush, oltin, platina zarralari kiritiladi. Bunda shishaning yorug'likka nisbatan sezuvchanlik xossasi ham oshadi. So'ngra, fotokimyoviy usul yordamida shishadan aniq o'lchamli mahsulot tayyorlanadi.

Nur ta'sir ettirib yoki termik ishlov berib, shisha tarkibida tekis kristallanish amalga oshiriladi. Buning natijasida shishaga kerakli xossalarni berish mumkin.

Shishaning solishtirma hajmiy qarshiligi  $10^9$ – $10^{18}$  Om·m bo‘lib, bunda  $r$  ning yuqori qiymati kvarsiga va quyi qiymati ishqorli shishaga taalluqlidir. Tarkibida ikki yoki uch xil ishqorli oksidlari bo‘lgan shishaga ishlov berish (neytralizatsiyalash) orqali unda elektr o‘tkazuvchanlik holati yuzaga keltiriladi. Agar ishqorli shisha tarkibiga ikki valentli metall (Ba, Pb) oksidlari kiritilsa, uni tarkibiy tuzulishi mustahkamlanishi hisobiga  $r$  ning qiymati ortadi; temperatura ortishi natijasida ionlarning siljuvchanligi ortib, shishaning elektr o‘tkazuvchanligi ko‘tariladi. Odatda, shisha yuzasiga nam o‘tirishi natijasida  $r_s$  ning qiymati anchagina (10 barobar) past bo‘ladi. Shishada  $r_s$  ni oshirish uchun, uning yuzasiga himoya qatlami (KO loki) surtiladi yoki kimyoviy ta’sirga bardoshli shisha qo‘llaniladi.

Sof shishalarda, asosan, elektron va ion qutblanish sodir bo‘lishi sababli, unda  $e_r$  qiymati kichik (3.1–3.2) bo‘ladi. Agar shishaga ishqorli og‘ir metall oksidlari kiritilsa, unda ion-relaksatsiya qutblanishi kuzatilib,  $e_r$  ning qiymati 20 gacha ortadi.

O‘zgaruvchan elektr maydonida va past takroriyliklarda shishadagi dielektrik yo‘qotishlar o‘tkazuvchanlik hisobiga sodir bo‘lsa, yuqori takroriyliklarda bu hodisa ion-relaksatsiya qutblanishi hisobiga sodir bo‘ladi. Tarkibida metall ionlari bo‘lgan shishada  $t_{g\alpha}$  qiymati yuqori bo‘ladi.

Sof shisha, ishqorsiz yoki tarkibida og‘ir metall oksidlari bo‘lgan ishqorli shishalar yaxshi dielektrik hisoblanadi. Shisha temperaturasi oshirilganda kuchsiz bog‘langan ionlarning soni ko‘payishi hisobiga dielektrikning elektr o‘tkazuvchanligi ortadi. Ion-relaksatsiya qutblanishi natijasida shishada  $t_{g\alpha}$  ning qiymati yuksala boradi. Yuqori takroriylik va temperatura oralig‘larida shishada  $t_{g\alpha}$  qiymati o‘zgarishsiz bo‘ladi.

Yuqori kuchlanishlarda shishada elektr va issiqlikdan teshilish hodisasi sodir bo‘ladi. Bir jinsli maydonda, yupqa (50 – 100 mkm) shishada elektr teshilishi  $E_T=100 – 600$  MV/m, qalin shishada esa issiqlik teshilishi  $E_T=15 – 30$  MV/m sodir bo‘ladi.

Shishaning solishtirma og'irligi  $2000 - 8100 \text{ kg/m}^3$ , cho'zilishdagi mexanik mustahkamligi  $100 - 300 \text{ MPa}$ , shishaning yumshash temperaturasi  $400 - 1600^\circ\text{C}$  oralig'ida bo'ladi. Texnik shishaning dielektrik xossalari:  $\epsilon_r = 3,8 - 16,2$ ;  $\text{tg}\delta = 0,002 - 0,01$ ;  $\rho = 10^6 - 10^{15} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ ;  $E_T = 500 \text{ MV/m}$  ga teng bo'ladi.

Shisha elektrotexnikada keng qo'llaniladi. Undan, asosan, yuqori kuchlanishli izolatorlar, turli izolatsiya mahsulotlari, shuningdek, egiluvchan, o'ta ingichka ( $4 - 16 \text{ mkm}$ ) uzun tolalar tayyorlanadi. Tola olish uchun shisha siniqlari maxsus teshik-filerlarda eritiladi, so'ngra uni oqizib, o'rab olinadi yoki kerakli uzunlikda kesiladi. Bir nechta shisha tolalarni o'zaro birlashtirib, shisha ipi olinadi. Ulardan tasma, turli matolar ishlab chiqariladi. Shisha tolalarining organik tolalardan ustunligi ularning yuqori temperaturaga bardoshlilik, yuqori mexanik mustahkamlik va dielektrik xossalarga egaligi va kam miqdorda nam singdiruvchanligidadir. Shisha tolasidan yasalgan qalamchalarning cho'zilishga bo'lgan mustahkamligi po'latning mustahkamligidan qolishmaydi.

Kvarsli shisha kondensatorlar, induksion g'altaklar, vakuumli asboblarda va hokazolarda qo'llaniladi. Kam ishqorli va ishqorsiz shishalardan yuqori kuchlanishli va yuqori takroriyli asboblarning kondensatorlarida, impulsi generatorlarda keng foydalaniladi.

Ayrim turdagi shishalar lampalar tayyorlashda ishlatiladi. Tola va to'qima tayyorlashda ishqorsiz shisha qo'llaniladi. Shisha tola va to'qimalardan mexanik mustahkamlikka ega shisha plastlari tayyorlanadi. Ular issiqqa chidamli kabel izolatsiyalarida qo'llaniladi. Shisha to'qimalarining tarkibida havo bo'shliqlari bo'lgani sababli, ularning dielektrik xossalari shisha tolasinikiga nisbatan yuqoridir. Masalan, shisha tolasida  $\text{tg}\delta = 4,5 \cdot 10^{-3}$ ;  $\epsilon_r = 9,2$  bo'lsa, shisha to'qimada  $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-3}$ ;  $\epsilon_r = 1,8 - 2,0$  bo'ladi. Shisha to'qimalar issiqlik va  $\gamma$  nurlari radiatsiyasi ta'siridan himoya qiluvchi vosita sifatida ham qo'llaniladi. Shisha pardalar har xil qalinlikda ishlab chiqariladi. Agar pardaning qalinligi kamaytirilsa,



uning egiluvchanligi va  $E_T$  qiymati ortadi. Bunday pardalarning elektrik mustahkamligi  $E_T=70 - 600$  MV/m ni tashkil etadi. Parda shisha elektr mashinasining izolatsiyasida, kondensator, mustahkam shisha qatlamlari tayyorlashda qoʻllaniladi.

Koʻpiksimon shisha yengil, mexanik mustahkam, yaxshi dielektrik xossali, issiqqa chidamli modda boʻlgani uchun u radio qurilmalari va issiqlik izolatsiyalarida ishlatiladi.

#### 4.7. Keramik moddalar va sitallar

Hozirgi zamonda keramik moddalar sohasi juda koʻp moddalarni – qurilishda ishlatiladigan gʻishtdan to eng yangi yuqori temperaturada oʻta oʻtkazuvchan keramik qotishmalargacha boʻlgan qattiq jismlarni oʻz ichiga oladi. Ular xilma-xil xossalarga ega fan hamda texnikada keng qoʻllanilmoqda. Shuning uchun keramika toʻgʻrisida toʻlaroq maʼlumot keltirishning iloji yoʻq va biz bu haqda asosiy xossalarning qisqa bayonini keltiramiz.

Keramik moddalarning atomlari orasida ionlarga xos va kovalent bogʻlanishlar uchraydi. Bu yerda shuni taʼkidlash kerakki, ionlar bogʻlanishi holida elektronlar zaryadlari ionlar atrofida yigʻilgan, ionlar orasida, tabiiy, elektrostatik kuchlar taʼsir qiladi. Kovalent bogʻlanish holida elektronlar zaryadi (zichligi) qoʻshni atomlar orasida nisbatan tekis taqsimlangan, bunda elektrostatik oʻzaro taʼsir kuchsiz, ammo kvant oʻzaro taʼsiri asosiy boʻladi.

Texnologik jarayonning qanday borishiga qarab bir modda turli tuzilma hosil qiladi. Masalan,  $\text{SiO}_2$  moddasini suyultirib soʻng sekin sovuta borilsa, kristobalit kristali hosil boʻladi, agar  $\text{SiO}_2$  ning suyulmasi tez sovutilsa — silikat shisha (amorf jism) olinadi. Bu ikkala qattiq jism ham keramikaga mansubdir.

Hozir keramika deyilganda metall tabiatli hamda polimer (zanjirsimon) tuzilishga ega boʻlmagan qattiq modda tushuniladi. Shishalar, monokristallar, konglomeratlar, mayda kristallar va ularning birlashmalari keramik moddalardir.

Aluminiy oksidi  $Al_2O_3$  asosida keramik moddalarga turli xossalar berish mumkinligini ko'rib chiqaylik.

$Al_2O_3$  ning ayrim donalari (korund) moddalarni silliqlash va sayqallashda ishlatiladi. Donador tuzilishli  $Al_2O_3$  polikristallari ko'rinadigan yorug'lik sohasida yaxshi shaffof (tiniq) bo'lganligi tufayli ulardan yuqori temperatura va yuqori bosimda ishlay oladigan optik derazalar tayyorlanadi.  $Al_2O_3$  namunasida titan kirishmasi bo'lsa, ularni sapfir deyiladi va u spektrning IQ sohasida shaffof. Shuning uchun u optoelektronikada ko'poq qo'llaniladi.

$Al_2O_3$  kristaliga xrom qo'shilsa, yoqut hosil bo'ladi. Yoqut optik kvant generatorlarda ishchi jism sifatida ishlatiladi.

#### 4.7.1. Qurilmalar va asboblarda qo'llaniladigan keramika

Keramikaning kimyoviy va termik chidamligi ulardan qurilmalarda foydalanish imkonini beradi. Bu xossalar atomlararo bog'lanishlarning kuchli bo'lishligi va ko'pchilik metallar oksidlaridan tarkiblangan keramik moddalarning yana oksidlanishi amalda mumkin emasligidan kelib chiqadi.

Kimyoviy bog'lanishlarning mustahkamligi keramik moddalarning yuqori suyulish temperaturasiga va qattqlikka ega bo'lishligini taqozo etadi. Atomlar qatlamlarning o'zaro sirpanishiga yo'l bermaydi, keramik moddalar tashqi kuchlanish berilganda o'z shaklini saqlaydi, lekin agar yuklama biror bo'sag'aviy qiymatga erishganda birdaniga barbod bo'ladi, ularda metallardagidek plastik deformatsiya bo'lmaydi.

Keramik moddalarning mazkur xossalarini tushunish uchun ularda mavjud bo'ladigan nuqsonlarni – kirishmalar, yakka vakansiyalar va ularning uyumlari (vakansion kovaklar), mikrodarzlarni ko'rib chiqish zarur.

Kristall keramika va shishaning mo'rtligini miqdoran qayishqoqlik aniqlaydi, u taxminan  $MPa/m^{1/2}$ . Metallar uchun u  $40 MPa/m^{1/2}$  chamasida bo'ladi.

Keramik moddalaridagi kirishmalar va mikrokovaklar ham qo'yilgan tashqi kuchlanishni o'ziga jalb qiladi. Ular atomlararo bog'lanishlarni susaytiradi, oson uziladigan qiladi, shuning uchun nuqtaviy nuqsonlar atrofida bog'lanishlarning plastik deformatsiyasi bo'lishi qiyin. Oqibatda nuqsonlar joyida kovaklar kattalasha boradi.

Demak, nuqsonlarning ta'sirini o'rganish keramik moddalarning foydali xossalarini yaxshilashga qaratilgan. Kovaklar, aglomeratlar, kimyoviy kirishmalar kabi nuqsonlarni bartaraf qilish zarur, chunki ular darzlarning paydo bo'lishi manbalaridir. Buning uchun dastlabki kukun (poroshok) sinchiklab tozalanadi va juda maydalab, zichlab taxlanadi.

Texnologik jarayon quyidagi bosqichlardan iborat: metall oksid, masalan,  $TiO_2$  ning kichkina diametrli ( $<1\mu m$ ) zarralari eritmadan o'tkaziladi. Bu zarralardan (masalan, metanolda) maxsus suspenziya tayyorlanadi, unga qo'shilgan polimer zarralar sirtiga yopishib, ularning aglomeratlar shaklida uyushib ketishiga yo'l qo'ymaydi. Olingan kukun (poroshok) "nazorat qilinadigan taxlashga" duchor qilinadi. Natijada amalda kovaksiz modda olinadi. "Nazoratli taxlash" jarayonning eng muhim qismidir. Bunda katta bosim ostida qoliplarda qisish bilan bir qatorda qizdiriladigan press qolipda zichlash, zambarakning yopiq stvolida portlash yordamidagi zichlash, dinamik zichlash, elektr maydonda polimer qobiqli kukun (poroshok) zarralari harakati – elektroforez yordamida zichlash usullari qo'llaniladi.

Mayda kukun (poroshok) olishda lazerlar texnologiyasi muvaffaqiyatli qo'llana boshladi. Bu  $Al(CH_3)_3$ ,  $B(CH_3)_3$  turidagi organometall molekullar yoki  $SiCl_4$  turdagi molekullarni lazer nurlari ta'sirida parchalashga asoslangan. Bu holda metall zarralari mazkur birikmalar gazi to'ldirilgan kamera devorlarida mayda donali kukun (poroshok) ko'rinishida o'tiradi. Ba'zan kameraga maxsus taglik joylanadi.

Kukun (poroshok)ni uydırish sohasida asosiy vazifa zichlangan zarralar tutinishi mustahkamligini oshirishdir. Odatda, zarralar

chegarasida vakansiyalar va vakansion kovaklar ko'p bo'ladi. Masalan, SiC yoki  $\text{Si}_3\text{N}_4$  kukunlariga nodir yer metallari oksidlari qo'shiladi. Ular masofada mavjud bo'lgan  $\text{SiC} > 2$  bilan o'zaro ta'sirlashadi. Qizdirishda  $\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{CO}_2 \uparrow$  yoki  $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \uparrow$  reaksiyalar oqibatida vakansion kovaklarni to'ldiruvchi  $\text{K}_2\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaSiO}_3$  suyuq silikatlar hosil bo'ladi. Keramik moddalar mustahkamligini oshirishning yana bir yo'li yuklama (bosim) ostida darzlar o'sishini to'xtatishdir.

Bosim ostida kristall tuzilishini o'zgartirish usuli ham keramik moddalar mustahkamligini oshirishga xizmat qiladi. Masalan, bosim ostida tetragonal tuzilishli dioksid  $\text{ZrO}_2$  monoklin tuzilishli bo'lib qoladi. Monoklin tuzilishli  $\text{ZrO}_2$  ning hajmi tetragonal tuzilishdan 3...5% qadar katta. Kengayib borib, donalari darzni qisadi, darz endi kengaya olmaydi.

Yana bir usul shundan iboratki, mazkur keramikaga undan mustahkamroq keramika tolalari kiritiladi. Bunday keramik moddalarda darz o'sishda tolaga duch keladi va nariga yoyilmaydi. Amalda bunday tola sifatida SiC kremniy karbidi tolalaridan foydalaniladi.

Darzlarni to'xtatishning uchinchi usuli darzning uchini to'ntoqlashdir.

Mazkur keramik moddalarga boshqa moddalarning ozroq qo'shimchasi kiritilganda hosil bo'ladigan bir jinsli (gomogen) sohalar paydo bo'ladi, albatta. Shu sohalarini imkoni boricha toraytirish keramik moddalarni mustahkamroq qiladi. Hozir shu asosda  $0 \leq x \leq 5$  oraliqda  $\text{Si}_{6-x}\text{Al}_x\text{N}_{8-x}\text{O}_x$  kabi yuqori mustahkamlikka ega bo'lgan keramik moddalar – sialonlar yaratilgan.

Keramik moddalar ikkita muhim sohada – metallga ishlov beradigan kesuvchi asbobni va harakatlantirgichlar qismlarini tayyorlashda qo'llanilmoqda.

Keramik asbob, mustahkamlangan keramikadan yasalgan keskichlar uzoq muddat ishlashi sharoitida, kesish tezligini ko'p marta oshirish imkonini beradi energiya tejashga olib keladi.

Harakatlantirgichlarning qismlari – turbinalarning harakatlantiruvchi va qo‘zg‘almas kuraklari yuqori darajada mustahkam bo‘lgan va uncha mo‘rt bo‘lmagan keramikadan tayyorlansa, ular metall va qotishmalarga nisbatan yuqori temperaturalarda ham ishlay oladi, FIK i yuqoriroq bo‘ladi, zichligi kam, chidamligi ham yuqoriroq.

Keramik moddalar avtomobilning harakatlantirgich qismlarini tayyorlashda ham qo‘llaniladi, mexanik zichlantirgichlardan suv quvurlarni berkituvchi jo‘mraklarni tayyorlashda foydalaniladi.

#### 4.7.2. Sitallar

Sitallar kristall strukturali anorganik modda bo‘lib, maxsus tarkibli shishani kristallash orqali olinadi (“sitall” so‘zi “silikat” va kristall so‘zlarining qisqartmasidan iborat). Sitallning kristall fazasi tayyorlanish sharoitiga qarab 90 – 95% ni tashkil etadi. Bunda kristall o‘lchamlari 1–2 mkm dan ortmaydi.

Kristall fazali sopoldan farqli o‘laroq, sitall shisha qotishmalaridan hosil bo‘ladi va mayda donador (kristall o‘lchami 1 mkm, sopolnikida esa 20 – 25 mkm) tarkibga ega bo‘lib, modda hajmida havo bo‘shliqlari bo‘lmaydi. Sitalldan mahsulot ishlab chiqarish usullari xuddi shishaniki kabi bo‘ladi. Sitall olish uchun arzon bo‘lgan tog‘ jinslari, shlak kabi xomashyolar talab etiladi. Quyidagi tarkibli sitallar eng ko‘p tarqalgan:

- 1) litiy-alumosilikatli ( $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ );
- 2) magniy-alumosilikatli ( $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ );
- 3) litiy-rux-silikatli ( $\text{Li}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$ );
- 4) litiy-magniy-silikatli ( $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{SiO}_2$ ) va boshqalar.

Sitall tayyorlash uchun ko‘pincha, ikki ko‘rinishdagi katalizatorlar–ishqorlar va ishqoriy-yer metallarning sulfidlari, floridlari, yorug‘likka sezgir metallardan (mis, kumush, platina, oltin) foydalaniladi. 800 – 900°C da katalizatorli shisha eritmasidan detallar tayyorlanadi va ma‘lum temperaturagacha keskin

sovutiladi. Soʻngra detallar yumshash temperaturasi ( $500\text{--}540^{\circ}\text{C}$ ) gacha qizdiriladi. Bujarayon shishaning kristallangan markazlarini diffuziya hisobiga kolloid oʻlchamlarigacha yiriklashtiradi va shishaning asosiy qismida kristallanish boshlanadi. Qattiq kristall panjara hosil boʻlgandan soʻng issiqlikni asta-sekin oshirish orqali shishada toʻliq kristallanish ( $800\text{--}1000^{\circ}\text{C}$  da) amalga oshiriladi. Bunda detallarning deformatsiyalanishiga yoʻl qoʻyilmaydi. Soʻngra ular xona temperaturasi ( $20^{\circ}\text{C}$ ) gacha sovutiladi. Agar shisha tarkibida mis, kumush, oltin, platina elementlari katalizator sifatida qoʻllanilsa, eritmani keskin sovutish mobaynida bu metallar bir tekis tarqalgan ion va atomlar holatida boʻladi. Keltirilgan metall zarralari hajm boʻyicha tekis tarqalishini osonlashtirish maqsadida, ishlatishdan avval ularga ultrabinafsha yoki rentgen nurlarida ishlov beriladi. Suyuq shishadan detallar tayyorlanib, ularga issiqlik taʼsirida ishlov beriladi. Yuqorida keltirilgan usulda tayyorlangan sitallar *fotositallar* deyiladi.

Yuqori temperatura va takroriyliklarda sitallning  $\text{tg}\delta$  qiymati kichik boʻlib, undan elektr izolatorlari tayyorlanadi. Dielektrik xossalari jihatidan sitallar yaxshi sopol moddalariga yaqin turadi. Sitallning elektr oʻtkazuvchanligi modda kristall asosining turiga bogʻliq boʻladi. Kristallanish darajasi yuqori boʻlgan sitallarning elektr oʻtkazuvchanligi past boʻladi. Bu, asosan, kristallanish mobaynida ionlar siljishining pasayishi bilan tushuntiriladi.  $20\text{--}400^{\circ}\text{C}$  oraligʻida sitallning solishtirma hajmiy qarshiligi shishaning hajmiy qarshiligidan  $10^2\text{--}10^4$  marotaba yuqori boʻladi. Sitall tarkibiga ikki valentli metall oksidlari (Ca, BaO va hokazo) kiritilsa,  $\text{tg}\delta$  qiymati 2–2,5 marta ortadi,  $\text{tg}\delta$  qiymati esa 2 marta kamayadi.

Sitallning dielektrik singdiruvchanligi 5–10 ga teng. Agar sitall tarkibida segnetoelektrik faza (titanat, niobiy) mavjud boʻlsa,  $\epsilon_r$  qiymati 2000 gacha koʻtariladi.

Sitallning  $\text{tg}\delta$  qiymati takroriylik oʻzgarishiga deyarli bogʻliq emas. Oʻzgaruvchan elektr maydoni taʼsirida boʻlgan sitalldagi

energiya yo'qotishlari elektr o'tkazuvchanlik va ion-relaksatsiya qutblanishi hisobiga sodir bo'ladi. Dielektrik isroflar moddaning shishasimon fazasida sodir bo'lgani sababli, uning tarkibidagi ishqorli metall ionlarining miqdori kamaytirilishi kerak. Sitallda energiya yo'qotishi shishaga nisbatan kamroq bo'ladi. Sitall tgd qiymatining takroriylikka nisbatan o'zgarishi ion-relaksatsiya qutblanishi hisobiga sodir bo'ladi. Temperatura ko'tarilishi bilan sitallning tgd qiymati, elektr o'tkazuvchanlik ko'payishi hisobiga ortadi. Sitall tuzilish jihatidan zich modda bo'lib, uning tarkibida havo bo'shliqlari yo'q. Uning elektr mustahkamligi shisha va chinnilarning elektr mustahkamligidan yuqoridir.

Sitallning solishtirma og'irligi  $2420 - 5700 \text{ kg/m}^3$  oralig'ida bo'ladi. Sitallning tarkibi mayda zarralardan iborat bo'lgani uchun u yuqori darajali gaz o'tkazmaslik va mexanik mustahkamlikka ega bo'ladi. Sitall yuzasi tekis bo'lib, oson tozalanish xususiyatiga ega, uning yuzasini sirlash shart emas. Bu modda metall bilan yaxshi birikadi. Yaxshi kristallangan, sitallning tashqi ko'rinishi tiniq bo'lmaydi. Tiniq va yarim tiniq sitall kristallarining o'lchami kichik bo'ladi yoki kristallanish darajasi to'liq bo'lmaydi. Bu moddaning kristallanish jarayonida hajmiy kichrayishi kichik (3% gacha) bo'lganligi sababli, undan aniq o'lchamga ega mahsulot olish mumkin.

Sitallning ishqalanishga chidamliligi yuqori bo'lganligi uchun undan tayyorlangan mahsulot yuzasi yemirilishga bardoshli bo'ladi. Mexanik mustahkamligi jihatidan sitall shishadan ustun turadi. Sitallning chiziqli kengayishi koeffitsiyenti  $-0,7 \cdot 10^{-6}$  dan  $-30 \cdot 10^{-6} (\text{grad})^{-1}$  gacha oraliqda bo'ladi. Bu esa turli xil metall bilan sitallni yaxshi biriktirishga keng imkoniyat yaratadi.

Sitallarning metall bilan yaxshi birikishi, dielektrik xossalari va issiqqa chidamliligining yuqoriligi, ularning mikromodulli bosma sxemalar asosida qo'llash imkonini beradi. Alangaga chidamliligi, yaxshi mexanik xossalari, yuqori darajali radioshaffoffligi tufayli sitallni aylanadigan antenna o'tkazgichlarda ishlatish mumkin.

Vakuimli elektron asboblarda sitalldan metall bilan zich birikuvchi modda sifatida foydalaniladi. Sitall yuqori temperaturali vakuum sharoitida ishlaydigan asbob qobiqlarida, reaktorlar va boshqaruv o'zaklarida ham ishlatiladi.  $e_r$  qiymati yuqori bo'lgan sitallardan kichik hajmli kondensatorlar tayyorlanadi.

#### 4.8. Organik moddalar

Tarkibida uglerod moddasi bo'lgan birikmalar *organik moddalar* deb ataladi. Uglerod molekularining tuzilishi turli-tumandir. Bu molekular ko'p sonli kimyoviy birikmalar hosil qiladi: molekula tuzilishi bo'yicha ular zanjirli, tarmoqlangan, doirasimon va boshqa shakllarda bo'lishi mumkin. Yuqori molekularli moddalarga selluloza, shoyi, kauchuk va boshqalar kiradi.

Sun'iy ravishda olinadigan yuqori molekular moddalar ikki turkumga ajratilishi mumkin. Birinchisiga tabiiy yuqori molekular moddalarga kirayoviy ishlov berish yo'li bilan tayyorlanadigan sun'iy moddalarni keltirish mumkin. Masalan, sellulozani qayta ishlash orqali selluloza efiri olinadi. Ikkinchi turkumga past molekular moddalardan tayyorlanadigan yuqori molekular sintetik moddalar kirib, ular elektr izolatsiyasida alohida ahamiyatga egadir.

Reaksiya natijasida monomerlardan polimerlar hosil bo'lishi *polimerlash* deyiladi. Polimerlash natijasida moddalarning molekular massasi, suyuqlanish va qaynash temperaturasi ortadi; polimerlash jarayonida modda gaz yoki suyuq holatdan quyuv yoki qattiq holatga o'tadi.

Polimerlar, asosan, chiziqli va fazoviy polimer guruhlarga bo'linadi. Chiziqli polimer molekularining tuzilishi zanjir va tola ko'rinishida bo'ladi. Tabiiy kauchuk, polietilen, siloksan kauchuklari chiziqli polimerlarga misol bo'ladi. Fazoviy (yoki tarmoqlangan) polimer molekular uchala koordinata o'qlari



bo'yicha tekis joylashib, ixcham tuzilishga ega qaytariluvchi guruhlardan tashkil topadi. Chiziqli va fazoviy polimerlar xossalari jihatidan bir-biridan keskin farq qiladi. Chiziqli polimerlar egiluvchi qayishqoq bo'lib, temperatura ta'sirida ularning ko'pchiligi avval yumshab, so'ngra eriydi. Fazoviy polimerlar esa eriydigan qattiq holatda bo'lib, ularga temperatura ta'sir ettirilganda kimyoviy yemirilish sodir bo'ladi.

Polimerlarning termoplastik va termoreaktiv turlari bo'ladi. Termoplastik (plastik) polimerlar qizitilganda yumshab, osongina deformatsiyalanadi; erituvchilar ta'sirida esa ular oson eriydi, temperatura ta'sirida elektr xossalari deyarli o'zgartirmaydi. Termoreaktiv (reaktoplast) polimerlar qizitilganda qattiq (mexanik mustahkam) holatga o'tib, egiluvchanlik va eruvchanlik xususiyatlarini yo'qotadi. Temperatura ta'sirida ushbu moddalar fazoviy polimerlarga o'xshash tuzilishga ega bo'ladi. 4.4-jadvalda polietilenning asosiy mexanik va fizik xossalari keltirilgan.

4.4-jadval

**Polietilenning asosiy mexanik va fizik xossalari**

Ko'rsatkichlar	Yuqori bosimli	Past bosimli	O'rtacha bosimli
Zichligi, kg/m <sup>3</sup>	918–930	954–960	960–968
Mustahkamligi, MPa: Cho'zilishda	10–17	18–45	18–40
Egilishda	17–20	18–45	25–40
Siqilishda	14–17	30–36	20–37
Nisbiy cho'zilish, %	15–20	10–12	5–8
$\rho$ , Om·m	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>
$\rho_s$ , Om·m	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>
$\epsilon_r$ (MHz)	2,2–2,3	2,2–2,4	2,3–2,4

tgδ	$(2-3) \cdot 10^{-4}$	$(2-4) \cdot 10^{-4}$	$(2-4) \cdot 10^{-4}$
$E_p$ , MV/m	45-55	45-55	45-55
Erish temperaturasi, °C	108-110	124-132	128-135
Suv yutishi (30 sutka), %	0,02	0,005	0,01
Ish temperaturasi, °C	90	90	90

Soʻnggi yillarda issiqlik taʼsiriga chidamli termoplastik moddalar (poliamid, politetraforetilen) ishlab chiqarilgan boʻlib, ular yuqori temperaturada ishlay olish xususiyatiga egadir.

**Tabiiy qatron.** Tabiiy qatron oʻsimlik va biogen birikmalaridan tashkil topgan organik moddadir. Tropik oʻsimliklarda tabiiy qatron koʻp boʻladi. U past temperaturada amorf holatda boʻlib, qizdirilganda avvaliga yumshab, plastik soʻngra esa suyuq holatga oʻtadi. Elektrotexnikada ishlatiladigan tabiiy qatron suvda erimaydi, ammo spirt, efir va oʻzi bilan kimyoviy tabiati bir xil boʻlgan organik erituvchilarda yaxshi eriydi. Hosil boʻlgan eritma quritilganda yupqa parda hosil boʻladi. Tabiiy qatron yopishqoq boʻlib, suyuq holatdan qattiq holatga oʻtishida jism yuzasiga mustahkam yopishadi. Bu modda kompaund, plastik massa, sunʼiy yoki tabiiy tolasimon moddalarining tarkibiy qismi boʻlib xizmat qiladi.

Shellak – tropik daraxt qumursqalari (gummilak) mahsuli. Shellak tangasimon koʻrinishli, rangli (och sariqdan qoʻngʻir tusgacha), spirt, atseton va efirda yaxshi eriydi. U eritilgan holatda kanifol, sopol, gliftal, bitum va novalak bilan yaxshi birikadi. Shellakning zichligi  $1000 - 1040 \text{ kg/m}^3$ , chiziqli kengayish koeffitsiyenti  $4,4 \cdot 10^{-4} \dots 9 \cdot 10^{-5}$  ga teng. Uning dielektrik xossalari quyidagicha:  $\epsilon_r=3,5$ ;  $\text{tg}\delta=0,01$ ;  $\rho=10^{13}-10^{14} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_t=20 - 30 \text{ MV/m}$ .

Shellakdan qoplovchi yoki yelimlovchi loklar tayyorlanib, ko'pincha undan elektr asboblarning qismlarini loklashda foydalaniladi.

Kanifol – to'q sariq rangli mo'rt modda bo'lib, daraxt yelimidan ajratib olinadi. Kanifol spirt, benzin, benzol, skipidar, atseton, neft va o'simlik moylarida osongina eriydi, suvda esa mutlaqo erimaydi. Uning dielektrik xossalari quyidagicha:  $\epsilon_r=2,8$ ;  $\text{tg}\delta=0,003$ ;  $\rho=10^{13}-10^{14} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_r=10-15 \text{ MV/m}$ .

Elektr izolatsiyasida kanifol lok va kompaund tayyorlashda, qatron tarkibida va yuqori kuchlanishli kabellar uchun neft moyiga qo'shimcha sifatida ishlatiladi.

Qahrabo – och sariq - qo'ng'ir tusli o'simlik mahsulidir. Qahraboning zichligi  $1050 - 1096 \text{ kg/m}^3$ , yumshash temperaturasi  $175-200^\circ\text{C}$ . Uning dielektrik xossalari:  $\epsilon_r=2,8$ ;  $\text{tg}\delta=0,001$ ;  $\rho=10^{15} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $\rho=10^{15} \text{ Om}\cdot\text{m}$ , u qatron skipidar, benzin va moylarda yaxshi eriydi. Qahrabo qimmat bo'lganligi sababli, undan faqat maxsus o'lchov asboblari va katta qarshiliklar ishlab chiqarishda foydalaniladi.

**Selluloza.** Selluloza yuqori molekularli chiziqli polimer bo'lib, yog'ochga ishlov berish orqali olinadi. Selluloza yuqori molekular massaga ega. Selluloza tarkibida qutbli gidroksid guruh bo'lganligi sababli, u qutbli polimer hisoblanadi. Mazkur polimerning dielektrik xossalari quyidagicha:  $\epsilon_r=6,0 - 7,0$ ;  $\text{tg}\delta=0,005 - 0,01$ .

Elektrotexnikada izolatsiya moddasi sifatida ko'pgina selluloza moddalaridan foydalaniladi. Ulardan elektr mashinasi va transformatorlar uchun turli xil izolatsiya moddalari yoki konstruksiya detallari ishlab chiqariladi. Selluloza asosida olingan qog'oz esa yuqori kuchlanishli kabel, telefon kabeli, transformator va kondensatorlar izolatsiyasida ishlatiladi.

Selluloza atsetati yaxshi tozalangan paxta sellulozasidan olinadi. Bu moddaning metilensloriddagi eritmasidan tola va parda olinadi. Ularga egiluvchanlik xususiyatini berish maqsadida eritmaga plastifikator (dibutilftalat) qo'shiladi.

Triatsetat pardasi, odatda, elektr mashinasining gaz izolatsiyasida qoʻllaniladi.

Nitroselluloza loki past kuchlanishli simlarning izolatsiyasida ishlatiladi. Etilselluloza noyob xossalarga ega boʻlganligi sababli, undan kabel sanoatida sim usti va tola yuzasiga qoplama berishda foydalaniladi.

**Toʻqimachilik moddalari.** Toʻqimachilik moddalari tarkibi tolalardan iborat xomashyoga maxsus ishlov berish orqali olinadi. Elektr izolatsiyada tola sim va shnur yuzasiga oʻrab yoki toʻqib chiqiladi. Elektr mashina va apparatlarning asosiy izolatsiyasini tashqi mexanik taʼsiridan himoya qilishda ham tasma va gazlama matolar ishlatiladi.

Tola diametri silindrsimon boʻlmagani sababli, uning qalinligini aniqlashda raqamlash usulidan foydalaniladi. Tola raqami tola uzunligining uning massasiga nisbati orqali aniqlanadi. Demak, tola raqami qancha katta boʻlsa, tola shuncha ingichka boʻladi. Agar bir necha tola birlashtirilib toʻqilsa, toʻqima qalinligi kasr sonda ( $75/3$ ) koʻrsatilib, uning suratida tola raqami, mahrajida esa tola soni koʻrsatiladi.

Tolasimon moddalar zichligi  $920 - 2500 \text{ kg/m}^3$  atrofida boʻlib, uning quyi chegarasi polietilenga, yuqori chegarasi esa asbest va shisha moddalariga xosdir. Elektr texnikada qoʻllaniladigan gazlamalarga misol qilib shifon (qalinligi 0,15 mm), batist (0,12 mm) va boʻz (0,40 mm) ni olish mumkin.

Elektr mashina izolatsiyasida, kabellarda va elektr uskunalarini taʼmirlashda, mitkal va batist tasmalar ishlatiladi. Bu tasmalarning eni 10 mm boʻlib, qalinligi kiper tasmada 0,45 mm, mitkal va batistda – 0,12 mm qilib olinadi.

Tabiiy shoyi tolasining tashqi qismi ipak yelimi seritsin bilan qoplangan boʻladi. Izolatsiyada ishlatiladigan ipak tolasini seritsin va boshqa modda qoʻshimchalaridan tozalanadi. Tabiiy shoyi tolalari juda ingichka boʻlib, sim yuzalariga qoplama sifatida ishlatiladi. Bu modda yaxshi dielektrik xossaga va

mustahkamlikka ega. Tabiiy ipak gazlamalariga lok shimdirish orqali mexanik va elektr mustahkamligi yuqori bo'lgan moddalar olinadi. Bunday shoyi to'qimalaridan shoyi-sluda tasmalari ishlab chiqariladi. Izolatsiyada ishlatiladigan shoyi gazlamalarning qalinligi 0,07 – 0,08 mm bo'lib, ulardan juda yupqa izolatsiya qatlami tayyorlanadi. Shoyi ishlatib tayyorlangan izolatsiya yupqaligi va nafisligi bilan ajralib turadi.

Sintetik tola va ulardan olingan turli moddalar elektrotexnikada triatsetat shoyisi, kapron, lavsan nomi bilan tanishdir.

Triatsetat shoyisi, asosan, triatsetat sellulozasi eritmasidan tayyorlanadigan tolalardan ishlab chiqariladi. U sim va kabellarning izolatsiyasida ishlatiladi. Kapron gazlamasi kapron tolalaridan tayyorlanadi, olinadigan lavsan gazlamasi yoki tasmasi polietilentereftalatdan olinadigan lavsan tolalaridan tayyorlanadi. Bu gazlamalardan, o'z navbatida, mitkal va batist deb nomlangan tasmalar tayyorlanadi. Mazkur tasmalarning eni 15 – 30 mm, qalinligi 0,14 – 0,16 mm bo'lib, ular qayishqoqligi va mexanik mustahkamligi bilan ilgarigilaridan farq qiladi.

**O'simlik moylari.** O'simlik moylari turli o'simlik urug'laridan olinadi. Elektrotexnikada yorug'lik, issiqlik, kislorod va boshqa ta'sirlar ostida qotadigan o'simlik moylari katta ahamiyatga ega. Biror-bir mato yoki qattiq jism yuzasiga yupqa surtilgan moyning qurishi natijasida qattiq yaltiroq va jismga yaxshi birikkan qoplama hosil bo'ladi.

Moylarni quritish tezligi temperaturasini oshirish, yorug'lik ta'sir ettirish yoki biror turdagi katalizator (sikkativ) qo'shish orqali amalga oshiriladi. Quriyidigan moylar kimyoviy tarkibi bo'yicha glitserin efiri va organik kislotalardan tashkil topadi. Eng keng tarqalgan quriyidigan moylarga zig'ir va tung moyi misol bo'ladi. Zig'ir moyining zichligi  $930 \text{ kg/m}^3$ , qotish temperaturasi –  $20^\circ\text{C}$  ga teng. Tung moyi zararli bo'lib, zichligi  $940 \text{ kg/m}^3$ , qotish temperaturasi  $-5^\circ\text{C}$ .

U o'zining tez qotishi va nam yutmaydigan ancha qalin qatlam hosil qilishi bilan ajralib turadi. Ushbu moylar elektr texnikada,

asosan, loklangan gazmollar tayyorlashda va yog'och moddalarni shimdirishda ishlatiladi.

Kanakunjut moyi ham o'simlik urug'idan olinib, uning zichligi  $950 - 970 \text{ kg/m}^3$ , qotish temperaturasi  $-10, -18^\circ\text{C}$ , dielektrik xossalari:  $\epsilon_r=4,0 - 4,5$ ;  $\text{tg}\delta=0,01 - 0,03$ ;  $E_m=15-20 \text{ MV/m}$ . Bu moy etil spirtida eriydi. Undan qog'ozli kondensatorlarni shimdirishda foydalaniladi.

**Bitumlar.** Bitum – murakkab uglevodorod birikmalaridan iborat bo'lgan, qora yoki to'q qo'ng'ir rangli, termoplastik amorf, gigroskopik bo'lmagan va o'ziga suv singdirmaydigan moddadir. U benzol va toluolda oson eriydi, spirt va suvda esa mutlaqo erimaydi. Tabiiy (qazib olinadigan) bitum asfalt deb ham ataladi.

Sun'iy bitum neftni qayta ishlash orqali olinadi. Neftdan olinadigan bitumlarga BN-111, BN-4, BN-5 navli bitumlar hamda qiyin eruvchan bitumlar misol bo'ladi. Mazkur bitumlarning yumshash temperaturasi  $50-125^\circ\text{C}$  ni tashkil etadi.

Asfalt yaxshi elektr izolatsiya xossasiga ega bo'lib, mo'rt va qattiqdir. Uning yumshash temperaturasi  $200^\circ\text{C}$  gacha yetadi.

Bitumlarning dielektrik xossalari quyidagicha:  $\epsilon_r=2,5-3,0$ ;  $\text{tg}\delta=0,01$ ;  $\rho=10^{13}-10^{14} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_m=10-25 \text{ MV/m}$ . Bitumlar, asosan, lok va kompaundlar tayyorlashda ishlatiladi.

**Mumsimon dielektriklar.** Mumsimon dielektriklar kristall tuzilishi jihatidan qatron va bitumlardan farq qilib, qattiq holatdan suyuq holatga o'tishda o'zining aniq temperaturasiga egadir. Bu moddalardan elektr izolatsiyasida shimiluvchi va quyiluvchi moddalar sifatida foydalaniladi. Ulardan foydalanilganda kondensator va boshqa elektr asboblarning konstruksiyalarini soddalashtirish imkoni yaratiladi.

Mumsimon dielektriklar namga chidamli bo'lgani sababli, ular qo'llanilgan konstruksiyalarni zichlash (germetizatsiyalash) talab etilmaydi. Mazkur dielektriklarning asosiy kamchiligi qotishda ular hajmiy kirishishining nisbatan yuqoriligidir ( $15-20\%$ ).

Qutblilik darajasi bo'yicha mumsimon dielektriklar uch guruhga bo'linadi:

- 1) qutbsiz (parafin, serezin);
- 2) qisman qutbli (polietilen, poliizobutilen);
- 3) qutbli (olevaks).

Polietilen va poliizobutilen mumi yuqori kuchlanishli kabelning qog'oz izolatsiyasini shimdirishda qo'llaniladi. Ular oq yoki kul rang, solishtirma hajmiy qarshiligi yuqori ( $\rho=10^{14}$  Om·m) dielektriklardir. Polietilen mumi shimiluvchi kabel moylari (MN-3, MN-5) tarkibida kanifol bilan birgalikda, poliizobutilen mumi esa MN-4 navli shimiluvchi moy tarkibida qo'llaniladi.

Parafin rangsiz, hidsiz, kristall strukturali mumsimon modda bo'lib, benzol, neft moylari, benzin va efirda yaxshi eriydi. Parafin parafinli neft distillatini qayta ishlash orqali olinadi. Parafinning bir nechta turi bo'lib, ular bir-biridan erish temperaturasi bilan farq qiladi. Parafinning erish temperaturasi qancha yuqori bo'lsa, uning sifati shuncha yaxshi hisoblanadi. Parafinning zichligi  $850-900$  kg/m<sup>3</sup>, erish temperaturasi  $50-62^{\circ}\text{C}$ , dielektrik xossalari:  $\epsilon_r=2,1-2,2$ ;  $\text{tg}\delta=0,0003-0,0007$ ;  $\rho=10^{13}-10^{15}$  Om·m;  $\rho_s=10^{15}-10^{16}$  Om·m;  $E_m=20-30$  MV/m. Sifatli tozalangan parafin navi  $B_1-B_4$ , o'rtacha tozalikdagisi  $T$ ,  $C$  va tozalanmagani  $H_c$ ,  $H_b$  harflari orqali belgilanadi. Parafin kondensator izolatsiyasini shimdirishda, uning serezin bilan aralashmasi esa sim va kabel o'ramlarida ishlatiladi.

Serezin neft mahsulotlaridan olinib, dielektrik xususiyatlari jihatidan parafindan ustun turadi. Serezinning erish temperaturasi  $65-85^{\circ}\text{C}$ , undan qayishqoq yupqa qoplama olish mumkin. Serezin kabel sanoatida rezina mahsulotlari tayyorlashda (rezinaning yorug'lik nuriga chidamliligini oshiradi) ishlatiladi.

Sintetik serezin och sariq rangli kristall strukturali modda bo'lib, qog'oz sluda izolatsiyali kondensatorlar tayyorlashda ishlatiladi.

Vazelin – qattiq va suyuq uglevodorodlar aralashmasidan tashkil topgan quyuc moddadir. Uning dielektrik xossalari

quyidagicha:  $\epsilon_r=0,0002$ ;  $\rho=5 \cdot 10^{12}$  Om·m;  $E'_m=20$  MV/m. Vazelin kondensatorlarni to'latishda yoki ularning qog'ozli izolatsiya tasmalarini shimdirishda ishlatiladi.

Olevaks – kanakunjut moyini gidrogeneratsiya qilish usuli orqali olinadigan yaxshi dielektrik xossali moddadir. Olevaksning dielektrik singdiruvchanligi yuqori bo'lganligi sababli, undan kondensatorlar sig'imini oshirishda foydalaniladi.

**Lok va kompaundlar.** Lok tabiiy va sintetik qatronlar, bitum, quriyigan moy, selluloza efiri va boshqa birikmalarning kolloid eritmasidir. Lokning qurish jarayonida uning tarkibidagi erituvchi moddalar uchib ketadi, natijada lok pardasi hosil bo'ladi. Alifatik (benzin, uayt-spirt, kerosin) va aromatik (toluol, ksilol, solvent) uglevodorodlar organik erituvchilarning keng tarqalgan xillaridir.

Vazifasiga ko'ra elektr izolatsiya loklari uch guruh (shimiluvchi, qoplovchi va yelimlovchi)ga bo'linadi.

Shimiluvchi loklar g'ovak va tolasimon izolatsiya moddalari (qog'oz, yog'och, gazlama)ga shimilishi natijasida ular hajmidagi havo bo'shliqlarini siqib chiqaradi. Lok qurigandan so'ng izolatsiya moddasining mexanik va elektr mustahkamligi keskin ortib, uning gigroskopiklik xususiyati kamayadi; issiqlik o'tkazuvchanligi yaxshilanib, izolatsiyaning issiqqa chidamliligi ortadi. Mazkur loklardan elektr mashina va apparati chulg'amlarini shimdirishda, lokli gazmollar va qatlamli plastiklar ishlab chiqarishda foydalaniladi.

Qoplovchi loklar qattiq izolatsiya moddalari yuzasiga surtilishi natijasida silliq, yaltiroq, mexanik mustahkam, namga chidamli qoplama olinadi. Qoplama loki izolatsiya qarshiligini keskin oshirib, yuzani zaryaddan yaxshi muhofaza qiladi. Ushbu lok yuzani kimyoviy erituvchi va boshqa reagentlarga bardoshli qilishi bilan birga unga chang o'tirishini ham kamaytiradi.

Bunday loklar suyuq holatda sim yoki po'lat varaq'larga yupqa qilib surtiladi. Natijada, metall yuzasida kerakli xossaga ega elektr izolatsiya qoplamasi hosil bo'ladi.



Yelimlovchi loklar ikki qattiq izolatsiya moddasini o'zaro yoki izolatsiya moddasini metall bilan biriktirish vazifasini o'taydi. Bu loklarga moddalarni yaxshilab yelimlash bilan birga yuqori darajali elektr izolatsiya xossasini berish vazifasi ham yuklatiladi. Yelimlovchi loklar moddalarni biriktirish bilan birga ularga shimilishi ham shart. Bunday loklar xona temperaturasida qurish xususiyatiga egadir. Odatda, yuqori temperatura va kerakli muhitda quritiladigan loklardan yaxshi va sifatli parda hamda qoplamalar olinadi.

**Qatronli loklar** sintetik, sun'iy va tabiiy qatron eritmalaridan iboratdir. Ularga quyidagilarni misol qilib keltirish mumkin:

Bakelit loki bakelitning spirtidagi eritmasi bo'lib, termoreaktiv turdagi lok hisoblanadi. Bu lok shimiluvchi yoki biriktiruvchilik vazifasini o'taydi. Bakelit loki quritilganda jism yuzasida qayishqoq bo'lmagan qattiq parda qatlami hosil bo'ladi. Bu lok getinaks, tekstolit ishlab chiqarishda, elektr apparatlarining izolatsiyasida shimiluvchi sifatiga keng qo'llaniladi.

Gliftaloki gliftal qatronining spirtlarning suyuq uglevodorodlar aralashmasidagi eritmasi bo'lib, termoreaktiv yelimlovchi lok hisoblanadi. Undan mikanit va mikalentalarni biriktirishda foydalaniladi.

*Selluloza loki* – selluloza efrining eritmasidir. Bu lok quriganda hosil bo'lgan parda qatlami termoplastikligi bilan ajralib turadi. Nitrolok qurishidan hosil bo'lgan pardalar yaltiroq, mexanik mustahkam bo'lib, havo, namlik va moy ta'siriga chidamlidir. Mazkur lok, asosan, sim yuzasidagi qog'oz-paxta o'ramini shimdirish uchun qo'llaniladi.

*Moyli lok* asosini zig'ir va tung kabi quriydigan moylar tashkil etadi. Quritish jarayonini tezlatish maqsadida ushbu loklarga erituvchi modda qo'shiladi. Bunday erituvchilarga benzin, kerosin va boshqalar misol bo'la oladi. Tarkibida bitumi bo'lmagan moyli lokning rangi tiniq bo'lib, u mato va qog'oz izolatsiyasini, shuningdek, elektr mashina va apparatlari chulg'amlarini

shimdirishda keng qo'llaniladi. Bu lok termoreaktiv bo'lganligi sababli, transformator chulg'amini shimdirishda juda qo'l keladi, hosil qilingan qoplama esa transformator moyida yaxshi ishlaydi. Issiqlik ta'sirida tez qotadigan moyli lok elektr mashina va apparatlarning magnit o'zaklaridagi po'lat varaqlarni sirlash uchun ishlatiladi. Bu po'lat varaqlar bir-biridan izolatsiya qilinsa, o'zgaruvchan tokli magnit maydonida sodir bo'ladigan uyurma toki hisobiga vujudga keladigan dielektrik yo'qotishlar birmuncha kamayadi.

*Qora bitumli lok* tarkibiga bitumlar kiradi. Bu lok moyli lokka nisbatan arzon, yuqori elektr izolatsiya va kam gigroskopik xossali parda hosil qiladi. Qora bitumli lok asosidagi izolatsiya eskirishga chidamli bo'lsa ham, lekin erituvchi va moy ta'siriga chidamsizdir.

Organik erituvchiga bitum qo'shib hosil qilingan eritma, *sof bitum loki* deyiladi. U oddiy sharoitda quritiladi. Sof bitum loki, asosan, turli metall yuzalarini korroziyadan muhofaza qilishda qo'llaniladi.

*Moy-bitumli lokning* tarkibida bitumdan tashqari, quriydigan moy ham bo'ladi. Mazkur lokning xossalari sof bitumli loklarga nisbatan qayishqoqligi va chidamliligi bilan farq qiladi. Moy-bitumli loklarning erituvchilari qatoriga benzol, toluol va skipidarni kiritish mumkin. Bu loklar transformator chulg'amlarini shimdirishda ishlatiladi.

Moy-qatronli loklar tarkibida tabiiy va sintetik qatronlar bo'lib, qayishqoqligi, yelimlash xususiyati, kam gigroskopikligi va issiqqa chidamliligi bilan ajralib turadi. Bu moylar transformator chulg'amlarini qoplashda ishlatiladi, hosil bo'lgan qoplama chulg'amni moy kislotaga bug'laridan yaxshi himoya qiladi.

Loklar harf va raqamlar bilan belgilanadi. Harflar lokli asosning tarkibini, birinchi raqam lokning qayerda qo'llanilishini, keyingi raqamlar esa lokning muayyan turini bildiradi. Elektr izolatsiyasida ishlatiladigan, shimiladigan loklarga fenolli (FL-98),

poliuretanli (UR-9144), kremniy-organikli (KO-964) va moygliftalli (GF-95) loklarni misol tariqasida keltirish mumkin.

Ko'pgina loklarni tayyorlash jarayoni murakkab bo'ladi. Bunda, avvalo, lokli asos tayyorlab olinib, so'ngra u erituvchida eritiladi va mazkur eritmadan turli qo'shimchalar chiqarib yuboriladi.

*Elektr izolatsiya kompaundlari* shimiluvchi va quyiluvchi turlarga bo'linadi, ular loklardan o'z tarkibida erituvchilarning yo'qligi bilan farq qiladi. Sintetik polimerlar (poliefirstirol, poliefirakrilat, metakrilat, poliuretan, epoksid, kremniy-organik moddalar) asosidagi kompaundlar keng qo'llanilmoqda. Ko'rsatilgan polimerlar ichida eng ko'p ishlatiladigani epoksid qatroni va uning modifikatsiyalari asosidagi kompaundlardir.

Shimiluvchi va quyiluvchi kompaundlarni to'g'ri qo'llash orqali yuqori kuchlanishli konstruksiyalarning hajmini anchagina ixchamlashtirish mumkin. Elektr texnikada kompaundlar elektr mashina, transformator va sludali moddalarga shimdiriladi, radiosxema, asbob va uskunalar qismlariga quyiladi.

Tarkibidagi bog'lovchining turiga qarab, kompaundlar, asosan, uch guruhga (epoksid qatroni asosidagi, poliefir qatroni asosidagi, poliuretanli) bo'linadi. Tarkibiga ko'ra kompaundlarning sovuq yoki issiq sharoitda qotadigan xillari bo'ladi. Kompaund tarkibiga to'ldiruvchi kiritilishi natijasida uning mexanik va elektrik xossalari o'zgaradi. Tolali yoki kukun ko'rinishidagi to'ldiruvchilar kompaundning mexanik xossalarini o'zgartirib, kompaund asosidagi jismning siqilishga bo'lgan mustahkamligini oshiradi. Bunda jismning issiqlik o'tkazish koeffitsiyenti ortib, chiziqli kengayish koeffitsiyenti kamayadi.

Kompaundga ba'zi to'ldiruvchilar (fosfat, surma) qo'shilihi natijasida uning yong'inga chidamliligi ortadi. Agar kompaundga grafit yoki temir kukuni aralashtirilsa, u holda elektr o'tkazuvchanlik yuzaga kelib, statik zaryad bartaraf etiladi.

Kompaundlar ishlatish joyida tayyorlanadi. So'nggi paytda bir

yoki ikki komponentli kompaundlar ishlab chiqarish keng yo'lga qo'yildi. Ikki komponentli kompaundlarda komponentlarni bir-biriga aralashtirish orqali kerakli miqdordagi kompaund tayyorlab olinadi. Sanoat sharoitida kompaund tayyorlash uchun uzluksiz ishlaydigan aralashtirgichlardan foydalaniladi. Kompaundlardan jismlarni shimdirish, to'latish yoki zichlashda foydalaniladi. Shimdiriladigan jism vakuum yoki bosim ta'sirida kompaundga botirib olinadi. Shimdirish usuli esa suyuqlikni markazdan qochma kuch ta'sirida hamda tomchi holatida yuborish orqali amalga oshiriladi. Yuqori kuchlanishda ishlaydigan izolatsiyaga kompaund vakuum ostida yuboriladi. Quyish ishlarida metall yoki ftoroplastdan tayyorlangan qoliplar ishlatiladi. Kompaundni quyishdan avval metall yuzasiga KO kauchugining 7% li eritmasi surtiladi. Kukun holatdagi kompaund konstruksiyasi yuzasiga elektrostatik maydon yoki uyurma tebranish usullari orqali qoplanadi. So'ngra yuqori temperatura ta'sirida yuzadagi kompaund eritilib, bir tekis silliq qoplama hosil qilinadi.

Issiqlik ta'sirida qotadigan shimiluvchi kompaundlarga ED-16 navli qatron asosidagi D1, D3, D36, D112, EPK-16, EPSK, UP-5-105, UP-592 navli har xil qotiruvchi va plastifikatorli kompaundlar kiradi. Ba'zi epoksidli kompaundlarning dielektrik va mexanik xossalari quyidagicha:  $\rho=10^{13}$  Om·m; cho'zilishdagi mustahkamligi 60 – 90 MPa; urilish qovushqoqligi 11–20 kJ/m<sup>2</sup>.

Issiqlik ta'sirida qotadigan, quyiluvchi kompaundlarga ED-16 qatroni, qotiruvchisi sifatida – malein angidridi, to'latuvchi sifatida kvarts qumi yoki kalsiy ftoridi ishlatiladi. Kompaund komponentlari bir-biriga ma'lum ketma-ketlikda va aniq miqdorda qo'shib aralashtiriladi. Tayyorlangan suyuq holatdagi kompaund qoliplarga quyiladi. Kompaund qotgandan so'ng yaxshi elektrik va mexanik xossalariga ega bo'ladi. Bunday konstruksiyali izolatsiya moy, namlik yoki suv ta'siriga chidamli bo'ladi. Ana shu xossalari tufayli kompaundlarni zichlovchi modda sifatida qo'llash mumkin. Ularga PEK-18, PEK-19, PEK-20, PEKL-19

navli kompaundlar misol bo'ldi. Bu kompaundlar po'lat yuzasiga yaxshi yopishadi, polivinilxlorid va kabel rezinasi bilan yaxshi birikadi.

KP-18, KP-34, KP-50 navli poliefir kompaundlaridan elektr uskunalarining chulg'amlarini shimdirishda foydalaniladi. KP-101 va KP-103 navli kompaundlardan esa murakkab elektr uskunalarining chulg'amlarini shimdirishda foydalaniladi.

MBK, KM-9 navli metakril kompaundlari namlik ta'siriga chidamli bo'lib, tashqi atmosfera sharoitida yorilmaydi. Bu kompaundlar boshqa moddalar bilan yaxshi birikib, toj yoki elektr razryad ta'siriga chidamli bo'lishi bilan birga organik erituvchilarda erimaydi. KM-9 navli kompaund yaxshi zichlovchi kompaundlar qatoriga kiradi.

B-PE-9128 navli kompaund elektr mashina va apparatlari chulg'amini shimdirishda, B-ID-9127 navlisi esa maxsus asinxron dvigatel, transformator chulg'amlarini shimdirishda, SPP-BI navli kompaund shisha tolalarini bog'lovchi sifatida ishlatiladi.

MFVG-1, MFVG-3 navli KO kompaundlari issiqlik ta'sirida va katalizator yordamida qotadi. Bu kompaund o'zining izolatsion xossasi yuqoriligi va issiqlik ta'siriga chidamliligi (250–260°C) bilan ajralib turadi. U qayishqoqlik xossasini –60°C gacha saqlaydi. Xamirsimon zichlovchi kompaundlarning KL turi uch: KLT-30, KLSE-305, KLF-120 navda ishlab chiqariladi. Ularning saqlanish muddati 6 oy bo'lib, moslama va uskunalarni zichlashtirishda ishlatiladi.

Lok va kompaund shimdirilgan g'ovaksimon izolatsiya moddasi yaxshilab quritiladi, so'ngra unga yana lok shimdiriladi yoki qoplanadi, keyin esa ikkinchi bosqichli quritish amalga oshiriladi va lok tarkibidagi erituvchi moddalar chiqarib yuboriladi.

Termoreaktiv lok yoki kompaundlar issiqlik ta'sirida quritiladi. Loklash, odatda, loklanadigan qism quritkichda ma'lum muddat (masalan, elektr chulg'amini 100 – 110°C da 5 – 10 soat) ushlab turilgandan so'ng olinib, biroz sovutiladi (60 – 70°C gacha) va

lokli idishga botiriladi. Qism idishda havo pufakchalari ajralib chiqishi tugaguncha ushlab turiladi. So'ngra olib, quritiladi. Nanga chidamli mashina izolatsiyasiga lok yoki kompaund bir necha marta beriladi. Detallarni lok yoki kompaund bilan qoplash suyuqlikni yuzaga quyish, tomizish, purkagichda sepish, mo'yqalamda surtish kabi usullarda amalga oshiriladi. Quritish jarayoni termostatda, avtoklavda, infraqizil nur, yoritish chiroqlari va boshqa usullar orqali amalga oshiriladi.

**Polimer pardalar.** Elektr izolatsiya pardalari yupqa va egiluvchan modda bo'lib, ular har xil kenglik va qalinlikda tayyorlanadi. Pardalarning elektr va mexanik xossalari yaxshi bo'lganligi sababli, ulardan kondensator, elektr mashina va apparat, kabellar ishlab chiqarishda foydalaniladi. Pardalar ekstruziya, quyish va puflab chiqarish usullari orqali tayyorlanadi. Egiluvchan pardalar yuqori molekular massali chiziqli polimerlardan tayyorlanib, egiluvchanlikka moddaga plastifikator qo'shish yoki temperatura ta'sirida polimer molekularini ma'lum yo'nalishga burish orqali erishiladi.

Elektr izolatsiyasida triatsetat selluloza ko'p ishlatiladi. Uning asosida olingan yupqa parda xossalari quyidagicha:  $\epsilon_r=3,6$ ;  $\text{tg}\delta=0,007$ ; gigroskopikligi 2–3 %; ish temperaturasi 90 – 100°C, bu pardaning mexanik mustahkamligi kichik bo'lganligi sababli, u ko'pincha qalin qog'oz yuzasiga qoplangan holda ishlatiladi.

Sintetik qutbli pardalarga polietilentereftalat pardalari: lavsan, melineks, xostafon va hokazolar misol bo'ladi. Bu pardalar 0,04 – 0,035 mm qalinlikda tayyorlanib, ularning xossalari quyidagichadir: zichligi 1400 kg/m<sup>3</sup>; cho'zilishdagi mustahkamligi 120 – 180 MPa;  $\rho=10^{14}$  Om·m;  $\epsilon_r=3,3$ ;  $\text{tg}\delta=0,007$ ; ish temperaturasi – 60,150°C; uzilishdagi nisbiy cho'zilishi 50,100%.

Polikarbonat makrofol pardasining xossalari: zichligi 3200 kg/m<sup>3</sup>; cho'zilishdagi mustahkamligi 100 – 2000 MPa;  $\rho=10^{14}$ – $10^{15}$  Om·m;  $\epsilon_r=2,9$ ;  $\text{tg}\delta=0,006$ ;  $E_T=60$ – $90$  MV/m; uzilishdagi nisbiy cho'zilishi 100 – 300%.

Politetraftoretilen asosida olingan pardaning xossalari: zichligi  $2100 \text{ kg/m}^3$ ; cho'zilishdagi mexanik mustahkamligi  $10 - 15 \text{ MPa}$ ;  $\epsilon_r=2,0$ ;  $\text{tg}\delta=0,0003$ ;  $\rho=10^{14}-10^{15} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_T=45-100 \text{ MV/m}$  bo'lib, ish temperaturasi ancha yuqori ( $260^\circ\text{C}$ ) dir.

Polietilen asosidagi parda ekstruziya asosida olinib, uning zichligi  $920 \text{ kg/m}^3$ , cho'zilishdagi mexanik mustahkamligi  $14 - 6 \text{ MPa}$ , dielektrik xossalari  $\epsilon_r=2,2$ ;  $\text{tg}\delta=0,0003$ ;  $\rho=10^{14}-10^{15} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_T=300 \text{ MV/m}$ , ish temperaturasi  $85 - 120^\circ\text{C}$ .

Polistirol asosidagi parda (stirofleks)ning xossalari quyidagicha: cho'zilishdagi mexanik mustahkamligi  $60 - 70 \text{ MPa}$ ;  $\epsilon_r=2-2,6$ ;  $\text{tg}\delta=0,0003-0,0004$ ;  $\rho = 10^{14}-10^{16} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_T=110 - 190 \text{ MV/m}$ ; ish temperaturasi  $70 - 85^\circ\text{C}$ .

Polipropilen pardasining xossalari: zichligi  $900 \text{ kg/m}^3$ , cho'zilishdagi mexanik mustahkamligi  $100-200 \text{ MPa}$ ;  $\epsilon_r=2,0$ ;  $\text{tg}\delta=0,0002$ ;  $\rho=10^{15}-10^{17} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_T=300 \text{ MV/m}$  va yuqori ish temperaturasi  $90 - 100^\circ\text{C}$  ga tengdir.

Qutbsiz pardalarning izolatsiya qarshiligi yuqori bo'lib, o'zidan elektr tokini juda kam miqdorda o'tkazadi. Shu sababli, ulardan o'zgarmas sig'imli kondensatorlar ishlab chiqariladi. Qutbli pardalarda  $e$  qiymati katta bo'lgani sababli, ulardan kichik hajmli kondensatorlar olish mumkin.

Stirofleks pardalari yuqori chastotali kabellarda ishlatiladi, polikarbonatlisi esa quvvatli (yuqori kuchlanishli) kabel ishlab chiqarishda qo'llaniladi. Pardalarning qalinligi kamaytirilsa, ularning elektr mustahkamligi ortadi.

**Yog'och va qog'ozlar.** Bu moddalarning asosini o'simliklar tarkibidagi organik moddalar tashkil etadi. Elektrotexnikada dastlabki elektr izolatsiya moddalaridan foydalanilgan. Yog'ochning tola yo'nalishi bo'yicha elektr mustahkamligi uning ko'ndalang kesim yo'nalishiga nisbatan  $3 - 4$  barobar, qarshiliklari esa  $10$  barobar kichikdir. Quruq holatdagi yog'ochning zichligi  $400 - 800 \text{ kg/m}^3$  oralig'ida bo'ladi. Yog'ochning zichligi qancha yuqori bo'lsa, uning mexanik mustahkamligi tola yo'nalishiga

qarab turlicha bo'лади. Uning tola yo'nalishi bo'yicha mexanik mustahkamligi shu tolaga ko'ndalang yo'nalishdagiga nisbatan ancha yuqori bo'лади. Yog'ochning asosiy kamchiliklari quyidagilardan iborat: yuqori darajada gigroskopiklik; issiqlik yoki alanga ta'siriga chidamsizlik; o'z xossalarini tashqi ta'sir natijasida keskin o'zgartirishi va hokazo.

Yog'ochning dielektrik va mexanik xossalari unga moy, qatron kabi shimiluvchi suyuqliklar shimdirish orqali yaxshilanadi. Quritib shimdirilgan yog'och o'zining elektrik va mexanik mustahkamligini oshiradi. Uning izolatsion xossalari shimdiriluvchi modda turi (parafin, olif, neft moyi, sintetik qatron)ga bevosita bog'liq bo'лади. Yog'ochning gigroskopikligini kamaytirish uchun unga moy shimdirishning o'zigina yetarli bo'lmaydi. Shuning uchun moy shimdirilgandan so'ng modda yuzasi qog'shimcha ravishda loklanadi. Transformatorlarda elementlarni biriktirish maqsadida oq qayin, qayin va butadan tayyorlangan yog'och moddalar ishlatiladi. Aloqa va elektr energiyasini uzatish liniyalarida yog'ochdan tayyorlangan tayanchlar ishlatiladi. Yog'ochlardan, shuningdek o'chirgich, uzgich, transformator va boshqa elektr apparatlarida, elektrotexnikada texnika xavfsizligini ta'minlovchi qurilmalarda foydalaniladi.

Tarkibi, asosan, sellulozadan iborat, qisqa tolali varaqsimon yoki o'ramli moddalarga qog'oz va karton kiradi. Qog'oz ishlab chiqarish uchun yog'och sellulozasidan foydalaniladi. Elektr izolatsiyasida qo'llaniladigan qog'oz tayyorlashda sulfat va karton sellulozasi ham ishlatiladi. Elektr izolatsiya qog'ozi va karton ishlab chiqarishda yog'ochga maxsus kimyoviy ishlov beriladi va undan lignin, mineral tuz va yelim kabi birikmalar chiqarib yuboriladi. Natijada selluloza tolalari sof holda ajratib olinadi. Mexanik ishlov berib maydalangan sellulozaning suvdagi eritmasi aylanuvchan jo'valarga quyilib, yuqori temperaturada quritiladi. Qog'oz o'ramga tortib o'ralayotganda tolalar, asosan, o'ram mustahkamligi uning uzunligi bo'yicha, eniga nisbatan birmuncha ortadi.



Kabel qog'ozlari K, KM, KV, KVMU navlarda ishlab chiqariladi, bunda K–kabel, M–ko'p qatlamli, V–yuqori kuchlanishli, U–kuchaytirilgan ma'nolarini ifodalaydi. K va KM navli qog'ozlar kuchlanishi 35 kV gacha bo'lgan kabellarda, KV va KVVU navlilari kuchlanishi 35 kV dan yuqori hamda KVM va KVMU navlilari kuchlanishi 100 kV dan yuqori bo'lgan kabellarda qo'llaniladi. Kabel qog'ozlarining qalinligi 70 – 170 mkm, zichligi 760 – 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Qog'ozning zichligini oshirish hisobiga uning qalinligini kamaytirish mumkin. Moddaning dielektrik singdiruvchanligi qog'oz va unga shimdirilgan moy turiga bevosita bog'liq bo'ladi.

Telefon qog'ozlari KT va KTU navlarda ishlab chiqarilib, ularning qalinligi 50 mkm, zichligi ko'pi bilan 800 kg/m<sup>3</sup> ni tashkil etadi. Telefon qog'ozlari sarg'ish, qizil, ko'k yoki yashil ranglarda bo'ladi.

Kondensator qog'ozlari, asosan, ikki xilda (oddiy kondensator qog'ozlari va silikon) ishlab chiqariladi. Silikon katta quvvatga ega kondensatorlarda qo'llaniladi. Kondensator qog'ozlarining zichligi 800 – 1250 kg/m<sup>3</sup>, qalinligi 4 – 30 mkm, o'ramining eni 12 – 490 mm atrofida bo'ladi. Bunday yupqa qog'oz ishlatish natijasida katta solishtirma sig'imli kondensatorlar yaratish imkoni tug'iladi.

Karton, asosan, qalinligi jihatidan (0,2 – 6 mm) odatdagi qog'ozlardan farq qiladi. Izolatsiya kartonlari ikki turda (havo muhitida ishlashga mo'ljallangan g'ovaksimon va uncha zich bo'lmagan kartonlar) ishlab chiqariladi. G'ovaksimon karton o'ziga moyini yaxshi shimib oladi va bunda uning elektr mustahkamligi pasaymaydi. Kartonlar varaq holida (o'lchami 3x4 m gacha) yoki o'ramlarda (eni 1 gacha) ishlab chiqariladi. Ulardan elektr mashina, transformator va boshqa elektr apparatlarining izolatsiyasida foydalaniladi. Pishiq qog'oz yupqa qog'ozlardan tayyorlanib, iliq ruh xloridi eritmasidan o'tkaziladi va kerakli

qalinlikka erishilguncha po'lat jo'valarga o'ralaveradi. So'ngra pishiq qog'oz jo'valardan kesib olinib, yaxshilab suvda yuviladi va bosim ostida ishlov beriladi. Varaqsimon pishiq qog'oz (FE) qalinligi 0,6–12 mm, uzunligi 0,85–2,3 m va eni 0,55–1,4 m qilib tayyorlanadi hamda unga qora, qizil, kulrang va boshqa ranglar beriladi. Namlangan pishiq qog'ozga turli shakl berish mumkin. Pishiq qog'oz elektr mashina va apparatlarining konstruksiya moddolari sifatida ham qo'llaniladi.

**Lokli matolar.** Elektr izolatsiya loki shimdirilgan, egiluvchan ip-gazlama yoki shoyi matolar *lokli matolar* deyiladi. To'qilgan mato, asosan, mexanik mustahkamlikni ta'minlasa, undagi lok pardasi esa moddaning elektr mustahkamligini ta'minlaydi. Lokli matolar elektr mashinasi va asboblarning izolatsiyasida, chulg'am, o'rama, qistirma va hokazo ko'rinishdagi kabel mahsulotlarida keng qo'llaniladi. Loklangan shoyi loklangan ip-gazlama matoga nisbatan yupqa, nafis bo'lib, kichik hajmli elektr asboblari ishlab chiqarishga imkon yaratish bilan birga, yuqori elektr mustahkamlikni ham ta'minlaydi. Mazkur loklangan matolarning yuqori ish temperaturasi 105°C ga tengdir. So'nggi paytlarda kapron va shisha tolalari asosidagi lokli matolar ham elektr izolatsiyasida keng qo'llanilmoqda.

Ochiq rangli lokli matolarning ip-gazlama asosidagisining elektr mustahkamligi 35–50 MV/m, shoyi asosidagisniki 55–90 MV/m, zichligi mo's ravishda birinchisida 1100 kg/m<sup>3</sup>, ikkinchisida 900–1000 kg/m<sup>3</sup> ga teng. Ochiq rangli loklangan matolar organik erituvchilar ta'siriga chidamli, lekin issiqlik ta'sirida eskirishi mumkin. Qora rangli loklangan matoning gigroskopikligi kichik bo'lib, organik erituvchilar ta'siriga chidamsizdir.

Loklangan matolar eni 700–1050 mm bo'lgan o'ramlar holida ishlab chiqarilib, ularning qalinligi: ip-gazlama matolarda 0,15–0,30 mm, shoyi matolarda 0,04–0,15 mm, kapronida 0,10–0,15 mm atrofida boladi. Mahsulotning tannarxini pasaytirish

maqsadida ip-gazlama va shoyi moddalar loklangan qog'oz bilan almashtiriladi. So'nggi paytlarda uskunalar izolatsiyasida loklangan mato yoki loklangan qog'oz o'rniga sintetik pardalar ishlatilmoqda.

**Elastomerlar.** Kauchuk asosidagi moddalar va xossalari jihatidan unga yaqin bo'lgan moddalar *elastomerlar* deb ataladi. Texnikaning turli sohalarida va kundalik hayotda elastomerlardan keng foydalaniladi. Tabiiy kauchuk (TK) tropik iqlim sharoitida o'sadigan kauchuk daraxtining sharbati (lateks) dan ajratib olinadi. Kauchuk +50°C da yumshaydi va yopishqoq bo'ladi, past temperaturada esa mo'rt holatga o'tadi. Kauchukning benzindagi eritmasidan rezina yelimi olinadi. Kauchuk tarkibiga oltingugurt kiritib, vulkanizatsiya qilinsa, kauchukning temperaturaga chidamliligi ortib, mexanik mustahkamligi ko'tariladi. Kauchuk tarkibidagi oltingugurtning miqdori 1–3% bo'lsa, yumshoq rezina (qayishqoq va cho'ziluvchan), oltingugurt miqdori 30 – 35% bo'lganida esa qattiq rezina (ebonit) olinadi.

Rezina va ebonit tayyorlashda kauchuk va oltingugurtdan tashqari, rezinali aralashma tarkibiga to'latuvchilar (bo'r, talk), katalizator va boshqa qo'shimchalar ham kiritiladi.

Rezina elektr texnikada keng qo'llaniladi. Undan sim va kabellar yuzasini izolatsiyalashda qoplovchi sifatida, shuningdek himoya qo'lqopi, kalishlar, gilamchalar tayyorlashda foydalaniladi.

Sof kauchuk qutbsiz dielektrik modda bo'lib, uning dielektrik xossalari quyidagicha:  $\epsilon_r=2,4$ ;  $\text{tg}\delta=0,0002$ ;  $\rho=10^{14}$  Om·m. Elektr izolatsiyasida ishlatiladigan rezinaning dielektrik xossalari rezinali aralashma va ishlab chiqarish texnologiyasiga bog'liq ravishda quyidagicha bo'ladi:  $\epsilon_r=3-7$ ;  $\text{tg}\delta=0,02-0,1$ ;  $\rho=10^{13}$  Om·m;  $E_T=20-30$  MV/m.

Rezina yaxshi dielektrik bo'lgani bilan, issiqlik, yorug'lik va ultrabinafsha nurlari ta'sirida tez eskiradi. Rezina o'zidan elektr tokini o'tkazmaydi. Agar uning tarkibiga ko'mir kukuni kiritilsa, elektr tokini yaxshi o'tkazadi. Bunday rezinalar mashina, konstruksiya, uskunalarda paydo bo'ladigan zaryadni o'zi orqali yerga tez o'tkazib yuboradi.

Sintetik kauchuklar (SK) kabel sanoatida izolatsiya va himoya qoplamasi sifatida keng qo'llanilmoqda. Ularni tayyorlashda spirt, neft va tabiiy gazdan foydalaniladi.

Butadienli kauchuk (SK) yaxshi elektr izolatsiya va elastiklik xossalari ega bo'lib, butadien (divinil)ni polimerlash orqali olinadi. Uning dielektrik xossalari quyidagicha:  $\epsilon_r=2,3$ ;  $\text{tg}\delta=0,008$ ;  $\rho=8,5 \cdot 10^{11} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_T=42 \text{ MV/m}$ . Butadienli kauchukning yuqori ish temperaturasi  $60,65^\circ\text{C}$ .

Butadien-stirolli kauchuk (SKS) butadien va stirolni birgalikda polimerlash natijasida olinadi. U xossalari jihatidan TKga yaqin bo'lib, dielektrik ko'rsatkichlari quyidagicha:  $\epsilon_r=2,3$ ;  $\text{tg}\delta=0,003$ ;  $\rho=1,1 \cdot 10^{13} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_T=46 \text{ MV/m}$ . Butadien-stirolli kauchukning zichligi  $940 \text{ kg/m}^3$ , ish temperaturasi  $-35$ – $+65^\circ\text{C}$  undan kabel izolatsiyasida qoplama sifatida foydalaniladi.

Butilkauchuk izobutilenni izopren bilan birgalikda polimerlash orqali ishlab chiqariladi. Uning zichligi  $930 \text{ kg/m}^3$ , ish temperaturasi  $-40$ ,  $+105^\circ\text{C}$ , dielektrik xossalari:  $\epsilon_r=2,4$ ;  $\text{tg}\delta=0,004$ ;  $\rho=2,1 \cdot 10^{13} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_T=22 \text{ MV/m}$ .

Kremray organikli kauchuk tarkibida kremniy va organik radikallar bo'lib, yuqori darajada egiluvchan va yaxshi dielektrik xossalari ega. U suvda, namlik sharoitida va past bosimda ishlashi bilan birga, moy va ishqorlar ta'siriga ham chidamlidir. KO kauchukning zichligi  $2000 \text{ kg/m}^3$ , dielektrik xossalari:  $\epsilon_r=2,9$ ;  $\text{tg}\delta=0,008$ ;  $\rho=1,2 \cdot 10^{12} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ;  $E_T=29,3 \text{ MV/m}$ .

**Bosma plata uchun bazis moddalar.** Bazis moddalardan past kuchlanishli asboblar va radiotexnika apparatlarida, hisoblash texnikasi, elektronika, telefoniya va boshqa sohalarda qo'llaniladigan bosma plata ishlab chiqarishda foydalaniladi.

Ularilari bosma plata uchun bazis moddalar sifatida zarlangan (folgalangan) moddalar qo'llanilib, ular qatlamli plastmassa yoki sintetik pardadan tayyorlanib, varaqning bir yoki ikkala yuzasi qalinligi  $35 \text{ mkm}$  dan ortiq metall zarqog'oz bilan qoplanardi. Keyingi paytda metall qoplama qalinligi  $5 \text{ mkm}$  gacha kamayti-

riib, modda yuzasiga qoplama subtraktiv (metall qoplama selektiv ravishda yuqalashtiriladi) uslubning yarim additiv va additiv (mis qatlam galvanik usulda yotqiziladi) usullari qo'llanilmoqda.

Bazis moddaning bir yoki ikki yuzasiga misni kimyoviy hamda galvanik usullarda yotqizilib (zarlab), bosma plata ishlab chiqarish mumkin. Zar qoplash aralash usulida ham amalga oshiriladi.

Qoplash uchun izolatsiya yuzasi tekis bo'lishi, metall o'tkazgich sifatida elektrolitik misli zarqog'oz qo'llanilishi va buni asos bilan (izolatsiya varag'i) birlashtirishda turli xil yelim va adgezivlar qo'llanilishi mumkin. Odatda, birlashtiruvchi yelim yuzaga 40 – 50 mkm qalinlikda maxsus mashina yordamida surtiladi.

Yuqori takroriyli asboblari uchun bazis moddalar getinaks asosida tayyorlanib, ularning yuzasiga elektrolitik mis qoplanadi. Bunday plata varag'i qalinligi 1–3 mm, o'lchami kamida 800x900 mm qilib tayyorlanadi.

Zarlangan shisha-tekstolit (shisha tola termoreaktiv bog'lagich bilan shimdiriladi) yuzasiga misli zarqog'oz qoplangan hollardagi varaq qalinligi 1,5 mm gacha, o'lchami kamida 600x700 mm qilib olinadi. Zarlangan SFT-230 navli dielektrikning qalinligi 0,13–2,5 mm, o'lchami kamida 400x600 mm, FDG navli zarlangan dielektrikning qalinligi esa 1,5–2 mm, o'lchami kamida 200x250 mm, SONF navli shisha-tekstolit qalinligi 0,8–3 mm, o'lchami kamida 400x600 mm, FDME navli shisha tekstolit qalinligi 0,1–0,15 mm, o'lchami esa kamida 400 – 600 mm qilib olinadi.

Issiqqa bardoshli SGPA-5-1, STPA-5-2 navli shisha-tekstolitlar (qatlami shisha to'qimasi asosidagi) 0,1–2 mm qalinlikda, o'lchami esa kamida 400x600 mm bo'ladi. Zarlangan LF-1 navli lavsan (polietilen tereftalat asosidagi) yuzasiga 35 mkm qalinlikdagi elektrolitik mis zarqog'ozini yopishtiriladi. Zarlangan PF-1 navli bosma platasi poliamid asosida tayyorlanadi.

Ko'p qatlamli bosma platasiga SP-1, SP-2, SPT-3, STP-4, SPO, SPS navli shisha to'qima asosida tayyorlangan moddalar misol bo'la oladi. Ularning qatlamlarini bosim ostida yelimlab, o'zaro biriktiriladi va misli zarqog'oz ularning yuzasiga yopishtiriladi.

Yuqori chastotali asboblarda FLAN navli arilaks bilan to'yintirilgan, zarlangan dielektriklar qo'llaniladi. Ushbu dielektrik moddalarning qalinligi 1–2 mm, o'lchami 260x340 mm, zarqog'oz qalinligi 35 mkm qilib olinadi. Yana shunday asboblarda polikarbon bilan to'yintirilgan, zarlangan varaqsimon moddalar ham ishlatiladi. Ularning ko'rsatkichlari quyidagicha:  $\epsilon_r = 2,8$ ;  $\text{tg}\delta = (1,5,5) \cdot 10^{-3}$  (chastotasi  $10^{10}$  Hz);  $\rho = 10^{12}$  Om·m;  $\rho_s = 10^{11}, 10^{12}$  Om·m.

#### 4.9. Polimerlar

Yarimo'tkazgichli plastina va namunalarga kimyoviy ishlovlar berishda, ularni agressiv moddalar ta'siridan himoyalash, qoliplar tayyorlash, taglik va tutqichlar tayyorlash, elektron asboblarni saqlash va olib yurish uchun moslamalar tayyorlash va boshqa ko'plab maqsadlar uchun polimer moddalarning ko'plab turlari ishlab chiqariladi.

*Poroplast* – murakkab poliefirni faollashtiruvchi, emulgator va barqarorlashtiruvchi qo'shimchalar mavjudligida diizotsiant bilan o'zaro ta'sirlashishi natijasida olinadigan yengil, gaz to'ldirilgan poliuretanli (elastik) modda.

Poroplast tovush va issiqlikdan himoyalash, to'ldiruvchi va taglik tayyorlash, amortizatsiyalash hamda har xil tutqichlar tayyorlashda qo'llaniladi. Poroplastni cho'zilishiga chidamliligi 1,2 kGs/sm<sup>2</sup>, uzilish chegarasida nisbiy cho'zilishi 150%, elastikligi 15%, qoldiq deformatsiyasi 10%, 20% deformatsiya sharoitida siqilish kuchlanishi 0,025 – 0,075 kGs/sm<sup>2</sup>, 600% li deformatsiyada – 0,04 – 0,115 kGs/sm<sup>2</sup>. Suv, benzin va moylar ta'siriga chidamli, o'z xossalarini –15°C dan 100°C gacha saqlab turuvchi modda.

Zichligi va g'ovaklilik darajasiga qarab poroplastning bir necha turlari ishlab chiqariladi.

**Polistirol** – stirol va kauchukni birgalikda polimerizatsiyalash natijasida hosil bo'ladigan, 4 – 5 mm o'lchamli donachalar shaklidagi modda. Yarimo'tkazgichli asboblarda va elektron qurilmalarga ishlov berish va ularning xususiyatlarini tadqiq qilish hamda qulaylik yaratish uchun joylashtiriladigan quyilma disklar, konteynerlar tayyorlashda ishlatiladi.

Ishlatilish maqsadi, olinish usullari va fizik-kimyoviy xususiyatlariga, asosan, bir necha xil polistirol ishlab chiqariladi (4.5-jadval).

*4.5-jadval*

**Polistirolning fizik-mexanik xususiyatlari**

Polistirol belgisi	Cho'zilishdagi parchalanish kuchlanishi, kgs/sm <sup>2</sup>	Uzilishdagi nisbiy cho'zilishi, %	Issiqlikka chidamliligi °C
UPM -503	175	25	90
UPM-508E	250	25	78
UPM-508L	200	20	80
UPM612L	250	15	80
UPM-3L	200	12	75
UPS-1105	200	20	95
UPS-804	270	30	88
UPS-505	250	25	80
UPS-303	180	15	90

**Viniplast** – 0,3 – 1mm qalinlikdagi polivinilxlorid pardalarini qaynoq holda bosim ostida hosil qilinadigan plastik modda zichligi  $1,38 - 1,42 \text{ g/sm}^3$ , cho‘zilishga chidamliligi  $400 \text{ kGs/sm}^2$ , siqilishda –  $800 \text{ kGs/sm}^2$ , burashda –  $470 \text{ kGs/sm}^2$ , elastik moduli  $3 \cdot 10^4 \text{ kGs/sm}^2$  issiqlik o‘tkazuvchanligi  $3 \cdot 10^{-4} \text{ kal/sm} \cdot \text{s} \cdot \text{grad.}$ , solishtirma qarshiligi  $1,8 \cdot 10^{14} \text{ Om} \cdot \text{sm}$ , issiqlikka chidamliligi  $80^\circ\text{C}$ , elektr mustahkamligi  $15 \text{ kVt/mm}$ , chizig‘iy kengayish koeffitsiyenti  $7 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Viniplastning mexanik mustahkamligi yuqori darajada, juda past gigroskopiklik, ko‘plab kimyoviy moddalar ta’siriga chidamli va yonmaydigan modda.

Viniplast plitalari, naychalari, yupqa qatlamlari va o‘zaklari oson kesiladi, payvandlanadi, yopishtiriladi va qoliplanadi. Isitganda viniplast yumshaydi. Uni  $120 - 140^\circ\text{C}$  issiqlikda kichikroq bosimlar ostida har xil shakllarda qoliplash mumkin. Uni payvandlash uchun  $120 - 140^\circ\text{C}$  gacha istilgan qisilgan havodan foydalaniladi. Elektron texnikasida viniplast yuqori namlik va aktiv moddalar muhitida himoya vositasi va kimyoviy moddalarni saqlash uchun buyumlar tayyorlashda ishlatiladi.

**Polietilen** – qattiq, oq, suyuqsimon modda. U etilen polimeri, yuqori molekullari parafin. Uning zichligi  $0,92 - 0,93 \text{ g/sm}^3$ , uzilishdagi chidamlilik chegarasi  $120 - 160 \text{ kGs/sm}^2$ , egilishdagi chidamliligi  $120 - 170 \text{ kGs/sm}^2$ , elastiklik moduli  $1500 - 2500 \text{ kGs/sm}^2$ , mo‘rtlik temperaturasi  $-60^\circ\text{C}$ , solishtirma issiqlik sig‘imi  $0,5 - 0,68 \text{ kal/g} \cdot \text{grad.}$ , chizig‘iy kengayish koeffitsiyenti  $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , issiqlik o‘tkazuvchanligi  $7 \cdot 10^{-4} \text{ kal/sm} \cdot \text{s} \cdot \text{grad.}$ , elektr mustahkamligi  $45 - 60 \text{ kV/mm}$ , ish temperaturasi  $100^\circ\text{C}$ .

Polietilin past temperaturalarda ham egiluvchanligi saqlab qoladi, har xil agressiv muhitlarga chidamli. Zichligi yuqori bo‘lgan nitrat kislotasi, tuzli eritmalar va organik eritgichlarga chidamliligi pastroq. Issiqlik, ultrabinafsha nurlanish, havo-



dagi kislorodlarning ta'sirida polietilen o'z fizik-kimyoviy xususiyatlarini kamaytiradi.

Polietilendan asboblarni tayyorlashning asosiy usuli – 150–180°C issiqlikda bosim ostida quyishdir. Bosim ostida 250°C da u yopishqoq holatga o'tadi va shu holda payvandlash mumkin. Polietilen plastinkalari, naychalari mexanik ishlovlarga moyil bo'lib, uni kesish, teshish va boshqa jarayonlarni amalga oshirish mumkin.

**G'ovak polietilen** – oq rangli, to'g'ri to'rtburchak listlar, yuqori molekular, past bosimli polietilenni qovushtirish asosida tayyorlangan ochiq hujayrali tuzilishga ega bo'lgan qattiq plastmassa.

G'ovak polietilenning zichligi 400–600 kg/sm<sup>3</sup>, siqishga chidamliligi 700 kGs/sm<sup>2</sup>, 60°C da chizig'iy o'lchamlarining o'zgarishi 0,4% dan ko'p emas, solishtirma zarbiy yopishqoqligi 10 kGs/sm<sup>2</sup>, cho'zilishga chidamliligi 15 kgs/sm<sup>2</sup> va cho'zilishi 1,5% dan ko'p emas, erishga chidamliligi 50 kGs/sm<sup>2</sup>, gazga singdiruvchanligi 2–15 l/kg·s·sm.

Elektron texnikasida polietilendan har xil quvurlar, konteynerlar va kimyoviy ta'sirlarga chidamli buyumlar tayyorlanadi.

**Ftoroplast** – etilendagi vodorod atomlari ftor atomlari bilan almashtirilgan plastmassa moddasi. Ftor polimerga kiritilganda u uglerodli bog'lanishlarni mustahkamlab, uglerod zanjirining yana ham kuchliroq bo'lishiga va hosil bo'lgan moddaning issiqlik va kimyoviy ta'sirlarga chidamliligini oshiradi.

Ftoroplast-4 ni –269°C dan +250°C gacha ishlatish mumkin. Uning dielektrikli xususiyatlari yuqori hamda uni vakuum moddasi sifatida ham ishlatilishi mumkin. Asosan ikki xil turdagisi ko'proq qo'llaniladi: ftoroplast-4 (politetraftoroetilen) va ftoroplast-3 (politriftoro-etilen). Ularning asosiy ko'rsatkichlari 4.6-jadvalda keltirilgan.

## Ftoroplastning xususiyatlari

Ftoroplast xususiyatlari	Ftoroplast-4	Ftoroplast-3
Zichligi, g/sm <sup>3</sup>	2,1 – 2,3	2,9 – 2,16
Kristallar erish temperaturasi, °C	327	210
Eng yuqori ish temperaturasi, °C	+250	100
Eng kichik ish temperaturasi, °C	-269	-195
Tsziqlik o'tkazuvchanligi, kal/s·grad·sm	0,0006	0,00014
Cho'zilish mustahkamlik chegarasi, kgs/sm <sup>2</sup>	140–200	350–400
Egilish mustahkamlik chegarasi, kgs/sm <sup>2</sup>	110–140	600–800
Solishtirma qarshiligi, Om·sm	25	13
Bo'limb ketish temperaturasi, °C	415	315

Barcha plastmassalar ichida ftoroplast kimyoviy ta'sirlarga eng chidamlisi hisoblanadi. Uning chidamliligi oltin, platina, shisha, farfor, emal kabi korroziyadan himoya uchun qo'llaniladigan moddalarnikidan ham yuqori. U shuningdek, suvda ho'llanmaydi va shishmaydi, hech qanday kimyoviy erituvchida erimaydi va yonmaydi.

Ftoroplastdan yasalgan buyumlar shaklini o'zgartirish uchun 260 – 320°C gacha qizdirilgan qolipga joylashtirilib, 100 dan 350 kGs/sm<sup>2</sup> gacha bosim ostida sovutiladi.

Ftoroplast qizdirilganda yumshamaydi. Shuning uchun ularni payvandlash mumkin emas. Ularni biriktirish uchun flyusdan

foydalaniladi. Flyus sifatida fluoroglerod moy (5 qism) va nafis fluoroplast-4 ning kukuni (35 qism) aralashmasi ishlatiladi. Elektron texnikasida fluoroplastdan elektron asboblariga kimyoviy ishlov beriladigan idishlar, juda kuchli agressiv muhitlardan himoya vositasi, tutqichlar, qoliplar va boshqa maqsadlar uchun ishlatiladi. Temperatura o'zgarishlariga chidamli vakuum moddasi.

#### 4.10. Kompozitsion moddalar

Kompozitsion modda (kompozit)lar biror asosiy modda ichida boshqa moddaning tolalari yoki zarralari muayyan tarzda taqsimlangan moddadir. Taqsimlangan moddani *armatura* deyiladi. Armatura tartibli yoki tartibsiz joylashgan bo'lishi mumkin.

Kompozitlarni ishlab chiqish maqsadlari quyidagilardan iboratdir. Texnika va texnologiyada mustahkamligi, qattiqligi, issiqlikka bardoshligi, kimyoviy ta'sirga barqarorligi yuqori darajada bo'lgan moddalar kerak. Bunga erishish uchun davriy sistemaning o'rtasida joylashgan elementlar – S, Al, Si, O, N lardan foydalaniladi, ular o'zaro mustahkam barqaror bog'langan birikmalar hosil qiladi. Bu birikmalar misollari: kremniy karbidi SiC, kremniy nitridi Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, kremniy oksidi SiO<sub>2</sub>, aluminiy oksidi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Agar ularni mayda zarralar yoki ingichka tolalar sifatida tayyorlansa, mustahkamligi ancha ortadi.

Masalan, oyna shishasi mo'rt modda, ammo shisha tola cho'zilishga nisbatan juda mustahkam bo'ladi.

Tolalarning eng katta imkoniy mustahkamligidan foydalanish maqsadida ularni asosiy modda ichiga joylanadi, bunda asosiy modda tolalarni bir-biriga birlashtirib, moddaga qattiq shakl beradi. Shuning uchun tola iplar inshootlar, qurilmalarda ishlatiladigan kompozitlarning muhim tarkibiy qismi bo'ladi. Tolalarning l uzunligi ularning *d* diametridan ancha katta bo'lishi kerak ( $l/d > 100$ ). Uzun tolalardan foydalanishda sinergizm hodisasi yuz

beradi. Sinergetika ichki teskari bog‘lanishli sistemalarda o‘z-o‘zini boshqarishni o‘rganadigan fan. Kompozit holda sinergizm tolaning asosiy modda (matritsa)ga va asosiy moddaning tolaga ta’siridir. Agar cho‘zish deformatsiyasi vaqtida tola uzilsa, asosiy modda bu uzilish joylarini qisadi va tola qisqa tolalardек ishlay beradi. Shunday qilib, kompozitlarni tayyorlashning asosiy maqsadi undagi tolalarning mustahkamligini saqlashdir. Umuman, kompozitlar ularni tarkiblagan qismlariga nisbatan yuqori sifatlil bo‘lmog‘i kerak.

Kompozitning muayyan temperaturalar oralig‘ida ishlay olish qobiliyatini ta’minlaydigan asosiy modda va armaturani tanlash eng muhim vazifadir.

200°C dan past temperaturalarda ishlaydigan kompozitlarni tayyorlashda polimer moddalar qo‘llanadi. Masalan, shishaplastik kompozit poliefir smola ichida taqsimlangan qisqa shisha tolalardan iborat. Bu kompozit avtomobil, kema va turli asboblار tanasini tayyorlashda ishlatiladi.

Termoreaktiv plastiklar deb ataladigan kompozitlar polimerlar asosida tayyorlangan bo‘lib, ularda molekular zanjirlar orasidagi ko‘ndalang bog‘lanishlar qattiq uch o‘lchovli to‘r shaklidagi molekular tuzilishni hosil qiladi. Ularga misol qilib – epoksid smolalar va 350°C gacha qizdirishga chidaydigan polimer smolarini keltirish mumkin.

Yuqori temperaturalarda ishlaydigan kompozitlar uchun asosiy modda (matritsa) sifatida metallar olinadi. Metall moddasi, issiqlikka chidamlilikdan tashqari tolalar mustahkamligiga mustahkamlik qo‘shadi, metallning plastikligi kompozitga qayishqoqlik xossasini beradi.

Juda yuqori temperaturalarda keramik matritsalar qo‘llaniladi. Ularga kiritilgan tolalar keramikada darzlarning kattalashib ketishiga to‘sqinlik qiladi.

$\text{SiC}$ ,  $\text{SiN}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  moddalar asosiy qilib olinsa, ular kompozitning

ishlash temperaturasi 1700°C gacha ko'taradi. Karbon asosidagi kompozitlar yuqori qattqlikka ega kam g'ovaklik bo'ladi. Bunda matritsa sifatida amorf karbon olinsa, armatura tolalari kristall karbon – grafitdan bo'lsa, bu kompozit 2500°C gacha chidash beradi. Uchuvchi apparatlar uchun moddaning  $\sigma$  mustahkamligini oshirish,  $\rho$  zichligini kamaytirish zarur, ya'ni  $\sigma/\rho$  nisbatning katta bo'lishiga erishish kerak.

Karbon matritsali kompozitning ba'zi kamchiliklarini bartaraf qilish uchun uni chidamliroq SiC yupqa qatlami bilan qoplanadi. Bu kompozit "Shattl" kosmik kemasida qo'llanilgan.

Demak, matritsa moddasi birinchi navbatda kompozitning ishlash temperaturasi qarab tanlanadi.

Har qanday moddadan tayyorlangan tolalar mustahkam bo'ladi, ammo boshqa xossalari kuchli darajada farq qilishi mumkin. Masalan, shisha tolalarning cho'zilishga nisbatan mustahkamligi karbon tolalarinikidek, ammo ularning qattqligi har xil: shisha tola kuchli cho'ziladi, karbon tola esa cho'zilmaydi. Shuning uchun katta yuklamalar berilganda qattqligi talab qilinadigan hollarda shisha tolani qo'llab bo'lmaydi.

Zarbalarga duchor bo'lib turadigan buyumlar va qurilmalarda masalan, harbiy texnikada ishlatish uchun yuqori zarbaviy mustahkamlikka ega bo'lgan kompozitlar qo'llanadi. Tolani tanlashda uning matritsa moddasi bilan kimyoviy bog'lanishi ham mavjud bo'lishligi muhim. Ammo, kompozit tayyorlashda tolani buzadigan kimyoviy reaksiyalar yuz bermasligi kerak. Tola moddasi hali qotmagan matritsa moddasini yaxshi ho'llaydigan bo'lsa, yuqori sifatli kompozit hosil bo'ladi. Ho'llanishni yaxshilash maqsadida ham tola, ham matritsa bilan o'zaro ta'sirlashadigan maxsus qatlamlar o'tqaziladi. Demak, tola moddasini tanlashda quyidagi to'rtta qoidaga rioya qilinadi: kompozitning mustahkamligi; kompozitning qattqligi; tolaning ho'llanishi va uning matritsa suyulmasida kimyoviy barqarorligi.

Kompozitning tuzilish masalas ham juda muhim, uning geometrik ichki tuzilishiga qarab xossalari ham har turli bo'ladi.

Kompozit armaturasi shakli kompozit mustahkamligining tolalar yoʻnalganligi va tolalar egiluvchanligiga bogʻliqligi armaturani tayyorlash xarajatiga qarab tanlanadi.

Shu talablar asosida kompozitlar ishlab chiqarish texnologiyasining usullari yaratilgan. Masalan, metallning yupqa qatlami yoki kukuni tola ustiga oʻtqaziladi va metallning suyuqlanish temperaturasidan pastroq temperaturalarda qizdiriladi, diffuziya jarayoni natijasida metall matritsasi tola bilan bogʻlanadi. Boshqa bir necha usullar ham mavjud.

#### 4.11. Suyuq kristallar

Suyuq kristallar oraliq (mezamorf) fazalar boʻlib, anizotropiya (kristallarga xos) va oquvchanlik (suyuqliklarga xos) xossasiga ega. Suyuq kristallar muayyan temperaturalar oraligʻida mavjud boʻladi, undan past temperaturalarda toʻla tartiblangan qattiq kristallga aylanadi, yuqori temperaturalarda esa izotrop suyuqlik boʻladi. Suyuq kristallarning molekulalari choʻziq shaklga ega boʻlib, ular orasida mavjud boʻladigan yonlama bogʻlanishlar molekulalarni parallel yoʻnaltiradi, chekkalama bogʻlanishlar esa ularni zanjirsimon joylashtiradi.

Suyuq kristallarning nematik, smektik va xolesterik turlari mavjud.

1. Nematik (yunoncha: «*nema*» – ip) suyuq kristallarda molekulalar oʻqlari bir-biriga parallel yoʻnalgan, lekin molekulalarning oʻzi bir-biriga nisbatan ixtiyoriy ravishda siljigan boʻladi, moddada molekulalar chiziqlar boʻylab joylashgan, optik oʻqlari bitta va musbat. Nematiklarga elektr va magnit maydonlar taʼsir koʻrsata oladi. Masalan, oqish yoʻnalishiga tik boʻlgan kuchsiz magnit maydon taʼsirida nematik suyuq kristall paraazoksianizolning qovushqoqligi kuchli darajada oʻzgaradi.

2. Smektik (yunoncha «*smegma*» – sovun) suyuq kristallarda molekulalar faqat oʻzaro parallel yoʻnalgan boʻlibgina

qolmay, balki bir molekula qalinligida yassi qatlamlar hosil qiladi. Masalan, sovun pufagining tashqi va ichki sirtlari smektik qatlamlardan iborat. Sirt qatlamlaridagi sovun molekulalarining o'zaro tortishishi pufakning barqarorligi uchun zarur bo'lgan sirtiy taranglikni hosil qiladi.

3. Xolesterik suyuq kristallar nomining kelib chiqishiga sabab tarkibida xolesterin bo'lgan birikmalarning suyuq kristall fazalarini hosil qilishidir. Xolesteriklar aralash smektik, nematik turdagi tuzilishga ega. Bunday kristallarda molekulalar smektiklardagidek parallel qatlamlar tashkil qiladi, ammo har bir qatlamda molekulalar o'qlari, qatlamga nematik holidagidek paralleldir. Xolesteriklar optik jihatdan bir o'qli va manfiy, chunki molekulalar o'qlari optik o'qqa tik bo'ladi. Bunday kristallar yorug'likning qutblanish tekisligini bura oladi. Umuman, xolesteriklar barcha ma'lum moddalar orasida eng yuqori optik faollikka egadir.

Suyuq kristallar ma'lum darajadagi qovushqoqlik, optik, elektrik va magnit xossalariga ega bo'lgan organik birikmalardir. Bu suyuqliklarning temperatura o'zgarishiga sezgirligi yuqori bo'lib, bunda ular o'z rangini o'zgartiradi. Elektronika sohasida suyuq kristallardan yuqqa parda olish maqsadida foydalaniladi. Ushbu kristall birikmalardan  $-20,250^{\circ}\text{C}$  oralig'ida ishlaydigan indikatorlar ishlab chiqariladi. Suyuq kristallar elektr va magnit maydoni kuchlanganligiga juda ham bog'liq bo'lib, bunda ular o'zining shaffofligi va boshqa optik xossalarini o'zgartiradi. Biror yuzaga surtilgan suyuq kristallda nurning qutblanish tekisligining burilishi, nurning ikki bor sinishi, nur yutilishidagi spektral o'zgarish va boshqa xususiyatlar suyuq kristallarni amalda keng qo'llash imkonini beradi. Suyuq kristallarning anizotrop xossasi molekulalarning tartiblanish darajasi ( $S$ ) orqali aniqlanadi:

$$S=(1/2) (3\cos^2Q - 1).$$

Bunda:  $Q$  – alohida olingan molekula o'qi bilan bir yo'nalishdagi boshqa molekulalarning yo'nalish o'qi orasidagi burchak.

Suyuq kristallarda  $0 < S < 1$  oralig'ida bo'lib, temperaturaga bog'liq ravishda o'zgaradi. Temperatura ko'tarilganda tartiblanish darajasi nolga intiladi. Suyuq kristallar uchun qayishqoqlik va qovushqoqlik muhim rol o'ynaydi. Bunda qovushqoqlik qiymati oqim tezligi qiymatigagina emas, balki yondosh qatlamdagi molekulaning yo'nalish o'qiga ham bog'liqdir. Suyuq kristallarining solishtirma elektr o'tkazuvchanligi kichik qiymatni ( $10^{-11}$  Sm/m) tashkil etadi. Bir necha suyuq kristallarni o'zaro aralashtirib, kerakli dielektrik singdiruvchanlikka ega aralashma olinadi. Bu aralashma dielektrik singdiruvchanlik anizotropiyasi  $\Delta E$  bilan ifodalaniib, uning  $\Delta \epsilon$  qiymati 4–20 oralig'ida bo'ladi.

Suyuq kristallarning elektr-optik xossalari elektr texnikada keng miqyosda qo'llaniladi. Ushbu kristallar asosida yaratilgan asbobda tasvir hamda axborotni qayta ishlash sifati boshqa shunga o'xshash asbobga nisbatan ancha yuqoridir. Mazkur asboblarda sarflanadigan quvvat ( $10^{-9}$  Vt/m<sup>2</sup>) va ish sharoitidagi kuchlanish qiymati (2–50 V) kichik bo'ladi.

Suyuq kristallar ma'lumot, axborot beradigan asboblarda (elektron soat, kalkulator, televizor, kompyuter va boshqalar)da keng qo'llanilmoqda.

### **Bobga doir savol va mashqlar**

1. Dielektriklar va ularning turlari haqida nimalarni bilasiz?
2. Dielektriklarning elektr o'tkazuvchanligini sohalar nazariyasi asosida tushuntiring.
3. Dielektriklarning qutblanishiga ko'ra turlarini sanang.
4. Pyezoelektrik hodisa qanday kristallarda kuzatiladi?
5. To'g'ri va teskari pyezoelektrik effektga ta'rif bering.
6. Polimer moddalar qanday maqsadlarda qo'llaniladi?
7. Yuqori molekular moddalarga misollar keltiring.
8. Kompozitsion moddalar deb qanday moddalarga aytiladi?
9. Kompozitsion moddalarning asosi (matritsa) qanday talablarga javob berishi kerak?



10. Kompozitsion moddalarning tarkibi qanday tanlanadi?

11. Suyuq kristallar deb qanday moddalarga aytiladi va ular qanday xossalarga ega?

12. Suyuq kristallarning qo'llanilish sohaslarini ko'rsating.

13.  $+q$  va  $-q$  zaryadlardan tashkil topgan elektr dipolning markazidan  $\vec{r} \gg \vec{l}$  ( $\vec{l}$  – dipol yelkasi) nuqtadagi maydonning kuchlanganligi  $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{3(\vec{p}\vec{r})\vec{r} - r^2\vec{p}}{4\pi\epsilon_0 r^5}$  ifodaga mos kelishini aniqlang.

14. Birlik hajmining dipol momenti  $\vec{P}$  bo'lgan bir jinsli dielektrik ichida sferik kovak bor.  $\vec{P}$  vektor  $z$  o'qi bo'yicha yo'nalgan deb hisoblab,  $z$  o'qi bilan kovak sirtidagi biror nuqtada kovak markazidan o'tkazilgan radius-vektor  $r$  orasidagi burchakni  $\theta$  deb hisoblab, kovak markazidagi maydon  $\vec{E} = 4\pi\vec{P}/3$  bo'lishini isbotlang.

15. Qutbli qattiq jism uchun Debay temperaturasi 153 K.  $T = 240$  K da 110 KHz takroriylikda dielektrik yo'qotishlar egri chizig'ida maksimum kuzatilgan. Buning o'rtasida 0,4 eV to'sig'i bilan dipollarning ikki imkoniy oriyentrlanishi mavjudligiga mos tushishini isbotlang. Bu holda quyidagi Debay ifodasi o'rinli:

$$\epsilon = \epsilon' + \epsilon'' = A + \frac{B}{1 - i\omega\tau}, \quad \text{bundagi} \quad \tau = (2\pi\nu_D)^{-1} \exp(U/kT)$$

ikki imkoniy oriyentirlanish orasida o'tish vaqti,  $\nu_D \approx k\theta_D/h$ ,  $\nu_D \approx k\theta_D/h$   $A=5$  va  $B=15$  deb yuqoridagi ifoda asosida  $\epsilon'(\omega)$  va  $\epsilon''(\omega)$  bog'lanishlar grafigini chizing. 250 K dan 290 K gacha oraliqda  $\epsilon'' = 0,5\epsilon''_{\max}$  bo'lib chiqishi kerak.

16. Bir jinsli izotrop dielektrikdan ( $\epsilon=5$ ) yasalgan sharning ichida bir jinsli elektr maydoni hosil qilingan. Maydon kuchlanganligi  $E=100$  V/m. Bog'langan zaryadning sirt zichligi topilsin.

## V bob. MAGNETIK MODDALAR

### 5.1. Magnetizm haqida umumiy ma'lumotlar

Magnit maydoniga joylashtirilgan har qanday jismga qandaydir magnit momenti  $M$  ta'sir etadi. Jism hajm birligining magnit momenti magnitlanganlik  $\vec{J}_m$  deyiladi:

$$J_m = \frac{M}{V}.$$

Agar jism notekis magnitlangan bo'lsa, u holda

$$J_m = \frac{dM}{dV}.$$

Magnitlanganlik vektor kattalik bo'lib, izotrop jismlarda magnit maydon kuchlanganligi vektori  $\vec{H}$  ning yo'nalishiga parallel yoki antiparallel bo'ladi. Magnitlanganlik xalqaro birliklar sistemasida magnit maydoni kuchlanganligi birligi (A/m) da ifodalanadi.

Magnitlanganlik  $\vec{J}_m$  magnit maydoni kuchlanganligi  $\vec{H}$  bilan

$$\vec{J}_m = \chi \vec{H} \quad (5.1)$$

ifoda orqali bog'langan bo'lib, bunda  $\chi$  – o'lchamsiz kattaligi, ushbu jismni magnit maydonida magnitlanish xususiyatini xarakterlaydi va magnit qabul kiluvchanlik deb nomlanadi.

Magnit qabul qiluvchanlik  $\chi$  maydon kuchlanganligi  $\vec{H}$  bir

birlikka teng bo'lgandagi magnitlanganlik  $\vec{J}_m$  ga son jihatdan teng bo'ladi. Ko'rib o'tilgan hajmiy magnit qabul qiluvchanlik  $\chi$  dan tashqari, ba'zan jismning birlik massasiga yoki bir moliga mos keluvchi solishtirma magnit qabul qiluvchanlik va molar magnit qabul qiluvchanlik tushunchalari ham qo'llaniladi.

Tashqi magnit maydoniga joylashtirilgan izotrop jism, tashqi maydon yo'nalishiga parallel yoki antiparallel yo'nalgan xususiy magnit maydonini hosil qilishi sababli jismdagi umumiy magnit induksiyasi tashqi va xususiy magnit maydonlari induksiyaalari yig'indisi bilan aniqlanadi:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_i = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}_m, \quad (5.2)$$

bunda  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Gn}{m}$  – SI dagi magnit doimiysi.

Yuqoridagi (5.1) va (5.2) ga asoslanib,

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} (1 + \chi) = \mu_0 \mu \vec{H} \quad (5.3)$$

ni hosil qilamiz, bunda  $\mu = 1 + \chi$  – nisbiy magnit kirituvchanlik bo'lib, muhitdagi magnit maydoni induksiyasi  $B$  ning vakuumdagi magnit maydon induksiyasi  $B_0$  dan necha marta kattaligini ko'rsatadi.

Moddalarning magnit xususiyatlarining dastlabki sababi sifatida magnit momentga ega elementar aylanma toklarni yuzaga keltiruvchi elektr zaryadlari harakatining yashirin shakllarini ko'rsatish mumkin. Bular jumlasiga, atomdagi elektronlar spini va ularning orbital aylanishlari tufayli yuzaga keluvchi toklar kiradi. Yadrodagi proton va neytronlarning magnit momentlari elektronlarning magnit momentlaridan taxminan 1000 barobar kichikligini e'tiborga olsak, atomning magnit xususiyatlarini

moddadagi elektronlarning magnit xususiyatlari belgilaydi deyish mumkin.

Amper neytral moddaning ichida magnit maydonni vujudga keltiradigan molekular toklar oqadi deb faraz qildi. Molekular toklarning magnit maydoni moddaning magnitlashuvi sifatida namoyon bo'ladi, o'tkazuvchanlik toklarining magnit maydoniga qo'shiladi. Doimiy magnitlarning magnit maydoni ham shunday molekular toklarning maydoni sifatida tushuniladi. Molekular toklar haqidagi Amper gipotezasi elektrodinamikada unumli natijalarga olib keldi.

Erkin zaryadlarning  $\vec{j}$  toklari hosil qiladigan maydoni

$$\mu = 1 + \chi \quad (5.4)$$

tenglama bilan aniqlanar ekan, bog'langan zaryadlarning toklari  $\vec{j}_m$  ham shu kabi magnit maydon hosil qilishi kerak. Bog'langan zaryadlar toklarining magnit maydonini  $\vec{H}'$  deb belgilaylik, unda (5.4) ga qiyosan:

$$\text{rot} \vec{H}' = \vec{j}_m \quad (5.5)$$

tenglama o'rinli bo'ladi. Bu tenglamaning integral shakli to'liq tok qonuni kabi ifodalanadi:

$$\oint_L \vec{H}' \cdot d\vec{l} = I_m. \quad (5.6)$$

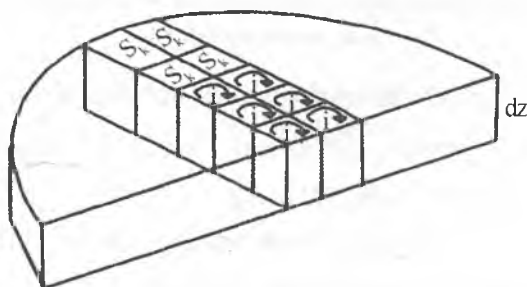
Bog'langan zaryadlarning magnit maydoni  $\vec{H}'$  birlik hajmdagi muhitning magnit momenti  $\vec{J}$  ga, magnitlashuv vektoriga tengligini ko'rsataylik. Magnitlashuv vektorining birligi  $[J] = [IS/L^3] = \text{Am}^2/\text{m}^3 = \text{A/m}$  magnit maydon kuchlanganligi birligi bilan mos keladi. Biz ularning miqdorlarini ham tengligini ko'rsatishimiz lozim.

Molekular toklar – atom va molekularlarning ichidagi

elektronlarning aylanma harakatlaridan iborat. Atomning u yoki boshqa yonida magnit maydon qiymati va yo'nalishi butunlay boshqacha bo'ladi. Bunday sharoitda hisoblash yoki o'lchash mumkin bo'lgan birdan bir miqdor magnit maydonning o'rtacha qiymatidan iborat.

Magnit moment – additiv miqdor. Shuning uchun, moddaning magnit momenti uning ayrim qismlarining magnit momentlarini yig'indisidan iborat. Quyida bu xossadan foydalanamiz.

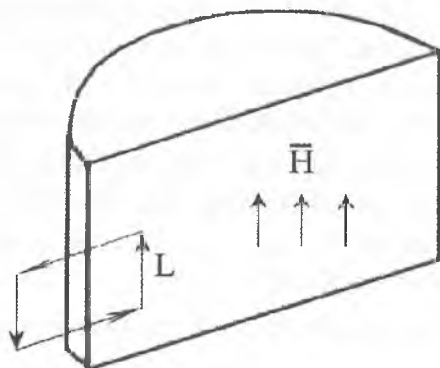
Bir jinsli magnitlangan moddani ko'rib chiqaylik (5.1-rasm). Undan magnitlashuv  $\vec{J}$  vektoriga tik  $dz$  qalinlikdagi plastina kesib olaylik. Plastinaning to'liq magnit momenti uning hajmiga bog'liq:  $\vec{p}_m = \vec{J}Sdz$ . Plastina hajmini fikran, rasmda tasvirlanganidek kichik bo'lakchalarga bo'lib chiqaylik. Har bir bo'lakcha magnit dipoldan iborat bo'lib, magnit maydon hosil qiladi. Har bir bo'lakchanning magnit momentini uning yon sirti bo'ylab aylanuvchi tok  $i$  orqali ifodalaylik:  $p_{mk} = s_k i$ . Bunda  $s_k$  – tegishli bo'lakchanning sirti. Turli bo'lakchalarning atrofidagi toklar teng bo'lib, magnit momentlar faqat  $s_k$  sirtlarning hisobiga farq qilishi mumkin. Plastinaning to'liq magnit momenti  $p_m = \sum_k p_{mk} = iS$  ga teng bo'ladi ( $S$  – plastinaning to'liq sirti).



5.1-rasm. Bir jinsli magnitlangan moddaning to'liq magnit momentini hisoblashga doir

Bo'lakchalarning o'zaro chegaralaridagi molekular toklarni

ko'rsak, ular son jihatdan teng va o'zaro teskari yo'nalgandir, shuning uchun ichki chegaralardagi molekular toklarning magnit maydoni nolga teng bo'ladi. Molekular toklarning magnit maydoni faqat plastinaning yon sirtini aylanib oqayotgan  $i$  tok bilan  $p_m = iS$  tarzda aniqlanadi. Ikki yo'l bilan topilgan magnit moment ifodasini  $\vec{p}_m = \vec{J}Sdz$  ifoda bilan solishtirib,  $J = i/dz$  (sirtidan oqayotgan tokning chiziqli zichligi) munosabatni hosil qilamiz. Bir jinsli magnit maydonga ega bo'lgan silindr magnit maydoni  $H'$  ni topish uchun (5.2-rasm) da tasvirdangan yopiq konturga to'liq tok qonuni (5.6) ni qo'llaylik.



5.2-rasm. Bir jinsli magnit maydonga ega bo'lgan silindr magnit maydonini topish

Konturning muhitdan tashqari qismida maydon yo'q, konturning maydonga tik qismida  $\vec{H}'d\vec{l} = 0$ , faqat bir chiziq bo'ylab integralga hissa qo'shiladi:  $H' L = I$ .

Bundan  $H' = I/L$ . Bunda  $I$  – muhitning sirti bo'ylab oqayotgan toklar,  $I/L$  – esa ularning chiziqli zichligi.  $I/L = i/dz$  bo'lgani uchun,  $J = H'$  xulosaga kelamiz: bog'langan zaryadlarning magnit maydon kuchlanganligi ularning magnitlashuv vektoriga teng ekan.

Muhitdagi magnit maydon induksiyasi erkin va bog'langan zaryadlar maydonlarining yig'indisidan iborat bo'ladi:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}). \quad (5.7)$$

Bunda xalqaro birliklar sistemasi (SI) ning doimiysi –  $\mu_0$  hisobga olindi. Boshqa birliklar sistemasida uning o'rnida I turishi mumkin. Muhitning chegarasida magnit maydonning o'zgarishini ko'rib chiqaylik.

Yuqorida  $B_{1n} = B_{2n}$  chegaraviy shart keltirib chiqarilgan edi. Birinchi muhit magnetik, ikkinchi soha bo'shliqdan iborat bo'lsa, unda magnitlanish bo'lmaydi, demak,

$$H_{1n} + J_{1n} = H_{2n}. \quad (5.8)$$

Jumladan, o'tkazuvchanlik toklari bo'lmasa va  $H_{1n} = 0$  bo'lsa,  $J_{1n} = H_{2n}$ . Shunday qilib, moddaning ichida magnitlashuv deb atalgan magnit maydon moddadan tashqariga chiqqanda magnit maydon kuchlanganligidan iborat bo'ladi, chegarada magnit induksiyaning tik tashkil etuvchisi uzilmaydi.

Magnit maydonning ikkinchi sirtga parallel tashkil etuvchisi uchun  $H_{1r} = H_{2r}$  munosabat olingan edi. Unga ko'ra moddaning ichida sirtga parallel  $J_{1r}$  magnitlashuvning mavjudligi sirtning tashqarisidagi magnit maydon  $H_{2r}$  va  $B_{2r}$  ga butunlay ta'sir etmaydi. Ko'p moddalar uchun magnitlashuv faqat tashqi magnit maydon mavjud bo'lgandagina vujudga keladi va u tashqi maydonga mutanosib bo'ladi:

$$\vec{J} = \chi \vec{H},$$

Bunda:

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \mu = 1 + \chi. \quad (5.9)$$

Bunda  $\chi$  – moddaning magnit qabul qiluvchanligi;  $\mu$  – moddaning magnit singdiruvchanligi deb ataladi.

Diamagnetiklar va paramagnetiklar uchun ular fizik doimiy miqdorlar bo'lib, fizik ma'lumotnomalardan topilishi mumkin. Ferromagnetiklar, antiferromagnetiklar, ferrimagnetiklar kabi kuchli magnetiklar uchun umumiy holda (5.7) munosabatlardan foydalanish kerak.

Diamagnetiklar manfiy magnit qabul qiluvchanlikka va bir-dan kichik magnit singdiruvchanlikka ega. Son jihatdan ularning magnit qabul qiluvchanligi  $|\chi| \ll 1$  bo'lib, ular tashqi  $\mu_0 \vec{H}$  maydonni kuchsizlantiradi, lekin diamagnetiklarning magnit xossalari juda sust bo'lgani uchun, buni faqat maxsus o'lchovlardagina sezish mumkin (o'ta o'tkazgichlar ham paramagnetik bo'lib, ularda  $\chi = -1$ , lekin ularning magnit hossalari hamma vaqt mustasno ravishda o'rganiladi).

Paramagnetiklar diamagnetiklarga nisbatan kuchli magnit xossalarga ega bo'lib, ularning magnit qabul qiluvchanligi musbat bo'lib, tashqi magnit maydon  $\mu_0 \vec{H}$  ni kuchaytiradi.

Ferromagnetiklar temir, nikel, kobalt metallari va ularning turli qotishmalaridan iborat bo'lib, doimiy magnitlar ham, odatda, ferromagnetiklar va quyida o'rganiladigan ferrimagnetiklardan yasaladi.

## 5.2. Ferromagnetiklar

Moddalarning ferromagnitlik xossasi eng kuchli magnit xossa bo'lib, u asosan kristallar va qattiq jismlarda uchraydi. Jumladan, doimiy magnitlar ham ferromagnetiklardan iborat. Ferromagnetiklar temir, nikel, kobalt kabi metallar va ularning qotishmalaridan iborat bo'lib, ularning kristall panjarasidagi ionlari magnit momentga ega. Ferromagnitlar magnit momentli zarralar kabi magnit maydon kuchli bo'lgan sohaga tortiladi. Magnitlarni o'zaro tortilishi, magnitlar temir bo'laklarini tortishi shu xossaga asoslangan. Bunday ta'sirlashuvlar odamlarni



shunday hayratga soladiki, Isaak Nyuton kuchli tabiiy magnit bo'lakchasini uzukka o'rnatib, uni taqib yurar ekan. Bu magnit o'zining vaznidan 50 marta og'irroq bo'lgan temir bo'lagini ko'tara olar ekan. Alniko qotishmasi aluminiy, nikel, kobalt metallaridan yaratilgan eng kuchli ferromagnit hisoblanadi. Alnikodan yasalgan magnit o'z massasidan 4450 marta ortiq massali temirni ko'targani haqida ma'lumot bor.

Magnetizmga taalluqli ko'p tarixiy ma'lumotlar aynan ferromagnetiklarga tegishlidir.

V. Gilbert XVII asr boshlarida nashr etgan kitobida qizdirilgan magnit tortish xususiyatini yo'qotganini yozadi. Magnitning bir uchiga temir yopishtirilganda ikkinchi uchi temirlarni kuchliroq tortishini bayon etadi. Temirni doimiy magnit yonida magnitlash, magnitga aylantirish mumkinligini yozadi.

Ferromagnetiklar uchun magnitlanish  $\vec{J}$  kattaligi  $\vec{H}$ -magnit maydon kuchlanganligi bilan bir qiymatli bog'lanmagan. Shuning uchun moddaning doimiy  $\chi$  va  $\mu$  parametrlarini kiritishni iloji yo'q. Shunga qaramay ba'zan "ferromagnetiklar uchun  $\mu$  bir necha mingga teng" degan iboralar uchraydi. Bunday iborani taqribiy deb, magnit induksiya  $B$  magnit kuchlanganlik  $\mu_0 H$  dan bir necha ming marta ortiq bo'lishi mumkin degan ma'noda tushunish kerak.

Ferromagnetiklarning xossalari tarixan segnetoelektriklardan avval o'rganilgan. Keyinchalik ularning xossalari juda o'xshashligi aniqlangan.

Ferromagnetiklarda ularni tashkil etuvchi ionlarni magnit momentlarini tartiblashtiruvchi mexanizm bor. Bu mexanizm elektronlar to'liqlarini almashinuv ta'sirlashuvi deb ataladi va kvant mexanikada o'rganiladi.

Almashinuv ta'sirlashuvi tufayli qo'shni ionlarning magnit momentlarini bir xil yo'nalishi ta'sirlashuv energiyasining kichik bo'lishiga, magnit momentlarning tabiiy tartiblashishiga sabab bo'ladi. Ferromagnetik kristall hajmining tabiiy magnitlangan sohasi *domen* deb ataladi.

Shuni aytib o'tish kerakki, parallel magnit momentli zarralar magnit ta'sirlashuv tufayli bir-birini itaradi, demak yaqinlashtirilgani sari kattaroq energiyaga ega bo'ladi. Buni ikki magnitni yaqinlashtirib, sinab ko'rish mumkin.

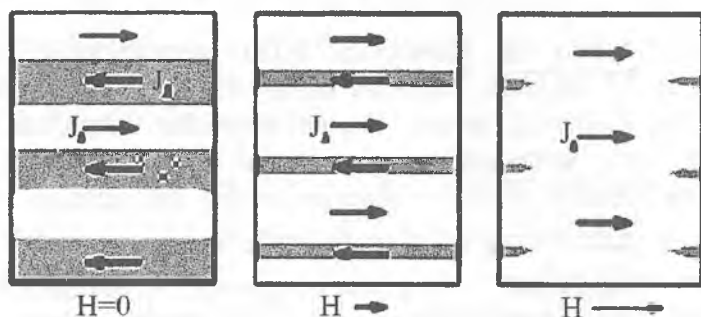
Lekin, mikrozarralarning o'zaro ta'sirlashuvida parallel magnit momentli zarralarning tortishuvi ham uchraydi. Kristall tabiiy ravishda domenlarga bo'linib, ularning magnit momentlari turlicha yo'naladi va buning hisobiga magnit maydon energiyasi kichikroq bo'ladi. Domenlarning chegaralarida qo'shni atomlarning magnit momentlari turlicha yo'nalgan bo'lib, bu ta'sirlashuv energiyasini orttiradi. Domenlarning mavjudligi maxsus tajribalarda tasdiqlangan, ikkinchidan gisterezis halqasi bilan asoslanadi.

Butun ferromagnetik kristall to'la magnitlashib, yagona domenga aylansa, almashinuv energiyasi eng kichik bo'ladi. Lekin, kristall kuchli magnitga aylanib, katta magnit maydon energiyasiga ega bo'ladi. Kristall turli yo'nalishda magnitlashgan ko'plab domenlardan iborat bo'lsa, tashqi magnit maydon va magnit maydon energiyasi kichrayishi mumkin, lekin bunda domenlar chegaralari ko'payib, almashinuv energiyasi ortadi. Shunday sharoitda kristall tabiiy ravishda umumiy energiyasini kichraytiruvchi domenli tuzilishga ega bo'ladi. Bunda kristallning shakli, bundan avval qanday magnit maydonda bo'lganligi muhim bo'ladi.

Kristallning magnitlashuvi  $J$  ko'plab domenlardagi zarralarning magnit momentlarini yig'indisidan iborat bo'lib ( $\vec{J} = \sum \vec{p}_m$ , yig'indi birlik hajmdagi zarralar bo'yicha hisoblanadi), u nol yoki noldan farqli bo'lishi mumkin, unda kristall doimiy magnit deb ataladi. Tashqi erkin zaryadlarning magnit maydoni  $\vec{H}$  ferromagnet kristallning domenli tuzilishiga juda kuchli ta'sir etadi.  $\vec{H}$  ta'sirida domenlar chegarasidagi ionlarning magnit momentlari tashqi maydonga moslasha boshlaydi, natijada magnitlashuvi tashqi

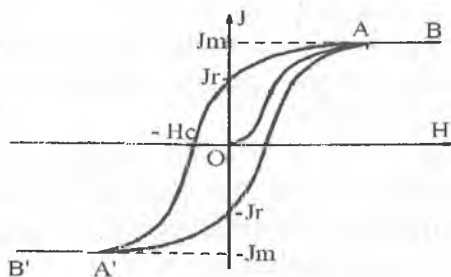
maydonga mos bo'lgan domenlarning hajmi boshqa domenlar hisobiga ortib boradi (5.3-rasm), kristallning magnitlashuvi keskin o'zgaradi. Ferromagnetiklarni magnit maydonda magnitlanib qolishi shunday tushuntiriladi.

Kristallning magnitlashuvi  $J$  ning magnit maydon  $H$  ga bog'lanishi bir qiymatli emas, bu bog'lanish umumiy holda gisterezis (5.4-rasm) halqasini hosil qiladi va ferromagnetiklarning domenli tuzilishi bilan tushuntiriladi.



5.3-rasm. Magnitlashuvi tashqi maydonga mos bo'lgan domenlar hajmining boshqa domenlar hisobiga ortishi

Dastlab kristall magnitlanmagan bo'lsin:  $H = 0$  va  $J = 0$  (5.4-rasmdagi  $O$  nuqta). Tashqi magnit maydon  $H$  ta'sirida kristall magnitlashuvi keskin o'sa boshlaydi ( $OAB$  – chiziq). Bunda magnitlashuvning ortishi tashqi maydonga mos yo'nalgan domenlar o'lchamlarini o'sishidan darak beradi. Lekin maydonning katta qiymatlarida maydon kuchlanganligi ortishi bilan magnitlashuv  $J$  ortmay qo'yadi, to'yinish ro'y beradi. Bunday holat butun kristall yagona domenga aylanganligidan, magnitlashuv  $J$  maksimal  $J = np_m$  qiymatga yetganligi (yaqinlashgani)dan darak beradi.



5.4-rasm. Tajribaviy gisterezis chizig'i

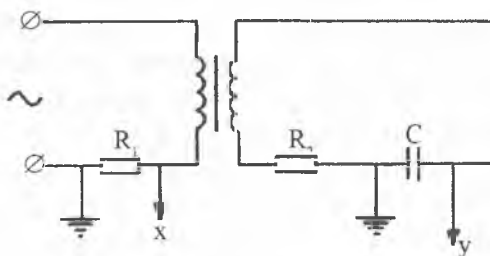
Magnit maydon  $H$  kamayishi bilan magnitlashuv ham kamayadi ( $BAA'$ -chiziq), lekin bu kamayish dastlabki ortishga nisbatan kechikib ro'y beradi. Bunda domenlar chegarasining o'zgarishi oson emasligi, magnit maydonning o'zgarishiga nisbatan kechikishi seziladi. Maydon nolga aylanganda ham kristallda  $J_r$  qoldiq magnitlashuv kuzatiladi. Shu  $J_r$  miqdorga qarab ferromagnetiklar qattiq va yumshoq ferromagnetiklar deb ataladi. Bu magnitlashuvni nolga aylantirish uchun esa teskari yo'nalishdagi maydon  $H_c$  – koersitiv kuch zarur.  $J_r$  qanchalik katta bo'lsa,  $H_c$  ham shunchalik katta bo'lishi kerak. Teskari yo'nalishdagi magnit maydonni kuchaytirib borib, yana magnitlashuvning to'yinishiga erishish mumkin. Tajribada tashqi magnit maydonni o'zgartirishni davom ettirib, gisterezis chizig'ining qolgan qismini ham olish mumkin (rasmda  $B'A'AB'$ -chiziq).

Shunday qilib, ferromagnetiklarning magnitlashuvini magnit maydonga bog'lanishi bir qiymatli bo'lmay, kristallning bundan avvalgi holatiga, ya'ni kristallning domenli tuzilishiga bog'liq ekan. Gisterezis yopiq chizig'ining umumiy sirti kristallning domenli tuzilishini o'zgartirish uchun kerak bo'lgan energiyaga mutanosibdir ( $JH$  ko'paytma energiya birligiga ega).

Tajribada gisterezis chizig'ini ko'plab ayrim nuqtalar bo'yicha chizish mumkin, lekin bundan qulayroq imkoniyat ham mavjud.

Buning uchun ferromagnetikka o'zgaruvchan kuchlanish bilan ta'sir etiladi. Bu kuchlanish ossillografning gorizontaal elektrodlariga ham ulanadi (5.5-rasm, x-belgi).

Ossillografning vertikal elektrodlariga (rasmda y-belgi) ferromagnetikning magnit momenti bilan bog'liq signal ulansa – ossillograf ekranida gisteresis chizig'i kuzatiladi. Tajribadagi har qanday o'zgarish, shu damdayoq ekrandagi gisteresis chizig'iga o'z ta'sirini ko'rsatadi. Jumladan, o'zgaruvchan kuchlanish amplitudasini kamaytirib, to'yinish bo'lmagan hollarda gisteresis halqasining shaklini o'zgarishini kuzatish mumkin. Qoldiq magnitlashuv va koersitiv maydonning nisbiy qiymatlarini o'lchash mumkin. Temperatura ortishi bilan gisteresis chizig'ining yo'qolishini ko'rish mumkin.



5.5-rasm. Gisteresis chizig'ini hosil qilish qurilmasi

Ferromagnetiklarning xossalari temperaturaga ham kuchli bog'liq. Temperatura ortishi bilan ferromagnetikning magnitlanish darajasi kamayib boradi, Kyuri temperaturasi deb nomlanadigan  $T_C$  temperatura chegarasiga yetgach, kristallning ferromagnetik xossalari yo'qolib, u oddiy paramagnetikka aylanadi. Gisteresis halqasi to'g'ri chiziqqa aylanadi, magnitlashuv darajasi Kyuri-Veys qonuniga bo'ysunadi:  $J = C / (T - T_C)$ , bu tajribada katta aniqlikda tasdiqlangan.

Kyuri temperaturasida 2-tur fazaviy o'tish ro'y beradi, kristalldagi tabiiy magnit tartiblashuv mexanizmi yemiriladi. Shu

bilan birga kristallning issiqlik sig'imi, issiqlik o'tkazuvchanligi, kristalldagi tovushning tarqalish tezligi va yutilish koeffitsiyenti, kristallning optik xossalari kabi xarakteristikalarining ham keskin o'zgarishi kuzatilib, bularga qarab Kyuri temperaturasining aniq qiymatini aniqlash mumkin.

Ferromagnetiklarning Kyuri temperaturasi yaqinidagi xossalari batafsil o'rganish boshqa ikkinchi turdagi fazoviy o'tishlarni tushunishda ham yordam beradi.

Ferromagnetik magnitlashuvining temperatura ortishi bilan kamayib borishini tushuntiraylik.

Temperaturaning absolut kichik qiymatlarida ferromagnetikdagi domenlarda maksimal magnitlashuv, magnit momentli ionlarning to'liq tartiblashuvi kuzatiladi. Temperatura ortishi bilan domen hajmidagi ayrim ionlar issiqlik energiyasini yutish hisobiga energiyasi ortib, magnit momenti teskari holatga o'tib qoladi, ularni *magnonlar* deb ataladi. Magnonlar soni almashinuv energiyasi va temperatura orasidagi nisbat bilan aniqlanadi va temperatura ortishi bilan magnonlar soni ortib boradi, domendagi magnitlashuv esa kamayib boradi. Temperaturaning chegaraviy qiymati – Kyuri temperaturasida esa magnonlar soni umumiy ionlar sonining yarmiga yaqinlashib, ferromagnetikda tabiiy magnitlanish mexanizmi yo'q olib, ferromagnetik oddiy paramagnetikka aylanadi.

Magnonlar kristall bo'ylab harakatlanishi mumkin. Bunda kristalldagi ionlar o'z o'rnida qoladi, ionning magnit momenti atrofdagi ionlarnikidan teskari bo'lgan holati – magnon kristall bo'ylab siljiydi. Bunday harakatni yarimo'tkazgich bo'ylab harakatlanayotgan kovakka o'xshatish mumkin.

Vakuumdagi  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$  tenglik o'rinli, moddada  $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J})$ . Ferromagnetiklarda ning qiymati magnit maydon kuchlanganligi  $H$  dan 100 – 1000 marta ortiq bo'lishi mumkin. Magnit maydonning barcha ta'sirlari esa umumiy maydon induksiyasi  $B$  bilan bog'liqdir. Jumladan, elektromagnit induksiya qonuni

ham magnit induksiya orqali ifodalanadi. Shuning uchun kuchli  $B$  magnit maydonlar elektr toklarini magnit maydoni  $H$  ni ferromagnit o'zaklarda kuchaytirish yo'li bilan hosil qilinadi. Transformatorlarda ferromagnit o'zaklar bo'lmasa edi, bir xil natijaga erishish uchun ularning o'lchamlarini o'nlab marta, hajmini (hisoblarga ko'ra) o'n minglab marta oshirishga to'g'ri kelardi. Ularning amaliy qo'llanishi shubhali bo'lib qolar edi.

Ma'lumki, magnit induksiya uzluksizligi,  $\text{div}\vec{B} = 0$ , tenglama bilan ifodalanadi.  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J})$  tenglikka, asosan,  $\text{div}(\vec{H} + \vec{J}) = 0$  natijaga kelamiz. Moddaning magnitlashuvi  $\vec{J}$  moddaning sirtida tugaydi, uziladi,  $\text{div}\vec{J} \neq 0$  bo'ladi. Demak, shu yerda  $\text{div}\vec{H} \neq 0$  bo'lib, moddaning sirtida magnitlashuv vektorlari magnit kuchlanganlik vektorlariga aylanadi.

Ilmiy laboratoriya sharoitida 1–10 Tl katta magnit maydonlar hosil qilingan. Buning uchun elektr toklarini magnit maydon kuchlanganligini ferromagnit o'zaklarda kuchaytirish qo'llanilgan. Ayrim neytron yulduzlarda (magnitarlar)  $10^{10}$  Tl kuchli maydonlar mavjudligi isbotlangan. Bunday maydonlar moddaning xossalari butunlay o'zgartirib yuboradi. Ularni tabiat amalga oshirgan nodir tajriba deb atash mumkin.

### 5.3. Paramagnetiklar

Moddaning magnit xossalari birinchi navbatda elektronlar bilan bog'liq. Elektronning xossalari, asosan, kvant fizikasida o'rganilsada, uning ayrim xossalari bu yerda ham eslash zarurati bor.

Har bir elektron o'zining harakat holatidan qat'iy nazar xususiy impuls moment – spinga ega. Elektronning spini  $L = \hbar/2$  bo'lib, fundamental fizik doimiy Plank doimiysi bilan aniqlanadi. Elektronning xususiy magnit momenti *Bor magnetoni* deb ataladi:

$$p_m = -\frac{e\hbar}{2m} \quad (5.10)$$

Uning son qiymati quyidagicha:

$$p_m = 9.274096 \cdot 10^{-24} \text{ J/T} = 9.274096 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2 \text{ A}$$

Elektron magnit momentga egaligi uning kichik magnitligini bildiradi. Elektronning spini va magnit momenti orasida quyidagi munosabat o'rinli:

$$p_m = -\frac{e}{m} L \quad (5.11)$$

Atomlarning magnit momentiga yadrodagi proton, neytronlar ham hissa qo'shadi. Bu zarralar uchun ham (5.11) munosabat o'rinli bo'lib, ularning massalari elektron massasidan 1840 marta ortiq bo'lgani uchun, magnit momentlari aksincha, 1840 marta kichikroq bo'ladi. Shuning uchun atomlarning magnit momentlariga yadrolarning hissasi sezilarli bo'lmaydi.

Elektron atom yadrosi atrofida aylanma harakatlanar ekan, uning impuls momenti kvantlanadi. Bunday kvantlanish dastlab Bor postulatlarida aytilgan edi:

$$L = mvr = \hbar \quad (5.12)$$

Elektronning yadro atrofidagi orbital harakati, elektron zaryadli zarra bo'lgani uchun, aylanma tok va magnit moment hosil qiladi:

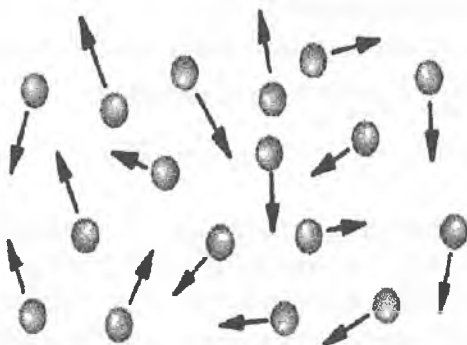
$$p_m = IS = -e\gamma\pi r^2 = -\frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 = -\frac{e}{2m} mvr = -\frac{e\hbar}{2m} = -\frac{e}{2m} L \quad (5.13)$$

Shunday qilib, elektronning orbital harakatida ham magnit va mexanik momentlar nisbati doimiy ekan, lekin nisbatlar qiymatining farqi magnit momentning ikki holdagi tabiati turli ekanligini ko'rsatadi. Atomning magnit momenti undagi elektronlar soniga bog'liq. Elektronlar soni juft bo'lsa, ularning



xususiy magnit momentlari ham, orbital harakat bilan bog'liq magnit momentlar ham o'zaro teskari yo'nalgan bo'lib, to'liq magnit moment, odatda, nolga teng bo'ladi. Atomdagi elektronlar soni toq bo'lsa, atom albatta Bor magnetoniga karrali magnit momentga ega bo'ladi. Demak, tabiatdagi atomlarning deyarli yarmi magnit xossalarga ega bo'lib, ulardan tuzilgan moddalar paramagnit (yoki undanda kuchli) xossalarga ega bo'ladi.

Paramagnit xossalar nimadan iborat?



5.6-rasm. Paramagnit moddalarda magnit momentining hosil bo'lishini tushuntirishga doir

Tashqi magnit maydon bo'lmaganda moddaning atom – molekularining magnit momentlari tartibsiz yo'nalgan (5.6-rasm), moddaning magnitlanish vektori  $\vec{J} = \sum_k \vec{p}_{mk} = 0$  bo'ladi.

Tashqi magnit maydonda magnit momentlarni tartiblashishi masalasida ikkita mexanizmni hisobga olish kerak: Magnit maydon magnit momentli atomlarga  $\vec{N} = \vec{p}_m \cdot \vec{B}$  kuch momenti bilan ta'sir etadi va ularni maydon bo'ylab yo'naltirishga harakat qiladi. Agar atomlar to'liq tartiblashsa, moddaning to'yingan  $\vec{J} = n \vec{p}_m$  ( $n$  – atomlar zichligi) magnitlashuviga erishilar edi. Lekin, quyidagi sabablarga ko'ra paramagnetiklarda to'liq tartiblashuv amalga oshmaydi.

Inersiya tufayli magnit moment magnit maydon yo'nalishida to'xtab qolmasdan, atom magnit momentining maydon yo'nalishi atrofidagi te'oranishlari ro'y beradi.

Issiqlik harakati tufayli atom-molekulalarning ta'sirlashuvlari va to'qnashuvlari magnit maydon tufayli vujudga keladigan tartiblashuvni cheklaydi.

Bunday to'qnashuvlar tasodifiy hodisalar bo'lgani uchun magnit maydondagi moddaning magnitlanishi statistik metodlar bilan hisoblanishi mumkin.

Statistik sistemalardagi turli makroskopik miqdorlar Bolsman taqsimot funksiyasi yordamida hisoblanadi:

$$w = C \exp(-E / kT). \quad (5.14)$$

Bunda  $E$  – zarraning energiyasi;  $T$  – absolut temperatura;  $C$  – normalash shartidan topiladigan koeffitsiyent.

Paramagnit moddada atomlar magnit momentlarining yo'nalishi tasodifiy miqdordir, integrallash ana shu tasodifiy parametrlar –  $\theta, \alpha$  burchaklar bo'yicha bajariladi. Masalan, zarralar zichligi quyidagicha hisoblanadi:

$$n = C \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{\pi} \exp(-E / kT) \sin\theta d\theta. \quad (5.15)$$

Magnit maydon yo'q bo'lganda  $E=0$  deb,  $n = 4\pi C$  natijaga kelamiz, demak  $C = n / 4\pi$  ekan. Magnit maydon bo'lganda  $E \neq 0$  va  $C$  ning qiymati boshqacha bo'ladi. Lekin kuchsiz magnit maydonlar uchun  $C = n / 4\pi$  miqdorni qo'llash mumkin. Atomlarning magnit momentlari tasodifiy yo'nalgan bo'ladi, ularning magnit maydon yo'nalishiga proyeksiyasi  $p_m \cos\theta$ , moddaning magnitlanish vektori esa quyidagi integral bilan hisoblanadi:

$$J = \frac{n p_m}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{\pi} \cos\theta \exp(-E/kT) \sin\theta d\theta. \quad (5.16)$$

Magnit maydonda zarralarning energiyasi

$E = -\vec{p}_m \vec{B} = -p_m B \cos\theta$ , taqsimot funksiyasi esa quyidagicha

ifodalanadi: 
$$\exp\left(-\frac{E}{kT}\right) = \exp\left(\frac{p_m B}{kT} \cos\theta\right) = \exp(a \cos\theta).$$

Demak,

$$J = n p_m I, \quad I = 0.5 \int_0^{\pi} \exp(a \cos\theta) \cos\theta \sin\theta d\theta. \quad (5.17)$$

Nisbatan kuchsiz magnit maydonda:  $a = p_m B / kT \ll 1$  bo'lganda eksponentani qatorga yoyib, dastlabki hadlar bilan

cheklanamiz: 
$$\exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \approx 1 + a \cos\theta.$$

Buni (5.17) ga qo'yib, integrallashni amalga oshiramiz:

$$I = \frac{2a}{3}, \quad J = \frac{n p_m a}{3} = \frac{n p_m^2 \mu_0}{3kT} H. \quad (5.18)$$

Shunday qilib, paramagnit qabul qiluvchanlik:

$$\chi = \frac{n p_m^2 \mu_0}{3kT} = \frac{C_K}{T}. \quad (5.19)$$

Paramagnit qabul qiluvchanlikning absolut temperaturaga bunday bog'liqligi Kyuri tomonidan empirik tarzda, tajriba natijalariga tayanib 1895-yilda topilgan va Kyuri qonuni deb ataladi. (5.19) ifodadagi  $C_K$  – Kyuri doimiysi deb ataladi. Kyuri doimiysi moddaning zichligiga bog'liqdir.

Topilgan nazariy natijalar paramagnetiklarni qabul qiluvchanligi Kyuri qonuniniga bo'ysinini to'g'ri tushuntiradi. Lekin, paramagnetiklarda to'yinish ro'y berishini, magnitlanish maksimal  $J = np_m$  chegaraga egaligini tushuntirmaydi. Magnitlanishning katta qiymatlarini o'rganish uchun yuqoridagi statistik usullarni qo'llash mumkin, faqat natijalarni analitik ifodalashni iloji yo'q.

#### 5.4. Diamagnetiklar

Diamagnetik moddalarda tashqi maydon ta'sirida unga nisbatan teskari yo'nalgan qo'shimcha maydon – magnitlanish  $\vec{J}$  vujudga keladi, bu maydon asosiy maydon bilan qo'shib, uni kuchsizlantiradi. Uzunchoq shakldagi diamagnetikni birjinsli magnit maydonda ipga osib qo'yilsa, u ferromagnit strelkadan farqli ravishda maydonga tik joylashadi. Magnit dipol magnit maydonning kuchli tomoniga tortilsa, diamagnetik maydonning kuchsiz tomoniga tortiladi.

Qiymat jihatdan diamagnetik magnitlanish juda kuchsiz bo'ladi, diamagnetiklar uchun  $\chi \approx -10^{-6}$  qiymatga ega,  $\epsilon \approx 1 - 10^{-6}$ .

Diamagnetiklar magnit momentga ega bo'lmagan atom va molekullardan tuzilgan bo'ladi. Demak, magnit maydonda ularni tartiblashishi haqida gap bo'lishi mumkin emas.

Diamagnetizmni moddaga magnit maydon kirish jarayonida ularning hajmida induksiya toklarining vujudga kelishi bilan tushuntiriladi. Induksiya toklari shunday yo'naladiki, ularning magnit maydoni tashqi maydonni o'sishiga, tashqi maydonni moddaning ichiga kirishiga to'sqinlik qiladi, induksiyalangan magnit maydon tashqi maydonga qarshi yo'nalib, uni kuchsizlantiradi. Bunday tushuntirishda toklarni farqlash kerak. Modda ichida Amper birinchi bor kiritgan molekular toklar mavjud bo'lib, ular qarshiliksiz, Joul issiqligini hosil qilmasdan oqishi

mumkin. Bunday toklarning mavjudligi doimiy diamagnetik xossalarni tushuntirishi mumkin. O'tkazuvchanlik toklari odatdagi sharoitda qarshilik tufayli tezda so'nadi, bu esa magnit maydonda doimo bo'ladigan diamagnet qutblanishni tushuntira olmaydi.

Diamagnitizmning tabiati quyidagicha tushuntiriladi. Atomlar musbat yadro va uni atrofida tinimsiz aylanayotgan elektronlardan iborat. Aylanma harakat va aylanma tok tufayli magnit momenti vujudga keladi va bu magnit moment magnit maydon bilan ta'sirlashadi. Elektronlarning aylanish o'qi umumiy holda magnit maydon bilan burchak tashkil etadi, magnit maydon magnit momentni o'zining yo'nalishiga keltirishga harakat qiladi, kuch momenti bilan ta'sir etadi. Bunda magnit momentga ega bo'lgan zarrani va magnit moment zarraning aylanma harakati bilan bog'liq bo'lgan hollarni farq qilish kerak. Oxirgi holda magnit maydonning ta'siri elektronning aylanma harakatini murakkablashtiradi, elektronning aylanish o'qi magnit induksiya chizig'ining atrofida aylana boshlaydi, elektronning bunday murakkab harakati pretsessiya harakati deb ataladi va nazariy mexanika kursida o'rganiladi.

Klassik mexanika fanida o'rganilganidek, pretsessiya harakatida Koriolis kuchi ta'sir etuvchi Lorens kuchi  $F_L$  bilan muvozanatlashadi:

$$\vec{F}_L + \vec{F}_K = 0.$$

Elektron zaryadi  $-e$  bo'lgani uchun:

$$-e\vec{v} \cdot \vec{B} + 2m\vec{v} \cdot \vec{\omega} = 0. \quad (5.20)$$

Bunda  $\vec{\omega}$  – pretsessiya harakatining burchak tezligi.

Tenglamadan bu burchak tezlikni topsak:

$$\vec{\omega} = \frac{e\vec{B}}{2m}. \quad (5.21)$$

Natijaning musbatligi pretsessiya aylanma harakati o'ng parma qoidasiga bo'ysunishini ko'rsatadi. Elektronning zaryadi

manfiy bo'lgani uchun bu pretsessiya harakati bilan bog'liq elektr tokining yo'nalishi teskari bo'ladi va diamagnetik magnitlanishini magnit maydonga nisbatan teskari bo'lishini belgilaydi.

Pretsessiya tufayli vujudga kelgan magnit moment:

$$P_m = IS = -\frac{e\omega}{2\pi}\pi r^2 = -\frac{e^2 r^2 \mu_0}{4m} H. \quad (5.22)$$

Bundan, magnit qabul qiluvchanlik:

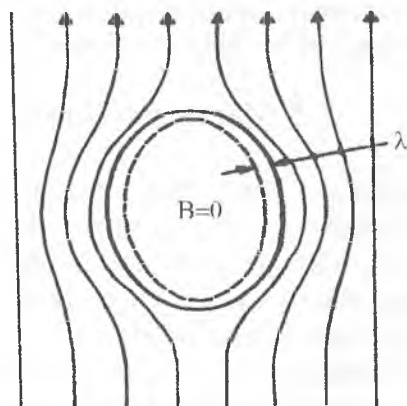
$$\chi = -\frac{n e^2 r^2 \mu_0}{4m}. \quad (5.23)$$

bunda  $n$  – atom (molekula)lar konsentratsiyasi. Natijadan shuni bilish mumkinki, magnit qabul qiluvchanlikka eng katta hissani yadrodan uzoqlashgan elektronlar,  $r^2$  parametri katta bo'lgan elektronlar berar ekan.

Yopiq halqa hosil qiluvchi molekulalarda (masalan, benzol, naftalin) elektron halqa bo'ylab harakatlanish imkoniyatiga ega. Tashqi magnit maydon bunday molekula halqasiga tik bo'lganida, halqa bo'ylab elektr tokni vujudga keltirib, tokning magnit maydoni tashqi maydonni cheklashga harakat qiladi. Harakat radiusi katta bo'lgani uchun bu holda magnit qabul qiluvchanlik nisbatan katta, benzol uchun  $\chi = -94.6 \cdot 10^{-6}$  ekan. Agar magnit maydon benzol halqalariga parallel yo'nalsa, magnit qabul qiluvchanlik  $\chi = -34.9 \cdot 10^{-6}$ , deyarli uch marta kichik bo'lar ekan.

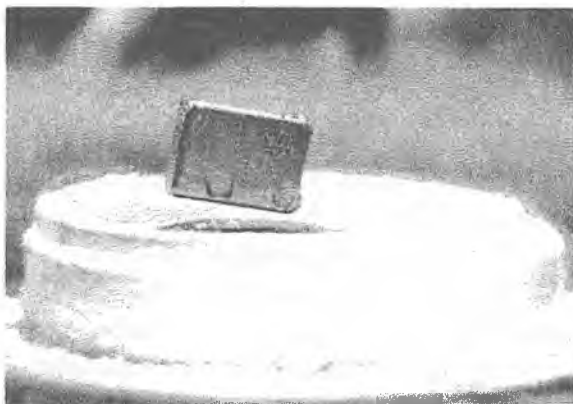
Diamagnet xossalar universal bo'lib, plazmadagi zaryadli zarralar ham, metalldagi erkin elektronlar ham, paramagnetik va ferromagnetiklardagi elektronlar ham diamagnet xossalarni namoyon qiladi. Lekin paramagnetiklar va ferromagnetiklardagi magnitlanishning boshqa kuchli mexanizmlari bu xossani sezishga imkon bermaydi.

Eng kuchli diamagnit xossa – o‘ta o‘tkazgichlarda kuzatiladi, ularda  $\chi = -1$  bo‘lib, magnit maydon o‘ta o‘tkazgich hajmiga kira olmaydi. Lekin magnetizmning yuqorida o‘rganilgan mexanizmlardan farqli ravishda, o‘ta o‘tkazgichlarda ichki magnitlanishni ayrim atom va molekularlarning ichidagi toklar (molekular toklar) emas, balki erkin elektronlarning o‘ta o‘tkazgich sirti bo‘ylab hosil qiladigan makroskopik toklari hosil qiladi. O‘ta o‘tkazgichlarda qarshilik nolga teng bo‘lgani uchun bunday aylanma toklar molekular toklar kabi so‘nmasdan oqib, o‘tkazgich ichiga magnit maydon kira olmasligini ta’minlaydi. 5.7-rasmda magnit maydon o‘ta o‘tkazgichni aylanib o‘tishi tasvirlangan.



5.7-rasm. Magnit maydonining o‘ta o‘tkazgichni aylanib o‘tishi (magnit maydonining kirish chuqurligi  $\lambda \sim 500 \text{ \AA}$ )

O‘ta o‘tkazgichlarga boshqa diamagnetiklar kabi magnit maydonni kuchsiz tomoniga qarab itaruvchi magnit kuch ta’sir etadi. Natijada magnit va o‘ta o‘tkazgich bir-birini shunday itaradiki, og‘irlik kuchini yengib, biri ikkinchisini ko‘tarib turishi mumkin. Bunday tajribalardan birining rasmi yuqorida keltirilgan (5.8-rasm). Bu kabi ajoyib tajribalar faqat fiziklarni emas, har qanday qiziquvchan odamni hayratga soladi.



5.8-rasm. O'ta o'tkazgichni kuchsiz magnit maydoni tomoniga qarab itaruvchi kuchning hosil bo'lishi ([www.phys.pe.kr](http://www.phys.pe.kr) saytidan olindi)

## 5.5. Magnit moddalar

Magnit moddalar yordamida magnit oqimi keskin kuchaytiriladi. Magnit oqimidan past kuchlanishli toklar yuqori kuchlanishli toklarga, yoki elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantirishda va elektr energiyasini shunga o'xshash tarzda generatsiyalashda foydalaniladi.

Tashqi magnit maydoni ta'sirida magnitlanish xossasiga ega bo'lgan moddalar *magnit moddalari* deb ataladi. Asosiy magnit moddalarga nikel, kobalt va toza temir asosidagi turli qotishmalar misol bo'ladi. Texnika ahamiyatga ega magnit moddalarga ferromagnit moddalar va ferromagnit kimyoviy birikmalar (ferritlar) kiradi.

Moddalarning magnit xossalari elektr zaryadlarining ichki harakatida bo'lib, bunda zaryadlar elementar aylanma tok ko'rinishida ifodalanadi. Bunday aylanma toklar elektronlarning o'z o'qi atrofida aylanishi (elektron spinlar) hamda ularning atom ichida orbita bo'ylab aylanishidan hosil bo'ladi. Ferromagnit hodisasi ba'zi moddalarning ichki mikroskopik qismida kristall



strukturalar tashkil qilishi bilan bog'liq bo'lib, bunday strukturalar *magnit domenlari* deyiladi. Bunda elektron spinlar o'zaro parallel ravishda bir tomonga yo'nalgan bo'ladi.

Jismning ferromagnitlik holatda bo'lishini ifodalovchi xususiyati tashqi magnit maydoni ta'sirida uning o'z-o'zidan (spontan) magnitlashishidan iboratdir. Ferromagnit magnit momentlarining ba'zi domenlari ichidagi spinlar turli yo'nalishga ega bo'lishi mumkin. Tashqi muhitda bo'lgan bunday moddalarning umumiy magnit oqimi nolga teng bo'ladi.

Ba'zi moddalar (qatlam chegaralari orasidagi qalinlik bir necha o'n-yuz atom masofasiga teng bo'lgan)da domenlarning o'lchami taxminan  $0,001-10 \text{ mm}^3$  oralig'ida bo'ladi. O'ta toza moddalarda esa domenlarning o'lchami yuqorida keltirilgan qiymatdan ham kattaroq bo'ladi.

Ferromagnit moddalarning monokristallari magnit anizotropiyasi bilan xarakterlanadi. Magnit anizotropiyasi turli o'qlar yo'nalishida magnitlanishning turli qiymatlari bilan ifodalanadi.

Polikristall magnetiklarda anizotropiya keskin ifodalangan hollarda ferromagnetik magnit teksturaga ega bo'ladi. Kerakli magnit tekstura olish orqali moddada ma'lum yo'nalishda yuqori magnit xarakteristikaga erishishi mumkin.

Tashqi magnit maydoni ta'sirida ferromagnit moddaning magnitlanish jarayoni quyidagicha kechadi:

1) magnit momenti maydon yo'nalishi bilan kichik burchak hosil qilgan domenlar kattalashadi va boshqa domenlar o'lchami kichirayadi;

2) magnit momentlari maydon yo'nalishi uzra buriladi va bir xil yo'nalishga ega bo'ladi.

Magnit to'yinishi domenning kattalashishi to'xtaganda va o'z-o'zidan magnitlangan barcha monokristall qismlarning magnit momenti maydon uzra yo'nalganida sodir bo'ladi.

Ferromagnit monokristallari magnitlanayotganda ularning chiziqli o'lchamlari o'zgaradi. Bu hodisa magnitstriksiya deyiladi. Temir monokristallining magnitstriksiyasi kristallning har xil yo'nalishlarida turlicha bo'ladi.

Ferromagnit moddasining magnitlanish jarayoni gisterezis egri chizig'i  $B(H)$  bilan ifodalanadi va u barcha ferromagnitlarda bir-biriga o'xshash bo'ladi. Moddalarning nisbiy magnit singdiruvchanligi magnit induksiyasi ( $B$ ) ning magnit maydoni kuchlanganligiga nisbati bilan aniqlanadi:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$$

Magnit moddalarning magnit singdiruvchanligi birdan yuqori  $m_0 \gg 1$  ( $m_r = m_0 \cdot m$ ,  $m_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6}$  Gn/m) bo'ladi.

Ferromagnit moddalarning magnit singdiruvchanligi temperaturaga bog'liq bo'lib, Kyuri nuqtasiga yaqin qiymatlarda  $m_r$  o'zining yuqori qiymatiga erishadi. Kyuri nuqtasidan yuqori temperaturalarda spontan magnitlanish sohasida issiqlik harakati buzilib, moddaning magnit xossasi yo'qoladi. Chulg'amda magnit o'zak bo'lmaganda magnit induksiya qiymati undan o'tayotgan tok hisobiga sodir bo'ladi. Agar chulg'amga magnit o'zak kiritsak, elektr toki hisobiga sodir bo'ladigan magnit maydoni o'zakni yanada magnitlab, qo'shimcha kuch chiziqlari hosil bo'lishi natijasida magnit induksiyasining yoki magnit oqimining keskin oshishiga olib keladi. O'zak kesim yuzasidan hosil bo'ladigan qo'shimcha kuch chiziqlari qayta magnitlanish deyiladi va  $i$  bilan belgilanadi.

Bu qiymat magnit maydon kuchlanganligi ( $H$ ) va magnit moddasi sifati ( $x$ ) ga yoki jismning magnit qabul qilish koeffitsiyenti  $j=xH$  ga bog'liq. Chulg'amga magnit o'zak kiritilgandan so'ng magnit induksiyasining ko'paygan qiymati quyidagicha bo'ladi:

$$B' = \mu_0(H + j) = \mu_0(H + xH) = \mu_0 H(1 + x) = \mu' H,$$

bunda:  $m' = m_0(1+x)$  – magnit moddasining magnit singdiruvchanligi.

Magnit moddasi sifatini aniqlashda nisbiy magnit singdiruvchanlik kattaligidan foydalaniladi:

$$\mu = \mu' / \mu_0 = 1 + x.$$

Magnit singdiruvchanlik chulg'amga magnit o'zak kiritilganda magnit oqimining ko'payishini bildiradi. Bu yuksalish bir necha o'n ming martagacha ortadi.

Uzunligi  $L$ , kesim yuzasi  $S$  bo'lgan o'zakning magnit qarshiligi quyidagicha aniqlanadi:

$$R_\mu = L / \mu' S = L / \mu \cdot \mu_0 S.$$

Shunday qilib, g'altakka o'zak kiritilishi natijasida magnit qarshiligi  $m$  ga bog'liq ravishda kamayadi.

Magnit singdiruvchanligi bo'yicha barcha qattiq jismlar sust (diamagnit  $m < 1$ , paramagnit  $m < 1$ ) va kuchli magnit moddalarga (ferromagnit  $m \gg 1$ ) bo'linadi. Magnit moddalari sifatida kuchli magnit moddalar qabul qilinib, ular magnit maydon kuchlanganligiga kuchli bog'liq bo'ladi. Magnit induksiyasi  $B$  va magnit maydon kuchlanganligi  $H$  o'rtasidagi bog'liqlik  $[B=f(H)]$  magnit moddasining magnitlanish egri chizig'i deb ataladi. Bunda magnit moddasi  $H=H_T$  qiymatda to'yinadi.

Magnit singdiruvchanlikning temperaturaga qarab o'zgarishi magnit singdiruvchanlikning temperatura koeffitsiyenti bilan aniqlanadi:

$$TK\mu_r = \alpha\mu_r = (1/\mu_r t)(d\mu_r/dt).$$

Agar ferromagnit tashqi magnit maydoni ta'sirida asta-sekin magnitlansa va ma'lum qiymatdan so'ng maydon kuchlanganligi pasaytira borilsa, induksiya ham kamaya boradi. Lekin bu kamayishi asosiy chiziq bo'ylab emas, balki ma'lum kechikish bilan (gisterizis hodisasi tufayli) ro'y beradi. Maydon kuchlanganligi teskari yo'nalishda oshirilganda modda

magnitsizlanishi, o'ta magnitlanishi mumkin va magnit maydon yo'nalishi yana o'zgartirilsa, induksiya yana asl holatiga qaytadi, ya'ni gisterizis halqasi paydo bo'ladi.

Magnit moddasi bo'lganda o'ramlari soni  $N$  ta bo'lgan sim chulg'amidan tok o'tkazish orqali magnit oqimini hosil qilish mumkin. Agar o'ramdagi simning kesim yuzasi  $S$ , chulg'am uzunligi  $L$  bo'lsa, magnit oqimi  $\Phi$  quyidagicha aniqlanadi:

$$\Phi = \mu_0 n j S / L$$

yoki boshqacha ko'rinishda:

$$\Phi = F / R_m$$

bunda:  $F$  – magnit yurituvchi kuch,  $A$ ;  $R_m = L / \mu_0 S$  – magnit qarshilik,  $\text{Gn}^{-1}$ .

Magnit oqimining zichligi yoki magnit induksiyasi:

$$B = F / S = \mu_0 H V.$$

Magnit moddasi uchun chizilgan  $B=f(H)$  xarakteristikadan foydalanib, magnit singdiruvchanlik  $m_r$  ning magnit maydon kuchlanganligi ( $H$ ) ga bog'liqligi aniqlanadi.

Agar magnit maydon kuchlanganligi va magnit induksiyalari nolga teng bo'lsa, ularning nisbati mavhum bo'lib qoladi. Tajribadan aniqlanishicha, kuchsiz magnit maydonida  $m_r$  qiymati ma'lum boshlang'ich singdiruvchanlik  $m_{th}$  ga intiladi. Magnit maydonining ma'lum qiymatida magnit singdiruvchanlik ( $m_{max}$ ) o'zining yuqori qiymatiga erishadi. Maydon kuchlanganligi yanada oshirilsa, magnit moddasining qiymati pasaya boradi.

Demak, magnit moddasida magnit singdiruvchanlik o'zining aniq bir qiymatiga ega bo'lmay, balki magnit maydon kuchlanganligiga qattiq bog'liq ekan. Shu sababli, magnit moddasining  $m_r$  qiymati keltirilganda magnit maydon kuchlanganligi ( $H$ ) ham ko'rsatilishi shart.

Magnit maydon kuchlanganligi o'zining  $H_m$  qiymatidan kamaytirilsa, (induksiya  $B_m$  gacha), gisterezis hodisasi kuzatiladi, ya'ni magnit induksiyasining kechikishi maydon kuchlanganligining o'zgarishiga bog'liq bo'ladi. Maydon kuchlanganligi nolga teng bo'lganida magnit induksiyasi qandaydir qoldiqqa ega bo'lib, u induksiya qoldig'i ( $B_p$ ) deyiladi. Induksiya qoldig'iga magnit maydon kuchlanganligining teskari yo'nalishida, uning  $H_c=0$  qiymatida erishiladi, bunda  $H_c$  koersitiv kuch deb ataladi. Agar xarakteristikada maydon kuchlanganligi -  $H_{max}$  qiymatidan +  $H_{max}$  qiymatigacha qaytarilsa, magnit maydonning gisterezis halqasi kelib chiqadi. Gisterezis hodisasida atomlarining o'z o'qi atrofida aylanishi natijasida moddada ichki ishqalanish sodir bo'ladi. Bu hodisa, gisterizisda sodir bo'luvchi energiya yo'qotilishi deb ataladi. Ferromagnitklarning o'zgaruvchan magnit maydonida qayta magnitlanishi natijasida issiqlik energiyasi yo'qotiladi. Magnit moddasi massasida induksiyalangan quyuq tok dielektrik yo'qotilishlarini keltirib chiqaradi. Quyuq tokda sodir bo'ladigan yo'qotilishlar ferromagnetikning elektr qarshiligiga bog'liq bo'lgan magnit moddasidagi umumiy energiya yo'qotilishi quyidagicha aniqlanadi:

$$P_m = P_h + P_r.$$

Kuchsiz toklar sohasida quyidagi qiymatdan foydalaniladi:

$$Q = \omega L / r,$$

bunda:  $\omega$  – burchak chastota, Hz;  $L$  – chulg'am induktivligi, Gn;  $r$  – o'zakdagi ekvivalent qarshilik, Om.

Magnit moddasidagi energiya yo'qotilishining qiymati  $B=f(H)$  xarakteristikasidagi gisterezis halqa yuzasi bilan aniqlanadi. Magnit moddasidagi energiya yo'qotilishi chastota ortishi bilan keskin ko'payadi. Bu esa yuqori chastotaga mo'ljallangan magnit

moddalari ishlab chiqarishda katta qiyinchiliklar tugʻdiradi.  $P_m$  ni kamaytirish maqsadida qiymati yuqori boʻlgan magnit moddalar qoʻllaniladi. Magnit moddasining asosiy xarakteristikasini ifodalovchi  $m_r$  qiymati maydon kuchlanganligiga bogʻliq boʻlib, modda qizishi natijasida bu qiymat keskin kamayadi. Kyuri nuqtasida modda oʻzining ferromagnitlik xossasini yoʻqotadi  $\mu_r \rightarrow 0$ . Bundan tashqari, chastota ortishi natijasida moddada sodir boʻladigan quyun toki hisobiga magnitsizlanish roʻy beradi.

5.1-jadvalda ferromagnit turkumdagi asosiy moddalarning magnit xususiyatlari keltirilgan.

5.1-jadval

**Ferromagnitlar guruhiga kiruvchi asosiy moddalarning magnit xususiyatlari**

Metall	$m_{max}$	$m_{p,ax}$ Vb/m <sup>2</sup>	$H_c$ , A/m	$B_p, B_j$ /m <sup>2</sup>	Kyuri nuqtasi, °C
Temir	10000- 15000	2,163	0,0015- 0,004	1,1	787
Nikel	1120	0,64	0,012	0,33	358
Kobalt	174	1,77	0,10	0,34	1115

**5.5.1. Yumshoq magnit moddalar**

Magnit moddalar yumshoq va qattiq turlarga boʻlinadi. Yumshoq magnit moddalardan magnitli oʻtkazgichlar tayyorlanadi. Bu moddalarning magnit singdiruvchanligining boshlangʻich qiymati katta boʻlishi kerak. Yumshoq magnit moddalarida solishtirma qarshilik nisbatan katta qiymatga, koersitiv kuch

( $H_c < 0,1$  A/m) esa kichik qiymatga ega bo'lishi kerak. Bu moddalarga sof temir, temirning kremniy, nikel va kobalt bilan qotshimalarini misol tariqasida keltirish mumkin.

Texnik sof temir (qo'shimchalari 0,1%) oddiy pechlarda olinadi. Uning ayrim magnit xossalari 5.2-jadvalda keltirilgan. Bu temir o'zgaruvchan tok zanjirida ishlatiladigan elektromagnit yoki rele uchun o'zaklar tayyorlashda ishlatiladi. Ular varaq yoki silindr shaklda yupqa (0,2 – 4 mm) qilib tayyorlanadi.

Texnik sof temir (qo'shimchalari 0,02%) ning asosiy fizik xossalari quyidagicha:

zichligi – 7880 kg/m<sup>3</sup>, erish temperaturasi – 1539°C, solishtirma issiqlik sig'imi – 0,46 KJ/kg·K, issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti – 71,5 Vt/m·K, chiziqli kengayish koeffitsiyenti –  $11,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ , solishtirma qarshiligi – 0,1 mkOm·m, qayishqoqlik moduli – 210 MPa, Kyuri nuqtasidagi temperatura – 770°C.

5.2-jadval

**Turlicha ishlov berilgan temirning tarkibi va magnit xossalari**

Modda	Qo'shimchalarning miqdori, %		Magnit xossalari		
			Magnit singdiruvchanlik		Koersitiv kuch, $H_c$ , A/m
	Uglerod	kislorod	$m_{rb}$	$m_{ryu}$	
Texnik sof temir	0,020	0,060	250	7000	64,0
Elektrolitik temir	0,020	0,010	600	15000	28,0
Karbonil temir	0,005	0,005	3300	21000	9,4

Vakuunda eritilgan elektrolitik temir	0,010	-	-	61000	7,2
Vodorodda ishlov berilgan temir	0,005	0,003	6000	200000	3,2
Vodorodda yaxshilab ishlov berilgan temir	-	-	20000	340000	2,4

O'zgarmas tokda ishlaydigan elektr mashinasida qo'llaniladigan temir tarkibida C, Si, Mn kabi qo'shimchalarning miqdori 1,2–1,5% gacha, kam legirlangan po'lat tarkibida esa C, Ni, Cr larning miqdori 2,5 – 5% gacha bo'ladi. Bu moddalarda mexanik mustahkamlik o'sishi bilan bir qatorda magnitlanish xususiyati birmuncha yomonlashadi.

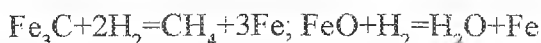
Elektrolitik temir texnik sof temirni elektroliz qilish usuli orqali olinadi. Bunday temirning tarkibidagi qo'shimchalarning umumiy miqdori 0,05% dan oshmaydi. Elektrolitik temirga ishlov berib, zarralarining o'lchami 50 – 100mkm bo'lgan kukun olinadi. Bu kukunni bosim ostida ishlash orqali undan o'zaklar tayyorlanadi. Ular chastotasi 100 – 1000 Hz atrofida bo'lgan asboblarda qo'llaniladi.

Karbonil temir pentakarbonil  $[Fe_2(CO)_5]$ – suyuqligi<sup>ni</sup> 200–250°C temperaturada kimyoviy parchalash orqali olinadi. Karbonil temir mayda kukun ko'rinishida bo'lib, undan yuqori



chastotali magnit o'zaklar tayyorlanadi. Kichik shar shakldagi zarralar o'zakda sodir bo'ladigan quyun toki miqdorini keskin kamaytiradi.

Vodorodda 1480°C da 30 – 40 minut davomida kuydirilgan sof temir birikmasidan uglerod va kislorod ajralib chiqadi:



Mazkur temir o'ta tozaligi bilan ajralib turadi, kuchsiz magnit maydonida bu moddaning  $m_r$  qiymati yuqori bo'ladi. Temir monokristali o'ta yuqori magnitlanish xossasiga ega.

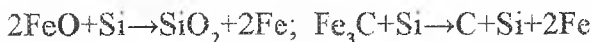
Kremniyli elektrotexnik po'lat temir va kremniy qotishmasidan iboratdir. Undan tayyorlangan listlar elektr texnik po'lat listlar deyiladi. Bu po'lat asosiy magnit moddalaridan biri bo'lib, sanoat chastotasida ishlaydigan elektr mashina va apparatlarida keng qo'llaniladi.

### Elektr texnik po'latning fizik xossalari:

Zichligi.....	7800 kg/m <sup>3</sup>
Tarkibidagi kremniy miqdori.....	0,4 – 2,8%
Solishtirma qarshiligi .....	(0,14 – 0,50)·10 <sup>6</sup> Om·m
Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti.....	0,46 – 0,25 Vt/(m·K)

Temir tarkibiga kremniy kiritishdan asosiy maqsad moddaning solishtirma qarshiligini oshirish va undagi quyun toki miqdorini cheklashdan iboratdir. Kremniy elementi temirning magnit xossalarini deyarli o'zgartirmagan holda  $P$  qiymatini sezilarli darajada oshiradi.

Kremniy temir tarkibidagi uglerod va kislorod birikmalarini yemiradi:



**Elektr texnik po'latlarning tarkibidagi kremniy miqdoriga nisbatan zichligi va solishtirma qarshiligi**

Po'latning kremniy bilan legirlanish darajasi	Markasidagi ikkinchi raqam	Zichligi, $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	Solishtirma elektrik qarshiligi $\text{mkOm}\cdot\text{m}$
Legirlanmagan	0	7,85	0,14
Kam legirlangan	1	7,82	0,17
O'rtachadan kam legirlangan	2	7,80	0,25
O'rtacha legirlangan	3	7,75	0,40
Yuqori darajada legirlangan	4	7,65	0,50
O'ta yuqori darajada legirlangan	5	7,55	0,60

Yupqa listli elektr texnika po'lati quyidagicha tasniflanadi:

Struktura holati va prokatlash turi bo'yicha (markadagi birinchi raqam): 1 – qizdirib shakl berilgan, izotropli; 2 – sovuqlayin shakl berilgan, izotropli; 3 – sovuqlayin shakl berilgan, anizotropli.

Tarkibidagi kremniy miqdori bo'yicha (markadagi ikkinchi raqam):

0 – kremniy miqdori 0,4 % gacha (legirlanmagan); 1 – 0,4 % < Si < 0,8 %; 2 – 0,8 % < Si < 1,8 %; 3 – 1,8 % < Si < 2,8 %; 4 – 2,8 % < Si < 3,8 %; 5 – 3,8 % < Si < 4,8 %

Asosiy xarakteristikasi bo'yicha (markadagi uchinchi raqam): 0 – magnit induksiyasi 1,7 Tl va chastotasi 50 Hz bo'lgandagi solishtirma yo'qotilishlar  $P_{17/50}$ ; 1 –  $P_{1,5/50}$ ; 2 –  $P_{1/400}$ ; 6 – maydon kuchlanganligi 0,4 A/m bo'lgan kuchsiz magnit maydonidagi magnit induksiyasi ( $B_{0,4}$ ); 7 – maydon kuchlanganligi 10 A/m bo'lgan o'rtacha magnit maydonidagi magnit induksiyasi ( $B_{10}$ ).

Po'lat o'ram, varaq va tasma ko'rinishida ishlab chiqariladi. hamda izolatsiya qoplamli bo'lib ham chiqariladi. Po'latlar

apparat, transformator, elektr mashinasi va asboblarning magnit zanjirlarida qoʻllaniladi. Teksturlangan poʻlatlar transformatorlar oʻzagi uchun ishlatiladi. Bunday poʻlatdan foydalanish quvvatli transformatorlar hajmi va tashqi oʻlchamini 20 – 25% kamaytirish imkonini beradi, radio transformatori hajmini esa 40% gacha kichraytiradi. Elektr texnik poʻlatlarning tarkibidagi kremniy miqdoriga nisbatan zichligi va solishtirma qarshiligi 5.4-jadvalda keltirilgan.

#### 5.4-jadval

### Tarkibidagi kremniy miqdorining ortishiga qarab temir xossalari oʻzgarishi

Si, %	g, kg/m <sup>3</sup>	m <sub>b</sub>	(m <sub>b</sub> ) <sub>max</sub> <sup>2</sup> Vb/m <sup>2</sup>	H <sub>c</sub> , A/m	ρ <sub>s</sub> mkOm·m
0	7800	150	2,15	0,0160	0,10
2	7750	200	2,06	0,0046	0,40
4	7550	400	1,97	0,0040	0,62

Permalloy temir-nikel qotishmasi boʻlib, uning boshlangʻich magnit singdiruvchanligi nisbatan yuqoridir. Tarkibida nikel miqdori 70 – 83% boʻlgan permalloylar yuqori nikelli, 40–50% boʻlgan permalloylar esa past nikelli permalloylar deyiladi.

Tarkibida 2% molibden boʻlgan permalloyning r qiymati katta boʻlib, u yaxshi magnitlanish xususiyatiga egadir. Permalloydan qalinligi 0,1– 0,5 mm li varaqlar tayyorlanadi. Kukun koʻrinishidagi permalloyga bosim ostida ishlov berib, oʻzaklar tayyorlanadi. Bunday oʻzaklar 100 kHz chastota bilan ishlaydigan uskunalarda qoʻllaniladi.

Alsifer – temirning kremniy va aluminiy (9,5% Si, 5,6% Al, 84,9% Fe) bilan birgalikdagi qotishmasidir. Bu qotishma qattiq va moʻrt boʻlib, undan murakkab shaklli quymalar olinadi. Alsiferning asosiy xossalari:  $m_{16}=35500$ ,  $m_{11}=120000$ ,  $H_c=1,8$  A/m,  $\rho=0,8$  mkOm·m. Alsiferdan magnitli ekran, asboblarning

ustki qismi va boshqa mahsulotlar quyish usuli bilan tayyorlanadi.

Qo'llanilishi magnit xossalarning u yoki bu xususiyatlariga asoslangan moddalarni alohida turkumga kiritish mumkin. Bunday moddalarga quyidagilar misol bo'ladi:

1) maydon kuchlanganligi o'zgaranda magnit singdiruvchanligi juda kam o'zgaradigan qotishmalar;

2) magnit singdiruvchanligi temperaturaga kuchli ravishda bog'liq bo'lgan qotishmalar;

3) to'yintirish induksiyasi o'ta yuqori bo'lgan qotishmalar.

Birinci turdagi qotishmalarning nomi perminvar bo'lib, uning tarkibida 29,4% Fe, 45% Ni, 25% Co va 0,6% Mn bor. Mazkur qotishma 1000°C da yumshatiladi, keyin 400 – 500°C da ushlab turiladi va asta-sekin sovutiladi. Perminvarning boshlang'ich magnit singdiruvchanligi 300 ga teng. Perminvar temperatura ta'siri va mexanik kuchlanishlarga sezgir moddadir.

Ikkinchi turga Ni-Cu, Fe-Ni yoki Fe-Ni-Cr asosidagi termomagnit qotishmalar kiradi.

Uchinchi turga temir-kobalt qotishmalari kiradi. Tarkibida 50 – 70% Co bo'lgan mazkur qotishmalar *permendyurlar* deb ataladi. Permendyurlarning narxi qimmatroq bo'lganligi tufayli ulardan faqat maxsus apparatlarda, xususan, dinamik reproduktorlar, ossilloqraflar, telefon membranalarida foydalaniladi.

**Ferritlar.** Tarkibida, temirdan tashqari, ikki va undan ko'p valentli metall (Ni, Co, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Mg) oksidlari ham bo'lgan birikmalar *ferritlar* deyiladi. Ular qisman elektronli elektr o'tkazuvchanlik xossasiga ham egadir. Ferritning kristall panjarasi kub shaklida bo'ladi. Odatda, yaxlit ferrit tayyorlash uchun ferrit kukuniga polivinil spirti plastifikatori qo'shiladi va bu massa yuqori bosimda qoliplanadi. Uning solishtirma qarshiligi sof temirning solishtirma qarshiligiga nisbatan  $10^5$ – $10^6$  barobar yuqoridir. Shu sababli, ferritda quyun toki hisobiga

sodir bo'ladigan yo'qotilishlar keskin kamayadi va moddani yuqori chastotalarda ham ishlatsa bo'ladi. Ferritning magnit singdiruvchanligi sof temirnikiga nisbatan  $10^2$ – $10^3$  barobar yuqori bo'lganligi uchun undan tayyorlanadigan o'zaklar hajmini keskin kichraytirish mumkin. Ferritdagi ( $m_r j_m$ ) qiymatlar ferromagnit (yoki oddiy metall) dagiga nisbatan juda kichik bo'lgani uchun, u past chastotali asboblarda ham qo'llaniladi.

Ferrit tarkibi oddiygina qilib quyidagicha ifodalanadi:  $MFe_2O_4$  yoki  $MOFe_2O_3$ , bunda:  $M$  – ikki valentli biror metall.

Ferritlar tarkibidagi qo'shimchalarga mis, ruh, nikel-ruh, marganes-ruh misol bo'ladi. Ular elektr texnikada keng miqyosda qo'llanilmoqda. Ferritlarda Kyuri nuqtasidagi temperatura ancha past, ya'ni  $100 - 150^\circ C$  atrofida bo'ladi. Uning solishtirma og'irligi  $3700 - 4800 \text{ kg/m}^3$  atrofida bo'lib, 5.5-jadvalda asosiy xossalari keltirilgan.

5.5-jadval

Ferritlarning asosiy xossalari

Navi	$m_r b$	$m_{max}$	$H_c$ A/m	$B_r$ , Tl	$I_c$ MHz	$T_c$ , °C	$\rho$ , Om·m	$g \times 10^3$ , kg/m <sup>3</sup>
20000HM	15000	35000	0,24	0,11	0,1	110	0,001	-
6000HM	4800 – 8000	10000	8	0,11	0,5	130	0,1	5,0
1000HM	800 – 1200	1800	28	0,11	5	200	0,2	4,5
1000HM	800 – 1200	3000	24	0,10	3	110	10	4,9
600HM	500 – 800	1500	40	0,12	5	110	100	4,8
2000HM1	1700 – 2500	3500	25	0,12	1,5	200	50	5,0
700HM1	550 – 850	1800	25	0,05	8	200	140	4,8
100VCH	80 – 120	210	300	0,15	80	400	$10^5$	4,8
20VCH2	16 – 24	45	1000	0,1	300	450	$10^6$	4,7
300NN	280 – 350	600	80	0,13	20	120	$10^6$	4,8
9VCH	9 – 13	30	500	0,06	600	500	$10^7$	4,4
200VCH	180 – 220	360	70	0,11	-	360	$10^3$	4,7
50VCH3	45 – 65	200	100	0,14	-	480	$10^4$	466

Ferritning gʻisterezis halqasi toʻgʻri burchakka yaqin boʻlishi uni maxsus apparatlarda qoʻllash imkonini yaratadi. Ferrit, asosan, aloqa, radiotexnika, hisoblash texnikasi, avtomatika asbob-uskunalarida keng miqyosda qoʻllaniladi.

Gisterezis halqasi toʻgʻri burchakli ferritlar hisoblash texnikasining xotira qurilmalari uchun asosiy modda boʻlib xizmat qiladi. Bunday moddalarning xossalarini izohlash uchun qoʻshimcha maxsus parametrlar kiritiladi. Bunday parametrlardan biri gisterezis halqasining toʻgʻri burchakli koeffitsiyentidir:

$$K_n = B_r / B_{\max}$$

bunda,  $K_n$  qiymati iloji boricha birga yaqin boʻlishi kerak. Oʻzaklar tezda qayta magnitlanishi uchun ularning qayta ulanish koeffitsiyenti  $S_q$  kichik qiymatga ega boʻlishi kerak. 5.6-jadvalda ferrit oʻzaklarining xossalari keltirilgan.

5.6-jadval

Ferrit oʻzaklarining xossalari

Modda	$H_c$ , A/m	$B_r$ , Tl	$k_n$	$S_q$ , mkKl/m	$m_{\max}$
Turli navdagi ferritlar	10 – 1200	0,15 – 0,25	0,9	25 – 55	110 – 630
Permalloyh oʻzaklar (tasmaning qalinligi 2–10 mkm)	8 – 50	0,6 – 1,5	0,85 – 0,9	25 – 100	300 – 630

Konstruksion choʻyan va poʻlatlar asbobsozlik, apparatsozlik va elektr mashinasozligida keng qoʻllaniladigan moddalardir. Magnit xossalariga koʻra ular magnitli (kulrang choʻyan, uglerodli va legirlangan poʻlat) va magnitsiz turlarga boʻlinadi.

Kulrang choʻyan tarkibida 3,2 – 3,5% uglerod, kremniy, marganes, fosfor va oltingugurt boʻladi. Bu moddaning egilishdagi mustahkamligi 200 – 450 MPa. Undan elektr mashinalarning korpusi, asosi va shu kabi detallar tayyorlanadi.

Odatda, quymalar olishda tarkibida 0,08 – 0,2% uglerodi boʻlgan, uglerodli poʻlatdan foydalaniladi. Bunda quymalar 85–900°C temperaturada sekin-asta yumshatiladi. Maxsus elektr mashinalarida, shuningdek, konstruksiyasi yengillashtirilgan mashinalarda nikel, vanadiy, xrom va molibden bilan legirlangan poʻlatlar ishlatiladi. Bu poʻlatlarning egilishdagi mexanik mustahkamligi 500 – 950 MPa oraligʻida boʻladi.

### 5.5.2. Qattiq magnit moddalar

Qattiq magnit moddalar tarkibi, holati va olinish usulariga koʻra quyidagicha tasniflanadi:

- 1) legirlangan martensit poʻlatlari;
- 2) quyma qattiq magnit qotishmalari;
- 3) kukunlardan tayyorlangan magnit;
- 4) qattiq magnitli ferritlar;
- 5) egiluvchan qotishmalar va magnit tasmalari.

Qutblar orasida havo boʻshligʻi mavjud boʻlganida energiya-ning bir qismi magnit moddasi hajmidan tashqaridagi maydon bilan bogʻliq boʻladi. Mazkur energiya qiyamati boʻshliqning uzunligiga bogʻliq. Magnit qutblarining magnitsizlanishi hisobiga oraliqdagi induksiya  $B_d$  qoldiq induksiya  $B_r$  ga nisbatan kichikroq boʻladi.

Havo oraligʻidagi solishtirma magnit energiyasi :

$$W_d = B_d H_d / 2,$$

bunda:  $H_d$  –  $B_d$  induksiyaga mos keladigan maydon kuchlanganligi.

Tutashirilgan magnitda  $B_d = B, H_d = 0$  bo'lgani sababli, mazkur energiya nolga tenglashadi. Agar qutublar oralig'i juda katta bo'lsa,  $B_d = 0, H_d = H_c$  bo'lganligi sababli bunda ham energiya nolga intiladi.

Qandaydir  $B'_d, H'_d$  qiymatlarda energiya o'zining eng yuqori qiymatiga erishadi:

$$W_{\max} = B'_d \cdot H'_d.$$

Bu ifoda bilan magnitdan eng yaxshi foydalanish imkoniyati aniqlanib, u o'zgarmas magnitlar tayyorlashda ishlatiladigan moddalarning sifatini aniqlaydigan muhim xarakteristika hisoblanadi.

Po'lat tarkibiga volfram yoki xrom kabi metallar kiritilsa, martensit tuzilishli modda hosil bo'ladi. Bunda po'latning doimiy magnit eskirish jarayoni susayadi. Volframli po'lat tarkibida 0,6% C, 5 – 6% W, xromli po'lat tarkibida esa 1% C, 1% – 3% Cr bo'lib, ularning xossalari uglerodli po'latnikiga nisbatan ancha yaxshilangan. Mazkur moddalarning magnit xossalari:  $H_c = 0,45 - 0,5$  kA/m,  $B_r = 0,9 - 1,1$  Vb/m<sup>2</sup>,  $W_g = 0,9 - 12$  kJ/m<sup>3</sup>.

Elektr texnikada magnit moddasi sifatida ilk bor qo'llanilgan qotishma *alni* deb atalgan. Uning tarkibi 11–16% Al, 24 – 30% Ni, 54 – 65% Fe elementlaridan iborat. Alning  $H_c$  qiymati uglerodli po'latnikiga nisbatan 10 barobar yuqori. Alni juda qattiq modda bo'lganligi sababli, unga mexanik ishlov berib bo'lmaydi. Alnidan magnit quyish usuli bilan olinib, kerakli tuzilish sovitish jarayonida hosil qilinadi. Uning magnit xossalari quyidagicha:  $H_c = 4 - 4,5$  kA/m,  $B_r = 0,55 - 0,65$  Vb/m<sup>2</sup>,  $W_g = 5$  kJ/m<sup>3</sup>.

Alni<sub>10</sub> qotishmasi alniga o'xshash bo'lib, uning tarkibida 5 – 10% Co va 6% Cu qo'shimchalar bor. Alnikoning magnit xossalari:  $H_c = 4,0 - 4,5$  kA/m,  $B_r = 0,7 - 0,8$  Vb/m<sup>2</sup>,  $W_g = 6,0 - 7,0$  kJ/m<sup>3</sup>.

Magnitko qotishmasi alnikodan tarkibidagi kobalt miqdorining nisbatan ko'pligi bilan (10% Al, 17% Ni, 24% Co, 6% Cu, 43%



Fe) farqlanadi. Magnitning magnitlik xossalari:  $H_c=4,0 - 4,5$  kA/m,  $B_r=1,2-1,3$  Vb/m<sup>2</sup>,  $W_g = 16 - 20$  kJ/m<sup>3</sup>.

Qotishma magnit xossalarining yaxshilanishi, uning tarkibi bilangina emas, balki maxsus ishlov berish – quymani kuchli maydon ta'sirida sovitish jarayoni bilan ham aniqlanadi.

Alni, alniko va magnitko qotishmalarining kamchiligi ulardan aniq o'lchamli kichik mahsulotlar tayyorlashning mushkulligidir.

Platinali qotishmalar temir yoki kobalt tarkibiga 77–78% platina qo'shish orqali olinadi. Bu moddada  $H_c$  qiymati keskin oshib, induksiya qiymati esa pasayadi. Uning magnit xossalari (temirli qotishmada):  $H_c=12,5$  kA/m,  $B_r=0,58$  Vb/m<sup>2</sup>,  $W_g=12$  kJ/m<sup>3</sup>; kobaltlida esa  $H_c=21$  kA/m,  $B_r=0,45$  Vb/m<sup>2</sup>,  $W_g=15 \cdot 10^3$  kJ/m<sup>3</sup> platinali qotishmalarining qoldiq induksiyasi kichik qiymatga ega. Narxi balandligi sababli, bu moddalar maxsus apparatlarda juda kichik hajmli magnitlar tayyorlashda qo'llaniladi.

### **Bobga doir savol va mashqlar**

1. *Molekular toklarga ta'rif bering.*
2. *Ferromagnetiklarning temperaturaga bog'liqligini tushuntiring.*
3. *Paramagnit xossalari nimadan iborat?*
4. *Kyuri qonuni qanday ta'riflanadi?*
5. *Diamagnetizmning tabiatini tushuntiring.*
6. *O'ta o'tkazgichlarda ichki magnitlanishni nimalar hosil qiladi?*
7. *Magnit moddalar qanday maqsadlarda foydalaniladi?*
8. *Tashqi magnit maydoni ta'sirida ferromagnit moddaning magnitlanish jarayoni qanday kechadi?*
9. *Magnitostriksiya nima?*
10. *Yumshoq magnit moddalarga misollar keltiring.*
11. *Ferritlarning asosiy xossalari ko'rsating.*

12. Qattiq magnit moddalarni tarkibi, holati va olinish usullariga ko'ra tasniflang.

13. Volframdagi bir jinsli magnit maydoni kuchlanganligi  $H=10 \text{ A/m}$  bo'lsa, uning magnit maydoni induksiyasi  $B$  qanday?

14. Temir sterjendagi magnit maydon induksiyasi  $B=1,7 \text{ Tl}$ . Agar sterjenning magnit xususiyatlari  $B=f(H)$  funksiya orqali ifodalansa, magnitlanish vektori  $P$  topilsin.

15. Tok oqayotgan induktiv g'altakka kiritiladigan ferromagnit o'zak qanday vazifani bajaradi?

16. To'rtta bir xil g'altak doimiy tok zanjiriga ketma-ket ulangan. Birinchi g'altak o'zaksiz, ikkinchi g'altakning o'zagi temirdan, uchinchisidiki aluminiydan, to'rtinchisidiki misdan yasalgan bo'lsa, qaysi g'altakning magnit oqimi eng katta (aluminium - paramagnit, mis - diamagnit)?

17. Kyuri temperaturasida qanday jarayon sodir bo'ladi?

18. Nikelning ma'lum kesimidan o'tuvchi magnit oqimi kirituvchanligi  $672$  bo'lgan po'latning xuddi shunday kesimidan o'tuvchi magnit oqimidan  $2$  marta kam bo'lishi ma'lum bo'lsa, nikelning magnit kirituvchanligini toping.

## VI bob. NANOMODDALAR

### 6.1. Nanozarralarning sinflanishi

Nanokimyo fani hali yosh fan bo'lgani uchun hozircha yagona atamalari ham, o'rganilayotgan zarralar sinflanishi ham mavjud emas. Aytish mumkinki, qancha tadqiqotchi bo'lsa, sinflanish ham shuncha bo'ladi. Hozircha nanokimyo fani turli nanotizimlarni qamrab oladi va ularning xossalarini o'rganadi degan (hamma qabul qilgan) nisbiy tushuncha bor.

*Nanotizim* deganda ma'lum bir muhitdagi o'lchamlari 100 nm dan birmuncha kichikroq bo'lgan nanozarralar tushuniladi. Bunda nanozarra yana ham kichikroq bo'lgan klasterlar tizimi va moddaning eng kichik g'ishtchalaridan tuzilgan deb tushuniladi. Klasterning o'lchami 10 nm dan katta emas. Xuddi shu klasterlar o'lchamida mumkin bo'lgan barcha kvant effektlari namoyon bo'ladi.

Fanda nanokimyo obyektlarini ko'p marta sinflashga harakat qilingan. 6.1- jadval sizlarni atamalarda adashib qolmasligingizga yordam beradi.

6.1-jadval

#### Nanokimyo obyektlari

Fazaviy holati	Alohida atomlar	Klasterlar	Nanozarralar	Kompakt modda
Diametri, nm	0,1 – 0,3	0,3 – 10	10 – 100	100 dan ortiq
Atomlar soni	1 – 10	10 – 10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup> –10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup> dan ortiq

Shunday qilib, nanotuzilmalarga ko'p atomli klasterlar va molekulalar, nanotomchi, nanokristallar misol bo'lishi mumkin. Bunday yondoshish yolg'iz atomlarni nanokimyoning pastki

chegarasi sifatida, nanozarra xossasini yo'qotadigan darajadagi atomlar miqdorini esa yuqori chegara sifatida qarash imkonini beradi. Yuqori chegara har bir modda uchun har xildir.

Geometrik belgisi (o'lchami) bo'yicha nanoobyektlarni turli nuqtayi nazardan sinflash mumkin. Ba'zi tadqiqotchilar obyekt o'lchami uning makroskopik o'lchamlariga ega bo'ladigan o'lchamlar soni bilan belgilanadi desa, ba'zilar, asosan, nanoskopik o'lchashlar sonini olishni taklif qiladi. Biz esa ikkala yondoshishni birlashtiruvchi sinflashni sinab ko'ramiz.

### 6.2-jadval

#### Nanokimyo obyektlarining birlashgan sinflanishi

Obyekt xarakteristikalarini tavsiflari	100 nm dan kichik bo'lgan o'lchamlar soni	100 nm dan katta bo'lgan o'lchamlar soni	Misollar
Uchala o'lchami (bo'yi, eni, uzunligi) 100 nm dan kichik	3 – o'lchovli obyekt	0 – o'lchovli obyekt	Fullerenlar, kvant nuqtalar, kolloid eritmalar, mikroemulsiyalar
Ko'ndalang kesim o'lchami (bo'yi, eni) 100 nm dan kichik, uzunligi ixtiyoriy katta	2 – o'lchovli obyekt	1 – o'lchovli obyekt	Nanonaychalar, nanotolalar, nanokapillarlar va nanog'ovaklar
Faqat bir o'lchamni eni 100 nm dan kichik, bo'yi va uzunligi ixtiyoriy katta	1 – o'lchovli obyekt	2 – o'lchovli obyekt	Nanoparda va nanoqatlamlar
Hamma uch o'lchami 100 nm dan katta	0 – o'lchovli obyekt	3 – o'lchovli obyekt	Oddiy makrojismlar

Nanoobyektlarni sinflash faqatgina rasman nuqtayi nazardangina muhim emas. Nanoobyekt geometriyasi uning fizik-kimyoviy xossalari ham jiddiy ta'sir ko'rsatadi.

Moddalarning tarkibida, klaster shakllari va atomlar orasidagi bogʻlanish turlariga koʻra juda koʻp nanoobyektlar mavjud. Quyida ulardan bir nechtasini koʻrib chiqamiz.

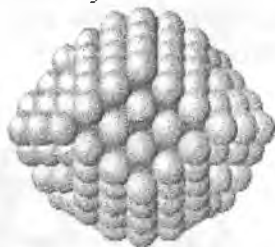
**Inert gazlar atomlaridan tuzilgan zarralari.** Bu eng sodda nanoobyektdir. Inert gaz atomlarining butunlay toʻlgan elektron qobiqlari oʻzaro Van-der-Vaals kuchlari bilan kuchsiz taʼsirlashadi.

Bunday zarralarni ifodalashda yetarlicha katta aniqlikda qattiq sharchalar modelini ishlatishimiz mumkin. Ularning atomlari orasidagi bogʻlanish energiyasi juda zaif, shuning uchun ular 10–100 K dan baland boʻlmagan temperaturalarda mavjud boʻladi.



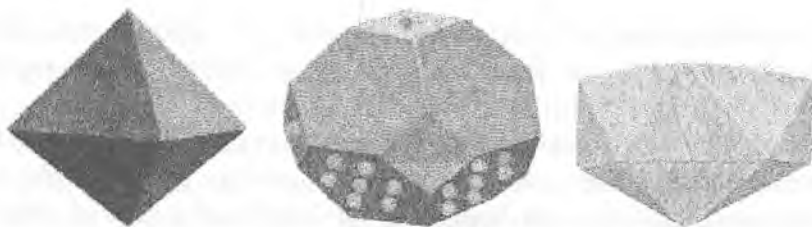
6.1-rasm. 16 ta argon atomidan iborat nanozarra

**Metall zarralari.** Bir nechta metall atomlari klasterda kovalent bogʻlanish ham, metall bogʻlanish ham hosil qilishi mumkin. Metallning nanozarrasi kuchli reaksiya qobiliyatiga ega va koʻp hollarda katalizator sifatida foydalaniladi.



6.2-rasm. Metall nanozarrasi

Metall nanozarrasi, odatda, muntazam shakllarni – toʻgʻri oktaedr, ikosaedr yoki tetrodekaedr shaklini qabul qiladi.



6.3-rasm. Metall nanozarrasining imkoniy shakllari

**Fullerenlar.** Fulleren nomini arxitektor Bakminster Fuller sha'niga olingan, u bunday strukturalarni arxitekturada foydalanish uchun yaratgan (shuning uchun ularning yana bakibolalar deb ham atashadi). Fulleren futbol to'piga juda o'xshovchi, 5 – 6 burchak shaklli “yamoqlar”dan tuzilgan karkas tuzilishiga ega. Bu ko'pyoqlar uchida uglerod atomlari joylashgan deb tasavvur qilsak, unda biz eng barqaror bo'lgan  $C_{60}$  fullerenini olamiz.

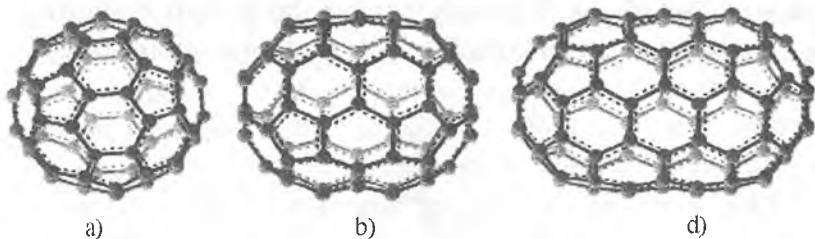
Eng taniqli hamda fullerenlar oilasining eng simmetrik bo'lgan vakili  $C_{60}$  molekulasida oltiburchaklilarning soni 20 ga teng. Bunda har bir beshburchak faqat oltiburchakli bilan chegaralangan, har bir oltiburchak oltiburchaklilar bilan 3 ta umumiy tomonga va 3 ta beshburchak bilan umumiy tomonga ega.

Fulleren molekulasida tuzilishining qizig'i shundaki, bunday uglerod “to'pi”ning ichida bo'shliq hosil bo'ladi, unga kapillar xususiyatlari hisobiga boshqa moddalarning atom va molekularini kiritish mumkin, bu esa ularga, masalan, ularni xavfsiz ko'chirish imkonini beradi.



6.4-rasm. Fullerenning tuzilishi

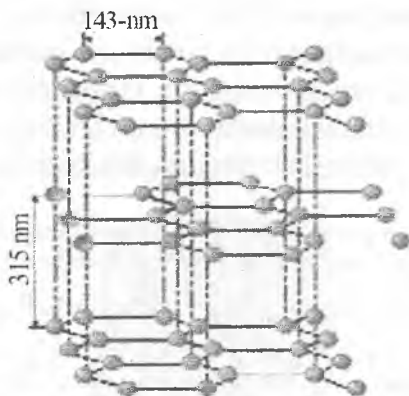
Fullerenlarni o'rganish davomida uning tarkibida uglerod atomlari soni turlicha – 36 tadan 540 tagacha bo'lgan molekullari sintez qilindi va o'rganildi.



6.5-rasm. Fullerenlar vakillari: a)  $C_{60}$ ; b)  $C_{70}$ ; d)  $C_{90}$ .

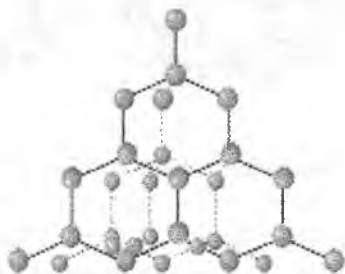
**Grafit** qatlamli tuzilishga ega. Uning har bir qatlami to'g'ri olti burchaklardagi bir-biriga kovalent ravishda bog'langan uglerod atomlaridan iborat.

Qo'shni qatlamlar kuchsiz Van-der-Vaals kuchlari bilan bir-birga bog'lanib turadi. Bunga misol qilib oddiy qalamni ko'rsatishimiz mumkin – siz grafitli sterjenni qog'oz ustida yurgizsangiz, qatlamlar asta-sekin bir biridan ajraladi va qog'ozda iz qoldiradi.



6.6-rasm. Grafitning tuzilishi

**Olmos** uch o'Ichamli tetraedrik tuzilishiga ega. Uglerodning har bir atomi kovalent ravishda qolgan to'rttasi bilan bog'langan. Barcha atomlar kristall panjarada bir - biridan bir xil masofada (154 nm) joylashgan. Ularning har biri boshqalari bilan to'g'ri kovalent bog'langan va kristallda bitta yirik makromolekula hosil qiladi.



6.7-rasm. Olmosning tuzilishi

C-C kovalent bog'lanishlarning yuqori energiyasi hisobiga olmos juda mustahkam va nafaqat qimmatbaho tosh, balki metall kesuvchi va silliqlovchi uskunalar tayyorlash uchun ham xomashyo sifatida ishlatiladi.

**Nanonaychalar.** Nanonaycha—uglerodning 1000000 chamasi-dagi atomlaridan tuzilgan ichi bo'sh, bir qatlamli, diametri bir nanometr atrofida va uzunligi bir necha o'n mikron bo'lgan katta naychasimon molekuladan iborat. Uning qobig'ida uglerod atomlari to'g'ri olti burchak shaklida birikkan bo'ladi



6.8-rasm. Nanonaychaning bir qatlamli molekulasi

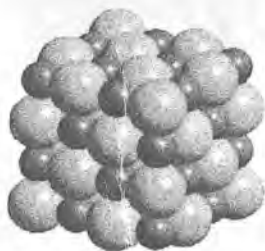


Nanonaycha bir qator noyob xossalarga ega. Shu tufayli u juda ko'p joylarda, yangi modda yaratish, elektronika va skanerlovchi mikroskopiyada keng qo'llaniladi. Nanonaychanning noyob xossalari, ya'ni yuqori darajadagi solishtirma sirtiy elektrik o'tkazuvchanligi va chidamliligi ular asosida turli jarayonlar uchun samarali katalizator tashuvchilarini yaratish imkonini beradi.

Nanonaychalar turli shakllarda bo'ladi: bir qatlamli, ko'pqatlamli, to'g'ri va spiralsimon. Bundan tashqari, ular kutilmagan elektrik, magnitik va optik xossalarini namoyish qilishmoqda. Maqsadga muvofiq ravishda naychalar ichiga boshqa moddalar atomlarini kiritish yo'li bilan nanonaychalarning elektron xossalarini o'zgartirish mumkin.

Fullerenlar va nanonaychalar ichidagi bo'shliqlar anchadan buyon olimlar diqqatini tortar edi. Tajribalardan ko'rinishcha, fulleren ichiga ma'lum bir modda atomi kiritilsa, bu uning elektrik xossalarini o'zgartirib yuborishi va hattoki, izolatorni o'ta o'tkazuvchi moddaga aylantirib yuborishi mumkin ekan.

**Ionlar klasterlari.** Ion klasteri NaCl kristalidagi ion bog'lanishni tasvirlaydigan klassik rasmlardandir. Agar ion nanozarrasi keragicha katta bo'lsa, uning tuzilishi katta o'lchamli kristall tuzilishiga yaqin bo'ladi. 6.9-rasmda NaCl kimyoviy formulasiga mos ion zarra turiga misol tasvirlangan. Bunday ion bog'lanishli birikmalar yuqori aniqlikda suratga oluvchi fotoplyonkalarda, molekular fotodetektorlarda, mikroelektronika va elektrooptikaning turli sohalarida ishlatiladi.



6.9-rasm. NaCl klasteri

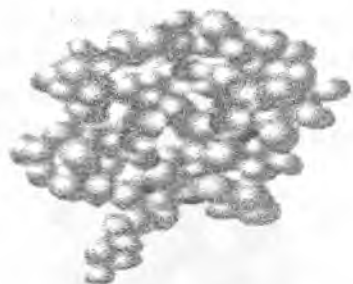
**Fraktal klasterlari.** *Fraktal* deb ildizsimon tarmoqlangan tuzilishga aytiladi. Bularga qurumlar, kolloidlar, turli xil aerogollar va aerogellar kiradi.



6.10-rasm. Fraktal klaster

**Fraktal** – bu shunday obyekt, uning kattalashib o‘shish jarayonida bitta shakl, tuzilish, katta va kichik masshtablarda birday qayta - qayta takrorlanishini ko‘rishimiz mumkin.

**Molekular klasterlar.** Ko‘pchilik klasterlar molekular bo‘ladi. Ularning sonlari va turlari beqiyos ko‘p. Hususan, molekular klasterlarga ko‘pgina biologik makromolekulalar misol bo‘ladi. 6.11-rasmda ferredoksin oqsili molekulari ko‘rsatilgan.



6.11-rasm. Molekular klaster

6.3-jadvalda turli nanozarralar va nanosistemalarning nanokimyodan o‘rganiladigan obyektlariga misollar ko‘rsatilgan.

## Nanokimyo o'rganadigan asosiy obyektlar

Nanozarralar	Nanotizimlar
Fullerenlar	Kristallar, eritmalar
Nanonaychalar	Agregatlar, eritmalar
Oqsil molekullari	Eritmalar, kristallar
Polimer molekullari	Kullar, gellar
Noorganik nanokristallar	Aerokullar, kolloid eritmalar
Mitsellalar	Kolloid eritmalar
Nanobloklar	Qattiq jismlar
Lengmyur- Blodjett pardalari	Sirti pardali jismlar
Gazlardagi klasterlar	Aerozollar
Modda qatlamidagi nanozarralar	Nanotuzilishli pardalar

## 6.2. Nanozarralarni olish usullari

O'Ichami, shakli va tuzilishini aniq boshqara oluvchi nanozarra olishning juda ko'p usullari ishlab chiqilgan. Biz o'quvchilarni zeriktirib qo'ymaslik uchun har bir usulni batafsil ko'rib o'tirmaymiz. Har bir usul o'zicha noyob va diqqatga sazovor bo'lsa-da, nanozarralar olishning umumiy qonuniyatlari bilan chegaralanamiz.

Shunday qilib, moddaga ta'sir etish qonuniyatiga, asosan, barcha usullarni ikkita katta guruhga bo'lishimiz mumkin:

**-dispergatsion usullar** yoki makronamunani maydalash yo'li bilan nanozarra olinadigan usullar;

**-kondensatsion usullar** yoki alohida atomdan "o'stirish" yordamida nanozarra olish usullari.

Birinchi guruh bu – "yuqoridan pastga" borish usuli. Boshlang'ich jismlar nanozarra bo'lgunga qadar maydalaniladi. Bu nanozarra olishning eng oddiy usuli, makrojism uchun o'ziga xos "go'sht maydalagich"dir. Ikkinchi guruh – "pastdan yuqoriga" borish usuli, ya'ni nanozarra alohida atomlarni birlashtirish yo'li

bilan olinadi. Bu qonuniyat hammaga yaxshi tanish bo'lgan kondensatsiya hodisasiga asoslangan.

Kondensatsiya (lotincha *condensation* – quyush, zichlashish so'zidan olingan) ta'rifiga ko'ra – bu moddani sovutish natijasida gazsimon holatdan kondensatsiyalangan (qattiq yoki suyuq) holatiga o'tishidir. Agar shishaga yaxshi puflasangiz u terlab ketadi. Aslida bunda shishada bir talay mayda, ko'zga ko'rinmas suv tomchilari o'tirib qoladi. Agar havо temperaturasi biz chiqarayotgan bug'ning temperaturadan past bo'lsa, keyinchalik mikroskopik tomchilar yanada kattalashadi va ko'rinadigan tomchilarga aylanadi. Nanozarraning kondensatsion olish usulida ham taxminan shunga o'xshash hodisa sodir bo'ladi. Birlamchi makroskopik jismlar oldin bug'lanadi, keyin esa hosil bo'lgan bug' kerakli o'lchamli nanozarra hosil bo'lguncha kondensatsiyalanadi. Natijada ixcham modda ultradispers moddaga aylanadi. Nanozarrani ion eritmadan olinganda ham shunga o'xshash jarayon sodir bo'ladi, faqat unda bug' emas, suyuqlik ishlatiladi.

**Rux oksidi.** ZnO nanozarrasi ham qator (jumladan, bakteritsidli) noyob xossalarga ega, ulardan eng muhimi elektromagnitik to'lqinlarning juda keng spektrini, ultrabinafsha, infraqizil, mikroto'lqinli va radiochastotali nurlarni yutish qobiliyatidir.

Bunday zarralar oyna, plastmassa, sintetik tola va boshqalarga ultrabinafsha nurlardan himoyalovchi yangi xossalarga berishi mumkin. Bu ultrabinafsha nurdan saqlovchi quyoshli ko'zoynak, quyoshli kunlarda kiyish uchun maxsus kiyim yaratish imkonini beradi. Ularni faqat quyoshdan himoyalaniش uchun emas, balki issiq kunda qizib ketishdan saqlanish uchun ham ishlatish mumkin bo'ladi.

ZnO nanozarralar asosidagi moddalarni infraqizil ko'rsatkichlarda qo'llasa ham bo'ladi.

**Serpentin.** Serpentin nanonaychasi nanozarralarning noyob xossalarni sanoatda qo'llanilishiga ajoyib misol bo'la oladi. "Nanoindustriya" konserni mineral nanonaychalar (uglerod bilan

adashtirilmasin) asosida maxsus ta'mirlovchi-tiklovchi tarkibli (TTT) modda ishlab chiqarishdi. Bunday nanotexnologik TTT amalda har qanday ishqalanish natijasida yeyilib ketgan metall sirtlarni qayta tiklashi mumkin (avtomobil dvigatelining, turli stanok va mexanizmlarning ishqalanuvchi qismlari), avtomobil karteriga TTT moddasini qo'yilsa, dvigatel ishdan chiqishini anchagacha unutsa bo'ladi.

Odatda, harakatlantirgichning mexanik qismlari ishqalanish oqibatida asta-sekin buzilishini kuzatamiz, chunki ular qo'pol balk - texnologiyasi bo'yicha ishlab chiqarilgandir. Agar TTT dan bir shishachasini moyga qo'shilsa, quyidagi hodisa sodir bo'ladi: dvigatel ishlashi davomida mexanik qismlar ishqalanishdan isiydi, bu qizish katalizator vazifasini o'tab, nanonaychalarni asbob qismini buzilgan sohasiga biriktirib qo'yadi, natijada asbobning jadal ishqalanyotgan qismining sirtida ideal himoya qatlami hosil bo'ladi. Qattiq qiziganda ular o'zlarining birikuvchanlik xossalarini yo'qotadi. Shunday qilib, ishqalanuvchi qismda doimiy issiqlik muvozanati saqlab turiladi, ishqalanuvchi sirtlar mutlaq silliq bo'lgani uchun asbob qismlari deyarli eskirmaydi.



Sirtni TTT bilan tozalash



TTT alohida kristallarning paydo bo'lishi



Turg'un yangilangan qatlarning paydo bo'lishi

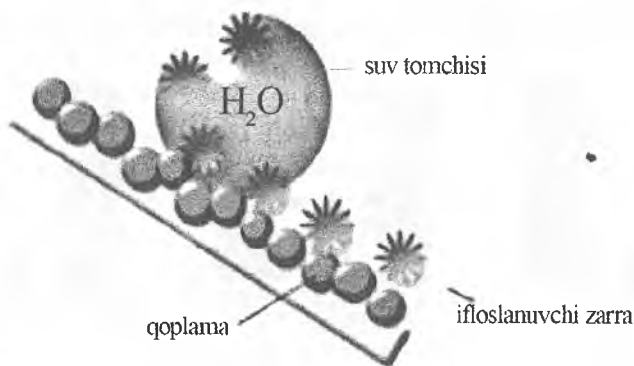
6.12-rasm. "Nanotexnologiya" konserni ishlab chiqqan TTT moddaning ta'sir qilish sxemasi

Izlanishlar natijasi shuni ko'rsatadiki, moy almashtirilgandan keyin ham qatlam kutilmagan darajada uzoq vaqt butunligicha qoladi. Bunday oddiy ko'ringan texnologiya mashinalar umrini

uzaytirish bilan bir qatorda yana bir talay quyidagi foydali jihatlarga ega:

- dvigatelni ochmasdan eskirgan detalni tiklash,
- dvigatelni qurumdan va saqichsimon cho'kmalardan tozalash;
- dvigatelning quvvatini 15–17% oshirish;
- dvigatel qismlari ta'mirlash narxini 2–3 marta kamaytirish;
- titrash va shovqinni pasaytirish;
- chiqindi gazning zahrini 70 – 80% kamaytirish.

**Kremniy dioksidi.** Kremniy dioksidi  $\text{SiO}_2$  ning nanozarralari hayratlanarli darajadagi xossaga ega: agar ularni qandaydir modda sirtiga qoplansa, ular sirt molekulari bilan birlashib, sirtga kir va suv yuqmaydigan bo'lib qoladi. Bu zarra yordamida yasalgan nanoqoplamaning o'z-o'zini tozalash xossasi oyna, plitka, yog'och, tosh va boshqalarni turli ta'sirlardan himoya qiladi. Ifloslik zarralari himoya qatlamining ichiga kiraolmaydi va yopisha olmaydi, suv esa osonlikcha undan oqib chiqib barcha kirlarni yuvib ketadi.



6.13-rasm. O'z-o'zini tozalovchi nanoqoplamaning ishlash prinsipi

Nanotexnologlar qanday qilib, faqatgina yog'och va toshlarnigina himoyalashni emas, balki matolarni ham saqlashi ham mumkin. Mato iplariga chuqur kirib boruvchi,  $\text{SiO}_2$

nanozarrasining bir litr suvdagi aralashmasi 5–30 m<sup>2</sup> yuzali matoga ishlov berish uchun yetarlidir. Matoga qoplama tortilgandan so‘ng havoni yaxshi o‘tkazadi, lekin namlikni o‘tkazmaydi. Bu qoplama ishqalashga chidamli, egiluvchan, quyosh nuridan, issiqdan va yuvishdan buzilib qolmaydi.

**“Aqlli” moddalar.** Nanokimyoning asosiy amaliy tatbiqi turli nanomoddalar ishlab chiqarishdir. Nanozarralarning noyob xossalari tufayli, ular asosida yaratilgan juda ko‘p moddalar “oddiy” lariga nisbatan ko‘p xossalari bo‘yicha ustunlikka ega.

Masalan, nanotexnologiyalar vositasida olingan metallning chidamliligi, oddiysinikidan 1,5 – 2 baravar, ba’zi hollarda 3 baravargacha katta bo‘ladi. Bunday tashqari qattiqligi 50 – 70 marta, zanglashga chidamliligi esa 10 – 12 marta katta bo‘ladi.

Noyob xossali nanomoddalarning turli tumanligi inson tasavvurini ajablantiradi: bular samolyotlardan tortib kesuvchi asboblargacha ishlatiladigan o‘ta yengil, o‘ta pishiq nanoqoplamlar, o‘z-o‘zini tozalovchi matolar, odamni radionurlarning yomon ta’siridan saqlovchi moddalardir.

“Aqlli” moddalar atrof-muhit o‘zgarishiga faol javob qaytaradi va o‘z xossalarini holatga qarab o‘zgartiradi.

Nanokimyoy, biz ko‘nikib qolgan oddiy sanoat moddalari xossalarini yaxshilash bilan birga “Aqlli moddalar”ni yanada keng tarqalishiga olib kelmoqda.

**Biomimetik moddalar.** Bunday moddalarga eng ko‘p tarqalgan misol sifatida, o‘zining mustahkamligi va elastikligi bilan barcha inson yaratgan moddalardan sifatli bo‘lgan o‘rgimchak to‘rini keltirish mumkin. Bu biomimetiklarning asosini sun’iy oqsillar tashkil qiladi. O‘zining tabiiy qardoshlariga o‘xshab bu oqsillar ham aminokislotalardan iborat bo‘lib, ularni ribosomalar emas, balki inson sintez qilgan. Agar oddiy oqsillar 20 ta noyob aminokislotalar ketma-ketligidan tuzilgan bo‘lsa, biomimetiklar uchun oqsillar bitta aminokislotalarning qayta-qayta ulanishidan tashkil topgan. Shunday qilib, yagona elementdan tashkil topgan oqsillar o‘xshash – poliaminokislotalar olinadi. Shundan keyin bu

oqsil bloklarini istalgan ko‘rinishda bir-biri bilan bog‘lash, yoki ularga bo‘yoqlar, fotofaol, elektrofaol molekulalarni biriktirish mumkin. Bunda har safar yangi ajoyib xossali moddalar hosil bo‘ladi.

Ma‘lumki, tabiat turli xil imkoniyatli juda ko‘p oqsillarni yaratgan. Ularning ko‘pchiligi tashqi muhitning o‘zgarishiga faol javob qaytaradi va moslashadi. Sun‘iy biomimetiklar o‘zlarining xossalari bilan tabiiy oqsillarga o‘xshab uncha katta bo‘lmagan tashqi ta’sirlarga: nurlanish, issiqlik, elektrotok, zararli moddalarga javoban “aqlililigini” namoyon etadi. Ular asosida ekologik monitoring o‘tkazuvchi nanotexnologiya va nanoqurilmalarga optik sezgir moddalar yaratilgan.

Masalan, temperaturani yarim darajaga oshirsak, sezgir modda darhol o‘z rangini o‘zgartiradi, keyin yana daslabki holatiga qaytadi. Ozgina elektr toki o‘tkazilsa, tizim rangini o‘zgartiradi. Uning yonida nashatir spirti yoki hatto juda kuchsiz hidli idish ochilsa, tizim nur chiqara boshlaydi, yopilsa, go‘yo hech narsa bo‘lmagandek nurlanish yo‘qoladi. Eng qiziqarlisi, bunda modda tashqi ko‘rinishida hech narsa sezilmaydi – barcha qayta jarayonlar inson ko‘zi payqamaydigan ichki o‘zgarishlar hisobiga sodir bo‘ladi. Bu moddalar ichida biodegradatsiyalanadigan, ya’ni ma’lum vaqtdan so‘ng tabiiy tarkiblovchilarga tezda ajrab ketuvchi moddalar katta qiziqish uyg‘otadi. Ular yordamida qilingan o‘rovchi biomoddalar metall va plastikli o‘rovchi moddalarga nisbatan atrof-muhitni kam ifloslantiradi.

### 6.3. Almazoid – kelajak nanomoddasi

Olmosning noyob xossalari qadimdan olimlar diqqatini o‘ziga tortib kelgan. Bunga sabab, birinchidan, olmos kristali panjarasida har bir uglerod atomi to‘rtta boshqasi bilan mustahkam C-C kovalent bog‘ hosil qilib, olmosga ajoyib qattiqlik beradi. U 1050 GPa bosim va 1800°C temperaturaga bardosh beradi.

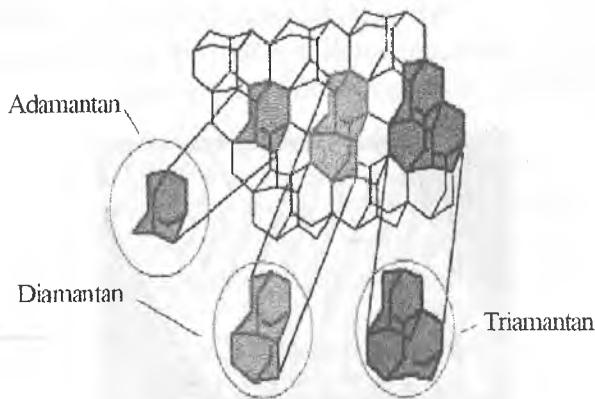
Ikkinchidan, bu qimmatbaho kristall Yer sharida juda ko‘p tarqalgan, neft, tabiiy gaz, yog‘och, ko‘mir va grafit tarkibiga



kiruvchi oddiy uglerod atomlaridan tashkil topgan. Bizning sayyoramizdagi uglerod miqdori  $6 \cdot 10^{18}$  tonnani tashkil qiladi, bu insoniyat madaniyatining butun tarixi davomida qurgan binolari va ishlab chiqargan buyumlaridan millionlab marta ko'pdir.

Tabiiy olmos kamyoab va qimmat bo'lmaganida, o'zining ajoyib xossalariga ko'ra sanoat va tibbiyotda ko'plab qo'llanilgan bo'lar edi. Uglerod ko'p tarqalganligi sababli olimlarda arzon uglerodli moddalardan sun'iy olmos olish usullarini ishlab chiqish fikrini paydo qildi. Natijada bunday usullar ishlab chiqildi, bugun sun'iy olmos sanoatning ko'p sohalarida – elektronika, metallni qayta ishlash, aviakosmik, avtomobil va kemasozlikda bebaho modda sifatida ishlatilmoqda.

Nanotexnologiyalarning rivojlanishi natijasida nanometr o'lchamli olmos olishga qiziqish paydo bo'ldi. Almazoid – makroskopik olmosning eng kichik zarralari, g'ishtchalari ekanligi to'g'risidagi g'oya ilgari surildi, bu zarra olmosning tetraedrik tuzilishini to'liq takrorlaydi deb taxmin qilindi.



6.14-rasm. Almazoidning tuzilishi

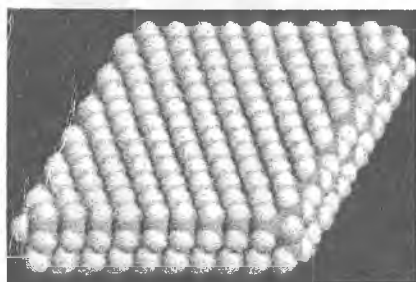
Bunday elementar g'ishtchalar – almozoidlar quyidagicha nomlarga ega bo'ldi: adamantan ( $C_{10}H_{16}$ ), diamantan ( $C_{14}H_{20}$ ) va triamantan ( $C_{18}H_{24}$ ). Almozoidlarda uglerod atomlari bir-birlari

bilan kovalent bog‘langan bo‘lib, zarra sirtidagi atomlarning bo‘sh bog‘lari vodorod atomlari bilan “band”. Ko‘p vaqt bu birikmalar hayoliy deb hisoblangan, chunki ularni atrof-muhitdan ajratib ham, termokimyo usullar bilan ham sintez qilib bo‘lmasdi. 1957-yili u tabiatda topildi ya'nialmazoidni xom neftdan ajratib olindi.

Almazoidlar kristali turli fazoviy tuzilishga ega bo‘lishi mumkin, lekin barchasining asosiy tavsiflari bir xil: Yung moduli 1050 GPa dan katta, suyuqlanish temperaturasi 1800°C dan yuqori, zichligi 3500 kg/m<sup>3</sup>. Shuning uchunalmazoiddan qilingan har qanday obyekt po‘latdan qilinganga nisbatan ancha katta qattqlikka va yuqori suyulish temperaturasiga ega bo‘lib, boshqa moddalardan juda yengil bo‘ladi.

Almazoid – uglerod atomlari huddi olmosdagi uglerodlardek joylashgan, tetraedrik fazoviy panjara hosil qiluvchi uglevodorod zarrasidir.

Almazoidlar olmosga yaqin xarakteristikaga ega bo‘lgani uchun inson hayotining ko‘p jabhalarida keng qo‘llaniladi. Bu jabhalar avvalo mikro- va nanoelektronika, tibbiyot, mashinasozlik, metallni qayta ishlash, dvigatellar ishlab chiqarish, samolyotsozlik va transport. Ba’zilarini qisqacha ko‘rib o‘tamiz.



6.15-rasm. Almazoid parda modeli

Nanoolmos vaalmazoid pardalar elektronikaning turli qurilmalarida, jumladan, maydon tranzistorlarida, elektron nur qurilmasida, optik kompyuterlarda, MEMS (Micro Electric

Mechanical System) va NEMS (Nano Electric Mechanical System) qurilmalarda keng qo'llash istiqboliga ega.

Nanoolmoslarning zamonaviy tatbiqlaridan biri elektronika, radiotexnika, optika, tibbiyot, mashinasozlik, zargarlik sanoatlarida elektron va optik moddalar sirtini silliqlashdan iboratdir. Nanoolmos tarkibli moddalar yordamida ixtiyoriy geometrik shakldagi qattiq jismlarning 2–8 nm li notekis yuzasini oynadek silliq qilish mumkin. Nanoolmoslarning qo'llanilishi mikroabraziv va silliqlovchi tarkiblar, yog'lovchi moylar, abraziv uskunalar, polimer kompozitlar, rezina va kauchuklar, magnitik yozuvchi tizimlar sifatini sezilarli darajada yaxshilaydi.

Nanoolmoslarning polimerlar, rezina va plastmassalarga kiritilishi, ularning pishiqligi va yemirilishga chidamliligini oshiradi. "Olmos"li avtomobil shinalari tayyorlanadigan rezinalar teshilishga va temperatura o'zgarishlariga chidamli bo'lib, hozirda eng chekka shimol va jazirama cho'llarda muvaffaqiyatli ishlar qilinmoqda.

Nanoolmoslar moylovchi yog'lar va sovutuvchi suyuqliklarda ishlatilmoqda. Nanoolmoslarning moylarda ishlatilishi motorlar ishlash muddati va transmissiyasini oshiradi.

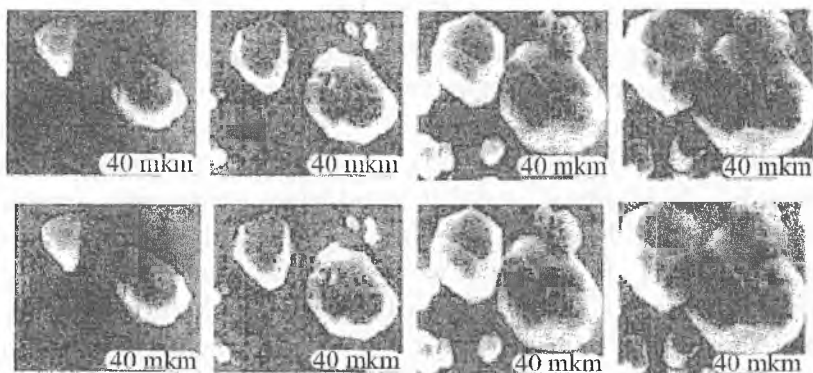
Almazoid o'zining noyob xossalariga ko'ra XXI asrning eng ommaviy va arzon moddasi bo'lishi ehtimoldan holi emas.

### **Nanoolmoslarning olinishi**

Hozirgi kunda olmos nanozarralarini olishning bir qancha usullari mavjud. Ular orasida keng tarqalganlari quyidagilar:

- tabiiy olmosdan fizik usullarda nanozarralar olish;
- o'ta yuqori bosim va temperaturalarda sintez qilish yo'li bilan olish;
- elektron va ion – nurli usullar bilan olish, bunda uglerodli modda elektron yoki argon ionlari oqimi bilan nurlantiriladi;
- yuqori temperatura va bosimli uglerod bug'ini kimyoviy cho'ktirish bilan olish.

6.16-rasmda 1000°Cli gaz holatidagi ugleroddan olmos nanozarrasining tug'ilish va o'sish jarayonlari tasvirlangan.



6.16-rasm. Mis taglikka joylashtirilgan o'zak olmos kristallarining  
 a) 0 min., b) 15 min., d) 30 min., e) 60 min. vaqtdan so'nggi holatlari

Nanoolmoslar yana detonatsion usulda olinadi, chunki, portlash vaqtida hosil bo'ladigan bosim va temperatura nanoolmoslar paydo bo'lishi uchun yetarlidir.

Murakkab almazoid nanostrukturalarni olish uchun avtomatlashgan mexanosintez g'oyasi istiqbolga ega bo'lib, u aniq nanomanipulatorlar paydo bo'lishi bilan amalga oshadi.

Bugun olimlar kerakli sharoitlarda va kerakli zichlikdagi turli moddalarni probirkada aralashtirib, murakkab molekular birikmalar olishga muvaffaq bo'lmoqdalar.

#### 6.4. Kremniy – istiqbolli nanomodda

Avval ko'rganimizdek, yarimo'tkazgichli kremniy monokristallariga Mendeleev jadvalining III va V guruh elementlari atomlarini kiritganimizda, ular kristall panjara tugunlarida joylashib *n*- yoki *p*-tur o'tkazuvchanlikni ta'minlaydi. Kremniyni bulardan boshqa elementlar, masalan, o'tish guruhlar, nodir Yer metallari atomlari bilan legirlanganda boshqacha holat kuzatiladi. Bu atomlarning kremniydagi zichliklari izotoplar kiritish, aktivatsion tahlil usullarida aniqlanganda ularni elektr

o'tkazuvchanlikda qatnashayotganlaridan bir nechadan yuzlab marotabagacha farqli ekanligi ko'rinadi.

Demak, kristallga kiritilgan atomlarning umumiy miqdori ularning elektrofaol qismidan katta farq qilar ekan (6.4-jadval).

#### 6.4-jadval

### 3d-o'tish elementlarining kremniydagi eruvchanligi

Element nomi	Se	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
$N_{\text{um}}$	$10^{16}$	$10^{16}$	$10^{17}$	$2 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$	$10^{16}$	$7 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{16}$
$N_{\text{ef}}$	$10^{14}$	$10^{14}$	$2 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{14}$	$10^{16}$
$\Delta N$	$10^2$	$10^2$	10	4	10	$5 \cdot 10^1$	$1,4 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	2

Tadqiqotlarning ko'rsatishicha, bunday holat kirishma atomlarining sirtqi elektron qobiqlarining kremniy atominikidan farq qilishi hamda ularning o'zaro elektron bog'lanishli birikmalar hosil qila olmaslikligidir.

O'tkazilgan tajribalardan ma'lum bo'ldiki, Si da elektrofaol va neytral atomlari farqi eng katta bo'lgan Ni va Cu atomlari bilan legirlangan na'munalarni, diffuziya jarayonidan keyin UK va elektron mikroskoplar yordamida o'rganilganda kremniyini butun hajmi bo'yicha bir tekis taqsimlangan qora nuqtalar paydo bo'lishi kuzatildi. Bu nuqtachalarning shakli va taqsimoti kremniyning *n*-yoki *p*-turidagi, undagi dislokatsiyalarning zichligi ( $10 \div 10^7 \text{ sm}^2$ ), legirlovchi elementlar turi (B, Al, P, Sb) va zichligi ( $10^{12} \div 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ ), optik faol kislorod zichligi ( $10^{16} \div 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ ) ga bog'liq bo'lmagan holda, diffuziya temperaturasi va sovutish tezligi bilan belgilanadi.

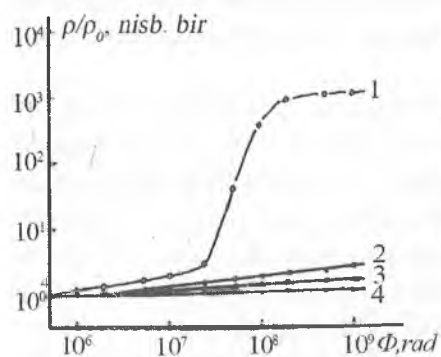
Eng yuqori temperaturalarda ( $1300 - 1310^\circ\text{C}$ ) maxsus pechlarda diffuziya qilinib, 3000 grad/s tezlik bilan toblangan Si<Ni> na'munalarda bu qora dog'larning o'lchamlari 10 nm dan, sovutish tezligiga bog'liq holda 100 nm va undan ham katta bo'lishi

mumkinligi aniqlandi. Bu jarayonlar natijasida kremniydagi dislokatsiya o'lechlari va zichligi sezilarli darajada o'zgarishi kuzatilmadi. Bu dog'larning kimyoviy tarkibi tahlil etilganda, ular, asosan, nikel atomlaridan tashkil topganligi hamda tarkibida qisman kislorod va uglerod atomlari bo'lgan klasterlar ekanligi aniqlandi. Tarkibida bunday mikro va nanobirikmalarning bo'lishi kremniy kristalllariga alohida xususiyatlar baxsh etadi.

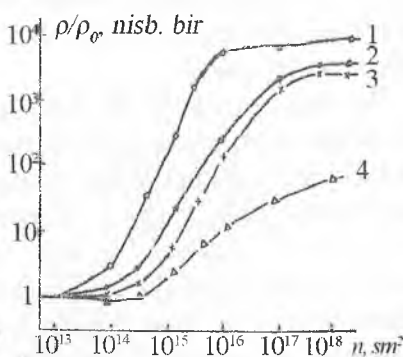
Bunday nanobirikmalarga ega bo'lgan tizimlar o'lechlari kichraytirilgan tizimlarning eng kichik bo'lgan holati desa bo'ladi, ya'ni yarim o'tkazgichli yoki dielektrik asosda nanoo'lehamli klasterlar bo'lgan nol o'lehamli tizimdan iborat. Bunday klasterlarda energetik holatlar spektrining diskretligi, ularda zarralar sonining ko'pligiga qaralmasdan ularni sun'iy holda atomlarga o'xshatish mumkinligini ko'rsatadi. Boshqariladigan texnologik jarayonlar yordamida bunday nanobirikmalarning o'lechlari, shakli va tarkibini boshqarish orqali qo'yilgan talablarga javob beradigan keng imkoniyatli moddalar olish mumkin. Misol uchun, Si<Ni> namunalariga temperatura ta'siri o'rganilganda, odatdagi kirishma atomlarining nomuvozanat holatdan muvozanat holatga o'tishi bilan bog'liq bo'lgan erkin zaryadlarning kamayishiga, aksincha, boshlang'ich davrda zaryadlarning ko'payishi va  $\rho(T)$ ning qo'ng'iroqsimon o'zgarishini ko'ramiz (3.4-rasm). Buning mohiyati issiqlik ta'sirida boshlang'ich davrlarda klasterlarning parchalanishi, ulardan ajralib chiqqan alohida atomlarning elektrofaol holatlarga o'tishi, shu bilan bir vaqtda UK faol kislorodning zichligini ham ortishi ekanligi tajribalarda ko'rsatilgan. Bunday Si<Ni> namunalarini UK, elektromikroskoplar va rentgen qurilmalari yordamida o'rganilganda, avval ko'rilgan hajmi bo'yicha bir tekis taqsimlangan nanobirikmalarning tarqalishi, dislokatsiyalarga o'tirib qolishi, dislokatsiyasiz kremniyda esa o'ziga xos halqachalar hosil qilishi kuzatiladi. Bu jarayonlarda kremniy hajmini nanobirikmalardan tozalanishi natijasida uning elektrik va optik xususiyatlarining o'zgarishi yuz beradi.

Kirishma atomlari birikmalari bo'lgan kremniyani tezlashtirilgan neytronlar yoki  $\gamma$ -nurlar bilan nurlantirilganda, ularning elektr o'tkazuvchanligining o'zgarishi ham kiritilgan kirishma atomining turiga qarab har xil bo'lishi kuzatiladi. Ma'lumki, yarimo'tkazgichli kremniy monokristallarini neytronlar hamda  $\gamma$ -nurlar bilan nurlantirilganda siljigan Si atomi va vakansiya turidagi nuqsonlar vujudga kelib, ularning kristall nuqsonlari bilan o'zaro ta'sirlashuvi natijasida har xil elektrik va optik faol zarralar birikmalari hosil bo'ladi va kristall xususiyatlarini o'zgartirib yuboradi. Lekin, Si<Ni> namunalarda  $\gamma$ -nurlar ta'siri  $I \approx 10^9$  rad. bo'lguncha qariyb sezilmaydi (6.17-rasm).

Neytronlar bilan nurlantirilganda esa chuqur sathli kirishmalar bilan legirlangan namuna (2-4)lar solishtirma qarshiligi ( $\rho$ ) ortishining boshlang'ich nuqtasi nazorat namunasi (1)nikidan 10-15 marta yuqoriroq dozalarda yuz beradi va uni ortish sur'ati ham bir muncha pastroq bo'ladi (6.18-rasm).



6.17-rasm. Nazorat (1) va Si<Ni> (2-4) namunalari solishtirma qarshiligining  $\gamma$  nurlanish ta'sirida o'zgarishi



6.18-rasm. Nazorat (1), Si<Mn> (2), Si<Co> (3) va Si<Ni> (4) namunalari solishtirma qarshiligining neytronlar bilan nurlantirish ta'sirida o'zgarishi

Namunalarni nurlantirilgandan keyin infraqizil mikroskop (IQ) va elektron mikroskopda tekshirilganda, neytronlar ta'sirida

nanobirikmalarning taqsimotida ham, shakllarida ham sezilarli o'zgarishlar bo'lgani ko'rinadi.

Mana shunday o'ziga xos o'zgarishlarni kremniy Cu, Cd, Co, Zn, Ce, Mn kabi elementlar atomlari bilan legirlanganda ham kuzatilgan. Kremniyda, bu atomlarni umumiy zichligi kamroq bo'lganda diffuziya'lan keyin kuzatiladigan qora dog'larni UK va elektron mikroskoplar yordamida aniqlash qiyinroq, lekin, atomiy kuchli mikroskoplar, EPR kabi usullarda kirishma atomlarining nanobirikmalari paydo bo'layotganini kuzatish mumkin. Marganets bilan legirlangan kremniyda  $(Mn^{2+})^4$  turdan klasterlar vujudga kelishi va ular kristalldagi boshqa turdagi nuqsonlar bilan o'zaro ta'sirlashib, har xil to'liq uzunlikdagi nurlarni yuta oladigan optik markazlar hosil qilishi mumkinligi tajribalarda isbotlangan.

Kremniyda kirishma atomlarining nanobirikmalarini hosil qilish texnologiyalarining takomillashuvi natijasida bir emas, ikki va undan ortiq chuqur energetik holatlar hosil qiluvchi kirishma atomlarini kiritib, ularning turli birikmalarini hosil qilish imkoniyatini yaratdi.

Buning natijasida kremniy monokristallari hajmida turli xil kirishma atomlaridan iborat nanoklasterlar tizimini hosil qilish imkoniyati vujudga keldi. Marganets va selen bilan legirlangan kremniyda  $(Mn^{2+})^2-(Se^{-})^2$  klasterlarining mavjudligi kremniyni yorug'likni xususiy yutish sohasi yonida yana klasterda yutilish sohasi paydo bo'ldi. Mana shunday klasterlarni boshqa elementlar bilan ham paydo qilish, ularning miqdorini va hajm bo'yicha taqsimotini boshqara oladigan texnologiyalar yaratilsa, nanobirikmali kremniy monokristallarining yorug'likni yutish spektrini kengaytirish imkoniyati paydo bo'lar edi.

Hozirgi zamonaviy texnologiyalar yordamida olinayotgan kirishma atomlarining mikro va nanobirikmalari bo'lgan kremniy monokristallarining xususiyatlarini o'rganishning o'zi ham bunday tizimlarni amaliyotda qo'llanishi uchun naqadar ahamiyatli modda ekanligini ko'rsatmoqda.



Kremniyning elektron texnikasida zarur bo'lgan xususiyatlarini hosil qilish va ularni boshqarishning yana bir usuli -- bir necha nanometrlar o'lchamlaridagi bir-biridan fazoviy ajralgan nanotuzilmalarni shakllantirishdir. Bu holda tizimdagi zaryad tashuvchilar kvant o'lchamli effektlari hisobiga qo'shimcha energiyaga ega bo'lar edi. Odatda, kvant o'ralar, iplar va nuqtalar (yupqa qatlamlar, simlar, kristallga kiritilgan moddalarning nanobirikmalari)ni hosil qilish nisbatan murakkab jarayon. Hozircha bu sohada erishilgan natijalar bunday kremniy tuzilmalarini ko'p sohalarda qo'llashga yetarli emas.

Bu masalada g'ovakli kremniydan foydalanish istiqbolliroq deyish mumkin. Bu modda elektrokimyoviy ishlov berish tufayli juda ko'p sonli mayda g'ovaklar hosil bo'lgan C-Si monokristallidan iborat. Ayrim na'munalarda g'ovaklarning zichligi juda katta bo'lganligi uchun ular ulanib ketishi mumkin va Si ning kimyoviy yedirilmagan qismlari o'zgaruvchan ko'ndalang kesimli egri-bugri chiziqlar tizimidan iborat bo'lib qoladi. Bunday kremniyli iplarni va ularni ajratib turuvchi klasterlarni elektron mikroskop yordamida g'ovakli kremniydagi eng kichik ko'ndalang kesim yuzasi bir necha nanometr o'lchamida bo'ladi. G'ovakli kremniy, odatda, c-Si plastinasi sirtida qatlam sifatida shakllantiriladi va shuning uchun mikroelektronikada qo'llanish uchun juda qulay.

O'tgan asrning oxirlarida uy temperaturasida g'ovakli kremniyda F.I.K. 10% gacha bo'lgan qizil-qo'ng'ir rangli fotoluminessensiyasi kuzatildi va uning mualliflari g'ovakli kremniydagi nanotuzilmalarda kvant o'lchamli effektga bog'liq deb atashdi.

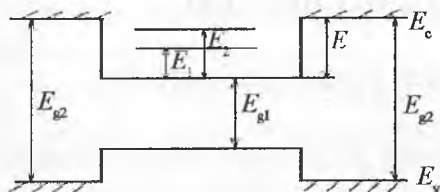
Keyinchalik bunday moddada elektroluminessensiya hodisasi kuzatildi va bu yarimo'tkazgichdan elektr toki o'tganda elektron hamda kovaklarning qo'zg'otilishi hamda keyinchalik ularning rekombinatsiyalashuvi natijasida yuzaga kelishi ko'rsatildi. Shu asnoda g'ovakli kremniydan yorug'lik chiqaruvchi qurilmalar ishlab chiqarish istiqbollari tadqiq etila boshlandi.

Shunday qilib, o'zining fizik va kimyoviy xossalari, texnologiyalarining rivojlanganligi va xomashyosini Yer yuzasida tarqalganlik darajasi bilan yarimo'tkazgichli kremniy kelajakda nanomodda sifatida ham istiqbolli modda bo'lib qoladi deyish mumkin.

### **Bobga doir savol va mashqlar**

1. Nanokimyo nimani o'rganadi?
2. Fulleren molekulasining tuzilishi qanday?
3. Nanonaychanning asosiy xossalarini ayting.
4. Nanozarralar olishning dispergatsion usulini tushuntiring.
5. TTT moddalar qanday foydali jihatlarga ega?
6. Sun'iy biomimetiklar tashqi ta'sirlarga qanday moslashgan?
7. Olmos nanozarralarini olish usullarini ko'rsating.
8. Almazoidlar inson hayotining qaysi jabhalarida keng qo'llaniladi?
9. Kremniyda kirishma atomlarining nanobirikmalarini hosil qilish qanday natija berdi?
10. G'ovakli kremniydan foydalanish qanday afzalliklar yaratadi?
11. Kremniy dioksidi  $\text{SiO}_2$  ning muhim xossalarini ko'rsating.
12. Nanotexnologiyalar vositasida olingan metall va oddiy metallarni farqlab ko'rsating.
13. Vakuumda joylashgan, radiusi 1 nm bo'lgan kvant nuqtaning elektr sig'imini aniqlang va uni Yer shari sig'imi bilan baholang.
14. 1 V kuchlanish ostidagi kvant nuqtaning zaryadi qanchaga o'zgaradi? Bu o'zgarishni elektronlar soni orqali ifodalang.
15. 1 nm radiusli kvant nuqtani elektron zaryadiga teng miqdorda zaryadlash uchun qancha eV energiya sarf etiladi?
16. Kvant o'ra hosil qiluvchi turli yarimo'tkazgichlar ta'qiqlangan sohasi o'rtalari bir-biri bilan mos tushadi va ularning

kattaliklari  $E_{g1} = 1,43 \text{ eV}$ ,  $E_{g2} = 1,78 \text{ eV}$ ,  $E_1 = 0,05 \text{ eV}$ ,  $E_2 = 0,175 \text{ eV}$  ga teng (6.19-rasm). Mazkur kvant o'radan tayyorlangan nanoqeterotuzilma asosli fotoqabullagich matritsaning ishchi spektral diapazonini baholang.



6.19-rasm. Kvant o'raning energetik sxemasi

17. Zichligi  $7,8 \text{ g/sm}^3$  bo'lgan, bitta elektron bilan zaryadlangan nanozarra  $400 \text{ m/s}$  tezlik bilan elektr maydoniga uchib kiradi va  $1 \text{ V}$  potentsiallar farqini uchib o'tgach, o'z tezligini uch marta orttiradi. Ushbu nanozarraning radiusini nanometrlarda ifodalang.

## VII bob. ELEKTRON ASBOBSOZLIKNING QO‘SHIMCHA MODDALARI

### 7.1. Elektron asboblari haqida ma'lumotlar

Elektron asboblari va qurilmalar ishlab chiqarish texnologiyasi-ning vazifasi – zamonaviy mikroelektron apparaturalar yaratish uchun kerak bo‘ladigan asosiy bazaviy elementlar ishlab chiqarish hisoblanadi.

Elektronika – fan va texnikaning elektron va boshqa zaryadli zarralarning elektromagnit maydon bilan vakuumda, gazli muhitda, qattiq jismda hamda kristall panjaradagi atom va molekularlar ichidagi o‘zaro ta’sirlashuv hodisalarini o‘rganadigan sohasidir.

Elektronikaning amaliy vazifasi quyidagi usullarni ishlab chiqish hisoblanadi:

- elektromagnit energiyasini o‘zgartirish uchun shu o‘zaro ta’sirlashuvdan foydalanadigan elektron asboblarni yaratish;
- elektron asbob va qurilmalarni ishlab chiqarish texnologiyasining ilmiy asoslarini yaratish.

Elektronika rivojlanishning bir nechta bosqichlarini bosib o‘tdi, bu vaqt ichida elementlar bazasining bir nechta avlodlari bir-birini almashtirdi:

1. Elektron vakuumli asboblarning diskret (uzlukli) elektronikasi.
2. Yarimo‘tkazgichli asboblarning diskret elektronikasi.
3. Mikrosxemalarning integral elektronikasi (mikroelektronika).
4. Funksional mikroelektron qurilmalarning integral elektronikasi (funksional mikroelektronika).

Birinchi avlodning element bazasi (elektron vakuumli asboblarning diskret elektronikasi) birinchi jahon urushi arafasida birlamchi elektron vakuumli asboblarni -- avvaliga ikki, keyinchalik uch elektrodli elektron lampalarning yaratilishi bilan paydo bo'ldi. Birinchi jahon urushidan keyin lampali elektron texnika katta sur'atlar bilan rivojlandi.

Birinchi avlod qurilmalarida aktiv va passiv elektrodialemlar (rezistorlar, kondensatorlar, induktivlik g'altaklari, transformatorlar, ulagichlar va hokazolar) panelga mexanik usulda birlashtiriladi va simli o'tkazgichlar yordamida o'zaro elektr ulash uchun kavsharlanadi yoki payvandlanadi. Keyinchalik ishlab chiqilgan bosma o'tkazgichli platalar qurilmalar ishoniqliligini ta'minladi hamda ishlab chiqarishni avtomatlashtirishni nisbatan osonlashtirdi. Shunga qaramasdan, elektron vakuumli asboblarni texnologiyasining murakkabligi, xizmat qilish muddatining qisqaligi, tashqi o'lcham va massasining kattaligi, elektr energiyani ko'p talab qilishi elektronika ikkinchi avlodining paydo bo'lishiga sabab bo'ldi.

XIX asrda yarimo'tkazgichlarni fizikaviy tadqiq qilish boshlangan bo'lsada, ikkinchi avlodning element bazasi (yarimo'tkazgichli asboblarning diskret elektronikasi), shu bilan bir qatorda yarimo'tkazgichlar texnologiyasi tranzistor (inglizcha - *transresistance* so'zidan olingan bo'lib, o'tish qarshiligi ma'nosini beradi) paydo bo'lgandan keyingina yaratildi. Birinchi nuqtali o'tishli tranzistor germaniy asosida amerikalik olimlar D. Bardin, U. Brattein, U. Shokli tomonidan 1947-yil 23-dekabrda kashf qilingan edi. 1950-yilda birinchi yassi *p-n-p* o'tishli tranzistor germaniy quymasini eritmadan tortish usuli bilan tayyorlandi. 1953-yilda eritib qotirish usuli yordamida nisbatan yupqa bazali (5 mkm atrofida) qotishmali tranzistorlar tayyorlandi. Yarimo'tkazgichli asbobsozlik rivojlanishining birinchi bosqichida asosan germaniydan foydalanildi, chunki

uning monokristallarini olish kremniy monokristallarini olishga qaraganda ancha sodda edi va bunda yuqori temperaturali qurilmalar va o'ta chuqur tozalash talab qilinmasdi. 1954-yilda birinchi o'stirilgan  $p-n$  o'tishli kremniyli tranzistorlar paydo bo'ldi. Bundan keyingi yillarda diffuziya usuli yordamida tuzilmalar hosil qilish intensiv ravishda ishlab chiqila boshlandi va 1958-yilda mezatuzilmali diffuziyali tranzistorlar yaratildi. Meza deb atalishiga sabab mezatuzilmaning ko'ndalang kesimi tekis qirni (ispancha *mesa* – plato) eslatadi. 1959-yilda planar (inglizcha *planar* – tekis) texnologiyaning paydo bo'lishi keyingi qadam bo'ldi. Kremniy plastina sirtida izolatsiyalovchi kremniy dioksidining o'stirilishi va unda fotolitografik jarayonidan foydalanib berilgan konfiguratsiyali topologik rasmning hosil qilinishi asboblardagi elementlartuzilmalarining o'lchamlarini o'ta aniqlik bilan nazorat qilish imkoniyatini berdi. Planar texnologiya ko'p yillar davomiga yarimo'tkazgichli asboblarda (YaO'A) va integral mikrosxemalar (IMS) ishlab chiqarishda rivojlanishni ta'minladi. 1960-yilda bu bilan bir qatorda texnologiyada asosiy usullardan biri bo'lgan monokristall taglikda kerakli qalinlikdagi va elektrofizik xossaga ega yarimo'tkazgichli qatlamni epitaksial o'stirish jarayoni ishlab chiqildi. Epitaksial texnologiya yuqori bazali va kichik qarshiliklarga kollektorli, takroriyli yuqori va sochilish quvvati katta bo'lgan tranzistorlar yaratish imkoniyatini berdi.

30-yillarda maydon tranzistorlarining ishlash prinsiplari ma'lum edi. 1958-yilda sifatli monokristallarning olinishi  $p-n$  o'tishli boshqariladigan maydon tranzistorlarini tayyorlash imkoniyatini berdi.

Tarkibida o'n va yuz minglab tarkibiy tuzilmalar – diodlar, tranzistorlar, rezistorlar va boshqalar bo'lgan elektron qurilmalarni yig'ish muammolari uchinchi avlodning element bazasining (mikrosxemalarning integral elektronikasi yoki mikroelektronika) hamda yarimo'tkazgichli ishlab chiqarishdagi texnologiyaning

yaratilishiga sabab bo'ldi. Bu ko'plab diskret tarkibiy tuzilmalarni bir-biri bilan ulashdan qutulish imkonini berdi.

1959-yili germaniy kristalida mezadiffuzion texnologiya yordamida birinchi marta triggerning mikrosxemasi tayyorlandi. 1960-yilda planar texnologiya bilan yaratilgan kremniyli mikrosxemalar paydo bo'ldi.

1962-yilda Kremniyni qayta ishlash texnologiyasining yaxshilanishi natijasida zatvori izolatsiyalangan maydon tranzistorlari yaratildi. 1963-yilda esa birinchi marta maydon tranzistorli mikrosxemalar ishlab chiqildi. MOYa (metall-oksidarimo'tkazgich)—tranzistorlari texnologiyasining mukammal emasligi, ularni o'tgan asrning 70-yillarigacha keng qo'llash imkoniyatini bermadi. 60-yillarning o'rtalarida sanoatda ion implantatsiya usuli paydo bo'ldi. Bu usul legirlashning zichligi va chuqurligini boshqarish aniqligini ancha oshirdi.

70-yillarning boshida ion-plazmali changlatish usulidan intensiv foydalana boshlandi, elektron litografiya usuli ishlab chiqildi, tuzilmalarni suyuq yemirgich va eritkichlarni qo'llanmasdan quruq qayta ishlash texnologiyasi paydo bo'ldi. Mana shu davrdan boshlab bipolar asboblar va MOYa-tranzistorlari bazasida yaratilgan mikrosxemalar jadal rivojlana boshladi. Shu vaqtning o'zida topologik chizmalar va fotoshablonlarni nazorat qilish uchun EHMLardan foydalanila boshlandi. Bu ularning sifatli bo'lishiga sabab bo'ldi hamda mikrosxemalarni mashinali loyihalash tizimining yaratilishiga olib keldi. 70-yillarning oxirida mikro EHMLar yordamida boshqariladigan avtomatlashgan texnologik jarayonlar va qurilmalar paydo bo'ldi.

Mikrosxemalar bajarishi kerak bo'lgan vazifalarning murakablashuvi ularning integratsiya darajasining oshishiga olib keldi. Hozirgi vaqtda integratsiyaning o'ta yuqori darajasiga erishdikki, endi uning bundan ham oshishiga fizik va texnologik cheklashlar yo'l qo'ymaydi.

To'rtinchi avlodning element bazasi (funktional mikroelektron qurilmalarning integral mikroelektronikasi yoki funktsional mikroelektronika) yanada murakkab bazaviy elementlarni yaratish yo'llarini qidirish natijasida paydo bo'ldi. Agar sxemotexnik elektronikada ba'zi bir sxemotexnik yacheykalarining elektr holati axborot tashuvchi bo'lsa, funktsional mikroelektronikada esa axborot tashuvchi bo'lib dinamik nobirjinslik hisoblanadi. Bunday mahalliy nobirjinslilik ba'zi bir cho'ziq birjinsli muhitdagi nomuvozanatli holatdan iborat bo'ladi. Funktsional mikroelektronika mahsulotlarida dinamik nobirjinsliklarning o'zaro akustik, issiqlik, elektr va magnit maydonlari bilan birgalikdagi ta'sirlardan axborotlarni qayta ishlash, yaratish va saqlash uchun foydalaniladi. Funktsional mikroelektronika mahsulotlarida diskret elektroradio elementlariga ekvivalent bo'lgan elementlarni ajratib olish qiyin yoki mumkin emas.

Elektronikaning element bazasi uzluksiz o'sib boruvchi odimlar bilan rivojlanmoqda. Yuqorida keltirilgan har bir avlod ma'lum bir davrda paydo bo'lib, o'zini oqlaydigan yo'nalishlarda mukammallashib bormoqda. Elektronika mahsulotlarining avloddan avlodga o'tib rivojlanib borishi, ularning funktsional murakkablashuvi, ishonchliligi va xizmat qilish muddatini uzaytirish, tashqi o'lchamlari, massasi, tannarxi va sarflaydigan energiyani kamaytirish, texnologisini soddalashtirish va elektron qurilmaning parametrlarini yaxshilash yo'nalishlari bo'yicha olib borilmoqda.

XX asrning 90-yillaridan boshlab nanoelektronika rivojlanmoqda va mikroelektronikaning o'rnini egallamoqda.

## **7.2. Elektron asboblari yaratishning texnologiyalari**

“Texnologiya” atamasi – san'at, ustalik, qo'ldan ish kelishlik to'g'risidagi fan ekanligini bildiradi.

Ishlab chiqarishi jarayoni korxonada xodimlari harakatining



majmuasi bo'lib, buning natijasida boshlang'ich modda va xomashyolar tayyor mahsulotlarga aylanadi. U quyidagilarni o'z ichiga oladi: ishlab chiqarishni tayyorlash, modda va xomashyolarni saqlash va nazorat qilish, energetik xo'jalikning xizmati, texnologik va nazorat-o'lchov aslahalari, mahsulotlarni tayyorlashning texnologik jarayonlari va jihozlari, yakuniy nazorat va tayyor mahsulotlarni sotish.

Texnologik jarayon ishlab chiqarish jarayonining bir qismi bo'lib, u boshlang'ich modda va yarimfabrikatlarni qayta ishlash bilan bog'liqdir. Texnologik jarayon o'ta murakkab tizim bo'lib, uning elementlariga texnologik uskuna va asboblarni ishlab chiqarish obyektlari, bajaruvchi va nazorat qiluvchi vositalar hamda texnologik va konstruktorlik hujjatlari kiradi. Texnologik jarayonning borishiga qarab, u uzluksiz, diskret (uzlukli), uzluksiz-diskret bo'lishi mumkin.

Bundan tashqari, yakka texnologik jarayonlar ham bo'lib, bularda kam miqdordagi buyumlar (masalan, noyob mikro-sxemalar) tayyorlanadi.

Umumiy texnologik jarayonda o'zgarmas chizmalar bo'yicha ko'plab buyum tayyorlanadi. Bu buyumlar ma'lum qisqa vaqt ichida tayyorlansa, ishlab chiqarish *seriyali* deyiladi. Agar uzoq vaqt davomida ishlab chiqarilsa, ishlab chiqarish *ommaviy* deyiladi.

Operatsiyali texnologik jarayon bitta texnologik operatsiyadan iborat bo'ladi:

Marshrutli texnologik jarayonlarda ketma-ketlikka keltirilgan bir qancha texnologik jarayonlar natijasida avval xomashyo, oxirgi bosqichda esa tayyor mahsulot hosil bo'ladi.

Har qanday integral mikrosxema tuzilma, tashqi qobiq va yig'ish vositalaridan, tashqi chiqishlar bilan biriktiradigan bo'laklardan tashkil topadi.

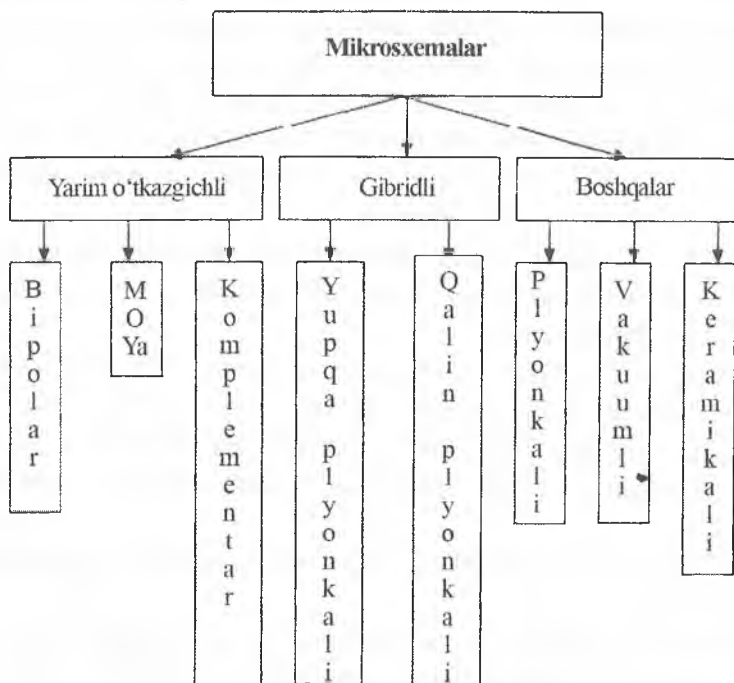
1. Tuzilma – mikrosxema imkoniyatlarining asosi hisoblanadi.

U hamma elementlar, tarkibiy kristallar, elementlararo bog‘lanishlar va kontakt yuzachalaridan tashkil topadi.

2.Qobiq-tuzilmani mexanik ta’sirlardan himoya qiladi.

3.Yig‘ish vositalari – unga kavsharlagichli qo‘ymalar: chiqish simlari, chiqish-darchalari va boshqalar kiradi.

Tuzilmalarining konstruktiv-texnologik tayyorlanishiga qarab, integral mikroshemalar uch guruhga bo‘linadi (7.1-rasm) yarimo‘tkazgichli, gibridli va boshqalar (plyonkali, vakuumli, keramikali va h.k.).



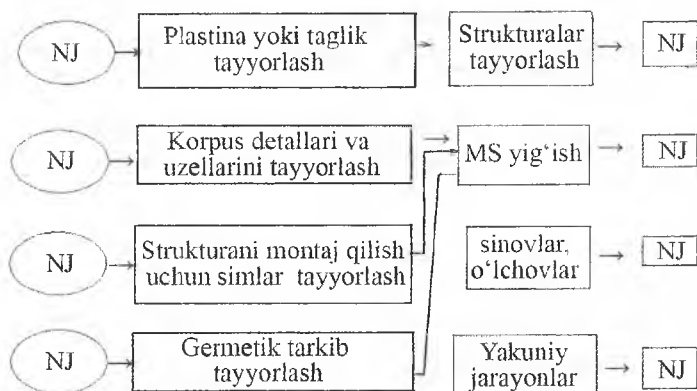
7.1-rasm. Mikroshemalarning tasnifi

Yarimo‘tkazgichli mikroshemalarda aktiv va passiv elementlar hamda hamma elementlararo bog‘lanishlar yarimo‘tkazgichning hajmi va sirtida tayyorlanadi.

Gibrid mikrosxemalarda dielektrik taglikda passiv elementlar plyonka ko‘rinishida tayyorlanib, unga faol elementlar biriktiriladi va umumiy qobiqqa joylashtiriladi.

Boshqa mikrosxemalar -- yupqa pardali, vakuumli, keramikali. Yupqa pardali mikrosxemalarda hamma elementlar va elementlararo birikmalar yupqa parda ko‘rinishida tayyorlanadi

Har qanday mikrosxemalarni tayyorlash texnologiyasida hamma mikrosxemalar uchun umumiy bo‘lgan quyidagi asosiy bosqichlarni ajratib ko‘rsatish mumkin (7.2-rasm).



7.2-rasm. Mikrosxemalar tayyorlash bosqichlari: - qobiqsiz mikrosxemalar uchun, NJ – nazorat jarayonlari

Plastina yoki tagliklar yarimo‘tkazgich yoki dielektrik moddalardan tayyorlanib, ularda tuzilmalar hosil qilinadi. IMS tayyorlashda asosiy modda kremniy Si hisoblanadi, chunki kremniyning taqiqlangan sohasi germaniy Ge ga qaraganda katta bo‘lib, ishchi temperaturalari oralig‘i kengroq, *p-n* o‘tishlarning teskari toki kichik, teshuvchi kuchlanish katta qiymatga ega bo‘ladi. Massa jihatidan kremniy Yer qobig‘ining 27,7% ni tashkil qiladi.

Mikrosxemalar tayyorlashda kremniydan tashqari arsenid galliy GaAs va boshqa yarimo‘tkazgichli birikmalar ham

qo'llanilmoqda. Gibridd va plyonkali mikroshemalarda taglik sifatida sital, fotosital, keramika, sapfir kabi moddalar ishlatiladi.

Plastina va taglik tayyorlash uchun yarimo'tkazgichli hamda dielektrik moddalar mexanik qayta ishlanadi va ularning sirti tozalanadi. Mikroshemalar ishlab chiqarish jarayoniga qo'yiladigan talablar umumiy va xususiy talablarga bo'linadi. Umumiy talablarni qisqacha quyidagi uchta holat bilan bayon qilish mumkin:

- 1) texnologik jarayonning ishonchli bo'lishi;
- 2) texnologik jarayonning tejamli bo'lishi;
- 3) texnologik jarayonning ishchilar va atrof-muhit uchun xavfsiz bo'lishi.

Xususiy talablar mikroshemalarning tuzilishida quyidagi asosiy va yordamchi moddalarning texnologik holatlaridan kelib chiqadi:

1. mikroshemalar tayyorlashning texnologik jarayonlari qayta ishlanayotgan obyektlar mikronlar o'lchamlaridagi siljishlarining yuqori darajada aniqligini ma'lum bir holatlarida qayd qilishni hamda ustma-ust tushishini ta'minlab turishi kerak;

2. texnologik jarayonlar qayta ishlanadigan obyektlar (plastinalar, tagliklar, kristallar, platalar va boshqalar) ning harakatlarini katta aniqlikda boshqarish uchun maxsus vositalar qo'llanilishi kerak;

3. texnologik jarayonlar o'ta yuqori tozalikdagi moddalar va muhim ko'rsatkichlari (temperatura, bosim, namlik, gazlarning miqdori kabilar)ni yuqori aniqlikda ushlab turiladigan sharoitda o'tkazilishi shart;

4. ishchi xonalarda statik elektr zaryadi hosil bo'lishi imkoniyati nihoyatda kamaytirilishi kerak.

Texnologik jarayonlarga qo'yiladigan bu talablar bajarilishi uchun to'la hajmli tadbirlar va ishlab chiqarish vositalaridan foydalaniladi. Bularning asosiylari quyidagilar:

1. korxonaning ishlab chiqarish faoliyatini qattiq nazorat qilish;

2. mikrosxemali me'yoiy texnik hujjat. Bunga konstruktorlik va texnologik hujjatlar kiradi.

Ishlab chiqarishning bosqichiga bog'liq holda texnologik hujjatlar quyidagi toifalarga bo'linadi:

1. IMSni tajribaviy ishlab chiqarishga texnologiya hujjat, bunga O belgisi beriladi;

2. IMSni seriyali ishlab chiqarishga texnologik hujjat, bunga A belgisi beriladi;

3. IMSni ommaviy ishlab chiqarishga texnologik hujjat, bunga B belgisi beriladi.

Seriyali IMSlarda texnologik hujjatlar majmuasi asosiy va yordamchi hujjatlardan tashkil topadi. Asosiy hujjatlarga:

1. Texnologik jarayonning yo'l xaritasi;

2. Texnologik jarayonning bajarish xaritasi, unga texnologik nazorat va texnologik ko'rsatmalar kiradi.

Yordamchi hujjatlarga yo'l-nazorat xaritasi, standart va nostandart qurilmalar ro'yxati, normallashtirilgan va maxsus asboblarning ro'yxati, ta'minlanganlik hamda izohlovchi xabarnomalar kiradi. Texnologik jarayonning yo'l xaritasida tamomlanadigan jarayonlar majmuasining ketma-ketligi keltiriladi, jarayonlar xaritasida har bir jarayonning qanday borishi ko'rsatib qo'yiladi.

Yo'l-nazorat xaritasi o'z joyida buyum sifatining nazoratini qayd qilish uchun zarur bo'lgan asosiy hujjat hisoblanadi.

Texnologik jarayonlarning ishonchligini va mikrosxemalar sifatini ta'minlaydigan asosiy holat elektron gigiyenasiga rioya qilishdir. Elektron gigiyenasi mikrosxema tayyorlash bosqichida ifloslanishni kamaytiradigan yoki yo'qotadigan usullar, vositalar va shart-sharoitlar tizimidir. Havo muhitining tozaligi chang, namlik va begona gazlarning borligi bilan tavsiflanadi. Ishchi xonalarning tozalik sinfi 1-8 gacha bo'ladi. 1-sinf tozaligida 1 litr havoda chang umuman bo'lmaydi. Havo muhitining temperatura va namligi texnologik jarayonlarning sifati va qaytariluvchanligiga ta'sir qiladi.

**Plastina va tagliklarni tayyorlash.** Zamonaviy mikrosxemalar tayyorlash texnologiyasi mikrosxemalar tuzilmasi tayyorlanadigan yarimo'tkazgichli plastinalar va tagliklarga o'ta yuqori talablar qo'yadi. Bu talablar yarimo'tkazgichning elektrofizik tasniflari, plastinaning geometrik o'lchamlari va plastina sirtlarining sifatiga taalluqlidir.

Plastinaning elektrofizik tasniflari va uning kristallografik yo'nalganligi berilgan xossali mikrosxema hosil bo'lishini ta'minlashi kerak. Bundan kelib chiqqan holda loyihalash bosqichida kerakli kristallografik yo'nalish va yarimo'tkazgichli moddaning rusumi tanlanadi hamda plastina tayyorlash jarayonida uning elektrofizik parametrlari va kristallografik yo'nalishi nazorat qilinadi.

Plastinaning geometrik o'lchamlari yoki parametrlariga diametri, qalinligi, asosiy va qo'shimcha rusumlovchi kesilishlarning uzunligi va joylashishi, tomonlarning parallelligi, notekisligi, egilganligi kabilar kiradi.

Plastinaning diametri yarimo'tkazgichli quymaning o'lchamlari bilan aniqlanadi. Eng ko'p tarqalgan yarimo'tkazgichlarning standart diametrlari 60, 76, 100 mm li bo'ladi. Katta diametrli plastinalarda mikrosxemalarning katta miqdordagi kristallarini tayyorlash mumkin (7.1-jadval).

7.1-jadval

**Kristallar miqdorining kremniy plastinasi diametriga bog'liqligi**

Kristallning o'lchami, mm	Kristallning yuzasi, mm	Diametri 76 yoki 100 mm bo'lgan plastinadagi kristallar miqdori (qalinligi, mm)	
		76 (450)	100 (600)
1 x 1	1	4214	7598

7.1-jadvalning davomi

2 x 2	4	1018	1846
4 x 4	16	236	434
6 x 6	36	95	184

Tekisligining kristallografik yoʻnaltirilganligi (oriyentatsiyasi) (111) boʻlgan kremniy plastinalarida asosiy kesishish (110), (011), (101) yoʻnalishlarda, oriyentatsiyasi (100) boʻlgan plastinalarda (011) yoʻnalishda bajariladi. Diametri 100 mm boʻlgan kremniy plastinalarida asosiy kesilish uzunligi 30 – 35 mmni tashkil qiladi. Kesilishlar litografik ishlov berishda qurilmaga plastinani oriyentirlangan holatda oʻrnatishda kerak boʻladi. Plastinalarda mikrosxema tuzilmalari shunday shakllantiriladiki, bunda kristallning bir tomoni asosiy kesilishga parallel boʻlishi kerak.

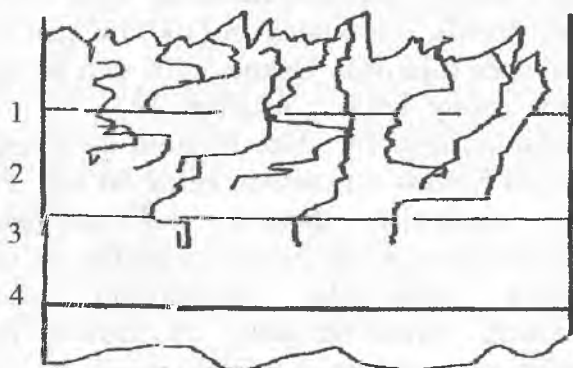
Qoʻshimcha kesishmalar rusumlovchi ham deyilib, ular yordamida yarimoʻtkazgichli moddaning belgisini va kristallografik oriyentatsiyasini aniqlash mumkin (7.3-rasm).



7.3-rasm. Har xil rusumli va kristallografik oriyentirlangan kremniy plastinasidagi asosiy va qoʻshimcha kesilishlar

Plastina sirtining sifati: 1) mexanik buzilgan qatlarning chuqurligi, 2) gʻadir-budurlik va 3) iflosliklardan tozalanganlik sifati bilan tavsiflanadi.

Mexanik buzilgan qatlarni uch qismdan tashkil topadi (7.4-rasm): 1 – tashqi relyefli qatlam bo‘lib, bu qatlam tartibsiz joylashgan uchliklar, chuqurliklar, yoriqlardan iborat; 2 – yoriqli qatlam bo‘lib, bu qatlam yakka holdagi darzliklar va ichki tomonga ketgan yoriqlardan iborat; 3 – deformatsiyalangan qatlam bo‘lib, dislokatsiyalarning to‘shami, mikroyoriqlarning davomi va ular atrofida joylashgan mexanik kuchlanishlardan iborat.



7.4-rasm. Plastina sirtining mexanik buzilgan qatlami:

- 1 – relyef qatlam; 2 – yoriqli qatlam; 3 – deformatsiyalangan qatlam;  
4 – plastinaning buzilmagan tomoni

Buzilgan qatlam qalinligi abraziv donasining o‘lchamlariga proporsional bo‘ladi va quyidagi formula yordamida aniqlanishi mumkin:

$$F = k\delta, \quad (7.1)$$

bunda, kremniy uchun  $k=1,7$ ; germaniy uchun  $k=2,2$ ;  $\delta$  – abraziv donining o‘lchami.

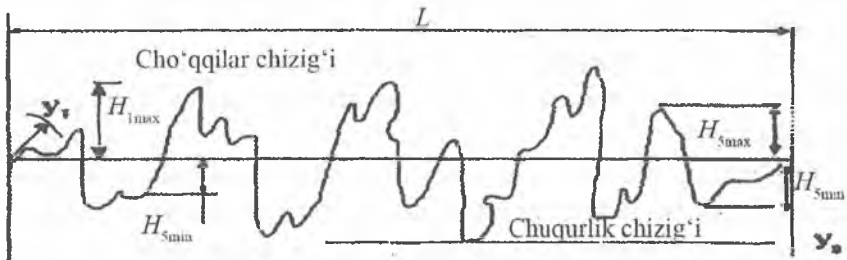
2) G‘adir-budurlik (7.5-rasm) profili  $R_a$  ning o‘rtacha arifmetik og‘ishi, ya‘ni  $L$  asos uzunligi chegarasidagi profil og‘ishlari absolyut qiymatlarining o‘rtacha arifmetik miqdori bilan



$$R_a = \frac{1}{n} \sum_0^n |y| \quad (7.2)$$

yoki  $R_z$  profil notekisligining taxminiy nuqtadagi o'rtacha balandligi bilan baholanishi mumkin:

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 H_{smax} - \sum_{i=1}^5 H_{smiz} \right) \quad (7.3)$$



7.5-rasm. Taglikning silliqli sirtining profili

$R_a$  va  $R_z$  parametrlarning qiymatlariga bog'liq holda ishlov berilgan sirtning sifati mos holda g'adir-budurlik sinfi bilan baholanadi. Plastinalar sirtining silliqligi 13 – 14 sinflardan past bo'lmashligi kerak. Bu balandliklari mos holda 0,1 dan 0,025 mkmgacha bo'lgan mikronotekisliklarga to'g'ri keladi.

3) Plastinalarni tozalash sifati quyidagicha baholanadi: sirt bilan mexanik va kimyoviy bog'langan iflosliklarning borligi bilan; plastina sirtining birlik yuzasiga to'g'ri keladigan adsorbsiyalangan kirishma atomlari va ionlari miqdori bilan yoki adsorbsiyalangan kirishma molekulari monoqatlamlarining soni bilan. Plastinalarni kirishmalar adsorbsiyasidan to'liq himoya qilishning iloji yo'qligi sababli, ideal toza sirtlar olib bo'lmaydi. Toza sirt deganda shunday texnologik toza sirt tushuniladiki, unda qolgan kirishmalarning zichligi mikrosxemalar parametrlarining

berilgan qiymatlarini takroran hosil qilinishi va ularning turg'unligiga ta'sir qilmasligi kerak.

Gibrid va yupqa pardali mikrosxemalarning tagliklari asosning yupqa pardali va osma elementlarini ushlab turuvchi konstruksiya vazifasini bajaribgina qolmasdan, balki elementlar va elementlararo birikmalarda elektrdan himoya sifatida ham xizmat qiladi. Ular birinchi navbatda yaxshi izolatsiya va mexanik xossalarga ega bo'lishi kerak.

Tagliklar yuqori solishtirma qarshilikli, dielektrik kirituvchanligi va dielektrik yo'qotishning tangens burchagi kichik, elektr va mexanik mustahkamligi yuqori bo'lgan dielektrik moddalardan tayyorlanadi. Elementlardan issiqlik uzatish samarali bo'lishi uchun taglikning moddasi yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka ega bo'lishi kerak.

Taglikning moddasi mikrosxemalarning tuzilmasini tayyorlashda kerak bo'ladigan texnologik ishlovlarga chidamli bo'lishi, texnologik jarayonning o'tkazilish sifatiga yomon ta'sir qilmasligi (vakuumda yupqa parda o'tqazishda gaz chiqarmasligi, tuzilma topologiyasini shakllantirishda qo'llaniladigan yemirgichlarga befarq bo'lishi, issiqlikka chidamlik va boshqalar) kerak.

Bu talablarning hammasini qanoatlantiradigan ideal modda yo'q. Asosiy talablarga ko'proq javob bera oladigan taglik moddalariga sapfir, shisha, sitall, keramika, polikor, polimidlar misol bo'ladi.

**Yarimo'tkazgichli va dielektrik moddalarga mexanik ishlov berish.** Yarimo'tkazgichli moddalar va monokristall dielektrik sapfir mexanik ishlov beriluvchi joy quyma ko'rinishida keladi; amorf va boshqa dielektrik moddalar (shisha, sitall, polikor, keramika) list holida keladi. Plastina va tagliklarni tayyorlashda mexanik ishlov berish abrazivlar yordamida bajariladi.

Mikrosxemalar ishlab chiqarishda foydalaniladigan sintetik abraziv moddalarga: olmos, kremniy karbidi, elektrokorund, kremniy, xrom, sirkoniy va seolit oksidlari misol bo'ladi.

Abraziv moddalar kukun holatda ishlatiladi. Abraziv kukunlar donalarining o'lehamlariga bog'liq holda to'rt guruhga bo'linadi: shlifdonali, shlifkukunli, mikrokukunli va o'ta mayda kukunli. IMS ishlab chiqarishda oxirgi uchtasidan foydalaniladi.

Abraziv yoki olmosli kukunlarni belgilashda moddaning rusumi va donadorligining tartib raqami hisobga olinadi. Masalan, EBM14 belgisi - elektrokorund oq, asosiy fraksiyadagi donalarining o'lehami 14 mkm dan 10 mkm gacha bo'lgan mikrokukun ekanligini, ACM10/7 belgisi -olmos sintetik, asosiy guruhdagi donalarining o'lehamlari 10 mkm dan 7 mkm gacha ekanligini bildiradi.

Abraziv ishlov berishning mohiyati ko'proq qattiq va kamroq, mo'rt abrazivning kamroq qattiq va ko'proq mo'rt moddaga mexanik ta'siridir. Abraziv kukunlar erkin va bog'langan holatlarda ishlatiladi.

Erkin abrazivlar yordamida ishlov berishda abraziv kukunlarning suspenziyasi yoki pastasidan foydalaniladi.

Bog'langan abrazivlar bilan ishlov berishda disk, doira ko'rinishdagi, ishchi qismi, asosan, olmos donalari bilan maxsus birlashtirilgan uskunalardan foydalaniladi.

**Plastina va tagliklarni tayyorlash bosqichlari.** Kremniy plastinasini tayyorlash ketma-ketligi. Yarimo'tkazgichli plastinalarni tayyorlashning texnologik yo'llari tayyorlanadigan mikro-sxemalarning qo'llanilayotgan yarimo'tkazgich xossalari har xilligi tufayli bir-biridan farq qilishi mumkin. 7.6-rasmda kremniy plastinasini tayyorlashning umumiy yo'li keltirilgan.

Keltirilgan marshrutdagi operatsiyalarni sanab, bir nechtasining vazifasini ko'rsatib o'tamiz:

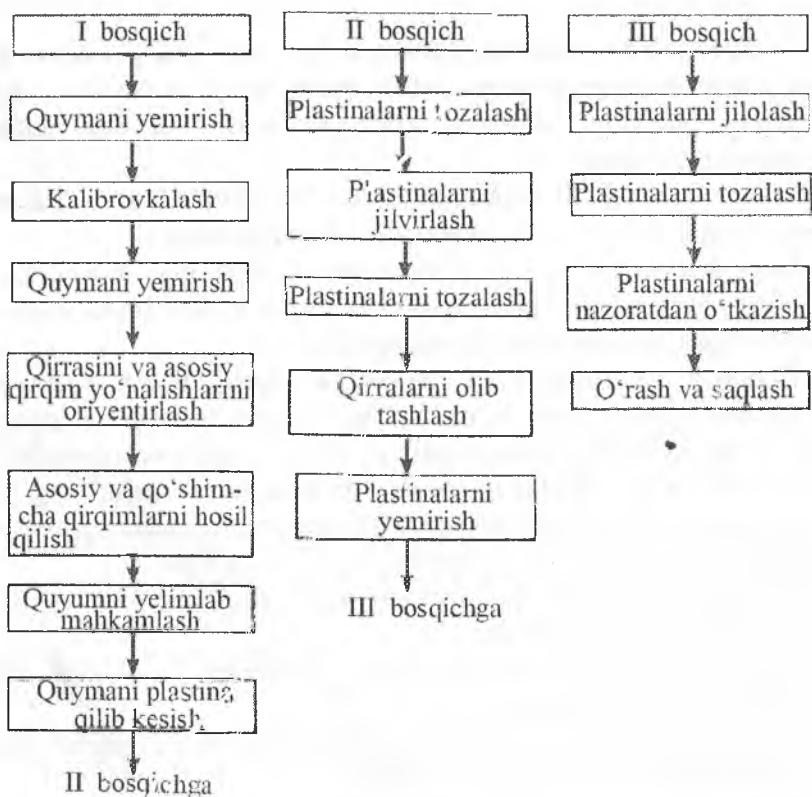
Quymani yemirish uning sirtini tozalash va nuqsonlarni aniqlash uchun o'tkaziladi.

Kalibrovka quyмага standart plastina diametriga teng bo'lgan silindr shaklini berish uchun bajariladi.

Undan keyingi quymani yemirish kalibrovka jarayonida kristall tuzilmasining buzilgan qatlamini olib tashdash uchun o'tkaziladi.

Quyma qirrasining yoʻnalishini belgilash quyma qirra tekisligining bosh kristallografik tekislikdan yoʻnalishini chetlanishini (ogʻish burchagini) aniqlash uchun oʻtkaziladi. Mana shunga, asosan, quymani plastinalarga kesishdan oldin u kesuvchi asbobga nisbatan ogʻish burchagini hisobga olgan holda ishlov beruvchi mashinaga mahkamlanadi.

**Asosiy qirqim yoʻnalishini oriyentatsiyalash.** Asosiy qirqim texnologik qurilmalarda plastinalarni bir xil oriyentatsiyalash uchun kerak boʻladi.



7.5- rasm. Kremniy plastinalarini tayyorlashning umumiy ketma-ketligi

Qo‘shimcha qirqumlar plastinalarning aralashib ketganida bir-biridan ajratish (sortirovka qilish) uchun kerak bo‘ladi.

Kesish uchun qirqish mashinasiga quymani yelimplab mahkamlash.

Quymani plastinalarga kesish. Oldingi jarayonlarda hosil bo‘lgan iflosliklarni yo‘qotish uchun plastinalarni tozalash.

Plastinalarni jilvirlash uning qalinligini bir xil qilish, plastina tomonlarining tekisligini va parallelligini yaxshilash sirtidagi g‘adir-budurliklarni kamaytirish uchun o‘tkaziladi.

Plastina iflosliklardan tozalanadi.

Plastina sirtining chekkasidagi qirralari olib tashlanadi. Bu tuzilmalarni shakllantirishning qizdirish jarayonlarida dislokatsiya va mexanik kuchlanishlarning hosil bo‘lish ehtimolligini kamaytiradi, ya’ni nuqsonlar zichligi kamayib, yaroqli plastinalar chiqish foizi oshadi.

Mexanik buzilgan sirt qatlamini olib tashlash uchun plastinalarni yemirish va ularni tozalash.

Plastinalarni jilolash. Bu jilvirlash va faskani olib tashlashdan keyin sirtga ishlov berishning sifati va aniqligini yaxshilash, oynasimon tekis, silliqlik sinfi 14 va undan yuqori bo‘lgan sirt hosil qilish uchun o‘tkaziladi.

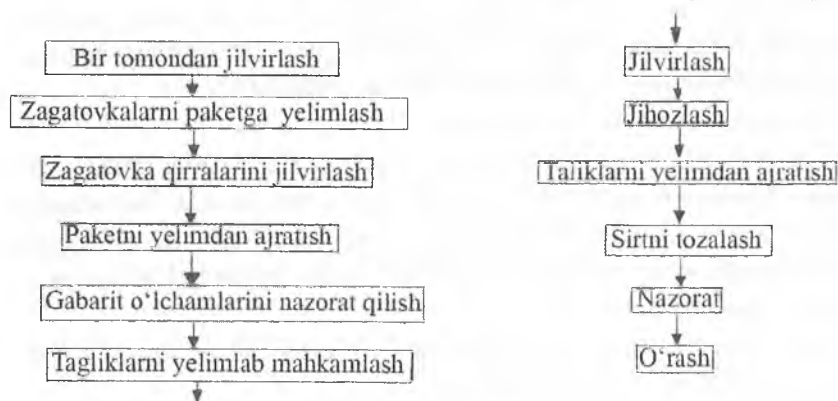
Plastina sirtini tozalash va quritish.

Plastinalarning geometrik, elektrofizik parametrlari va sirt sifatining belgilangan o‘lchamlarga mos kelishini nazorat qilish.

Plastinalarni saqlash va mikrosxemalar tuzilmalarini tayyorlaydigan sexlarga tashish uchun o‘rash.

7.6-rasmdan ko‘rinib turibdiki, kreminiyli plastinalarni tayyorlashning hamma yo‘li uchta bosqichdan tashkil topar ekan: birinchi bosqich – quymani mexanik ishlovga tayyorlash va uni plastinalarga kesish; ikkinchi bosqich – plastinalarga boshlang‘ich ishlov berish (jilvirlash va qirralarini olib tashlash); uchinchi bosqich – plastinalarga oxirgi ishlov berish (jilolash). Bosqichlarning har biri plastinalarning nazorati bilan yakunlanadi.

Shisha, sitall va keramikali tagliklarni tayyorlash ketma-ketligi. Bu moddalarning hammasi tarkibiy tuzilishiga binoan kristallografik oriyentatsiya talab qilmaydi. Bundan tashqari, ular asosan yupqa taxta holatda tayyorlanadiganligi sababli ulardan taglik tayyorlash jarayonlari ancha soddalashadi. Misol tariqasida 7.7-rasmda sitaldan tagliklar tayyorlash ketma-ketligi keltirilgan.



7.7-rasm. Sitalli tagliklarni tayyorlashning umumiy ketma-ketligi

### 7.3. Kontakt va elektrod moddalar

Yarimo'tkazgichli elektron asboblarda va integral sxemalar ishlab chiqarishda yarimo'tkazgich hajmida diod, tranzistor, yuqori va past qarshilikli sohalarda, uning sirtida tokni to'g'rilamaydigan (omik) va to'g'rilaydigan kontaktlar hosil qilish muhim rol o'ynaydi. Bu maqsadlar uchun, asosan, yarimo'tkazgich kristallari bilan har xil kimyoviy moddalarning qotishmalarini hosil qilish usulidan foydalaniladi. Kristallar sifatida bunday qotishmalar hosil qilish hozirgi paytda nisbatan yaxshi o'zlashtirilgan texnologik usul bo'lib, o'zining qulayligi va ishonchligi bilan ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi.

Bu usulning mohiyati yarimo'tkazgichli kristall va uning sirtiga qo'yilgan qotishma qizdirilganda, u qotishma kristal sirtiga

yoyilib, kristall sirtoldi qatlamining bir qismini eritadi. Jarayon temperaturasi va davrini o'zgartirish bilan eritma chuqurligi hamda o'lchamlarini boshqarish imkoniyati vujudga keladi.

Bunday eritma sovutilayotganda undagi bir qism yarimo'tkazgich kristall zarralari ajralib chiqib, asosiy kristall sirtiga o'tirib qolib, dastlabki qotishma elementlari bilan aralashgan-legirlangan yangi kristall qatlam vujudga keladi. Bu hosil bo'lgan yangi qatlam yarimo'tkazgichli monokristall xususiyatlarini saqlab qolishini eslatib o'tish kerak. Faqat qotishma-kristall chegarasidagi yupqa qatlam elektr o'tkazuvchanligi o'zgaradi.

Shu munosabat bilan har xil yarimo'tkazgichli kristallarning xususiyatlariga mos holda turli xil legirlovchi moddalar ishlatiladi. Yarimo'tkazgichlarda donor yoki akseptorlik xususiyatlarini namoyon qiluvchi fosfor, surma, mishyak, aluminiy, bor, galliy kabi moddalar kristallarga erib kirishishi mumkin bo'lmagan elementlar bo'lgani uchun ularni boshqa moddalar bilan ma'lum bir nisbatdagi aralashmalari ishlatiladi. Bunday elementlar sifatida Pb, Sn, In, Au va Ag kabilardan foydalaniladi.

Bunday kontakt kirishmalarini uch guruhga bo'lish mumkin:

a) kristallarda  $p-n$  o'tishlar va tranzistorlarning emitter va kollektor o'tishlarini hosil qilish qotishmasi;

b) kristallarda tokni to'g'rilamaydigan (omik) kontaktlar hosil qiluvchi qotishmasi;

d) yarimo'tkazgichli asboblarda va integral sxemalarning ayrim elementlarini ulash yoki ajratib turish uchun ishlatiladigan kavsharlash qotishmasi.

Kavsharlash qotishmalarini tanlashda, asosan, kristallning ho'llovchanligi, erish temperaturasi, kimyoviy va mexanik chidamliligi kabi xususiyatlari alohida o'rin tutadi. Boshqa ikki guruh qotishmalarda yarimo'tkazgichli kristallga kerakli elektrofizik xususiyatlar bera oladigan elementlar bo'lishiga ahamiyat beriladi. Kontakt qotishmalari ham kristallni ho'llashga moyil bo'lishi, kimyoviy va issiqlik ishlovlariga chidamli, chiziqli

kengayish koeffitsiyenti yarimo'tkazgichnikiga mos bo'lishi va boshqa parametrlari bilan tanlab olinadi.

Quyida kontakt va elektrodlar vazifasini bajaruvchi qotishmalar uchun ishlatiladigan asosiy elementlar tavsiflarini keltiramiz.

Elektrod va kontakt qotishmalarini hosil qilish uchun asos sifatida ko'proq metall elementlaridan foydalaniladi.

**Qalay (Sn)** – oq kumushrang yumshoq metall. Yer qobig'ida toza holda ko'p uchraydigan metall. Zichligi  $7,5 \text{ g/sm}^3$ , erish temperaturasi  $230^\circ\text{C}$ , issiqlik o'tkazuvchanligi  $0^\circ\text{C}$  da  $0,116 \text{ kal/sm}\cdot\text{s}\cdot\text{grad}$ , bug'ining  $1000^\circ\text{C}$  dagi bosimi suv bilan ta'sirlashmaydi, kuchsiz kislotalar, fluorit va nitrat kislotalar aralashmasida sekin eriydi. Xlorid kislotada erib  $\text{SnCl}_2$  tuzini, kuchli ishqorlarda sekin erib tuzlar hosil qiladi. Eruvchanligi va yumshoq bo'lganligi uchun har xil qoliplar, shisha-disklar yasash mumkin. Ko'proq payvandlash ishlarida kavshar sifatida foydalaniladi. Kontaktlar va elektrodlar uchun qotishmalarda yarimo'tkazgichlarda donorlik xususiyatlaridan foydalaniladi.

**Qo'rg'oshin (Pb)** – qo'ng'ir-ko'k rangli, egiluvchan, yumshoq metall va minerallardan olinadi. Zichligi  $11 \text{ g/sm}^3$ , erish temperaturasi  $330^\circ\text{C}$ , issiqlik o'tkazuvchanligi  $0^\circ\text{C}$  da  $0,085 \text{ kal/sm}\cdot\text{s}\cdot\text{grad}$ , bug'ining  $1100^\circ\text{C}$  dagi bosimi 5 mm sim. ust. ga teng. Nisbatan past temperaturalarda ham tez bug'lanadi. Uning mexanik va fizikaviy xususiyatlari tarkibidagi begona elementlar hissasiga bog'liq, odatda, uning, egiluvchanligi kamayib, qattiqligi ortadi.

Havoda qizdirilganda oksidlanadi va xlorid kislotalar ta'siriga chidamli, lekin kuchli kislotalarda qizdirilganda tez eriydi. Metallar bilan ko'plab birikmalar hosil qiladi. Qo'rg'oshin elektron texnikada ko'proq kavsharlovchi moddaning tarkibiy qismi sifatida ishlatiladi. Qo'rg'oshinning geliyda eruvchanligi  $5\cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ , kremniy kristalida eruvchanligi juda past. Uni kontakt va elektrodlar uchun qorishma sifatida ishlatilmasligiga uning past issiqlik o'tkazuvchanligi va issiqlikdan kengayish koeffitsiyentining kattaligi sabab bo'ladi.



**Akseptor elementlar.** Bu guruh elementlari yarimo'tkazgichlar bilan aralashtirilganda tok tashuvchi elektronlarni yutib olib,  $p$ -o'tishli soha hosil qiladi.

**Aluminiy Al** – oqish kumush rangli metall, erish temperaturasi  $660^{\circ}\text{C}$ , issiqlik o'tkazuvchanligi  $20^{\circ}\text{C}$  da  $0,5 \text{ kal/sm}\cdot\text{s}\cdot\text{grad}$ , bug'ining  $1200^{\circ}\text{C}$  dagi bosimi  $10^{-3} \text{ mm sim. ust}$ . Aluminiy suvda oson oksidlanadi va sirtida uni korroziyadan himoyalovchi yupqa parda hosil bo'ladi. Eritilgan aluminiy metallar bilan oson reaksiyaga kirishadi.  $577^{\circ}\text{C}$  da kremniy bilan qotishma hosil qiladi. Xlorid va sulfat kislotalari aluminiyini oson yemiradi, nitrat kislota ta'sir qilmaydi. O'yuvchi ishqorlar aluminiy bilan reaksiyaga kirishib, suvda oson eruvchi aluminatorlar hosil qiladi. Aluminiyning kremniy bilan qotishmasi *silunim* deb ataladi. Toza aluminiy metali kremniy kristallarida akseptor elektrod sifatida  $p$ - $n$  o'tishlar hosil qilishda ishlatiladi.

**Galliy Ga** – qattiq va mo'rt yaltiroq ko'kish rangli metall. Galliyning kristall panjarasining tuzilishi boshqa metallardan farqli bo'lib, rombik panjaradan iborat. Galliy o'ta sovutishlarga moyil va kristallanishda hajmi kengayadi. Oddiy sharoitlarda havoda galliy oksidlanmaydi, lekin isitilganda tez oksidlanadi. U namlikka chidamli, kislota va ishqorlarda eruvchan. Uni, asosan, yarimo'tkazgichlarni legirlash va omik kontaktlar olish uchun ishlatiladi.

**Bor B** – qo'ng'ir rangli kukun sifatidagi amorf va oq rangli kristall holatlarida mavjud. Tabiatda borat kislotasi –  $\text{H}_3\text{BO}_3$  va har xil  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$  – bura,  $2\text{MgO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  – asharit,  $2\text{CaO}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3\cdot 5\text{N}_2\text{O}$  – kolomanit tuzlari ko'rinishida uchraydi. Borning amorf holatdagi zichligi  $1,73 \text{ g/sm}^3$ , kristall holatida  $3,34 \text{ g/sm}^3$ , erish temperaturasi  $2000 - 2500^{\circ}\text{C}$ , bug'ining  $1400^{\circ}\text{C}$  dagi bosimi –  $10^{-8} \text{ mm sim. ust}$ .

Uy temperaturasida bor suv bilan reaksiyaga kirishmaydi, oksidlanmaydi, boshqa elementlar bilan ta'sirlashib bor kislotasini hosil qiladi. Yuqori temperaturalarda kimyoviy aktivligi ortib, galogenlar va uglerod bilan birikib, tuzlar hosil qilishi mumkin.

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida bor kremniy va germaniyda katta eruvchanlikka ega akseptor kirishma sifatida *p*-turdagi sohalar hosil qilishda ishlatiladi.

**Indiy In** – oqish-kumush rang, juda yumshoq metall. Tabiatda toza holda uchramaydi, mis, qalay, qo'rg'oshin rudalarida kam miqdorda mavjud. 20°C dagi zichligi 7,3 g/sm<sup>3</sup>, erish temperaturasi 155°C÷500°C dagi bug'ining bosimi 10<sup>-7</sup> mm sim. ust. ga teng. Havoda oksidlanmaydi, lekin isitganda yonib, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oksidini hosil qiladi. Suv va ishqorlar ta'sir qilmaydi, kislotalarda eriydi. 155°C dan yuqori temperaturalarda geliy bilan oson qorishadi, kremniy bilan qorishmaydi. Asosiy yarimo'tkazgich moddalarda akseptor kirishmasi rolini bajaradi. Ko'plab metallar bilan aralashib, elektrod sifatida foydalanish uchun qulay bo'lgan, oson eruvchi qotishmalar hosil qiladi.

**Donor elementlar.** Bu guruh elementlari yarimo'tkazgichlarda qo'shimcha tok tashuvchi elektronlar hosil qiladi hamda kontakt qotishmalari olish uchun ishlatiladi.

**Fosfor P** – tabiatda qizil kukun va oq kristall ko'rinishida mavjud, erkin holatda uchramaydi, faqat har xil minerallar tarkibida bo'ladi. Oq fosfor zichligi 1,8 g/sm<sup>3</sup>, qizilini 2,3 g/sm<sup>3</sup>. Oq fosforning erish temperaturasi 44°C, qizili erimasdan bug'ga aylanadi. Fosfor bug'ining 500°C dagi bosimi 1,8·10<sup>4</sup> mm sim. ust., qizilini 7,6·10<sup>3</sup> mm sim. ust. ga teng. Suvda erimaydi. Oq fosfor 40°C da alanga olib yonadi, qizili – 240°C da.

**Fosforning ko'p uchraydigan oksidi** – fosfor angidridi P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, u suv bilan ta'sirlashib, har xil fosfor kislotalarini, xususan H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> ni hosil qiladi. Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida elementar qizil fosfor va uning birikmalaridan foydalaniladi. U SiP va GeP hosil qilishi mumkin. Si va Ge kristallarida juda yaxshi aralashish xususiyatiga ega. Shuning uchun P ko'proq legirlovchi yoki qorishma hosil qiluvchi element sifatida ishlatiladi.

**Surma Sb** – oson maydalaniladigan mo'rt modda. Toza holda tabiatda juda kam uchraydi. Ko'p tarqalgan birikmasi Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>

minerali. Zichligi  $6,6 \text{ g/sm}^3$ , erish temperaturasi  $630^\circ\text{C}$ , bug‘ining  $382^\circ\text{C}$  dagi bosimi  $10^{-5} \text{ mm sim. ust. ga teng}$ .

Uy temperaturasida oksidlanmaydi, isitganda  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  oksidi holida tutunga aylanadi. Suv va organik eritmalarda erimaydi. Konsentirlangan nitrat kislotada eriydi. Havoda qizdirilganda uchuvchi  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  oksid paydo bo‘ladi. Ko‘plab metallar bilan qotishmalar hosil qiladi. Ularda  $\text{Sb}_2$  ning hissasi ortishi bilan mo‘rtligi ham ortib boradi.

**Mishyak As** – havoda tez xiralashadigan qo‘ng‘ir-po‘lat rangli, mo‘rt kristall. Zichligi  $20^\circ\text{C}$  da  $5,7 \text{ g/sm}^3$ ,  $36 \text{ kGs/sm}^2$  bosimda erish temperaturasi  $820^\circ\text{C}$ , bug‘ining  $300^\circ\text{C}$  dagi bosimi  $10^{-2} \text{ mm sim. ust. ga teng}$ .

Mishyak o‘rtacha kimyoviy faollikka ega bo‘lgan, ko‘proq nometall xususiyatlar namoyish etadigan modda. Havoda qizdirilganda  $\text{As}_2\text{O}_3$  oksidini hosil qiladi. Maydalangan As oq-ko‘kish alanga berib yonib,  $\text{As}_2\text{O}_3$  ajratib chiqaradi. As kremniy bilan  $\text{SiAs}$  va  $\text{SiAs}_2$  birikmalari hosil qiladi. U kremniy kristall panjarasida boshqa elementlardan yaxshiroq eriydi ( $N_{\text{As}}=1,8 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}$ ), germaniyda –  $N_{\text{As}}=2 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$ . Shuning uchun, As yarimo‘tkazgich moddalarda eng yaxshi legirovchi va har xil qotishmalar hosil qiluvchi element hisoblanadi.

#### 7.4. Sirtni himoyalovchi va mustahkamlovchi moddalar

Hozirgi zamon radioelektronikasida asosiy bosh talablardan biri butun qurilmalari va ularning bo‘limlari, alohida elementlar ishining mustahkamligi va chidamligidir. Aniqlanishicha, yarimo‘tkazgichli asboblarda va IMS turg‘un hamda mustahkam ishlashi yarimo‘tkazgich sirt holati va uning tashqi muhit bilan o‘zaro ta‘siri xususiyatlari bilan bog‘langan. Asbobning berilgan ishlatish sharoitlari natijasida sirt holatlari to‘g‘ri bo‘lishi, ayniqsa  $p-n$  o‘tishdan chiqish joylarini tashqi muhit ta‘siridan mustahkam himoyalash kerak.

Keyingi yillarda himoya qatlamlari sifatida kremniy ikki oksidi  $\text{SiO}_2$ , kremniy nitridi  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , aluminiy oksidi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yoki shu moddalarning kombinatsiyasi asosidagi qatlam moddalarini qo'llash kengaymoqda. Ba'zi bir hollarda tez eriydigan silikatli yoki xalkogenidli himoya pardalaridan muvaffaqiyatli foydalanilmoqda.

Himoya qoplamlari boshqa vazifalarni ham bajarishini keyingi paragraflarda izohlab beramiz. Biroq, hozirgi zamon tuzilmalarida himoya pardalari sifatida kremniy organiklar: lok, kompaund va boshqalar keng qo'llanilmoqda.

#### 7.4.1. Asbobning elektrik parametrlariga *p-n* o'tish sirt holatining ta'siri

Elektron-kovak o'tish sirti deganda, yarimo'tkazgich kristall yoki yarimo'tkazgich plastinka sirtiga chiqqan qism tushuniladi. *p-n* o'tishi chiqishidagi yarimo'tkazgich moddaning sirt holati, *p-n* o'tishdan tashqarida qolgan yarimo'tkazgich hajmining fizik xossasiga nisbatan asbobning elektrik parametrlariga ancha kuchli ta'sir qiladi. Agar yarimo'tkazgich kristali ichidagi *p-n* o'tish tashqi ta'sirlaridan mustahkam himoyalangan bo'lsa, kristall sirtiga *p-n* o'tishning chiqishi esa qo'shimcha himoyalinishi kerak.

Undan tashqari, yarimo'tkazgich modda sirtining tuzilishi cheksiz uzun kristalining energetik sohasidan boshqacha bo'ladi. Sirt tuzilishi qisman uzilgan atomlardan tashkil topadi. Chunki, har bir atomga kovalent bog'lanish uchun juftliklar yetishmaydi, unda bu bog'lanishlar to'yinmagan bo'lib qoladi va u energetik holatga ekvivalent bo'lib, sathlar man qilingan soha ichida yotadi.

Shunday qilib, sirtiy atomlar elektronlarni egallab olish yo'li bilan o'zlarining bo'sh qolgan bog'lanishlarini to'ldirishga intiladi. Natijada, yarimo'tkazgich modda o'tkazuvchanlik turiga qaramay, uning sirtida akseptor sathlar hosil bo'ladi.

Shu bilan birga yarimo'tkazgich modda sirtida gaz va suyuqlik ko'rinishdagi o'zga modda atomlarining adsorbsiyasi natijasida

yuqoridagi sathlardan tashqari qo'shimcha sirt holatlari hosil bo'lishi mumkin. Adsorbsiyalashgan atomlarning xossalari bog'liq ravishda yangi hosil bo'lgan sathlar akseptor yoki donor bo'lishi mumkin.

Agar yarimo'tkazgich modda sirtiga elektronlarni tutib oladigan atom yoki molekula adsorblashsa, unda akseptor sathlar hosil bo'ladi. Agar bu holda yarimo'tkazgich modda elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lsa, u holda elektronlar o'tkazuvchanlik sohasidan yoki donor sathdan Fermi sathidan pastda yotuvchi akseptor sathini to'ldirishga intiladi. Bu esa kristall sirtga to'g'ridan-to'g'ri joylashgan elektronlar bilan to'la bo'lmagan yupqa qatlam hosil bo'lishiga olib keladi. Bu yerda musbat zaryadlangan donor markazlar hosil bo'ladi. Hosil bo'lgan elektr maydon shunday yo'nalganki, yarimo'tkazgich modda hajmidan kelayotgan elektronlarni itaradi va energetik to'siqni vujudga keltiradi.

Bunda yarimo'tkazgich-muhit chegarasida energetik soha va yarimo'tkazgich modda sirtida inversion (teskari to'ldirilgan) qatlam vujudga kelishi mumkin.

Gaz molekullari yoki bug'lari adsorbsiyasi fizik yoki kimyoviy bo'lishi mumkin. Fizik adsorbsiya holida bug'lar va gazlar qattiq jism ionlari ta'sirida yarimo'tkazgich sirtida ushlanib qoladi.

Kimyoviy adsorbsiyada molekullar atomlarga dissotsiyalanadi, yarimo'tkazgich moddaning sirt atomlari bilan ular orasida tur-g'un kimyoviy aloqalar hosil bo'lishi bilan valent elektronlar qayta taqsimlanishi yuz beradi. Shunday, suv bug'lari ikkala mexanizm yordamida yarimo'tkazgich modda sirtiga adsorbsiyalanadi, bunda dastlabki ikki-uch qatlam yarimo'tkazgich panjara atomlari bilan kuchli bog'langan bo'lib, qo'zg'almas bo'lib qoladi, qolgan qatlamlarda (fizik) suv molekullari yarimo'tkazgich modda sirti bo'ylab ko'chishi mumkin.

Shunday qilib, turli gazlar va bug'lar adsorbsiyasi yarimo'tkazgichning sirtiga yaqin sohasida fazoviy zaryadlarni hosil

qilishiga olib keladi. Nisbatan faol kimyoviy yutiluvchi gazlarga kislorod va suv bug‘lari kiradi. Kislorod, ozon hamda xlorning yutilishi manfiy ishorali sirt zaryadlarining paydo bo‘lishiga olib keladi. Suv bug‘lari, spirt, atsetonlarning yutilishi musbat zaryadlarni hosil qiladi.

Yarimo‘tkazgich moddaning sirtiga metall ionlari (masalan, natriy, miqdori  $10^{14}\text{sm}^{-2}$  gacha) ham yutilishi va sirt ionli o‘tkazgich bo‘lib qolishi mumkin. Shunday yarimo‘tkazgich sirtida  $p$ - $n$  o‘tish chiqishiga tashqi elektrik maydon qo‘yilishi sirtiy ionlar tokini hosil qiladi va bu tok  $p$ - $n$  o‘tishning hajmiy tokidan bir necha marta yuqori bo‘ladi.

Bundan tashqari, asboblarning elektrik parametrlari o‘zgarishida inversion qatlamlarning hosil bo‘lishi bilan bog‘liq bo‘lgan sirqish toki ancha katta rol o‘ynaydi. Chunki, yarimo‘tkazgichning  $p$ - $n$  o‘tishga yaqin sohasida paydo bo‘lgan inversion qatlam yarimo‘tkazgich sirtiga chiquvchi  $p$ - $n$  o‘tishga tutashgan inversion kanal  $p$ - $n$  o‘tish effektiv maydonini oshiradi va bu asbobning teskari tokini oshirishga olib keladi. Shunday qilib, ion yoki kanal o‘tkazuvchanlik hisobiga asbob teskari toki ancha oshadi.

Teskari tokning o‘zgarish xususiyati bo‘yicha qaysi jarayon asosiy rol o‘ynashini bilish mumkin. Ionlar toklarining kuchlanishga bog‘lanishi chizig‘iy, kanal toki esa kuchlanishning kvadrat ildiziga mos holda o‘zgaradi. Elektron-kovak o‘tishlarida teshilish kuchlanishi kamayishi ham kanallarning mavjudligi bilan bog‘langan. Teshilish kuchlanishi  $p$ - $n$  o‘tishning kanal sohasida hajmga nisbatan kichik, chunki kanal o‘tkazuvchanligi taglik modda-baza o‘tkazuvchanligidan kattadir.

Asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar sirtiy rekombinatsiya tezligi yarimo‘tkazgich modda sirt holatiga ta’sir qiluvchi zaruriy parametrlardan biridir.

Sirtiy rekombinatsiya tezligi yuqorida ko‘rsatilgan yarimo‘tkazgich qatlam sirtidagi buzilishlar va adsorbsiya jarayonlari hisobiga hajmiy rekombinatsiyaga nisbatan ancha yuqori bo‘ladi.

Shuning uchun asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti faqat hajmiy nuqsonlar orqali aniqlanadigan vaqtdan ancha kichik.

Tranzistorlarda sirt rekombinatsiyasining oshishi zaryad tashuvchilarning ko'chish koeffitsiyenti kamayishiga va kuchaytirish koeffitsiyentining pasayishiga olib keladi. Asboblarning uzoq vaqt ishlashi davomida ularning elektrik parametrlari yomonlashadi. Bunga asosiy sabab, birinchi o'rinda  $p-n$  o'tishli yarimo'tkazgich kristali sirtiy holatining o'zgarishidir. Yarimo'tkazgich kristall sirt holati o'zgarishi tashqi muhitning o'zgarishi va uning yarimo'tkazgich moddasi ta'siri tufayli sodir bo'ladi. Shu sababli  $p-n$  o'tishli yarimo'tkazgich kristall sirtining himoyasi sifatiga faqat tayyor asbob elektrik parametrlarigagina emas, balki ularning mustahkamligi va xizmat vaqti ham kiradi.

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida  $p-n$  o'tishli yarimo'tkazgich kristall sirtiga tashqi agressiv muhitlar ta'sirini yo'qotish uchun turli usullardan foydalaniladi. Bu esa, asbobning elektr parametrlarini ish davomida turg'un va uzoq vaqt saqlash imkonini beradi.

#### 7.4.2. Organik qoplamalar yordamida sirtni himoyalash

Hozirgi davrda elektron-kovak o'tishlar sirtini tashqi atmosfera ta'siridan himoyalash uchun namga chidamli lok yoki kompaund qoplamalardan foydalanilib kelinmoqda. Bu usul birinchi navbatda, planar bo'lmagan asboblarda, ya'ni, qotishmali, qotishma diffuzion, meza-qotishmali va meza-diffuzion asboblarni tayyorlashda ishlatiladi.

Loklar va kompaundlar bilan himoyalash eng sodda texnologik usuldir. Ularning sirtiga himoya moddasi oddiy shprints bilan surkaladi, bunda albatta faqat sirtning kerakli yuzasi qoplanmasdan, uning atrofi va kontaktning chiqish joyining ma'lum qismi ham loklanadi. Kremniy organik kompaundlari tritor tuzilmalardagi yoqlarni himoyalash uchun keng qo'llaniladi. Aytib o'tish

kerakki, sirtni loklash yoki kompaund bilan qoplashdan oldin, qoida bo'yicha, u oksidlanadi yoki boshqa ancha mustahkam vositalar bilan himoyalaniadi. Elektron-kovak o'tishlarini himoya qilish uchun himoya moddalari sifatida turli kremniy organiklar va boshqa kompaundlardan foydalaniladi. Ular nisbatan namga yuqori chidamli va dielektrik xossalarga ega ekanligi bilan ajralib turadi (7.2-jadval).

7.2-jadval

**Elektron -kovak o'tishlarni himoyalovchi organik qoplamalar va kompaundlar**

Turi	Quritish tartibi		Solishtirma qarshiligi $\rho \cdot \text{Om} \cdot \text{sm}$	
	Vaqt, soat	Temperaturasi, °C	20 °C da	200 °C da
Lok				
M-49	5	200	$10^{14}$	$10^{12}$
K-55	3	150	$10^{13}$	$10^{12}$
K-1	4	150	$10^{12}$	$10^{10}$
PE-518	3	200	$10^{14}$	$10^{12}$
KO-961	1	20	$10^{14}$	$10^{12}$
Emal RPE-401	5	200	$10^{14}$	$10^{12}$
Kompaund	12	100	$10^{13}$	$10^{12}$
Emal ES-50	2	180	$10^{14}$	$10^{11}$

Elektron-kovak o'tishli yarimo'tkazgich kristall sirtini himoyalash uchun loklar va kompaundlar bilan birgalikda kremniy organik vazelinlar qo'llanilmoqda. Vazelinlar, asosan, mayda dispersion to'ldirgich qo'shilgan kremniy organik suyuqliklardan olinadi. Ular yuqori izolatsion xossaga ega (20°C temperaturada solishtirma qarshiligi  $10^{14} \text{Om} \cdot \text{sm}$ , 150°C da esa  $10^{12} \text{Om} \cdot \text{sm}$  elektrik mustahkamligi 15kV/m).



Vazelinlarning loklar va kompaundlardan farqi shundan iboratki, ular yarimo'tkazgich kristallga surkalgandan so'ng mexanik kuchlanishlarni hosil qilmaydi.

Organik himoya qoplamlarning boshqa bir e'tiborli ko'rinishlaridan biri, silanlash usuli bo'lib, unda yarimo'tkazgich sirtida kremniy organik polimer pardalar to'g'ridan-to'g'ri monomer gidroliz jarayonida hosil qilinadi. Masalan, organogaloidosilan  $R_{4-i}SiX_i$  ( $i=1, 2, 3$ ), gidroliz reaksiyasi hisobiga parda vujudga keladi. Bunda R – organik radikal – metan  $CH_3$ , etil  $C_2H_5$ , fenil  $C_6H_5$ ; X – monomerni gidrolizlovchi qismi, masalan, galoid Cl, Br ishlatiladi.

Gidroliz-polimerlash reaksiyasi oldindan suyuq metilxlorsilan yoki silanli eritma va ularning karbon vodorod aralashmalarida namlangan namunalari, silanlar va ularning aralashma bug'larida ma'lum vaqt ushlab turilib o'tkaziladi.

Elektron qurilmalarni himoyalashning yana bir turi – botish usuli. Bu usul yuqori himoyalash xossasiga ega bo'lgan yupqa pardani (ayrimlari yaxshi yopishqoqlik va suv o'tkazmaslikni ta'minlaydi), biroq galoidosilanni gidroliz qilish paytida ancha miqdorda vodorodxlorid paydo bo'ladi. Bu esa, aluminiy kontaktlarini yemirishi mumkin. Biroq, silanli eritmalarga vodorod xloridni neytrallovchi sifatida kiritish mumkin. Eritmada galoidosilan zichligini boshqarish mumkinligi hisobiga jarayonni boshqarish mumkin. Parda qalinligi 0,3 mkm dan oshmaydi.

Sirtni silanlash usulining polimer loklar va kompaundlarni mexanik qoplash usuliga nisbatan asosiy afzalligi yarimo'tkazgich sirti bilan himoya parda orasidagi kimyoviy bog'lanishning mavjudligidir. Bu faqat sirtga yuqori yopishqoqlikni taminlamasdan, nuqsonlarni kamaytirib o'tishlarning teskari tavsifnomasini yaxshilash imkonini beradi. Undan tashqari, eritmalarda silanlash usuli murakkab uskunalarni talab qilmagan holda, himoya pardalarini gomogen o'sishi uchun ham sharoit yaratadi.

### 7.4.3. Kremniy oksid va nitridlar bilan himoyalash

Yarimo'tkazgichli asboblarda va IMSlar ishlab chiqarish texnologiyasida kremniy to'rt oksidi  $\text{SiO}_2$ , kremniy nitridi  $\text{Si}_3\text{N}_4$  keng qo'llanilmoqda. Asbobni planar tayyorlashda himoya pardalar  $\text{SiO}_2$  va  $\text{Si}_3\text{N}_4$  boshlang'ich taglikka  $p$ - $n$  o'tishlarni hosil qilishdan oldin qoplanadi.

Himoya parda  $\text{SiO}_2$  va  $\text{Si}_3\text{N}_4$  orqali mahalliy diffuziya o'tkazilishi  $p$ - $n$  o'tishni yarimo'tkazgich kristall sirtiga chiqishishi tashqi ta'sirdan himoyalagan holda ajratish imkonini beradi.

Dielektrik  $\text{SiO}_2$  va  $\text{Si}_3\text{N}_4$  himoya pardalarini olish usullari keyingi paragraflarda batafsil berilgan. Bunda biz qotishmali, qotishma diffuzion va meza-qotishmali usullardan olingan  $p$ - $n$  o'tishlarni himoyalash usullari haqida to'xtalamiz. Bu turdagi asboblarga himoya pardalari  $\text{SiO}_2$  va  $\text{Si}_3\text{N}_4$   $p$ - $n$  o'tishlar va omik kontaktlar olingandan so'ng qoplanadi.

Elektron-kovak o'tishli kremniy kristall sirtida oksidli himoyaviy pardalarni kuchli kimyoviy oksidlovchilarda ishlov berish yo'li bilan olinadi. Ko'pincha oksidlovchi sifatida azot kislotasidan foydalaniladi. Kremniy sirtida hosil bo'luvchi himoya pardasining bir jinsliliigi va qalinligi ko'pincha kimyoviy oksidlanish rejimiga bog'liq.

Elektron-kovak o'tishli yarimo'tkazgich plastinkalar sirtiga oksidli himoyaviy pardalar qoplash uchun kislorod tarkibli birikmalarning suvli eritmalaridan ham foydalanish mumkin. Bu birikmalar kremniy bilan o'zaro ta'sirlashib kislorod ajratadi va sirtini oksidlaydi. Natijada, yuqqa himoya pardasini hosil qiladi. Bunday eritmalar sifatida quyidagi aralashmalarni ko'rsatish mumkin: 100 ml suv va 50 mg natriy atsetati; 200 ml suv va 70 ml ortofosfor kislotasi; 100 ml suv va 50 ml oltingugurt kislotasi; 150 ml suv va 10 g dinatriyfosfat va boshqalardan foydalanish mumkin. Bu aralashmalarda 250 – 350°C temperaturada, 10 – 15 soat ishlov beriladi.

Kremniy plastinkalar va  $p$ - $n$  o'tishli kristallarni katalizator qatnashgan is gaz muhitida ishlov berish bilan bir jinsli  $\text{SiO}_2$

himoya pardalarini olish mumkin. Katalizator sifatida metan yoki etilen ishlatiladi. Bu usul qotishmali yoki diffuzion tuzilmalarda himoyaviy pardalarni olish imkoniyatini beradi.

#### 7.4.4. Metall oksidi pardalari bilan himoyalash

Metall oksidi pardalari yarimo'tkazgich modda sirtida himoya qoplamasini hosil qiladi. Bu pardalarning solishtirma qarshiligi  $10^{14}$ – $10^{15}$  Om·sm bo'lib, namga barqaror va issiqqa chidamlidir.

Yarimo'tkazgichli asboblarni ishlab chiqarishda *p-n* o'tishli kristallarni himoyalash uchun aluminiy, titan, berilliy, sirkoniy va boshqa oksidlari asosidagi himoya pardalari qo'llaniladi. Namunaviy modda qum ko'rinishida olinadi. Tashuvchi vosita sifatida esa galogen yoki vodorodning galoid birikmalaridan foydalaniladi. Himoya pardalarini o'tkazish reaksiya kameralarda olib boriladi, unda manba va yarimo'tkazgich modda orasida bir tekis o'zgaruvchi temperatura o'rnatiladi. Manba (qum) temperaturasi yarimo'tkazgich temperaturasidan yuqori bo'ladi, chunki reaksiya mahsulotlari *p-n* o'tishlar sirtiga o'tirishi kerak.

Manba va yarimo'tkazgich modda orasidagi temperatura gradiyenti oshishi natijasida himoya pardasining hosil bo'lish tezligi o'sadi.  $Al_2O_3$ ,  $BiO$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$  himoya pardalarini o'tkazish uchun manba temperaturasini 800–1200°C oraliqda, *p-n* o'tishli kristall temperaturasini 350–500°C oraliqda ulash kerak. Manba va yarimo'tkazgich kristall orasidagi masofa temperatura gradiyentiga bog'liq ravishda 10–20 sm bo'lishi kerak.

Elektron-kovak o'tishli yarimo'tkazgichli plastinkada himoya pardasi hosil bo'lishining texnologik jarayoni kvarts nayda olib borilib, uning bir uchiga manba, masalan,  $Al_2O_3$  li tigel va ikkinchi tomonga *p-n* o'tishli kristallar joylashtiriladi. Kvarts naydan oldin havo chiqarilib, keyin kerakli miqdorda tashuvchi reagent kiritiladi.

7.3-jadvalda metall oksidli himoya pardalarini qoplash muhitlari berilgan.

7.3-jadval

**Metall oksidli himoya pardalarini qoplash muhitlari**

Manba moddasi	Tashuvchi reagentlar	Manba temperaturasi, °C	Plastinka temperaturasi, °C
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	HCl, HBr	800–1200	400–500
BeO	HCl, HBr	900–1200	450–500
TiO <sub>2</sub>	HCl, HBr, Cl <sub>2</sub>	800–1000	480–500
ZrO <sub>2</sub>	HCl, HBr	1000–1200	490–800

Yuqorida ko‘rilgan metall oksidli himoya pardalaridan tashqari *p-n* o‘tishli yarimo‘tkazgich moddalarni himoyalash uchun 7,5% polietilen va 92,5% polibutilendan tashkil topgan aralashmada erigan qo‘rg‘oshin surikni manba sifatida ishlatish mumkin. Bu aralashma aralashtiriladi va *p-n* o‘tish sirtiga surkaladi. Quritish temperaturasi 120 – 140°C deb tanlanadi. Manba sifatida ruxxromat – ZnCrO<sub>4</sub> hamda ZnCO<sub>3</sub>, SrCrO<sub>4</sub> va Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> laridan iborat aralashmadan ham foydalanish mumkin. Bunday aralashmada suspenziya hosil qilish uchun uchuvchi eritmalarni aralashtirib hosil qilinadi va *p-n* o‘tishli kristall sirtiga surkaladi. Shundan so‘ng 200°C temperaturada termik ishlov berish natijasida metall oksidli himoya pardasi hosil bo‘ladi.

Himoya pardalarining manbalari sifatida ishqoriy yer metallari: titanatlar, sirkonatlar va stannatlardan ham foydalanish mumkin.

7.4-jadvaldayarimo‘tkazgichlar texnologiyasidahimoyalovchi, ajratuvchi va niqob qatlamlari sifatida keng foydalanuvchi moddalarning taqqoslama tavsifnomalari berilgan.

**Yarimotkazgich texnologiyisida qo'llaniladigan  
moddalarning taqqoslanma tavsifnomalari**

Modda tasnifnomasi	SiO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ta'qiqlangan soha, eV	8,0	4,5	5,0
Nisbiy dielektrik singdiruvchanlik (past chatotali)	4,0	6-9	8-9
Sindirish ko'rsatkichi	1,4-1,5	2,0	1,7-1,8
Eng katta solishtirma qarshiligi Om·sm	10 <sup>15</sup> -10 <sup>16</sup>	10 <sup>15</sup> -10 <sup>16</sup>	10 <sup>14</sup> -10 <sup>15</sup>
Kremniy bilan chegarada eng kichik sirt zaryad zichligi, sm <sup>-2</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>11</sup> -10 <sup>12</sup>
Elektrik mustahkamligi, V/sm	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>
Termik kengayish koeff. 200°C da, K <sup>-1</sup> (Si uchun 4,5·10 <sup>-6</sup> )	0,4·10 <sup>-6</sup>	3·10 <sup>-6</sup>	4·10 <sup>-6</sup>
Nisbiy radiatsiya chidamligi	1	10	100

### 7.4.5. Shisha pardalar bilan himoyalash

Shisha pardalar bilan himoyalash ko'pchilik turdagi yarimo'tkazgichli asboblarda va IMSlar uchun qo'llaniladi. Shisha bilan himoyalash asboblarning elektrik parametrlarini yaxshilaydi. Chunki, shisha qatlami *p-n* o'tishda ko'chuvchi ionlar bilan bog'lanadi va elektrik parametrni maromiga keltiradi. Shishali kimyoviy parda asbobning turg'unligi, mustahkamligi va ishlash muddatini orttiradi.

Shisha to'g'ridan-to'g'ri yarimo'tkazgich sirtiga yoki himoya qatlami ustiga surkalishi bilan birga chiqqichlarining ma'lum qismiga ham qoplanishi mumkin.

Kremniyli asboblarni himoyalash uchun borosilikatli, fosforosilikatli va qo'rg'oshin-silikatli shishalar  $m \cdot S_2O_3 \cdot n \cdot SiO_2$ ;

$m \cdot P_2O_5 \cdot n \cdot SiO_2$ ;  $m \cdot PbO \cdot n \cdot SiO_2$  lar qoʻllaniladi. Albatta, ancha murakkab tarkibli shishalar: aluminoborosilikatli  $m \cdot Al_2O_3 \cdot n \cdot BrO_3 \cdot p \cdot SiO_2$ , ruxborosilikatli  $m \cdot ZnO \cdot n \cdot BrO_3 \cdot p \cdot SiO_2$  va boshqalardan ham foydalanish mumkin. Undan tashqari, shisha tarkibiga modifikatorlar:  $Li_2O$ ;  $K_2O_3$ ;  $Na_2O$ ;  $CaO$ ;  $BeO$  va nodir yer metallarining oksidlari qoʻshiladi. Koʻp hollarda shisha organik erituvchilar (masalan, spirtida) kolloid eritma koʻrinishida olinadi.

Olingan eritma yoki suspenziya purkash usulida taglik sirtiga oʻtkaziladi va  $600 - 700^\circ C$  da spirt eritilgandan soʻng bir jinsli yupqa qatlam (0.1 mkm gacha) olinadi.

Kremniy asosidagi *p-n* oʻtishlarni himoyalashda aluminosilikat shishalar keng qoʻllanilmoqda. Chunki, bu shishalarning termik kengayish koeffitsiyenti kremniyning kengayish koeffitsiyentiga deyarli yaqin. Oksidlangan kremniy sirtiga shishani oʻtkazish himoyalalanishni yanada yaxshilaydi. Bunga asosiy sabab, kremniy oksid qatlam shisha bilan kremniy orasidagi yopishqoqlikni oshiradi.

7.5-jadvalda koʻp qoʻllanilgan aluminosilikat shishalar tarkibi keltirgan.

7.5-jadval

Aluminosilikat shishalar tarkibi

Shisha birikma nomeri	Tarkiblar %				
	$SiO_2$	$Al_2O_3$	BeO	CaO	$Na_2O$
1	35	35	29,9	-	0,1
2	10	55	34,9	-	0,1
3	45	20	34,9	-	0,1
4	10	60	-	29,5	0,5
5	5	45	-	49,5	0,5

Alyumosilikatli shisha, odatda, oksid pardani 0,2 mkm dan yupqa bo'lmagan qatlamli kremniy kristaliga surkaladi. Agar oksid qatlami undan kam bo'lsa, oksid qatlam orqali yarimo'tkazgich moddaga natriy ionlari kirib borishi mumkin. Bu esa *p-n* o'tish elektrik parametrlarini yomonlashtiradi. Shuning uchun aluminosilikatli shishalar, asosan,  $\text{SiO}_2$  qatlami mavjud yarimo'tkazgichli kristallarda qo'llaniladi.

Himoya pardalari sifatida xalkogenid shishalar va murakkab tarkibli shishalar ham qo'llaniladi.

### 7.5. Mexanik ishlov moddalari

Yarimo'tkazgichli elektron asboblari tayyorlash texnikasida boshlang'ich texnologik jarayon – bu yarimo'tkazgichni kerakli o'lcham, shakl va yo'nalishda kesib olish, uning sirtini talab darajasidagi sifatga keltirishdan iborat.

Hozirgi zamon texnologiyalarida yarimo'tkazgichli moddalar diametrlari 100÷300 mm, uzunligi 1 m va undan ham uzun bo'lgan monokristall quymalar shaklida olinadi. Elektron asboblari yoki integral mikrosxemalar tayyorlash uchun bu quymalardan qalinligi 0,2 – 0,7 mm bo'lgan disk shaklidagi plastinalar, ulardan esa kerakli o'lchamli kristallar qirqib olinadi. Qirqish ichki yoki tashqi qirrasini olmosdan bo'lgan disklar, olmosli po'lat simlar yoki tasmalar, ultratovushlar, qirqib oluvchi lazer nurlari yordamida amalga oshiriladi. Qirqish texnologiyalariga qo'yiladigan asosiy talablar – qimmatbaho quyilmalarning isrofgarchiligini kamaytirish, kristallning qarama-qarshi tomonini tekis-parallel bo'lishiga erishish.

Abraziv moddalar olingan plastina yoki kristallarga sirt yuzalari tekis va silliqlangan bo'lishi uchun mexanik ishlov beriladi. Bu jarayonlar uchun ko'proq abraziv moddalar ishlatiladi.

**Abraziv** – qattiqligi, kimyoviy va mexanik mustahkamligi, qirqib olish (abraziv) xususiyatli sun'iy yoki tabiiy modda.

Moddaning abrazivlik sifatini ma'lum bir vaqtda qirqib olingan modda miqdori bilan belgilanadi. Abraziv moddaning qattiqligi uning boshqa moddalarda qoldiradigan chiziq kattaligi bilan o'lchanadi.

Uning mexanik qobiliyati – moddalarni qirqish, yedirish va silliqlashda chidamliligidan iborat. Kimyoviy eritkichlar, kislotalar, suv va ishqor eritmalariga chidamliligi uning kimyoviy mustahkamligini belgilaydi. Abraziv kukunlari donalarining bir jinsli bo'lishligi ishlov berishda katta ahamiyatga ega.

Yarimo'tkazgichli kremniy, germaniy, gallyiy arsenidi va kremniy karbidi monokristallariga ishlov berishda abrazivlar donalari bir xil bo'lishini har xil o'lchamli teshiklari bo'lgan elaklar tizimidan o'tkazish yoki mikroskopik tahlil asosida aniqlanadi. Abraziv moddalar mikrodonalarining o'lchamlari bilan belgilanadi.

### Asosiy abraziv moddalar

**Elektrokorund** – aluminiy oksidi  $Al_2O_3$  kristallarini toza  $Al_2O_3$  ni eritish usulida olinadi. Qattiqligi jihatidan faqat olmos va kremniy karbididan keyin turadi. Mikroqattiqligi – 1800÷2400 kg·s/mm<sup>2</sup>, zichligi – 4 g/m<sup>3</sup>, yumshatish temperaturasi –  $T_r=1750^{\circ}C$ , eritish temperaturasi  $T_n=2050^{\circ}C$ , elastiklik moduli 76000 kG·s/m<sup>2</sup>, Moss bo'yicha qattiqligi 9.

**Kremniy karbidi (SiC)** – kvars qumini koks bilan aralashmasini elektr pechlarda 2000°C da qizdirish orqali olinadi. Mo'rt va rangsiz modda. SiC asosan yupqa, oltiburchakli plastinkalar ko'rinishida kristallanadi. Plastinkachalar o'lchovlari 2÷15 mm va o'zaro sust bog'langan SiC ning zichligi 3,16÷3,39 g/sm<sup>3</sup>, mikroqattiqligi 3400 kG·s/m<sup>2</sup>. Moss bo'yicha qattiqligi 9,2.

SiC o'zining abraziv sifati bilan elektrokorunddan 2 marta yaxshiroq, lekin mo'rtroq va qattiqligi kamroq.

**Bor karbidi (B<sub>4</sub>C)** – qattiqligi bilan faqat olmosdan keyin turadigan, lekin o'ta mo'rt modda. Zichligi 2.5 g/sm<sup>3</sup>, siqilishga



chidamlilik chegarasi  $196 \text{ kGs/mm}^2$ , temperaturaga chidamliligi  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ , parchalanish temperaturasi  $2350^\circ\text{C}$ .  $\text{B}_4\text{C}$  – bor kislotasi va neft koksini eritib olinadi.

Olmos kukunlari eng samarali abraziv moddalardir. Ular to'g'ri kristall shakliga ega bo'lgan olmos donachalarining aralashmasidan iborat bo'ladi. Donachalarning o'lchami va olinish usullariga qarab olmos kukunlari qirqib oluvchi (shlif kukuni) va mikrokukunlarga bo'linadi.

Sintetik olmoslardan 5 turdagi shlif kukunlar ishlab chiqariladi. Ular donalarining o'lchamlari, mo'rtligi va kesuvchi sirlari bilan farqlanadi. Tabiiy olmoslardan shlif kukunlarining 10 dan ortiq turlari mavjud. Bu abrazivlar sifatini donalarning asosiy o'lchamlari bilan ulardan farqlanuvchilarning hajmiy hissalarini belgilaydi. Masalan, asosiy o'lchamli donalar – 20%, kattaroqlari – 15%, kichikroqlari – 3% bo'lishi mumkin. Begona zarralarning miqdori 1,5% dan, namligi 0,2% ortmasligi talab etiladi.

Olmos mikrokukunlari shlif kukunlarga nisbatan donalari o'lchamlari kichikroq ekanligi bilan farqlanadi. Sintetik olmos mikrokukunlar AM va AN tabiiy olmosli mikrokukunlar AM va AN belgi bilan belgilanadi. ASM va AM turdagilari normal abraziv xususiyatga, ASM va AN turdagilar – yuqori darajadagi abrazivlikka ega. Mikrokukunlarni belgilashda harfli belgilardan tashqari, ular donalarini asosiy va minimal o'lchamliklari xossalarini bildiruvchi raqamli sonlar ham keltiriladi. Masalan, 60/40, 40/28, 10/7.

**Olmos plastinalar** – har xil o'lchamli mikrokukunlar va yuqorimolekular sirtiy aktiv moddalardan iborat bo'ladi. Olmos plastinalarini tayyorlash uchun tabiiy yoki sintetik mikrokukunlarning AMS-40 dan AMS-1 gacha bo'lgan markalarini har xil hissalaridan tashkil topgan 4 turi chiqariladi – V (yuqori), S(o'rtacha), N(past) va P(pasaytirilgan) zichlikli. Pastalar qattiq (T), quyuuq (G), mazga o'xshash (M) va suyuq (J) holatlarda chiqariladi.

**Sayqallovchi pasta** — xrom oksidi, stearin, parafin va olein kislotalaridan tayyorlanadi. Pasta 62 – 65% xrom oksidi, 10 – 15% – parafin, 35–38% – olein kislotalari, stearin, olingugurt, kaliy va natriy xromniydan iborat. Sayqallash qobiliyati  $3 \text{ mg/sm}^2$ , sayqallash chuqurligi – 0,05 mkm dan ko‘p emas.

**Polirit** – 97% nodir Yer metallari oksididan iborat. Sayqallash quvvati shisha uchun – 3 lmg/min.

**Sayqallovchi birikma** – aerosilan, glitserin, dietilendiamin, etilenglikol va deionlashgan suvdan iborat (1000 ml suv, 120 g aerosilan, 50 – 70 ml glitserin, 100 – 200 ml etilendialinli suvli eritmasi).

Elektron asboblari moddalariga ishlov berish, texnologik jarayonlar davomida ushlab turish uchun har xil qotirish yoki ushlab turish moddalari ishlatiladi.

Epoksid smola – shaffof yopishqoq suyuqlik sariqdan och qo‘ng‘ir ranggacha bo‘lishi mumkin. Yopishtiruvchi modda tayyorlash uchun smolaga, ishlatish maqsadiga mos holda (tez qotirish, isitib qotirish) aminlar, amidlar va angidridlar qo‘shiladi. Kristall quyimalarini asosga yopishtirish uchun smolaga kimyoviy qotirgichlar plastifikatorlar, to‘ldirgichlar va eritkichlar qo‘shilishi mumkin. Bunday tarkibli smolani namunaning quyma qirasiga va tutqichga  $20^{\circ}\text{C}$  da surtib, 4 soat kutilsa, yupqa parda hosil bo‘lib, buyum bir-biriga mustahkam birikib qoladi.

Bunday smolaning tarkibi: 36% – smola, 53% – kalsiy karbonati, 2% – kolloid kremnezem, 9% – alifatik amin.

**Polistirol** – oq va sariq rangli kukun, toluolda yaxshi erib, bir jinsli yopishqoq suyuqlik hosil qiladi.  $80 - 85^{\circ}\text{C}$  yumshaydi,  $140 - 160^{\circ}\text{C}$  da eriydi. Yopishtirish uchun quyma va asosga polistirolni surtib,  $85^{\circ}\text{C}$  bir necha soat quritiladi.

**Yelim BF** – sariqdan qo‘ng‘ir qizilgacha rangga ega shaffofdek yoki loyqasimon suyuqlik. Fenoloformaldegid va ponivinilbutiral smolalarni aralashtirib olinadi. Yelim choklari har xil moddalar uchun  $20 \cdot 10^{-4} \text{ kGs/m}^2$  dan  $350 \cdot 10^{-4} \text{ kGs/m}^2$  gacha

bo'lishi mumkin. Isitishga chidamliligi  $180^{\circ}\text{C}$ . Yarimo'tkazgichli quyimalarni asosga qotirish uchun bor yelimga 0,3:0,7 nisbatda olmos mikro kukunlari qo'shiladi.

**Vosk (jun)** – o'simliklar yoki asalariildan olinadigan sariq rangli termoplastik modda. Amalda ko'proq asalariidan olinadigan turi ishlatiladi. U benzinda yaxshi eriydi,  $60^{\circ}\text{C}$ – $70^{\circ}\text{C}$  da yumshaydi va undan yuqori temperaturalarda erib, asos sirti bo'ylab tarqaladi. Sovutilganda qotib, qattiq parda hosil qiladi. Undan plastinkalarni yedirish va sayqallash uchun tutqichlarga mahkamlash uchun foydalaniladi.

**Parafin** – parafinli neftni isitib, purkashdan hosil bo'ladigan, distillatlardan olinadigan oq termoplastik modda. Sovutilganda parafin kristallanadi, keyin sulfat kislotasi yordamida tozalanib, loy bilan oqartiriladi. Parafin yirik kristalli g'ovak tuzilishiga ega bo'lgani uchun sovutilayotganda juda yaxshi qisqarib kirishadi. Erish va yumshatish temperaturasi  $50^{\circ}\text{C}$ – $55^{\circ}\text{C}$ . Parafin yarimo'tkazgichli plastinka va kristallarni silliqlash va sayqallash uchun tutqichlarga mahkamlashda ishlatiladi.

**Kanifol** – sariq rangli shishasimon mo'rt modda bo'lib, ninasimon bargli daraxtlar smolasining suyuq qismni ajratib olish orqali olinadi. Ulardagi namlikning o'zgarishiga qarab (0,2 dan 0,4% gacha) A, B, D va E turdagi kanifol olinadi. Ulardagi begona moddalar 0,03 dan 0,1% gacha bo'lishi mumkin. Yumshash temperaturalari belgilariga mos holda 68, 66, 54 va 73 kanifol neft yoki o'simlik moylarida, suyuq uglevodlarda, spirt, skipidar va boshqalarda eriydi.

**Pitsein** –  $70^{\circ}\text{C}$ – $90^{\circ}\text{C}$  temperaturalarda yumshaydigan termoplastik modda. 75% kanifol va 25% asalari vosklarni aralastirish orqali olinadi. Moddani eritib, bir necha soat qaynatib, kerakli shakldagi qoliplarga quyib, ishga yaroqli shakldagi modda olinadi. Pitsein yarimo'tkazgichli plastinkalar va kristallarni asosga yopishtirishda katta mexanik mustahkamlikni ta'minlaydi.

**Sellak** – saqichga o‘xshash qattiq organik modda, yumshash temperaturasi  $80^{\circ}\text{C}$ – $90^{\circ}\text{C}$ , erish temperaturasi  $110^{\circ}\text{C}$ – $120^{\circ}\text{C}$ , zichligi  $1,04\text{ g/sm}^3$ , kamayish koeffitsiyenti  $3,6\%$ , suvning singdiruvchanligi  $5\%$  spirt va ishqorlarda eriydi. Yarimo‘tkazgichli plastina va kristallarni asosga yopishtirishda katta mexanik mustahkamlikni ta‘minlaydi.

**Serezin** – neft yoki tog‘ mumidan olinadigan, sariq rangli termoplastik kristall modda. Kimyoviy tarkibi bo‘yicha uglevododlar aralashmasidan iborat. Parafinga nisbatan serezin maydaroq kristall tuzilishga ega va shuning uchun uning erish temperaturasi yuqoriroq –  $60^{\circ}\text{C}$  –  $80^{\circ}\text{C}$ , sovuganda hajmiy kamayishi  $7$ – $8\%$ .

**Gliftal lok** – sintetik alkid saqich, kanifol va o‘simlik moyidan olinadi. Yuqori yopishqoqlikka ega bo‘lgan shaffof suyuqlik, yumshash temperaturasi  $100^{\circ}\text{C}$ – $110^{\circ}\text{C}$ . Yarimo‘tkazgichli plastina va kristallarni asosga yopishtirish uchun qo‘llaniladi. Buyumlarning sirtiga surtiladigan parda va qatlamli gliftalin loki yuqori darajada mexanik mustahkamlikni ta‘minlaydi.

## 7.6. Yarimo‘tkazgichlarga kimyoviy ishlov berish moddalari

Elektron qurilmalar va yarimo‘tkazgichli asboblarni ishlab chiqarishda yarimo‘tkazgichlarning sirtini tozalash, sifatini aniqlash va silliqlash uchun har xil kimyoviy aralashmalardan foydalaniladi. Buning uchun yuqori darajadagi fizik-kimyoviy xususiyatlarga ega bo‘lgan kislotalar, ishqorlar, oksidlar va tuzlar ishlatiladi. Bunday moddalarga qo‘yiladigan asosiy talablar:

– dastlabki moddada begona elementlar miqdori eng kam bo‘lishi;

– mexanik zarralarning bo‘lmasligi; yarimo‘tkazgichlarga kirib oluvchi kimyoviy elementlarning bo‘lmasligi

– yarimo‘tkazgich sirtiga va  $p$ - $n$  o‘tishga o‘tirib qolib, uni

elektrofizik xossalari ta'sir qiluvchi moddalarning bo'lmashligi kabilarni tashkil etadi.

Kimyoviy moddalar ishlatilishdan oldin ularning sifati qattiq tekshiruvdan o'tishi zarur.

**Kislotalar** – vodorod atomlari bilan bog'langan kislota qoldig'idan iborat molekularlar birikmasi. Kislotalar kislorodli ( $H_2SO_4$ ,  $H_2SO_3$  va b.) va kislorodsiz ( $HCl$ ,  $H_2S$  va b.) bo'lishi mumkin. Kislotalar suvda yaxshi eriydi.

**Nitrat kislota**  $HNO_3$  – rangsiz och sariq shaffof suyuqlik. Molekular og'irligi 63,02; azot kislota ikki xil - konsentrlangan (zichligi –  $1,37 \div 1,4$  g/sm<sup>3</sup>) va suyultirilgan (zichligi – 1,34 – 1,37 g/sm<sup>3</sup>) bo'ladi.

**Sulfat kislota**  $H_2SO_4$  – rangsiz, shaffof, moysimon suyuqlik. Molekular og'irligi – 98,08, zichligi 1,83 dan 1,835 g/sm<sup>3</sup> gacha. Ajralish temperaturasi 336°C. 3 xil modifikatsiyada chiqariladi – kimyoviy toza (XCh), tahlil uchun toza (ChDA) va toza (Ch). Ularda toza sulfat kislota hissi 93,5 dan 95,6% gacha. Har xil kimyoviy elementlar qoldiqlari 10<sup>-4</sup>% dan ortmaydi.

**Xlorid kislota**  $HCl$  – vodorod xloridning suvdagi eritmasi. Molekular og'irligi – 36,46; zichligi 1,17 dan 1,19 g/sm<sup>3</sup> gacha, qaynash temperaturasi 84°C. 20°C da suvda eruvchanligi 720 g/l, qoldiq elementlar hissi 5 · 10<sup>-4</sup>% dan ortmaydi.

**Ftorid kislota**  $HF$  – o'tkir hidli, rangsiz, shaffof suyuqlik. Molekular og'irligi – 20,01, zichligi 0,04 g/sm<sup>3</sup>, qaynash temperaturasi 19°C gacha.

**Ortofosfor kislota**  $H_3PO_4$  – rangsiz suyuqlik. 85 – 87% gacha asosiy moddadan iborat. Molekular og'irligi – 98,0; zichligi 1,87 g/sm<sup>3</sup>; erish temperaturasi 42,5°C; 1:1 nisbatdagi suvli eritmasi 213°C da qaynaydi. Suvda eruvchanligi (20°C da) – 500 g/l.

**Borat kislota**  $H_2BO_3$  – sulfat kislota boratlarini ajratish yo'li bilan olinadigan rangsiz kislotalar yoki yaltiroq kukun shaklida bo'ladi. Molekular og'irligi 411,9, zichligi 1,44 g/l, ajralish temperaturasi 70°C.

**Sirka kislota**  $\text{CH}_3\text{COOH}$  – oʻziga xos hidga ega boʻlgan rangsiz, shaffof suyuqlik. Molekular ogʻirligi 60,05, zichligi – 1,05 g/sm<sup>3</sup>. Qaynash temperaturasi 118,1°C. Havodagi bugʻlari zichligi 2,1. Havoda oʻz-oʻzidan yonish temperaturasi 454°C.

**Aminosirka kislota**  $\text{H}_2\text{NCH}_3\text{COOH}$  – suvda eruvchi, oq rangli kristallarda iborat kukun. Molekular ogʻirligi 75,07; 3 xil modda koʻrinishida XCh, ChDA va Ch chiqariladi.

**Gidrooksidlar** deb molekulasi metall atomi va gidrooksid ionlari (-OH)dan tuzilgan kimyoviy birikmalarga aytiladi. Barcha gidratlar - qattiq moddalar boʻlib, koʻpchiligi suvda erimaydi. Suvda yaxshi eriydigan gidrooksidlar *ishqorlar* deb ataladi. Yarimoʻtkazgichlar texnologiyasida KOH va NaOH koʻproq qoʻllaniladi. Ishqorlar terilarni oʻyish xususiyatlariga ega boʻlgani uchun ularni *oʻyuvchi ishqorlar* deyiladi.

Gidrooksidlarga xos boʻlgan xususiyatlaridan biri – ular kislotalar bilan reaksiyaga kirishib, tuzlar hosil qilishidir. Suvda eriganda ishqorlar gidrooksid va metall ionlariga ajraladi. Bu jarayonda issiqlik ajraladi. Eritmada ishqorlar hissasining ortishi bilan dissotsiatsiya (ajralish) darajasi kamayadi. Eritmada dissotsiatsiya darajasi kattaligiga qarab kuchli (KOH, NaOH, LiOH) va kuchsiz  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Be}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  ishqorlar guruhlar mavjud. Ayrim gidrooksidlar amfoter, yaʼni ham gidrooksid ham kislota xususiyatlariga ega boʻlishi mumkin –  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Be}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ .

Yarimoʻtkazgichli asboblarda ishlab chiqarish jarayonlarida, toza kislotalar olish va yupqa metall pardalari hosil qilishda KOH, NaOH va ularning har xil koʻrinishlari koʻproq ishlatiladi.

**Tuzlar** deb molekulasi kislota qoldigʻi va metall atomlaridan iborat kimyoviy birikmalarga aytiladi. Odatda, tuzlar kislotalardagi vodorodni metall atomlari bilan yoki gidrooksidlarda gidrooksid guruhini kislotalar bilan aralashgan tuzilishiga ega boʻladi. Ular har xil rangli va shakldagi qattiq kristallar koʻrinishida boʻlib, metall yoki uning oksidini kislota bilan oʻzaro taʼsirlashuvi

natijasida hosil bo'лади. Tuzlar oddiy yoki neytral ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), o'tkir ( $\text{NaHSO}_4$  – tarkibida vodorod bo'lgan) va asosli (tarkibida gidrooksid bo'lgan  $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{SO}_3$ ) bo'lishi mumkin.

Tuzlar yarimo'tkazgichlarni kimyoviy va elektrolitik ishlovlarda keng qo'llaniladi. Amalda ko'proq ishlatiladigan tuzlar  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – natriy sulfat tuzi – oq rangli kukun holatida,  $\text{NiCl}_2$  – yashil kristallar,  $\text{NiSO}_4$  – nikel sulfati,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – natriy karbonati,  $\text{PbCl}_2$  – qo'ng'ir tusli kukun,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  – mis nitriti – ko'k rangli kristall,  $\text{AgCl}$ ,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{AgBr}$ ,  $\text{AuCl}_3$ ,  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_6]$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{SbF}_3$ ,  $\text{HN}_4\text{Cl}$ ,  $\text{SnCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4$  va boshqalar.

Yarimo'tkazgichli kristallar va plastinkalarning sirtini tozalash, sirtiy holatini maqsadga muvofiq holatga keltirish, tadqiqot ishlarini olib borish va elektron asboblarda hamda mikro integral sxemalar ishlab chiqarishni zaruriy texnologik jarayonlardan biri modda sirtini oksidlash va hosil bo'lgan oksidlarni olib tashlashdan iborat kimyoviy va elektrokimyoviy yedirishdir. Yedirish jarayonlari yordamida yarimo'tkazgich sirtini mexanik ishlovlar tufayli buzilgan qismidan tozalash, plastinani yoki kristall qalinligini kerakli holatga keltirish, dislokatsiyalarni aniqlash, plastina yuzasida oldindan qo'zg'olgan relyef hosil qilish, *p-n* o'tish chegarasini aniqlash kabi masalalarni hal etish mumkin.

Kimyoviy yedirgichlarning asosini oksidlovchi va oksidlarni erituvchi moddalar tashkil etadi. Bulardan tashqari, qo'yilayotgan vazifaga qarab, kimyoviy reaksiyalarni tezlatuvchi yoki sekinlatuvchi moddalar, kristall sirtining sifatini yaxshilash uchun alohida moddalar ham qo'shiladi. Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida oksidlovchi modda sifatida, asosan, nitrat kislotasi  $\text{HNO}_3$  va pergidrol  $\text{H}_2\text{O}_2$ , erituvchi moddalar fluorid kislotasi  $\text{HF}$  va suv  $\text{H}_2\text{O}$  ishlatiladi. Kimyoviy reaksiyalar sekinlatuvchi sifatida sirka kislotasi  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , tezlatuvchi sifatida brom  $\text{Br}_2$ , yod  $\text{J}_2$  va boshqalar ishlatiladi. Yarimo'tkazgichlarni yedirgichlarga qo'yiladigan asosiy talablari – reaksiya paytida namunalarda sirtida

qoldiqlari qolmasligi, namuna xossalariga ta'sir etuvchi gazlar ajralmasligi va h.k.

Yedirgichning tarkibini tanlashda yarimo'tkazgich kristallari xususiyatlari – kristall tuzilishi, kristallografik yo'nalishi, yedirish tezligi va chuqurligi, sirtning natijaviy holatiga qo'yiladigan talablar e'tiborga olinadi.

Ayrim ko'p qo'llaniladigan yarimo'tkazgich moddalar uchun yedirgichlar turlarini ko'rib chiqaylik.

Germaniy uchun: asosan 3 xil turdagi – kislotali, ishqorli va pergidrol yedirgichlar ishlatiladi.

a) **Kislotali yedirgichlar** – nitrat, fluorid va sirka kislotalaridan iborat bo'lib, ba'zilariga  $\text{Br}_2$  qo'shiladi.  $\text{Br}_2$  – bo'g'uvchi hidga ega bo'lgan, qizg'ish-qo'ng'ir rangli uchuvchan suyuqlik.

**Yedirgichlar.** 1. Nitrat, fluorid va sirka kislotalarini 2:1:2 og'irlik nisbatda olingan eritmasi. Kristallik yo'nalishi (100) bo'lgan namunalar sirtiga ishlov berish uchun qo'llaniladi.

2.  $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$  kislotalari 5:3:3 nisbatda olinib, 0,6 miqdorda  $\text{Br}_2$  qo'shiladi. Namunalar sirti optik silliqlash uchun ishlatiladi. Undan *p-n* o'tish chegarasini aniqlash uchun ham foydalanish mumkin.

3. 5:5:3 nisbatda  $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$  kislotalari aralashmasidan kristallarni yedirish va *p-n* o'tishning chegarasini aniqlash uchun foydalaniladi.

4. Germaniy sirtidagi dislokatsiyalarni aniqlash uchun  $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$  kislotalarining 4:2:15 nisbatda olingan aralashmasidan foydalaniladi.

5. Germaniy namunalari oynadek sirtini hosil qilish uchun nitrat va fluorid kislotalari hamda  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  10% eritmasini 1:2:1 nisbatda olingan aralashmasidan foydalaniladi.

6. Germaniyning yaltiragan sirtini olish uchun 10 ml nitrat, 20 ml fluorid kislota va 5 ml  $\text{PdCl}_2$  lardan iborat eritmalardan foydalaniladi.



b) **Ishqoriy yedirgichlar** – ishqorlarning suvdagi eritmasiga yana boshqa elementlarni qo‘shib olingan eritmalar.

1. 10 ml NaOH yoki KOH ning suv bilan 1:4 yoki 1:3 nisbatdagi eritmasi germaniy plastinalarining qalinligini boshqaradigan yemirish uchun ishlatiladi.

2. 10 ml NaCl ni 10 % li eritmasi 100 ml suv bilan aralashtirib germaniyni yedirish, chizig‘iy tuzilishini va donadorlik chegaralarini aniqlash uchun ishlatiladi.

d) **Pergidrol yedirgichlar** – pergidrol  $H_2O_2$  ning suv bilan aralashmasidan va ayrim hollarda boshqa elementlarni ham qo‘shiladigan sirtini hosil qilish uchun ishlatiladi. Namunalarning elektrofizik xususiyatlarini va *p-n* o‘tish chegarasini aniqlash uchun foydalaniladi.

2. 1:4:1 nisbatda olingan  $H_2O_2:H_2O:HF$  aralashmasini (111) va (100) yo‘nalishini germaniy namunalari sirtini yedirish uchun ishlatiladi.

3. 100 ml 3%  $H_2O_2$  va  $C_2NaOH$  aralashmasi germaniy namunalari sirtini yedirishda ishlatiladi. Yedirilish tezligi 5mkm/min.

Kremniy uchun kislotali va ishqorli yedirgichlar ishlatiladi.

**Kislotali yedirgichlar** nitrat, ftorid va sirka kislotalaridan tayyorlanadi.

1.  $HNO_3$  va HF kislotalarining 1:3 nisbatdagi aralashmasi kremniy sirtini oynasimon qilib sayqallaydi.

2. Nitrat, ftorid va sirka kislotalarining 3:1:3 nisbatda olingan aralashmasi har qanday kristallik yo‘nalishiga ega bo‘lgan kremniy kislotalarini va plastinalariga kimyoviy ishlov berish uchun ishlatiladi.

3.  $HNO_3:HF:CH_3COOH$  kislotalarini 5:5:3 nisbatda olingan aralashmasini kristallarni yedirish va *p-n* o‘tish chegarasini aniqlash uchun ishlatiladi.

4. 20 ml  $HNO_3$ , 30 ml HF, 10 ml  $CH_3COOH$  kislotalari va 0,1 ml brom, 10 ml suv va 1 g  $Cu(NO_3)_2$  lardan iborat aralashma

chegarviy va aralash dislokatsiyalarni har qanday yoʻnalishli kremniy sirtlarida aniqlashda ishlatiladi.

**Ishqoriy yedirgichlar** – asosan NaOH va KOH larning suvdagi eritmalaridan iborat boʻlib, gʻadir-budur sirtlar hosil qilish uchun ishlatiladi.

1. NaOH yoki KOH ning 30% li suvli eritmasi kristallarning tarkibiy tuzilmasini aniqlashda ishlatiladi.

2. 20 ml NaOH ning 4% eritmasi va 10 ml NaOCl natriy gipoxloridning 40% eritmalarini aralashmasi kremniy namunalarini elektron mikroskopda tadqiq qilish uchun tayyorlanadi.

Galliy arsenidi va GaAs uchun yedirgichlar sifatida quyidagilar ishlatiladi:

1. 5% li NaOH va 30%  $H_2O$  ni 5:1 nisbatda olingan aralashmasi sirtida moddani 10 – 15 mkm/min tezlikda olib tashlash uchun ishlatiladi.

2. HF,  $H_2O_2$  va suvning 3:1:2 nisbatda olingan aralashmasi namuna sirtini silliqlash uchun qoʻllaniladi.

**Yarimoʻtkazgichlarni elektrolitik usulda yedirish moddalari.** Yarimoʻtkazgichlar texnologiyasida moddalarga elektrokimyoviy ishlov berish alohida ahamiyatga ega. Buning uchun yarimoʻtkazgich moddani anod sifatida elektrolitga choʻktirilganda uning kimyoviy yemirilishi yuz beradi. Elektrolitdan oʻtayotgan tok kuchini boshqarish oson boʻlgani uchun bunday usul sodda va qulay hisoblanadi.

Elektrokimyoviy usulda namuna sirtlarini yedirish, sayqallash, *p-n* oʻtish chegarasini aniqlash, modda tarkibiy tuzilishi va kirishma atomlarining taqsimotini va namunaga har xil geometrik shakllar berish uchun qoʻllanilishi mumkin. Bu maqsadlar uchun koʻproq fluorid kislotaga organik birikmalar qoʻshilgan eritmalar ishlatiladi.

### **Germaniy uchun elektrolitlar**

1. NaOH ning suvdagi 10% eritmasi. Namunaviy germaniy anod va germaniydan qilingan tayoqcha katod rolini oʻynaydi.

2. 300 g/l  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ , 30 g/l  $H_3BO_3$  va bir necha tomchi

HCl kislotalari aralashmasi. Bunday elektrolitda anod-germaniy namunasi, katod-nikel tayoqchasi.

### **Kremniy uchun elektrolitlar**

1. 1:10 nisbatda olingan HF va gidroksil birikmalari (spirt, glitserin, glikogol va b.) aralashmasidan iborat elektrolitda anod-kremniy namunasi, katod plastina tayoqchasi.

2. NaF kislotalarini 0,2 – 0,4 qismli eritmasiga aralashmaning  $\text{pH}=3$  bo'lguncha HF qo'shiladi. Tok zichligini  $0,05 \pm 0,15 \text{ A/sm}^2$  oralig'ida o'zgartirish bilan kerak tezlikdagi namuna yemirilishiga erishiladi.

**Yarimo'tkazgichli birikmalar uchun elektrokimyoviy yemirtirish elektrolitlari.**

1.  $\text{HClO}_4$  xlorat kislota, sirka anhidridi va suvning 10:40:2 nisbatda olingan aralashmasi ishlatiladi. Bu elektrolit indiy antimonidini yemirish uchun ishlatiladi.

2. Perxlor va sirka kislotalarining 8:2 nisbatda olingan aralashmasi asosan AsGa kristallarini yemirtirish uchun ishlatiladi.

3. NaCl va  $\text{NaNO}_3$  ning suvda eritilgan aralashmasi AsGa ga elektrokimyoviy ishlov berish uchun ishlatiladi.

4.  $\text{HNO}_3$ , HF va  $\text{CH}_3\text{COOH}$  kislotalarini 5:5:3 nisbatda olingan aralashmasi SiC kristallarini elektrokimyoviy usulda yemirtirish uchun ishlatiladi.

**Yarimo'tkazgichli namunalarni yuvib tozalash uchun ishlatiladigan moddalar.** Yarimo'tkazgichli asboblari va mikroelektronika texnologiyalarida kristallarni kerakli shakl va sifat darajasiga yetkazish uchun bir necha texnologik jarayonlarga o'tkaziladi. Bu kristallarni kesish, tekislash, shakl berish, sayqallash va yemirtirish kabilar.

Har bir texnologik jarayon kristallda ma'lum bir buzilishlarni vujudga keltiradi. Ularni 5 guruhga bo'lish mumkin:

1. **Mexanik buzilishlar** – metall bo'lakchalari, abraziv zarralar, har xil tolachalar va b.

2. **Organik moddalar o'tirib qolishi** – moy, parafin, kompaund va b.

3. Ionlarning o'tirib qolishi – tuzlar, kislota komponentlari va ishqorlar.

4. Kimyoviy buzilishlar – oksidlar, sulfidlar, nitridlar va h.k.

5. Gazsimon kirishmalar – gazlar, shamlar parafinlar.

Nuqsonlar yoki kremniy sirtiga o'tirib qolgan zarralarni chiqarib yuborish uchun qulay usullardan biri – ularni davriy ravishda yuvib tozalab turish talab etiladi. Namuna sirtini mana shunday nuqsonlardan tozalash uchun kislota, eritkich, distirlangan va deionizatsiya qilingan suvlar ishlatiladi.

**Eritkichlar** – bular moy, vosk, tabiiy va sintetik saqich, kauchuk, alkaloidlardan iborat ko'p tarkibli aralashmalar. Odatda, eritkichlar sifatida uglevodorod aralashmalari (benzin, ligroin, kerosin, skipidar va boshqalar), individual uglevodorodlar (benzol, toluol, ksilol va boshqalar), spirtlar (etil, metil, propil, butil, amil va boshqalar) efirlar (etil, butil, metil, sirka kislotasi efirlari (atsetat), ketonlar (atseton, metil, etil keton), serouglerod, xloroorganik birikmalar va boshqalar ishlatiladi.

Ba'zi bir organik eritgichlar xususiyatlarini ko'rib chiqaylik.

1. **Aviatsiya benzini** – to'g'ridan-to'g'ri neftni qayta haydash orqali olinadi. Aviatsiya benzining kristallanish temperaturasi  $60^{\circ}\text{C}$ . Turiga qarab rangi ham o'zgarib turuvchi hidli suyuqlik.

2. **Erituvchi benzin** – yengil o't oluvchi, tez qaynovchi suyuqlik.

3. **Ligroin  $\text{C}_6\text{H}_{14}$ - $\text{C}_8\text{H}_{18}$**  – oson o't oluvchi rangsiz suyuqlik.

4. **Benzol  $\text{C}_6\text{H}_6$**  – rangsiz, o'ziga xos hidli, tez alanganuvchi suyuqlik.

5. **Toluol  $\text{C}_7\text{H}_8$**  – rangsiz, tez o't oluvchi suyuqlik.

6. **Spirt raktifikat  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$**  – rangsiz, o'tkir hidli suyuqlik, qaynash temperaturasi  $78.3^{\circ}\text{C}$ .

7. **Etil (sun'iy)** – rangsiz suyuqlik.

8. **Distirlangan suv, deionizatsiyalangan suv va boshqalar**

## Bobga doir savol va mashqlar

1. Elektronikaning amaliy vazifasiga nimalar kiradi?
2. Birinchi yassi p-n-p o'tishli tranzistor qachon va qanday usulda tayyorlangan?
3. Tuzilmalarining konstruktiv-texnologik tayyorlanishiga qarab, integral mikrosxemalar nech ta guruhga bo'linadi?
4. Mikrosxemalarni tayyorlash texnologiyasining asosiy bosqichlarini ko'rsating.
5. Mikrosxemalar ishlab chiqarish jarayoniga qanday talablar qo'yiladi?
6. Mexanik buzilgan qatlam qanday qismlardan tashkil topgan bo'ladi?
7. Yarimo'tkazgichli va dielektrik moddalarga qanday ishlov beriladi?
8. Plastinalarni jilolash nima uchun amalga oshiriladi?
9. Yarimo'tkazgich kristallari bilan har xil kimyoviy moddalarning qotishmalarini hosil qilish usulining mohiyatini tushuntiring.
10. Kavsharlash qotishmalarini tanlashda kristallning qanday xususiyatlariga ahamiyat beriladi?
11. Asbobning elektrik parametrlariga p-n o'tish sirt holatining ta'siri qanday?
12. Mexanik ishlov moddalariga misollar keltiring.

## VIII bob. ELEKTRON TEXNIKASI MODDALARINI OLISH TEXNOLOGIYALARI

### 8.1. Kristallarni oʻstirish mexanizmlari

Yarimoʻtkazgich monokristallar va epitaksial qatlamlar oʻstirish qattiq faza, suyuq faza va gaz fazadan amalga oshirilishi mumkin. Biz quyida ushbu hollarning har biri haqida toʻxtalib oʻtamiz.

#### 8.1.1. Kristallarni qattiq fazadan hosil qilish

Bunday jarayonlar 3 asosiy yoʻnalishda olib boriladi: 1) qattiq fazada va qovushish holida deformatsiyalash qizdiruvi vositasida qayta kristallash; 2) polimerda yuz beruch avrilishlar (oʻzgarishlar, oʻtishlar); 3) amorf holat va oʻta toʻyingan qattiq eritmadan qayta kristallash usullari.

Bu joyda qayta kristallash deganda qattiq fazadan kristall oʻstirilganda kristall panjarasi simmetriyasi (tuzilishi) oʻzgarishligi (rekristallanish) yoki boshqa simmetriyali yangi kristall panjarasi hosil boʻlishi tushuniladi. Bu usullarning afzalliklari: materialning suyulish temperaturasidan ancha past temperaturalarda kristallar oʻstirish imkoniyati kristallar olish texnologiyasini soddalashtiradi; zarur shaklli kristallar olish texnologiyasi soddalashadi, chunki oʻsayotgan kristall shakli oldindan tayinlanadi; past temperaturada diffuziya koeffitsiyentlari kichik boʻlganligi tufayli kirishmalarning oʻsayotgan kristalldagi taqsimoti dastlabki moddadagidek saqlanadi.

Mazkur usullarning kamchiliklari ham bor: qattiq fazadan kristallashning ehtimoliy markazlari miqdori koʻp boʻladi. Markazlar vujudga kelishini va binobarin, yirik yarimoʻtkazgich monokristallar oʻstirishni boshqarish qiyin. Shuning uchun bu

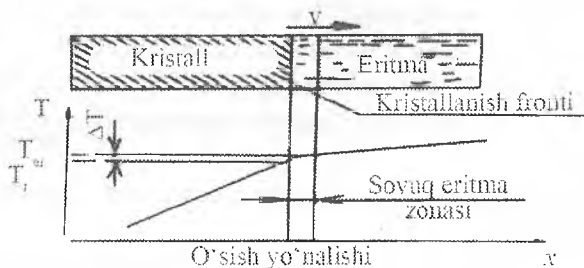
usullar batafsil qaralmaydi. Amorf holatdan va o'ta to'yingan qattiq eritmalardan qayta kristallash usullari yuqqa epitaksial qatlamli yarimo'tkazgich moddalar va mikroelektron asboblarni texnologiyasida yetarlicha keng qo'llanishga ega bo'lmoqda.

### 8.1.2. Kristallarni suyuq fazadan hosil qilish

Kristallarni bunday o'stirishning ikki guruh usullari ishlab chiqarilgan bo'lib, ular suyuqlarning o'zidan o'stirish va eritmalardan o'stirish usullaridir.

Bu usullar sanoatda keng qo'llaniladi. Ularning unumdorligi yuqori. Jarayonlar kirishmalar deyarli bo'lmagan bir tarkiblovchi tizimda borani tufayli o'stirish tezligi ancha katta yetarlicha toza kristallar olinadi. Kristallarni bu usullarda o'stirishda mumkin bo'lgan eng yuqori temperaturalar talab qilinadi. Bu esa, ba'zi muammolarni keltirib chiqaradi. Xususan, jarayon yuqori temperaturada borishi uchun quvvatli qurilmalar bo'lishi zarur. Ushbu sharoitda suyuqlar ifloslanishi ham mumkin.

Monokristallarni suyuqlardan o'stirishning barcha usullari suyuqlarning yo'nalgan kristallanish jarayonlariga asoslangan. Bunda suyuqlar  $\Delta T$  qadar o'ta sovugan holda kristallning o'sishi bir fazaviy chegarada amalga oshadi va issiqlik kristallanish frontidan asosan bir yo'nalishda olib ketiladi (8.1-rasm). Bu jarayonda bitta monokristall hosil bo'ladi.



8.1-rasm. Suyuqlardan yo'nalgan kristallanish usulida kristall o'stirishda temperatura taqsimoti

Yoʻnalgan kristallanish usullari 3 guruhga boʻlinadi:

1) kristallanuvchi moddani suyultiradi va keyin uni bir tomonidan kristallanadi (normal yoʻnalgan kristallanish);

2) suyulgan kristallanuvchi moddadan monokristall tortib olinadi (suyulmadan kristallarni tortib olish);

3) har bir bosqichda tayyorlama moddaning faqat uncha katta boʻlmagan qismi (sohasi) ketma-ket suyultirilib, keyin u kristallanadi (sohalarning qayta kristallanish usullari).

**Suyulmalarning normal yoʻnalgan kristallanish usullari.**

Bu usullarning barchasida kristall suyulmani ushlab turuvchi idish (tigel) devorlariga yopishgan holda oʻsadi. Kristallanish jarayonida keskin sovush hosil qilish uchun suyulmali tigelni isitkichga nisbatan jildirib oqiziladi. Bu jarayonni busiz, suyulmali tigelni temperatura gradiyenti mavjud boʻlgan muhitda sovutish evaziga ham bajarish mumkin.

Normal yoʻnalgan kristallanish jarayoni maxsus ravishda kristallanish markazlari hosil qilmasdan ham oʻtkazilishi mumkin. Bu holda kristallanuvchi modda jarayon boshida toʻla suyuq holatda boʻladi. Tigelning modda suyulish temperaturasidan past temperaturadagi sohasi sovuganda, odatda, bir necha kristallanish markazlari oʻz-oʻzidan hosil boʻladi. Oʻsish jarayoni samaradorligini oshirish uchun bir necha xil tuzilishli tigellar ishlatiladi (8.2-rasm).

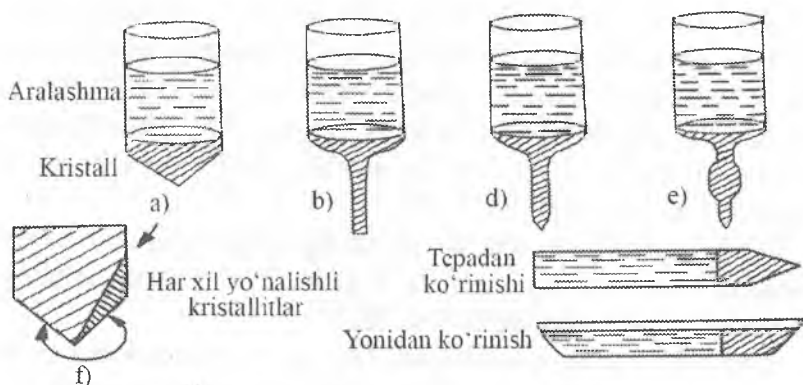
Dastavval kristallanuvchi modda hajmini kamaytirish uchun tigelning bir uchi konus shakliga keltiriladi. Bu joyda kristallanish markazi hosil boʻlish ehtimolligi ortadi. Oʻsish uchun qulay yoʻnalgan markaz boshqalarining oʻsishini toʻxtatadi. Bunday natijaga erishish uchun tigelning bir uchi kapillar shaklda yasaladi (8.2.-b, d rasm).

Normal yoʻnalgan kristallanish jarayonini amalga oshirish uchun kerakli anjomlar:

– aniq shaklli tigel, u kimyoviy barqaror (birikma hosil qilmaydigan, taʼsirlashmaydigan) moddadan tayyorlanadi;

– belgilangan issiqlik maydoni hosil qiladigan pech:

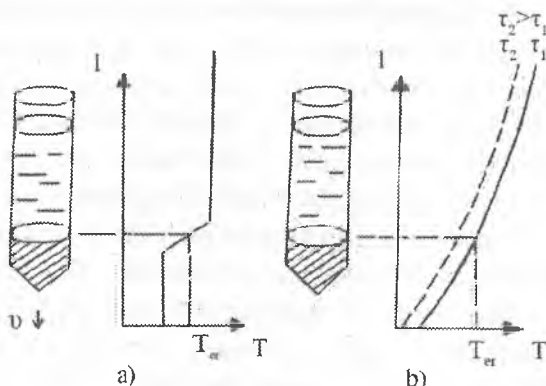




8.2-rasm. Normal yo'nalgai kristallanish usulida kristallar o'stirishda qo'llaniladigan tigellar shakllari

– pechning temperaturasini va tigel yoki isitkichni mexanik ko'chirishni boshqaradigan tizim.

Tigelni suyulma ho'llamasligi, u yetarli termik va mexanik mustahkamlikka ega bo'lishi kerak. Tigellarni tayyorlashda ko'pincha kvars shisha, aluminiy oksidi  $Al_2O_3$ , sirkoniy dioksidi, toriy dioksidi va boshqalar qo'llaniladi.



8.3-rasm. Normal yo'nalgan kristallanish usulida kristallar o'stirishda pechlarda temperatura taqsimoti

Kristallarni pechlarda turli temperatura gradiyenti mavjud bo'lgan sharoitda ham o'stiriladi, bunda orasidagi temperaturalar farqi bo'lgan izotermik sohalar vujudga keltiriladi. Bir soha moddaning suyulish temperaturasidan yuqorida, ikkinchisi pastda bo'ladi (8.3-a rasm). Bu sohalar orasida issiqlik almashinuvi juda kam bo'lishi choralari ko'riladi.

Agar tigelni jildirmasdan pechning temperaturasini umumiy pasaytirilishi hisobiga kristall o'stirilsa, bu holda temperatura taqsimoti 8.3-b rasmdagidek bo'ladi.

Normal yo'nalgan kristallash bir qator yarimo'tkazgichlar va dielektriklarning yirik kristallarini olish uchun qo'llaniladi.

Qarab chiqilgan usulning asosiy kamchiligi shundaki, o'stirilayotgan kristall va tigelning issiqlikdan chizig'iy kengayish koeffitsiyentlari har xil bo'lishi tufayli bu usulda mukammal kristall olish nisbatan qiyin.

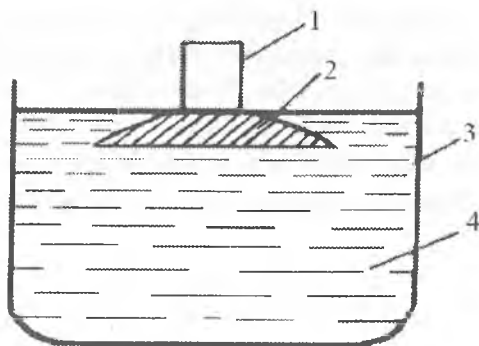
**Suyulmadan kristallni tortib olish usullari.** Bu usullar nazorat qilinadigan va qaytalanadigan xossalari yarimo'tkazgichlarning yirik monokristallarini ishlab chiqishda eng ko'p qo'llaniladi. Kristallarni suyulmali tortib olish qoidasini birinchi marta 1916-yili Choxralskiy taklif qilgan. Shuning uchun bu usullar turkumini umumlashtirib *Choxralskiy usuli* deyiladi. Bu usulning tavsifining mukammal tuzilishli monokristallar olish bandida keltiriladi.

Bu o'rinda biz Choxralskiy usuli haqida qisqacha ma'lumot beramiz. Bu usul quyidagidan iborat: sinchiklab tozalangan dastlabki modda (kukun yoki polikristall parchalari)ni tigelga solinadi va suyulguncha qizdiriladi. Jarayonni jips yopiladigan kamera (bo'lma)da vakuum sharoitida yoki neytral (inert) oksidlovchi yoki tiklovchi muhitda o'tkaziladi. So'ngra suyulmaga o'lchami bir necha mm bo'lgan xamirturush kristall botiriladi.

Xamirturushning uchi qisman suyulgan va muayyan temperatura maqomiga erishilgandan so'ng, suyulmaning kristallanishi xamirturushdan boshlab yuz beradigan qilib, uni tortib chiqara boshlanadi. Kristallning diametrini tortib olish

tezligini tanlash yoki suyulmani qizdirish yo'li bilan boshqariladi.

**Kiropulos usuli.** Bu usulda xamirturush suyulmaga kiritiladi va keyin undan tortib chiqarilmaydi, kristall suyulma ichida o'sa boshlaydi, bunga modda suyulishi temperaturasiga mos izoterma suyulmaning ichkarisiga ko'chishiga sababchi bo'ladi. Bunga erishish uchun suyulmaning temperaturasi pasayganda (xamirturush) tutqich orqali o'sayotgan kristall sovutiladi. Kiropulos usuli kristall diametrining balandligi (uzunligi)ga nisbati katta bo'ladigan kristallarni o'stirishda qo'llaniladi (8.4-rasm).



8.4-rasm. Kiropulos usulida kristallar o'stirish:

1-xamirturush; 2-kristall; 3-tigel; 4-suyulma.

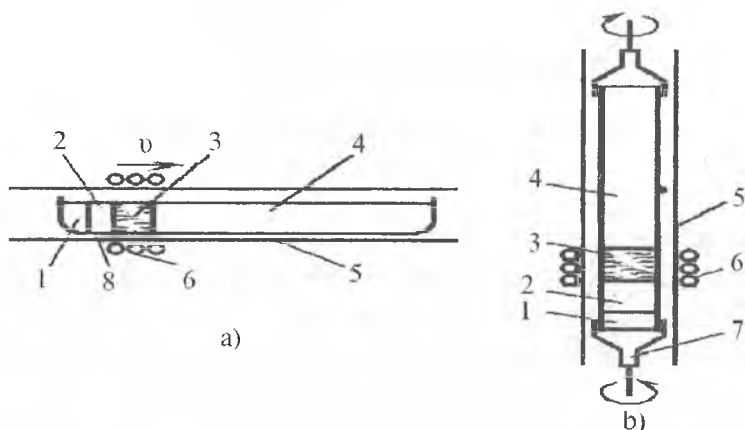
Kristallarni suyulmadan tortib olish usullari normal yo'nalgan kristallanish usulidan quyidagi afzalliklarga ega. Kristall erkin fazoda o'sadi, tigel unga mexanik ta'sir ko'rsatmaydi, qurilma o'sayotgan kristall o'lchamlarini har xil qilib olish imkonini beradi. Kristall o'sish jarayonini kuzatib turish mumkin.

Bu usullar kremniy monokristallari olishda asosiy o'rin tutadi. Jahonda yiliga 2000 tonnadan ortiq kremniy monokristallari olinadi. Texnologik qurilmalar tobora takomillashmoqda. Masalan, 1960-yilda kremniy kristallari o'stiradigan tigelning sig'imi 1 kg bo'lsa, hozir u 60 kg dan ortiq. O'stirilgan kristallar

diametri 150 – 300 mm va uzunligi 1,5–2 m ga yetdi. Ularning tuzilishi ham mukammallashib bormoqda, dislokatsiyalarsiz kristallar o‘stirilmoqda.

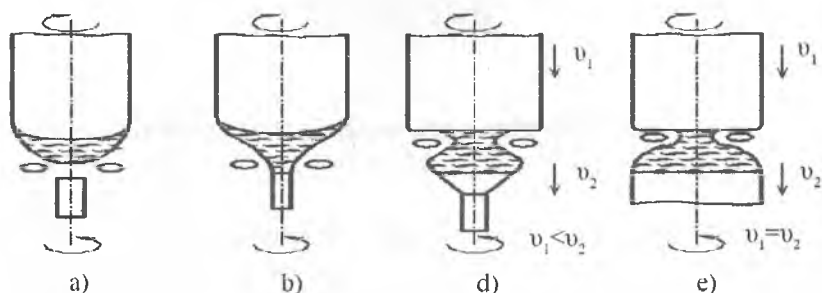
**Sohaviy suyultirish usullari.** Bu usullar yarimo‘tkazgich monokristallarini o‘stirish va moddalarni chuqur tozalashda muhimdir. Ularning bir fazilati – kristallarni o‘stirayotganda kirishmalarni ham bir tekis kiritish imkoniyatidir. Bulardan gorizontal va vertikal sohaviy suyultirish va Verneyl usullarini ko‘rsatish mumkin.

Gorizontal suyultirish usulida (8.5-a,b rasm) kristallanuvchi modda tigelda joylanadi. Tigelning bir chetiga monokristall xamirturush o‘rnatiladi. Jarayon boshida xamirturush – dastlabki modda chegarasida suyuq soha hosil qilinadi. Uning dastlabki modda orqali xamirturushdan to tigelning boshqa chetiga siljib borishi tufayli monokristall o‘sib boradi. Mazkur usulda kristallni tigeldan foydalanmasdan ham o‘stirish mumkin (suzuvchi soha usuli).



8.5-rasm. Sohaviy suyultirish usulida kristall o‘stirish: a) gorizontal sohaviy suyultirish; b) vertikal tigelsiz sohaviy suyultirish: 1–xamirturush; 2–kristall; 3–suyulgan soha; 4 –dastlabki modda; 5 – jips yopiladigan kamera devori; 6 – induktor; 7 – kristall tutkich; 8 – tigel.

Bu usul juda toza monokristallarni o‘stirishda keng qo‘llaniladi. Tigelsiz sohaviy suyultirish jarayonida namunadagi suyulgan sohani sirtiy taranglik kuchlari ushlab turadi (8.6-rasm). Kristallning shakli qanday bo‘lishligi gidrostatik bosim va suyulmaning sirtiy tarangligi munosabatiga bog‘liq. Bu usulni kremniy texnologiyasida qo‘llash diametri 100 mm va undan ortiq bo‘lgan monokristallar olish imkonini beradi.

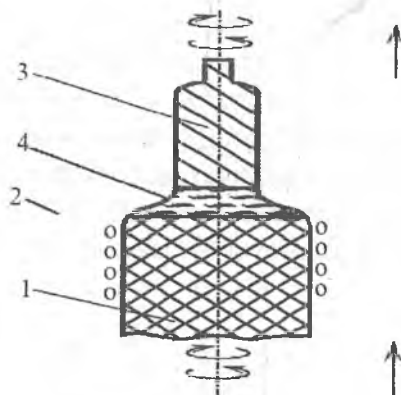


**8.6-rasm. Induktor diametri suyultiriladigan sterjen diametridan kichik bo‘lgan holda tigelsiz sohaviy suyultirish usulida kristallni o‘stirish jarayoni bosqichlari** ( $v_1$ ,  $v_2$  – mos ravishda, sterjen va xamirturush harakati tezliklari): a – suyulma tomchisini hosil qilish; b – xamirturushning ho‘llanishi; d – diametрни shakllantirish; e – o‘zgarmas diametri kristallni o‘stirish.

Monokristallarni tigelsiz taglikdan o‘stirish (garnissaj) usuli ham ishlab chiqilgan.

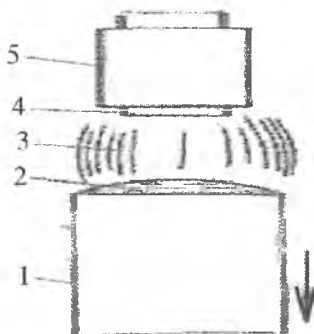
Bu usulda suyultiriladigan katta diametrli sterjen (taglik)ning yuqorigi yuzida suyulma hosil qilinadi va xamirturush yordamida kristall tortib olinadi (8.7-rasm).

Bu usulning afzalligi shundaki, uning yordamida uzunlik va ko‘ndalang kesim bo‘yicha kirishmalar yuqori darajada bir tekis taqsimlangan monokristallar olish mumkin. Monokristallarni tigelsiz o‘stirish usullari qiyin suyuladigan yarimo‘tkazgich moddalar olishda ayniqsa ahamiyatlidir.



8.7-rasm. Kristallni taglikdan tigelsiz o‘stirish usuli:  
1–taglik; 2– induktor; 3 – o‘stirilayotgan kristall; 4 – suyulma.

Verneyl usulida xamirturush kristall uchini alangada suyultiriladi. Bu usulni birinchi marta sapfir monokristallarini o‘stirishda qo‘llanilgan (8.8-rasm). Uni issiqqa bardoshli moddalar kristallarini o‘stirishda qo‘llaniladi. Undan hozir sapfir, rubin, rutil, sirkoniy oksidi, ittiriy oksidi, nikelli ferrit va boshqa kristallarni o‘stirishda foydalaniladi.



8.8-rasm. Alanga bilan suyultirish usulida (Verneyl usuli) kristallni o‘stirish:  
1–o‘stirilayotgan kristall; 2–suyulma; 3–alanga; 4–dastlabki modda kukuni va kislorod yuboriladigan naycha; 5–vodorod yuboriladigan naycha.

### 8.1.3. Kristallarni eritmadan o‘stirish

Bu jarayon oldin ko‘rilgan toza suyulmadan o‘stirishga nisbatan ancha past temperaturalarda olib borilishi mumkin.

Ushbu usul bilan:

– juda yuqori suyulish temperaturasiga ega bo‘lgan moddalar kristallarini (masalan, olmosni),

– suyulish temperaturasida tarkiblovchi bug‘ bosimi juda yuqori bo‘lgan yoki parchalanib suyuladigan kimyoviy birikmalarni;

– suyulmasi yuqori darajada qovushqoq bo‘lgan moddalar kristallarini;

– past temperaturali polimorf (ko‘p shaklli) moddalar kristallarini o‘stirish mumkin. Jarayonning past temperaturali bo‘lishi ko‘pincha tozaroq va mukammalroq monokristallar olish imkonini beradi.

Erituvchiga qo‘yiladigan talablar:

– kristall o‘stirish jarayonining temperaturasini muhim darajada pasaytirishi va o‘z bug‘ining bosimi yetarlicha past bo‘lishi kerak;

– o‘stirilayotgan kristallning ifloslamasligi, ya‘ni taqsimot (segregatsiya) koeffitsiyenti kichik bo‘lishi kerak;

– uning kristalldagi atomlari neytral kirishma bo‘lishi ma‘qul. Bunday erituvchini tanlab olish ancha qiyin. Bu talablarni qanoatlantiruvchi quyidagi holatlarni ko‘rsatish mumkin:

1) o‘stirilayotgan kristall tarkibiga kirmaydigan modda erituvchi xizmatini bajaradi (masalan, NaCl kristallini o‘stirishda suv).

2) o‘stirilayotgan birikmaning tarkiblovchilaridan biri erituvchi bo‘ladi (masalan, GaP kristallini o‘stirishda fosfor).

Birinchi holda o‘stirilgan kristall erituvchining barcha tarkiblovchilari kirishmalar sifatida qoldiq kirishmalar bilan birgalikda mavjud bo‘ladi. Shuning uchun bunday kristallar uncha toza emas.

Ikkinchi holda eritmada chet moddalar yo‘q, o‘stirilayotgan kristallarning tozalik darajasini faqat eritma tarkiblovchilari tozaligi aniqlanadi.

Eritmadan kristall o'sishi holda bu jarayon quyidagi bosqichlardan iborat:

- dastlabki tarkiblovchilarning erishi;
- tarkiblovchilarning eritmaning suyuq fazasi orqali kristallanish fronti tomoniga diffuziyalanishi;
- kristallanish frontida tarkiblovchilarning o'tirib qolishi;
- kristallanish issiqligining sochilishi.

Eritmadan hosil qilinayotgan kristallarning o'sish tezligi o'z suyuqlaridan olinadigan kristallarnikiga nisbatan ikki-uch tartib chamasida kam ( $10^{-3}$ – $10^{-2}$  sm/soat) bo'ladi, ammo uni oshirishning ba'zi choralari ham mavjud.

Kristallanuvchi moddaning erituvchanligini oshirish uchun shu modda bilan ta'sirlashuvchi tarkiblovchilar eritmaga qo'shiladi. Ularni mineralizatorlar deyiladi.

Eritmalardan yarimo'tkazgichlar monokristallarini o'stirish usullari bir-biridan:

- eritmaning kristallanuvchi modda bilan o'ta to'yinishini qanday hosil qilinishi bilan;
- erituvchining bug'lanish darajasi bilan;
- kristallanuvchi modda manbayi va xamirturush orasida temperaturalar farqini vujudga keltirish bilan;
- elektrik maydonda kristallanish mexanizmlari bilan;
- to'yingan eritmani sovutish tezligi bilan;
- butun namunada hosil qilinadigan temperatura gradiyenti bo'lgani holda suyultirish bilan farqlanadi.

Maxsus xamirturushlar kiritmasdan, balki kristallanish markazlarining o'z- o'zidan (spontan) paydo bo'lishi va o'sishi yo'li bilan ham eritmadan kristallarni o'stirish (omnaviy kristallanish) yoki kristallni xamirturush atrofida o'sishini nazorat qilib o'stirish ham mumkin.

Eng sodda holda kristall o'sishi uchun kerak bo'lgan eritmaning o'ta to'yinishini erituvchining bug'lanishi yoki to'yingan eritmaning sekin sovutilishi orqali paydo qilinadi. Bu holda

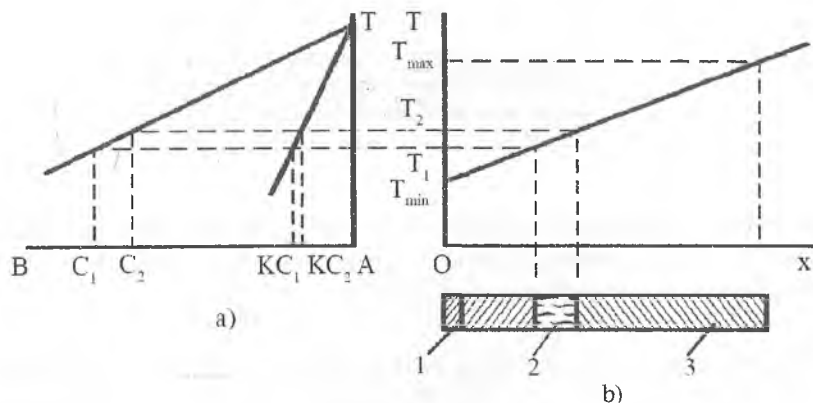


ommaviy kristallanish oqibatida kichik kristallar olinadi, ularda nuqsonlar ko'p, kirishmalar juda notekis taqsimlangan bo'ladi.

Yirik kristallarni eritmalardan xamirturush asosida o'stirish xuddi suyulmadan o'stirish usullariga o'xshab ketadi.

**Temperatura gradiyentli sohaviy suyultirish usuli.** Ushbu usul kristallarni eritmadan o'stirishning muhim usulidir.

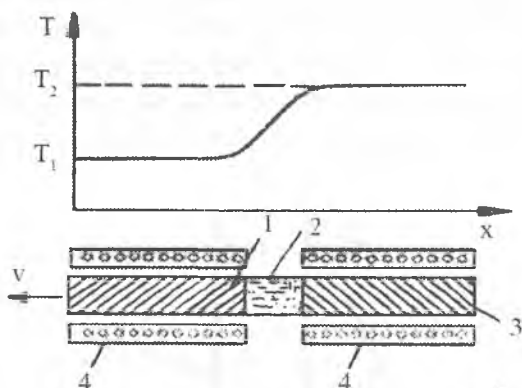
1 xamirturush va dastlabki 3 (A) modda orasida 2 erituvchining yupqa qatlami joylashgan. Ular temperaturasi taqsimoti 8,9-b rasmda tasvirlangan pechda joylanadi. Tizimning  $T_{maks}$ , eng katta temperaturasi A moddaning suyulish temperaturasidan past, eng kichik  $T_{min}$  temperaturasi esa A-B evtevtikaning suyulish temperaturasidan yuqori qilib olinadi. B erituvchi A modda bilan tutashgan holda suyuq faza hosil qiladi va u har ikki yo'nalishda gorizontol ravishda tarqaladi. Soha chegaralari temperaturasi  $T_1$  va  $T_2$  bo'lib qolguncha (ular A-B tizimning muvozanatliy holatiga mos keladi) A moddaning erishi davom etadi.



8.9-rasm. Temperatura gradiyenti bo'lgan holda kristallni sohaviy suyultirish usulida o'stirish: a-A (kristallanuvchi modda)-B (erituvchi) tizimi holatlari diagrammasining qismi; b -namuna bo'ylab temperatura taqsimoti (1-A modda xamirturushi; 2 - suyuq A-B eritma sohasi; 3 - dastlabki A modda).

$A$  moddaning muvozanatliy zichligi o'ng chegara yaqinida chap chegara yaqinidagidan yuqori. Suyulgan sohada  $A$  modda zichligining gradiyenti o'rtnashadi va u sohaning issiq chegarasidan sovuq chegarasiga tomon diffuziyalanadi. Oqibatda suyulgan soha temperatura gradiyenti ta'siridagi namunaning issiqroq uchi tomonga ko'chadi. Bu ko'chish soha ichida erituvchi zichligini o'zgartiradi.  $B$  erituvchining sohadagi miqdori uning  $A$  qattiq fazadagi eruvchanligidan ham kamayadi.

Suyulgan soha ko'chishi tezligini oshirish uchun temperatura gradiyenti ( $dT/dx$ ) va  $A$  tarkiblovchining suyuqlikda  $D$  diffuziya koeffitsiyenti katta bo'lishi va likvidus chizig'i og'maligi ( $dT/dS$ ) kichik bo'lishi kerak.



8.10-rasm. Temperatura gradiyenti bo'lgan holda bir jinsli kristallarni sohaviy suyultirish usulida o'stirish: 1-- $A$  modda kristali; 2-- suyuq  $A$ - $B$  eritma sohasi; 3-- dastlabki  $A$  modda; 4-- ikki sohali pech.

Eritmaning suyulgan sohasi orqali elektr toki o'tkazib, izotermik sharoitda kristallash mumkin. Bu holda ionlarning ko'chishi va Pelte effekti hisobiga kristallanish frontida eritma o'ta to'yinadi. Manba – eritma chegarasidan Pelte issiqligi ajraladigan eritma-taglik chegarasida esa u yutiladigan qilib tok yo'nalishi tanlanadi. Pelte issiqligi ta'sirida manba qatlami eriydi, shu vaqtda boshqa

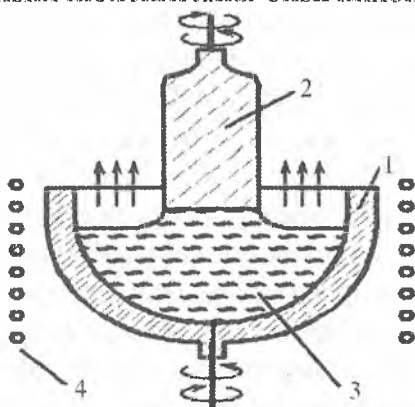
chegarada temperatura pasayib, eritma o'ta to'yinib qoladi va kristallanish yuz beradi. Elektrik maydonda bunday kristallanish jarayon temperaturasini bir muncha pasaytirish imkonini beradi, bu esa mazkur usulning afzalligidir.

## 8.2. Monokristallar olish usullari

Monokristallarni qattiq, suyuq va gaz fazadan o'stirish usullarini umumiy tarzda ko'rdik. Endi ko'p qo'llaniladigan ayrim usullarni alohida qarab chiqamiz.

### 8.2.1. Choxralskiy usulida monokristallar o'stirish

8.11-rasmda bu usulning sxemalari tasvirlangan. Bu usul kremniy, germaniy, parchalanadigan va parchalanmaydigan  $A^{III}B^V$  tipidagi va boshqa yarimo'tkazgichlar monokristallarini o'stirishda eng ko'p qo'llaniladigan usuldir. Texnologik jihatdan u juda qulay – tigel yoki isitish tizimi tuzilishini o'zgartirib, mukammal tuzulishli monokristallar olish imkoniyatlariga egadir.



8.11-rasm. Choxralskiy usulida yarimo'tkazgichlarni tozalash va ularning monokristallarini o'stirish chizmasi: 1 – konteyner (tigel, qayiqcha); 2 – suyulmaning kristallangan qismi; 3 – kristallanadigan suyulma; 4 – isitgich; Q – issiqlik ketkazish yo'nalishi strelka bilan ko'rsatilgan.

Choxralskiy usuli bilan monokristallar o'stirish jarayoni quyidagi bosqichlardan iborat:

1) monokristall xamirturush uchini suyulma bilan o'rash-xamirturushlash va bunda suyulmaning dastlabki ulushlarini kristallash;

2) diametrga chiqish – xamirturushda o'stirilgan bo'yin o'lchamida to kerakli diametrgacha monokristallni o'stirib borish;

3) doimiy diametrlil monokristall silindrik qismining o'sishi;

4) teskari konus deb atalgan kristall uchining hosil bo'lishi va monokristallning suyulmadan uzilishi;

5) o'stirilgan kristallni sovutish.

1) xamirturushlash. Xamirturushda, imkoni boricha, dislokatsiyalar miqdori kam bo'lgani ma'qul. Xamirturush sirtidagi buzilishlarni mexanik va kimyoviy ishlov berib bartaraf qilinadi. Suyulmaga xamirturush uchi tushirilgandan va suyulma bilan o'ralgandan keyin bo'yinni o'stirish amaliga kirishiladi. Bo'yinning uzunligi uning bir necha diametri chamasida bo'lishi kerak.

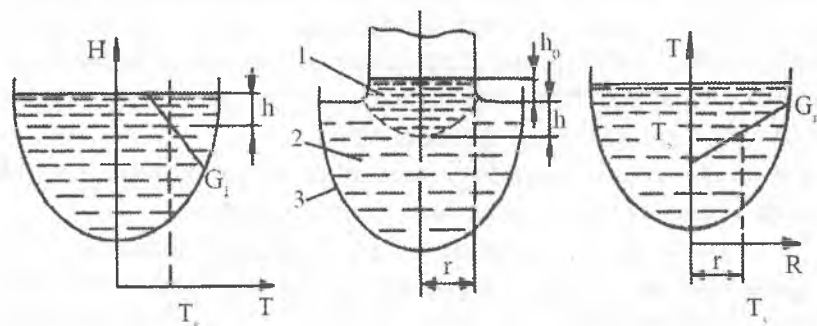
Bo'yin katta chiziqli tezlikda o'stiriladi. Xamirturushdan bo'yinga o'sib kirgan dislokatsiyalar vakansiyalar bilan ta'sirlashish oqibatida qisman yoki tamomila siqib chiqariladi;

2) diametrga chiqish. Bunda dislokatsiyalar zichligi ortib ketmasligi uchun asosiy shart termik kuchlanishlarni kamaytiruvchi, har tarafga o'sish burchaklari kichik bo'lishi kerak. Masalan, kremniy monokristallining har tarafga o'sish burchagi  $60^{\circ}\text{C}$  bo'lganda unda dislokatsiyalar zichligi  $10^5 \text{ sm}^{-2}$ , bu burchak  $10^{\circ}\text{C}$  bo'lganda dislokatsiya zichligi  $10^3 \text{ sm}^{-2}$  bo'ladi;

3) monokristall silindrik qismining o'sishi. Doimiy diametrlil monokristall o'sishi bosqichida monokristallni shakllantirishda jarayonning issiqlik sharoiti yetarlicha rol o'ynaydi. Ular kristall va suyulmadagi o'q va radius bo'ylab temperatura gradiyentlarini paydo qiladi.

Bular esa kristallanish fronti shakli va monokristalldagi termik kuchlanishlar, shuningdek, kristallanish fronti yaqinida suyulmaning o'ta sovugan sohasi o'lchamlariga bog'liq bo'ladi. Suyulmada temperatura tigel devoridan uning markazi tomonga, tigelning tubidan suyulma sirti tomonga kamayib boradi.

Oqibatda o'q bo'ylab  $G_x$  va radius bo'ylab  $T$  temperatura gradiyentlari vujudga keladi. Ularning  $T_s$  suyulish temperaturasi izotermasi bilan kesishishi suyulmaning o'ta sovugan sohasini hosil qiladi (8.12-rasm).



8.12-rasm. Tashqaridan unga issiqlik keltirib turiladigan tigeldagi suyuqlikda o'ta sovugan sohaning vujudga kelish chizmasi: 1–suyulmaning o'ta sovugan sohasi; 2–uning asosiy hajmi; 3–tigel;  $H$ –suyulma balandligi koordinatasi;  $R$ –tigeldagi suyulma radiusi koordinatasi;  $T$ –temperatura;  $r$  va  $h$  – mos ravishda, suyulmadagi o'ta sovugan sohaning radiusi va chuqurligi;  $h_0$ –suyulma ustuni balandligi.

Suyulmaning o'ta sovugan sohasi diametri suyulma ustuning diametrini aniqlaydi. Suyulma ustuni balandligi suyulmaning sirtiy taranglik koeffitsiyentiga to'g'ri proporsional, uning zichligiga, o'stirilayotgan kristall radiusiga teskari proporsional bo'lib, odatda, u 3–5 mm ni tashkil etadi.

4) o'sayotgan monokristall diametri birinchi navbatda suyulmadagi temperatura gradiyentlariga bog'liq.

Isitkichning temperaturasi oshganda o'ta sovugan soha o'lcha-

mi kichrayadi, kristall ustunida temperatura ortib kristallanish fronti ko'tariladi, ustun balandligi oshadi, oqibatda monokristall diametri kamayadi.

Isitkich temperaturasi pasayishi yoki kristallanish tezligi kamayishi, aksincha, suyulmadagi o'ta sovugan soha o'lchamini oshiradi, ustun balandligini kamaytiradi va unga qarshi tomonga egilishga olib keladi. Monokristall diametri ortadi. Suyulmadagi temperatura gradyentlari kristall va tigel aylanishlari nisbiy tezligiga ham bog'liq. Kristallning aylanish nisbiy tezligi oshganda o'ta sovugan soha o'lchami kamayadi, uning temperaturasi oshadi, kristall ostidagi suyulma ustuni ko'tariladi, monokristall diametri kamayadi. Aksincha, kristallning aylanish nisbiy tezligi kamayganda monokristall diametri ortadi.

Suyulma ustuni balandligi kristallanish jarayonida issiqlik tengligi (balansi) buzulishiga ham sezgir bo'ladi.

5) monokristallning uzunligi va ko'ndalang kesimi bo'yicha temperaturaning notekis taqsimlanganligi oqibatida kristallda termik kuchlanishlar vujudga keladi. Ular dislokatsiyalar hosil bo'lishi kritik kuchlanishi ortganda monokristallda dislokatsiyalar paydo bo'ladi. Mazkur kritik kuchlanish (suyulish temperaturasida), masalan, kremniy uchun 130, germaniy uchun 15, galliy arsenidi uchun 7 gs/mm<sup>2</sup> temperatura pasayganda u ortib boradi: 930°C da kremniy uchun – 220, 830°C da –330°, germaniy uchun mos ravishda 40 va 88 gs/mm<sup>2</sup>.

Ba'zi kirishmalar dislokatsiyalar hosil bo'lishi kritik kuchlanishini keskin oshirib yuboradi (masalan, germaniydagi fosfor). A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> birikmalarining ba'zilarida oltingugurt (S), tellur (Te), rux (Zn) shunday ta'sir qiladi.

Yuqorida keltirilgan ma'lumotlardan ko'rinadiki, kremniy 150 mm dan ortiq diametrli dislokatsiyasiz monokristallarini oson o'stiriladigan yagona yarimo'tkazgichdir. Germaniyda kritik kuchlanish 4 marta kichik, uning hatto 30 – 40 mm diametrli dislokatsiyasiz monokristallarini o'stirish qiyin masaladir.

### 8.2.2. Suyuqlik germetizatsiya usuli

Bu usul oddiy Choxralskiy usulining eng ko'p tarqalgan ko'rinishlaridan biridir. Uni parchalanuvchi yarimo'tkazgich birikmalar monokristallarini o'stirishda qo'llaniladi.

Bu usulda suyulmani jips yopadigan suyuqlik qatlami bilan qoplanadi, uning ustiga esa inert gaz bosimi hosil qilinib, bu bosim birikmaning suyulish nuqtasida uchuvchan tarkiblovchi bug'ining muvozanatliy bosimidan 1,5–2 marta yuqori bo'lishi kerak. U arsenidlar uchun 1,5–2 atm., indiy yoki galliy fosfidi uchun 60 – 80 atm. bo'ladi. Jips yopuvchi suyuqlik (qoplovchi flyus) sifatida shishasimon xossalari  $B_2O_3$  bor angidridi ishlatiladi. Suyulgan holatda  $B_2O_3$  juda kam faol. Ammo qattiq holatda xona temperaturasida havodan suvni kuchli yutadi. Ishlatishdan oldin uni vakuumda quritiladi.

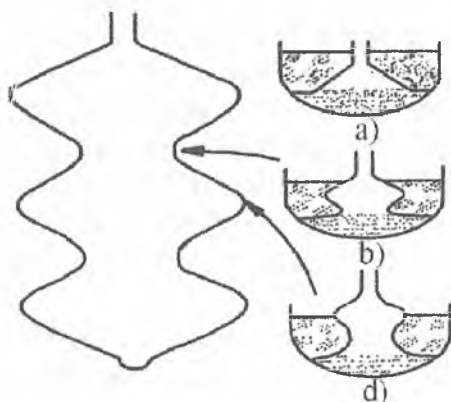
Jarayonning boshlang'ich paytida flyus tamomila shaffof. Ammo u  $1000^{\circ}C$  dan yuqorida uchuvchan (As yoki P) tarkiblovchilarni yoki oksidlarni yutib noshaffof bo'lib qoladi. Monokristall o'sishini kuzatish qiyinroq bo'ladi.

Flyus issiqlikni o'tkazmaslik xossasiga ega bo'lgani uchun suyulma sirtidan issiqlik ketishini keskin kamaytiradi. Flyusning qalinligi kam va monokristall diametri kichik bo'lsa, bu effekt kam seziladi, ammo flyus qatlami katta bo'lsa, katta diametrlil monokristall o'sishi barqaror bo'lmay qoladi. Monokristall tayinli diametrga o'sib yetganda, (8.13-a rasm) kristallanish frontida ajralgan suyulish yashirin issiqligi sochilib ulgurmasdan suyulma ustunida to'planadi. Shuning uchun ustun balandligi ortadi va monokristall diametri kamayadi (monokristall "tagidan kesiladi") (8.13-b rasm).

Ammo, monokristallning boshlang'ich qismi flyus qatlami ostidan chiqqandan keyin qisilgan gazda issiqlik ko'tarilib ketishi (konveksiya) tufayli mazkur qism tez soviy boshlaydi, kristallanish frontida issiqlik ketishi oshadi va monokristall har

taraf lama o'sa boshlaydi (8.13-d rasm). Issiqlik muvozanati o'rnatilgach, o'sayotgan monokristall diametri o'zgarishi jarayoni yana takrorlanadi.

Ehtiyojga binoan flyusning me'yoriy qalinligi 10 – 12 mm. Bundan kam bo'lganda suyulmadan uchuvchan tarkiblovchi ko'p ketib qoladi, ortiq bo'lganda diametрни boshqarish qiyinlashadi.



8.13-rasm. Parchalanadigan yarimo'tkazgich birikmaning qalin flyus ostida o'stirilayotgan yirik monokristallning diametri o'zgarishi (suyulmaning o'sishi turli bosqichlarida unga o'zgarimas kattalikli quvvat keltirib turiladi).

Parchalanuvchi yarimo'tkazgich birikmalar monokristallar mukammalligiga suyulmaning stexiometrik tarkibidagi chetlanishi katta ta'sir qiladi. Shuning uchun suyultirilgan birikma tarkibi stexiometrik tarkibga juda yaqin bo'lishi kerak.

Suyulmaning stexiometrik tarkibdan chetlanishi naqadar muhim ekanligini quyidagi ma'lumot tasdiqlaydi: galliy arsenidi (GaAs) da stexiometriyadan chetlanish to  $10^{18}$ – $10^{19}$   $\text{sm}^{-3}$  gacha zichlikdagi nuqtaviy nuqsonlar keltirib chiqaradi.

Flyus ostidan chiqayotgan monokristall temperaturasi yetarlicha katta bo'lsa, flyus uning sirtidan oqib tushadi, birikma parchalanib, sirt qatlamidan uchuvchan tarkiblovchi uchib ketadi,



oqibatda sirtida dislokatsiyalar vujudga keladi. Buning oldini olish uchun mazkur usulda o‘stirilayotgan monokristallarda flyus sohasida temperaturaning kichik geradiyentlarini hosil qilish zarur, sirtida temperatura 700 – 800° C dan yuqori bo‘lmasin. Bu temperaturada flyusning qovushqoqligi monokristall sirtida himoyalovchi qatlam hosil qilish uchun yetarli bo‘ladi.

### 8.2.3. Tigelsiz sohaviy suyultirish usuli

Yarimo‘tkazgich moddalar texnologiyasida tigelsiz sohaviy suyultirish jarayoni faqat kremniyning kislorod miqdori kam va noasosiy zaryad tashuvchilar yashash vaqti katta bo‘lgan ( $10^3$  mks) monokristallarini olish uchungina qo‘llaniladi. Elekrotexnika sanoatining talablari ortib borishi munosabati bilan bu usulning qo‘llanishi kengaymoqda.

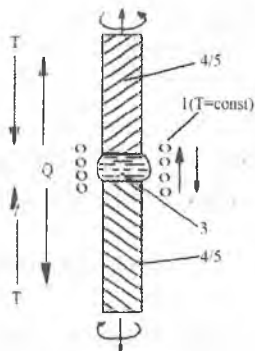
Tigelsiz sohaviy suyultirish usuli Choxralskiy usuliga nisbatan kam unumli va murakkab, yuqori chastotali qimmat apparaturalarda amalga oshiriladi.

Biroq kvars tigel va grafit issiqlik shaxobchasining yo‘qligi bu usul bilan tozalik darajasi ancha yuqori kremniy monokristallarini olish imkonini beradi.

Dastlabki polikristallik kremniy sterjenida (tayoqchasida) suyulgan sohani yuqori chastotali generatorda (5,28 MHz) ta‘minlanadigan induktor (pech) vujudga keltiriladi (8.14-rasm). Bu usul jarayonini vakuumda ham, inert gazlar muhitida ham o‘tkazish mumkin.

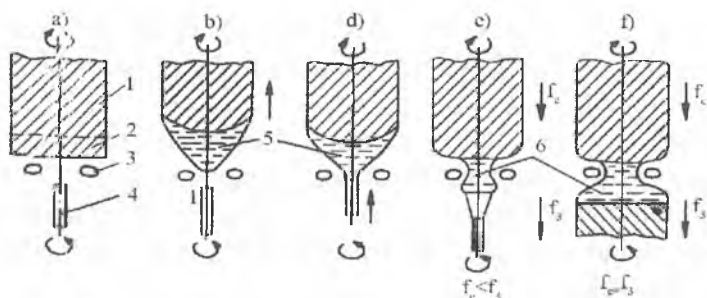
Turli tuzilishli induktorlardan foydalanib, suyulmadagi va o‘stirilayotgan monokristalldagi issiqlik maydonlarini boshqarish mumkin.

Hozirgi zamon texnologiyasi bo‘yicha tigelsiz sohaviy suyultirish usulida diametri  $d \leq 100$  m bo‘lgan kremniy monokristallarini o‘stirish mumkin. Issiqlik maydonlarini bu usul jarayonida boshqarish ancha qiyin, ammo muayyan choralar bu ishni amalga oshiradi.



8.14-rasm. Vertikal tigelsiz o'stirish usulida yarimo'tkazgichlarni tozalash va uning monokristallarini olish chizmasi: 1 – isitkich; 3 – kristallanayotgan suyulma; 4, 5 – suyulmaning kristallangan qismi, Q – issiqlikni ketkazish yo'nalishi strelka bilan ko'rsatilgan.

Diametri sterjen diametridan katta bo'lgan induktor suyultiriladigan sterjenning kristallanish fronti murakkab to'liqsimon shaklga ega (8.15-rasm).



8.15-rasm. Yuqori chastotali induktordan foydalanib tigelsiz sohaviy suyultirish jarayoni bosqichlari. Bunda induktorning diametri polikristallik kremniyning suyuladigan sterjeni diametridan kichik ( $f_c$  va  $f_s$  – mos ravishda, sterjen va xamirturush ko'chishi tezliklari); a–kremniy sterjeni uchining qizdirilishi; b–suyulgan kremniyning osilgan tomchisi hosil bo'lishi; d–xamirturushlash; e–suyulgan soha hosil bo'lishning boshlang'ich bosqichi; f–barqaror rejimda suyulgan soha o'tishi: 1–sterjen; 2–sterjenning qizigan sohasi; 3–yuqori chastotali induktor; 4–monokristallik xamirturush; 5–suyulgan tomchisi; 6–suyulgan soha.

Kichik diametrlı induktor suyultiriladigan holda kristallanish fronti yanada noto'g'ri shaklga ega bo'ladi, oqibatda suyulgan soha markaziy qismiga suyulma ingichka oqim bo'ylab qo'yiladi.

O'qlar bo'yicha temperatura gradiyenti qiymatining kattaligi monokristalda katta qiymatli termik kuchlanishlar paydo qiladi, bu esa dislokatsiyalar zichligi qiymatini ham kattalashtiradi ( $>10^4 \text{sm}^{-2}$ ).

Shuning uchun mazkur usul bilan mukammal (dislokatsiyasiz) katta kremniy kristallari ( $d > 60$  mm) olish uchun qurilmaga suyulgan sohadagi issiqlik sharoitlarini faol boshqaradigan qismlar kiritish talab qilindi.

Bu faol qismlar: qo'shimcha isitkichlar kiritiladi, sterjen va monokristall o'qlari bir-biriga nisbatan yaqinlashtiriladi. Bu holda monokristallar, Choxralskiy usuliga nisbatan kamroq mikronuqsonli bo'ladi.

Dislokatsiyasiz kremniy monokristallarida mikronuqsonlar eng ko'p o'rganilgan. Ularning ikki (*A* va *B*) asosiy turlari mavjud:

1) *A* yassi dislokatsion sirtmoqlar (bukilgan halqalar shaklida), ular kristall hajmida kirishmalar to'plamlari so'rilishi oqibatida hosil bo'ladi, o'lchami katta, ularni yedirish usullari bilan oshkorlash mumkin;

2) *B* turdagi mikronuqsonlar kirishmalar yoki ularning birikmalari ( $\text{SiC}$  yoki  $\alpha\text{-SiO}_2$ ) to'plamlaridan iborat.

Kremniy kristallarida mikronuqsonlar zichligi ularni o'stirish usuli va sharoitiga bog'liq.

Tigelsiz sohaviy suyultirish usulida o'stirilgan monokristalllarda *A* tur mikronuqsonlar o'rtacha zichligi  $10^7 \text{sm}^{-3}$ , Choxralskiy usulida esa —  $10^9 \text{sm}^{-2}$ . *B* tur mikronuqsonlar *A* turdan bir-ikki tartib qadar ko'proq ( $10^8\text{--}10^9 \text{sm}^{-3}$ ).

Dislokatsiyasiz kremniy kristallarida mikronuqsonlar hosil bo'lishiga yo'l qo'ymaslik uchun suyulma kislorod va uglerod kirishmalari miqdorini kamaytirish kerak. Bu maqsad uchun argon muhiti eng qulay bo'ladi.

Agar unga kislorodni bog'lovchi 10% vodorod qo'shilsa, natija yana ham yaxshi bo'ladi.

Monokristallni sovutish optimal (maqbul) tezligini tanlash, suyulmani kristallanish fronti sohasida tez-tez aralashtirib turish yarimo'tkazgichlar monokristallarida mikronuqsonlar paydo bo'lishini bartaraf qiladigan choralardir. Tigelsiz sohaviy suyultirish usulida qo'llaniladigan yuqori chastotali qizdirish yo'li bilan aralashtirish Choxralskiy usulidagi konvektiv aralashtirishdan ko'p marta tezroq va samaraliroqdir.

#### 8.2.4. Brijmen gorizontal usuli

Bu usul galliy arsenidi texnologiyasida keng qo'llanishga ega. Undan yuzani suyuqlik bilan jips yopish usulida dastlabki modda bo'ladigan polikristallik birikmalarni sintez qilish uchun ham, monokristall o'stirish bilan birlashtirilgan sintez uchun ham foydalanish mumkin. Bu usul qurilmasi yetarlicha sodda va Choxralskiy usulida o'stirilganiga nisbatan bir jinsliroq, kuchli legirlangan galliy arsenidi monokristallari olish mumkin. Brijmen gorizontal usuli vakuumlangan va kavsharlangan kvarts ampulalarda amalga oshiriladi, ampulalarning bir chetida arseniyli kvarts qayiqchani, ikkinchi chetida galliy solingan qayiqchani joylashtiradi.

Ampulalarda talab qilinadigan arseniy bug'i kerakli bosimi uning kondensirlangan fazasini termostatga ulab tutib turiladi. Kondensirlangan faza (suyulma)ning mutloq temperaturasi ( $610^{\circ}\text{C} - 625^{\circ}\text{C}$ ) jarayonning issiqlik sharoiti, suyulmaning talab qilingan tarkibi va kristallanish tezligiga bog'liq bo'ladi.

Usul qurilmasining pechlar bo'limi (bloki) ampula uzunligi bo'yicha kerakli temperatura taqsimotini ta'minlaydi va elektrik qarshilik pechlaridan iborat. Pechlar bloki kuzatish derazasi bilan ta'minlangan.

Pechlar blokini qoʻzgʻalmas ampulaga nisbatan siljitib borish yoʻli bilan galliy-arseniy suyulmasi boʻlgan qayiqcha boʻylab kristallanish fronti harakatlantiriladi.

Brijmen usulida monokristallar oʻstirilganda oʻqlar boʻylab temperatura gradiyenti unchalik katta emas ( $<10^{\circ}\text{C}/\text{sm}$ ) ularda dislokatsiyalar zichligi suyuqlik bilan jips yopish usulida olingan monokristallardagidek ( $5 \cdot 10^{-3} \text{sm}^{-2}$ ).

Sharsimon qayiqchalarda kichik temperatura gradiyentlari boʻlganda uncha katta boʻlmagan kesimli dislokatsiyasiz monokristallar olish mumkin. Monokristallarning tuzulishi mukammalligi xamirturush sifatiga, kristallanish tezligi va uning frontidagi temperatura gradiyentlari orasidagi munosabatga bogʻliq. Agar kristallanish tezligi  $0,25 \text{ mm}/\text{min}$  dan katta boʻlmasa, gradiyent  $8 - 10^{\circ}\text{C}/\text{sm}$  boʻlsa, kristallanish fronti deyarli yassi (egri emas) boʻladi, bu esa kichik burchakli chegaralar deb ataluvchi nuqsonlar hosil boʻlishini istisno qiladi.

Galliy arsenidi monokristallari [013] yoʻnalishda oʻstirilsa, ularda dislokatsiyalar kam boʻladi (bu yoʻnalish dislokatsiyalar sirpanishi tekisligi bilan  $\sim 27^{\circ}$  burchak tashkil qiladi), vaholangki, Choxralskiy usuli uchun maqbul yoʻnalishlar [111] va [100] edi. Brijmen gorizontaal usuli amalda dislokatsiyasiz monokristallar olish imkonini berishligini tajribalar tasdiqlaydi.

### 8.2.5. Yuqori darajada toza monokristallar oʻstirish

Yarimoʻtkazgich moddalar va asboblarni ishlab chiqarishda epitaksial texnologiyaning rivojlanishi hajmiy monokristallar tozaligiga qattiq talablar qoʻydi, chunki ulardan tagliklar tayyorlash uchun foydalaniladi. Shu tagliklar asosida gaz (Ge, Si, GaAs, InAs, GaP, InP) yoki suyuqlik (GaAs, InAs, GaP, InP) epitaksiya usullari bilan yarimoʻtkazgichli asbob yoki integral sxemaning

ishchi qatlami tayyorlanadi. Hozir epitaksial texnologiya yuqori darajada toza qatlamlar olish imkonini beradi.

### 8.3. Polikristallar o‘stirish texnologiyasi

Polikristallar (poli – ko‘p) ko‘p monokristall (mono – bir) donalardan tashkil topgan kristall. Toza polikristall bevosita yarimo‘tkazgichli asboblardan, katta integral mikrosxemalar ishlab chiqarishda qo‘llaniladi yoki yarimo‘tkazgich monokristallar olishda ishlatiladi.

Polikristallik yarimo‘tkazgichlarni o‘stirib olish uch jihatdan ahamiyatlidir: 1) monokristallar va epitaksial tuzilmalarga nisbatan polikristall quyma yoki parda ko‘rinishida yarimo‘tkazgich olish ancha sodda va unumdor texnologik jarayondir, bu esa yarim o‘tkazgich modda va uning asosida tayyorlanadigan asboblarni ancha arzonlashtiradi; 2) bunday yarimo‘tkazgichlarda donalar chegaralari maxsus elektrik va rekombinatsion xossalarga ega va ulardan bir qator asboblarda foydalanish mumkin; 3) kristall panjarasining tuzilishi jiddiy nuqsoni bo‘lmish donalar chegarasi samarali ichki getter vazifasini o‘tab, moddaning asosiy hajmini qoldiq kirishmalar va xususiy nuqtaviy nuqsonlardan tozalashga yordamlashadi. Bu xossa elektron qurilmalarning temperatura o‘zgarishiga barqarorligi va radiatsion bardoshligini oshiradi.

Amaliy qo‘llanish uchun ko‘proq quymalar emas, balki polikristallik qatlamlar ma’qul hisoblanadi. Eng ko‘p qo‘llaniladigan kremniy polikristallik qatlamlardan integral chizmalarning tarkibiy qismlar: rezistorlar, diodlar, maydoniy va qo‘shqubli tranzistorlar tayyorlashda foydalaniladi.

Yerda ishlatiladigan arzon quyosh batareyalari yaratish uchun polikristallik qatlamlardan foydalanilmoqda. Agar dona o‘lchami zaryad tashuvchilar diffuzion uzunligidan ancha katta bo‘lsa, bu holda hajmdagi rekombinatsion jarayonlar va quyosh elementlari batareyalari ishiga kam ta’sir ko‘rsatadi. Masalan, kremniyning

polikristallik pardasida ayrim kristallcha (dona)lar o'lchami ~ 1 mm bo'lsa, undan quyosh nurlarini yutuvchi qatlam qalinligi 50–100 mkm chamasida bo'ladi. Polikristallik pardalari arzon tagliklar (kvars, shisha, grafit, alund, molibden va h.k.) asosida olinib, yetarlicha samarali quyosh batareyalar tayyorlash uchun ishlatiladi. Ularning foydali ish koeffitsiyenti 12%–15% tarkibdan iborat.

Kremniyning polikristallik qatlamlarini olish uchun tarkibida kremniy bo'lgan moddalar – monosilan, dixlorsilan, trixlorsilan uchuvchan moddalar sifatida qo'llanib, gaz fazadan kristallash usullaridan foydalanadi. Eng past temperaturada monosilanni termik parchalash usuli 625–725°C da boshqariluvchi katta o'lchamli donalardan tuzilgan kristall pardalar olish imkonini beradi. Lazer nurlanishi ta'sirida SiH<sub>4</sub> ni parchalaganda ishchi temperaturani 120–150°C gacha pasaytirish mumkin, ammo bunda dona o'lchami 0,5–1 mkm dan oshmaydi. Kremniyning qalin polikristallik qatlamlarini xlorsilanni yuqori temperaturada vodorod bilan tiklash jarayonlarida hosil qilinadi.

Galliy arsenidi GaAs va boshqa A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> birikmalar polikristallik qatlamlari olishning eng ilg'or usuli mos gidrid jarayon bo'lib, u past temperaturada o'stirishni, dona o'lchamini qaytalab hosil qilishni va pardalarning yuqori darajada bir jinsliligini ta'minlaydi. Pardalarni metall, grafit, alund va kvars shishadan tayyorlangan tagliklarda o'stirish mumkin.

Polikristalldagi donalar o'lchami juda muhim kattalik. U o'tkazish temperaturasi, gaz faza tarkibi, kristallanish tezligi va taglik turiga bog'liq. Temperatura ortishi donalarning o'rtacha o'lchami kengayishiga olib keladi. Pardalar qalinligi ortishi ham donalar o'lchamini kattalashtiradi. Donalar o'lchami kiritilgan kirishma tabiatiga ham bog'liq bo'ladi. Kremniy polikristallik qatlamlarining me'yoriy o'sish yo'nalishlari <100> va <111>.

Polikristallik qatlamlaridan asboblari tayyorlash uchun ularga kerakli kirishmalar kiritiladi. Eng ko'p tarqalgan usullar – qatlamlar olish jarayonida gaz fazadan legirlash va ionlar implantatsiyasi

(kiritish) usullaridir.  $n$ -tur polikristallik kremniy qatlami olishda legirlovchi kirishma sifatida arsin, fosfin,  $p$ -tur olishda diboran ishlatiladi. P, As, Sb va B ionlarini kiritishda ionlar energiyasi 30 – 60 keV va dozasi  $10^{11}$ – $10^{15}$  sm<sup>-2</sup> bo'ladi, keyin 1000°C da qizdiradi (kuydiradi). Yuqori omli, yarim izolatsiyalovchi kremniy polikristallik qatlamlarini olish uchun kislorod kiritish usuli qo'llaniladi.

Bir qator kirishmalar polikristallik kremniy qatlamlariga kiritilganda chegaralarning potensial to'sig'i balandligi va elektrik qarshiligi ortadi. Bular: kislorod, fluor, selen, azot. Donalar chegarasi qarshiligi fluor bilan plazmaviy ishlov berilgandan so'ng, ayniqsa, keskin (125 marta) ortadi. Bunday ishlov berish integral sxema (IS)larning varistorlari, kondensatorlari va boshqa elementlarini yaratishda qo'llaniladi.

PbS, PbTe, PbSe polikristallik pardalari IQ nurlanishi samarali qabullovchi(detektor)lar sifatida anchadan beri muvaffaqiyat bilan foydalanib kelinmoqda. Si<sub>2</sub>S-CdS, Si<sub>2</sub>S-Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>S, SiInSe<sub>2</sub>-CdS polikristallik geterotuzilmalar asosida 8–10% F.I.K. ga ega bo'lgan Quyosh batareyalari ishlab chiqarilmoqda. GaAs polikristalli asosidagi Quyosh batareyalaridagi yer sharoitida foydalanish kengaymoqda.

Polikristallik qatlamlari fizikasi va texnologiyasi rivojlana borgan sari elektron texnikada bunday moddalarga talab oshib borarmoqda.

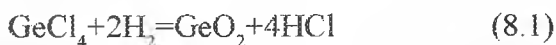
Yarimo'tkazgich moddalarni polikristallik sterjenlar (tayoqchalar) yoki quymalar shaklida olish uchun sintez, ajratish va tiklash jarayonlari qo'llanadi.

### 8.3.1. Tiklash jarayonlari

Yuqori darajada toza polikristallik elementar yarimo'tkazgichlarni olish uchun ularni tozalangan xlorid birikmalardan ajratib olish zarur. Bu ishni bajarish uchun tiklash jarayonlari qo'llaniladi.



Qattiq holatdagi yarimoʻtkazgichlar birikmalarini tiklash eng sodda jarayon boʻladi. Masalan, tozalangan germaniy xloridi suvda germaniy (IV) oksidiga oʻtkaziladi:



Quruq (IV) oksidni grafit qayiqchaga toʻldirib, uni naysimon elektrtopechga joylanadi. 1000°C atrofidagi temperaturagacha qizdirilgandan soʻng qayiqcha ustidan yuqori darajada toza vodorod oqimi oʻtkaziladi. Yuz beradigan



reaksiya oqibatida germaniy tiklanadi va uning tomchilari qayiqcha tubiga oqib tushadi.

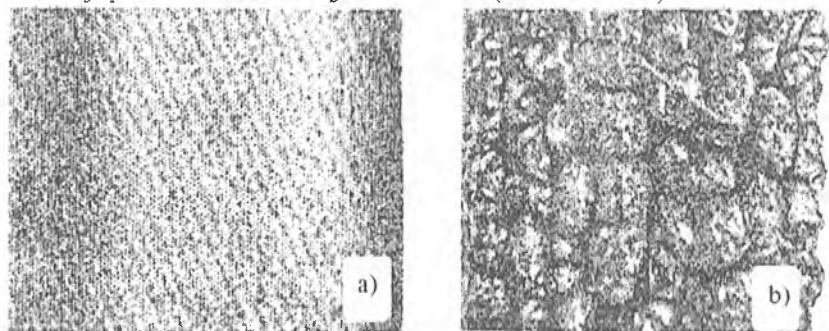
Kremniy (IV) oksidi  $\text{SiO}_2$  ga nisbatan bunday jarayon 2000°C dan ham yuqori temperaturalarini talab qiladi. Shuning uchun tozalashdan soʻng bevosita olinadigan xlorsilanlar vodorod bilan tiklashga harakat qilinadi:



Yarimoʻtkazgich kremniyni ishlab chiqarishda (8.4) reaksiya boʻyicha trixlorsilanni vodorod bilan tiklash jarayoni eng koʻp qoʻllaniladi.

Bu jarayon reaktorlarda amalga oshiriladi. Reaktorga vodorod va trixlorsilan aralashmasi kiritiladi. Ularda (8.3) reaksiya oqibatida ajraladigan kremniyni elektrik tok oʻtkazib qizdirilayotgan kremniy sterjenlari sirtiga oʻtkaziladi. Mazkur jarayon eng yaxshi samara beradigan temperatura oraligʻi: 1100 – 1200°C. Reaktordan oʻtayotgan bugʻ-gaz aralashmasining tezligi oshgan sayin kremniy oʻtirishi solishtirma tezligi [g/(sm<sup>2</sup>·soat)]

ham ortadi. U qizigan kremniy sterjenlari sirtiga turli shakldagi kristallchalar ko'rinishida kristallanadi. Bunda dastlabki kremniy sterjenlaridan radial (radius bo'yicha) tarqalayotgan ustunsimon kristallchalar o'sa boradi. Bunday o'sishda silliq sitrli zich kremniy polikristallik sterjeni olinadi (8.16-a rasm).



8.16-rasm. Vodород bilan tiklash jarayonida olingan sterjenlar sirtining ko'rinishi: a--optimalga yaqin; b--undan uzoq.

Agar o'tkazilayotgan sirt yaqinida gaz almashinuv yomon bo'lsa, bu holda kremniy kristallari dentrit shakliga (shoxchalik tuzilishga) ega bo'lib, sterjen sirti juda notekis bo'ladi (8.16-b rasm). Bunday sterjenlar sifati oldingi sterjenlarnikidan ancha past, chunki ularning sirti ko'p miqdorda kirishmalarni yutib olib, yarimo'tkazgich tozaligini pasaytiradi. Sterjen hajmidagi gazlar kremniyni eritish jarayonida uning qaynab va sachrab ketishiga sabab bo'ladi. Buni sterjenlar ko'rinishidagi tayyorlamalardan monokristallar o'stirishda e'tiborga olish kerak.

Vodород va trixlorosilanning  $M=H_2/SiHCl_3$  optimal nisbatini aniqlash murakkab. Nazariy (8.3) ifoda 1 ga teng bo'lishi kerak. Biroq, reaktorga kelayotgan bug' gaz aralashmasining butun miqdoridan faqat 1100 – 1200°C temperaturalari sohasiga (sterjenga bevosita yaqin qizigan sohaga) tushgani kremniy hosil qiladi. Kremniy mahsuli ko'proq bo'lishi uchun reaktorda gaz almashinuvini jadallashtirish zarur. Bu reaksiya sohasidan xlorli

vodorodni (HCl) olib ketish va shu sohaga yangi trixlorosilan ulushini olib kelishini tezlashtiradi.

Tabiiy, reaktorda gaz almashinuvini kuchaytirish uchun undan bug'-gaz aralashmasining o'tish tezligi oshiriladi. Bunda trixlorosilanni tejash maqsadida vodorodni ko'paytirish hisobiga bug'-gaz aralashmasining hajmi oshiriladi: HCl miqdori juda sekin oshadi, kremniyning chiqishi (hatto  $M=15$  bo'lganda ham) 60% atrofida bo'ladi. Kremniy olinishi samaradorligini oshirishning eng yaxshi chorasi – "yopiq sikl" usulini qo'llashdir. Bu holda reaktordan ketayotgan bug'-gaz aralashmasi ishlovga duchor qilinib, undan eng foydali tarkiblovchilar-trixlorosilan va vodorod ajratib olinadi va tozalashdan so'ng yana ishlab chiqarishga qaytariladi.

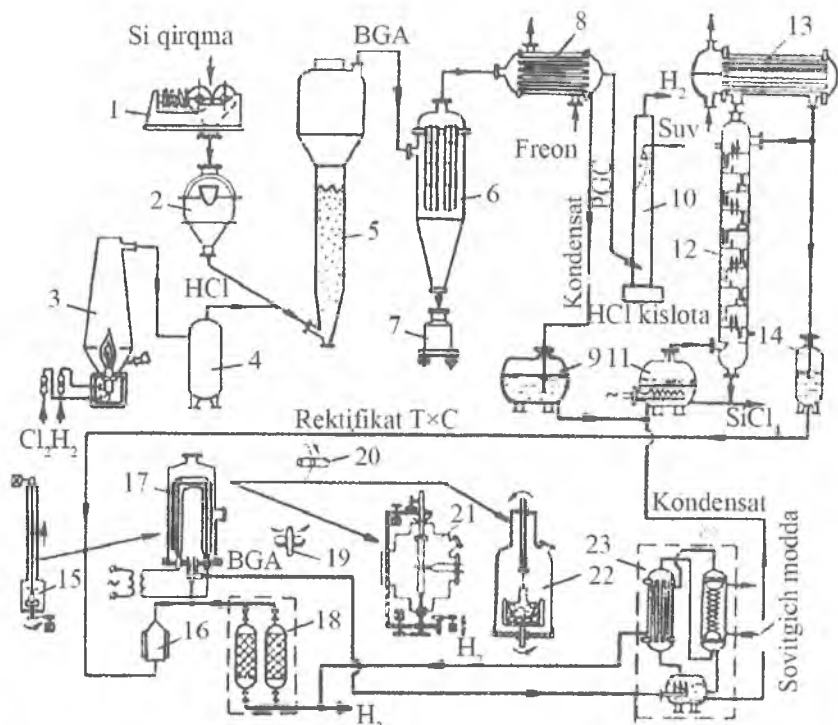
### 8.3.2. Polikristallik yarimo'tkazgichlar olish

**Trixlorosilanni tiklash usulida polikristallik kremniy olish.** Dastlabki ish xlorli vodoroddan trixlorosilan va kremniyni tayyorlashdir. Vodorodni xlor oqimida kuydirib xlorli vodorod olinadi:



Sintez pechida olingan xlorli vodorod namdan tozalanadi, muzlatish usuli bilan quritiladi. So'ng (8.17-rasm) tarkibida 96 – 99% asosiy modda va mayda kristallik ko'mach bo'lgan texnik kremniyni (ba'zan u ferrosilitsiyini) yanchgich va sharsimon tegirmon (1, 2)da 0,5 mm bo'lakchalarga maydalanadi. Hosil bo'lgan kukun 200°C da quritiladi va "qaynash qatlami" deyiladigan 5 reaktorga trixlorosilanni sintez qilish uchun kiritiladi. Reaktor po'lat devorlari suv bilan sovutilgan vertikal silindrdan iborat. Uning pastki qismida xlorli vodorod kiritilgan furma (jo'mrak)lar bor. Bir necha atmosferaga teng bosim ostidagi gaz oqimi kukunsimon kremniyni tez-tez aralashtiradi, bunda

issiqlik ta'sirlashuvchi massaning butun hajmi bo'yicha tekis taqsimlanadi.



8.17-rasm. Kremniy monokristalini hosil qilish qurilmasi:

1 – maydalagich; 2 – sharsimon tegirnon; 3 – HCl ni sintezlash pechi; 4 – resiver; 5 – SiHCl<sub>3</sub> ni sintezlash reaktori; 6 – xaltasimon filtr; 7 – chiqit yig'uvchi idish; 8 – kondensator; 9, 14 – oraliq hajmlar; 10 – skrubber; 11 – rektifikatsion; 12 – likopchasimon ustun (kolonna) kubi; 13 – deflegmator; 15 – kremniy polikristallik tayoqchalari (asoslari) o'stiriladigan qurilma; 16 – bug'lantirgich; 17 – vodorod bilan tiklash reaktori; 18 – vodorodni tozalash bloki; 19 – kremniy sterjenlarini shilish dastgohi; 20 – o'lchamli tayyorlamalarni kremniy sterjenlaridan kesish dastgohi; 21 – tigelsiz sohaviy suyultirish usuli bilan kremniy monokristallarini o'stirish qurilmasi; 22 – o'sha ishni Choxralskiy usulida bajarish; 23 – vodorodli tiklash reaktoridan chiqayotgan gazsimon mahsulotni quyiltirish bloki; BGA bug' – gaz aralashmasi; TXS – trixlorasilan.

(8.4) reaksiyada katta miqdorda issiqlik ajraladi, shuning uchun sintezning ma'qul (optimal) temperaturasini  $300^{\circ}\text{C}$  atrofida doimiy tutib turish uchun reaktorga kiritiladigan xlorli vodorodga trixlorosilan bug'lari aralashtiriladi.

Optimal nisbat:  $\text{HCl}:\text{SiHCl}_3=1:1$ . Bu sharoitda trixlorosilanning chiqishi HCl bo'yicha 60%, Si bo'yicha 70%. Bug'-gazlar aralashmasi 6 filtrga o'tadi, unda mexanik ravishda qo'shib qolgan kremniy changgi tutib qolinadi.

Filtrlarda tutilgan changda reaksiyaning yondosh mahsuli — polixlorosilanlar mavjud bo'ladi. Ularning kimyoviy ifodalari:  $\text{Si}_n\text{Cl}_{2n+2}$  (masalan:  $\text{Si}_2\text{Cl}_6$ ) va  $\text{H}_n\text{Si}_m\text{Cl}_{2n+2}$  (masalan:  $\text{H}_2\text{SiCl}_2$ ). Polixlorosilanlarning hosil bo'lishi metall kirishmalar (Al, Fe, Ca va boshqalar) bilan ifloslangan dastlabki kremniydan foydalanishga, uning bo'laklari o'lchamini kattalashtirishi va bug'-gaz aralashmaning tez sovushiga imkon beradi.

Polixlorosilanlar juda faol moddalar bo'lib, ular sovuqda ham oksidlanib, katta miqdorda issiqlik ajraladi, bu esa ularning yonib ketishi va hatto portlashiga olib keladi. Shuning uchun filtrlardan changni chiqarib yuborish, uni tashish va saqlashni alohida ehtiyot choralariga rioya qilib amalga oshiriladi.

Filtrlardan o'tgan (changsizlangan) bug'-gaz aralashmasini  $(-50) - (-70)^{\circ}\text{C}$  da suyuq holatga o'tkaziladi. Bu ish mobaynida kremniyning xlorlanish mahsulotlari ajraladi. Mos ravishda  $31,8^{\circ}\text{C}$  va  $57,2^{\circ}\text{C}$  qaynash temperaturalariga ega bo'lgan trixlorosilan va kremniy tetroxloridi suyuladi, vodorod va xlorli vodorod (qaynash temperaturasi  $-84^{\circ}\text{C}$ ) uchib ketadi. Suyultirish amalini naylardan tashkillangan 8 issiqlikni almashingichlarda (kondensatorlarda) o'tkaziladi. Naylar bo'yicha bug'-gaz aralashma o'tadi, ular orasidan sovutuvchi-suv, kalsiy xloridi, Freon va boshqalar o'tib turadi. Bir necha kondensatorlar ketma-ket ulangan bo'lib, ulardan o'tayotgan aralashma ketma-ket sovib boradi.

Suyulish (kondensatsiya) jarayonida bug'-gaz aralashma hajmi keskin kamayadi. Agar apparat yomon jipslangan (germetizatsiyalangan) bo'lsa, unga havo so'rib, aralashmadagi polixlorsilan yonib ketishi mumkin. Shuning uchun qurilmaning barcha qismlari yaxshi jipslangan bo'lishi kerak.

Kondensatsiyadan o'tib ketgan bug'-gaz aralashmasi 90% dan ortiq vodorod hamda xlorli vodorod bo'ladi. Bu aralashma (10) skrubber (ajratuvchi)ga yuboriladi, u joyda xlorli vodorod ajratiladi.

Bug'-gaz aralashmadan shu yo'sinda ajratilgan vodorodni tegishli yo'l bilan (18) qurilmaga yo'naltiriladi, bunda uni quritiladi va tozalanadi. Bunday vodorodni yana xlorli vodorod sintez qilishda ishlatiladi.

Olingan kondensat 90% trixlorosilan va 10% tetroxlorosilanga ega bo'ladi. Bu kondensatda quyidagi kirishmalar bor (massa bo'yicha % da)

$B-3 \cdot 10^{-3}$ ;  $Al-1 \cdot 10^{-6}$ ;  $Fe-4 \cdot 10^{-6}$ ;  $P-1 \cdot 10^{-6}$ ;  $Ti-8 \cdot 10^{-7}$ ;  $Cu-5 \cdot 10^{-7}$ .

Keyin kondensatni ( $SiHCl_3+SiCl_4$ ) ketma-ket ravishda ikkita (12) kolonnadan o'tkaziladi. Birinchisida yengil uchuvchan tarkiblovchi (1-fraksiya), ikkinchi kolonnada tozalangan trixlorosilan (rektifikat) ajratib olinadi.

Odatda, bunday rektifikatsion kolonnalar bir nechta bo'ladi. Rektifikatsion kolonna vertikal o'rnatilgan zanglamaydigan po'latdan yasalgan silindrdan iborat.

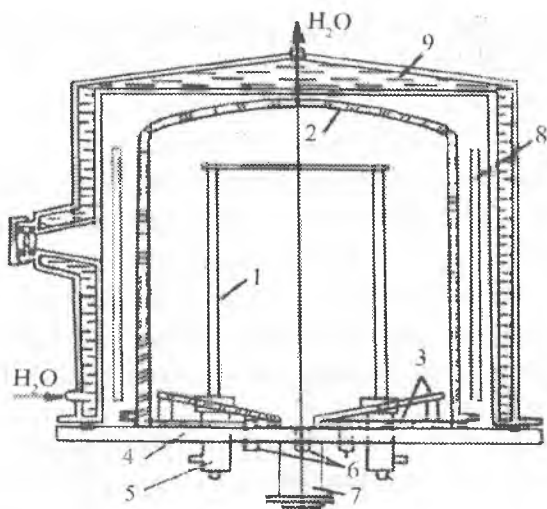
Olingan rektifikat (tozalangan trixlorosilanni) kimyoviy analizga duchor qilinadi va undagi kirishmalar aniqlanadi. Kirishmalar miqdori (massa bo'yicha % da) quyidagidan ko'p bo'lmasligi kerak:

$B-3 \cdot 10^{-8}$ ;  $Al-2 \cdot 10^{-7}$ ;  $Fe-3 \cdot 10^{-7}$ ;  $Ca-2 \cdot 10^{-6}$ ;

$Ti-5 \cdot 10^{-8}$ ;  $Cu-2 \cdot 10^{-8}$ ;  $Ni-6 \cdot 10^{-8}$ .

Keyingi vaqtda rektifikatning sifatini undan olingan monokristall parametrlari bo'yicha nazorat qilinmoqda. Buning uchun kichik "kvars-test" degan asbob qo'llanadi.

Rektifikatni (tozalangan  $\text{SiHCl}_3$  trixlorsilanni) vodorod bilan tiklash reaktoriga beriladi (8.17-rasm). U zanglamaydigan po'lat yoki po'latdan yasalgan qalpoq ko'rinishida bo'lib, suv bilan sovutiladigan zanglamas po'lat plita (taglik) ustiga germetik ravishda (jips) o'rnatilgan. Plita orqali izolatsiyalangan tok keltiruvchilar o'tgan, ularning ustiga (tik) vertikal ravishda kremniy sterjenlar mahkamlanadi. Ustidan kremniy tayoqcha bilan kavsharlangan ikkita kremniy tayoqcha II-simon isitkichni tashkil qiladi.



8.18-rasm. Trixlorsilanni vodorod bilan tiklash reaktori:

1 – kremniy tayoqcha (asos); 2 – ichki kvars qalpoq; 3 – tubdagi kvars ekranlar; 4 – metall tub; 5 – suv sovutadigan tok keltiruvchi; 6 – bug'-gaz aralashma (BGA) kiritadigan naycha; 7 – BGA chiqadigan naycha; 8 – boshlang'ich isitkich (12 dona); 9 – tashqi, suv sovutadigan metall qalpoq.

Reaktorda tayoqchalar soni har xil bo'ladi, u qaysi usul bilan kristall o'stirilishiga bog'liq.

Kremniy tayoqchalari - asoslar taglikdan oʻstirish usulida tayyorlanadi (15). Odatda, bunday tayoqchalar diametri 4 – 6 mm, uzunligi 2 m gacha.

Elektr tok oʻtkazib tayoqchalar qizdiriladi. Trixlorsilanni vodorod bilan tiklashni 1100°C atrofida va  $H_2/SiHCl_3$  molyar nisbat 6 ga teng boʻlganda amalga oshiriladi.

Polikristallik kremniyning legirlangan sterjenlarini kuchli legirlangan tayoqchalar – asoslarga oʻtkazish yoʻli bilan olinadi. *n*-tur kremniy olish uchun sterjenlar fosfor (P) bilan, *p*-tur olish uchun bor (B) bilan legirlanadi.

Reaktordan chiqarib olingan polikristallik kremniy sterjenlarini monokristallar oʻstirishga yuborishdan oldin qoʻshimcha ishlov beriladi.

Choxralskiy usuli bilan monokristallar moʻljallangan quymani tigelga joylashtirish qulay boʻlgan boʻlaklarga boʻlinadi yoki olmos disklar (20) bilan kesiladi. Tigelsiz sohaviy suyultirish jarayoni uchun ishlatiladigan sterjenlarni shilish yoʻli bilan tegishli oʻlchamli qilinadi(19). Shunday mexanik ishlovdan soʻng polikristall modda yediriladi, yuviladi, quritiladi va taxlanadi.

Polikristallik kremniy sifatini vakuumda  $1 \cdot 10^{-4}$  mm sim.ust. tigelsiz sohaviy suyultirish usulida nazorat sterjenini tozalash yoʻli bilan tekshiriladi. Suyulgan zonani 3 mm/min tezlikda 15 marta takroran oʻtishidan soʻng kremniydan bor (B) dan boshqa deyarli hamma donor va akseptor kirishmalar chiqarib tashlanadi va bor (B) qoladi. Bunday tozalashdan keyingi kremniy solishtirma qarshiligini bor (B) boʻyicha solishtirma qarshilik deyiladi.

Polikristallik kremniy sterjenlarda donorlar miqdorini nazorat qilish vakuumda, suyulgan sohaning siljish tezligi 3 mm/min boʻlgan holda, bir martali sohaviy suyultirish usuli bilan amalga oshiriladi. Polikristallik kremniy yuqori darajada toza boʻlishi uchun uning tozalik darajasi bor (B) boʻyicha 5000 Om·sm dan kam va donorlar boʻyicha 250 Om·sm dan ortiq boʻlmasligi,



sterjenlar sirtida xloridlar bo'lmashligi, sterjenning singan yoki kesilgan joyida oksidlangan halqalar bo'lmashligi kerak.

**Monosilandan kremniy polikristallarini olish.** Eng toza kristallik kremniyni  $\text{SiH}_4$  monosilanni termik qizdirib parchalash usuli yordamida tayyorlash mumkin. Olingan mahsulot bor (B) bo'yicha 80000 Om·sm gacha va donorlar bo'yicha 5000 Om·sm gacha solishtirma qarshilikka ega bo'ladi. Bu usulning texnologik sxemasi 8.19-rasmda tasvirlangan.

Gorizontal elektropechlarda texnik kremniyni (asosiy modda > 98%) va magniyni (asosiy modda >98%) 550°C da sintez qilinadi:



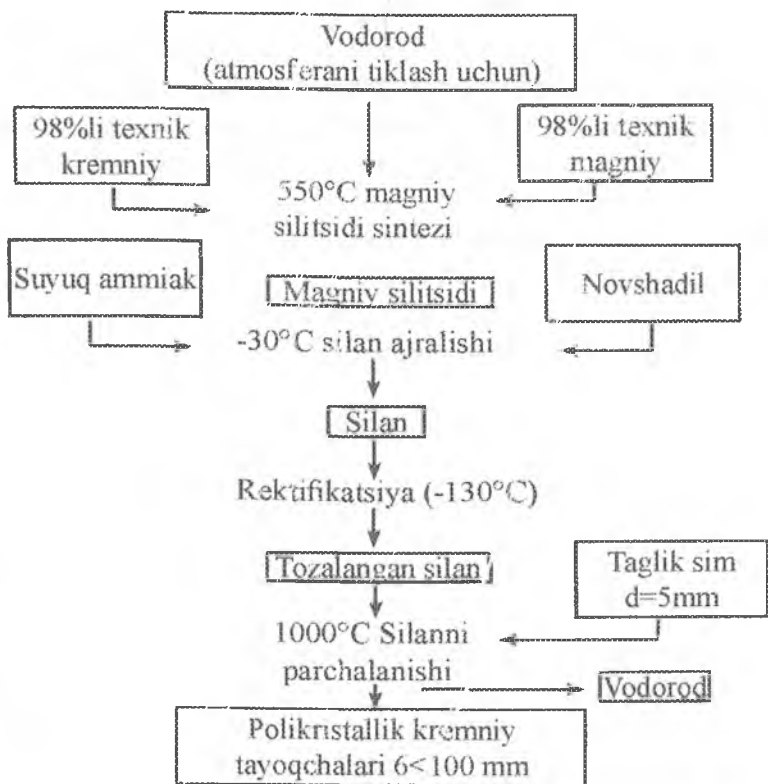
So'ngra  $\text{Mg}_2\text{Si}$  ni xlorli ammoniy bilan parchalanadi:



Parchalanish -30°C da suyuq ammiak  $\text{NN}_3$  muhitida o'tkaziladi. Bu jarayon kremniy undan eng qiyin chiqariladigan bor (B) dan tozalanadi. Bor (B) silandan oson ajraladigan bor-ammiak birikmasi tarkibida mahkam bog'lanib qoladi.

Silanni tozalash -130°C da o'tkaziladigan past temperaturali rektifikatsiya usulida davom ettiriladi. Olingan rektifikat (toza modda) da massa bo'yicha bor (B)  $3 \cdot 10^{-6}$  va fosfor  $1.1 \cdot 10^{-7}$  % dan kam bo'ladi. Boshqa kirishmalar yana ham kam miqdorda bo'lganligi bois, ular sezilmaydi.

Monosilan  $\text{SiH}_4$  reaktorlarda 1000°C da parchalanadi:  $\text{SiH}_4 = \text{Si} + 2\text{H}_2$ . Bunday reaktorlarning tuzilishi 8.18-rasmdagidan farq qilmaydi. Reaksiya natijasida ajralgan yuqori darajada toza vodoroddan yana foydalaniladi, toza polikristallik kremniy esa monokristallar o'stirishda, bevosita uning o'zidan asboblari ishlab chiqarishda qo'llaniladi.



8.19-rasm. Silanni termik usul bilan parchalab kremniy olishning texnologik tartibi.

## 8.4. Epitaksial pardalar olish

### 8.4.1. Umumiy ma'lumotlar

Hozirgi zamon texnologiyasida integral mikrosxemalar va diskret yarimo'tkazgichli asboblarni ishlab chiqarishda epitaksial jarayonlar eng muhim o'rinni egallaydi. Epitaksial texnologiya qo'llanilishi keyingi 10 – 15 yil ichida sifatli mahsulotlar ishlab chiqarishni 4–5 marta oshirib yubordi. Epitaksial qatlamlar tuzulish

jihatdan hajmiy monokristallardan ancha takomillashganligi, ularda kirishmalarni haqiqiy taqsimotiga ega bo'lishi bilan birga nazorat qilib bo'lmaydigan iflosliklar kamligi bilan farq qiladi.

Odatda, yarimo'tkazgichli asboblarning faol sohasi plastinkaning uncha chuqur bo'lmagan sirt mikrohajmi qismida vujudga keltiriladi. Plastinkaning qolgan qismi esa shu faol sohani ushlab turish uchun xizmat qiladi. Demak, asbob tuzilmasi faol va nofaol qismlardan tashkil topadi. Nofaol qism texnologik jarayonda konstruktiv vazifani bajarib turadi xolos. Chunki o'ta yupqa plastinkalar bilan ishlab chiqarish jarayonida ishlab bo'lmaydi.

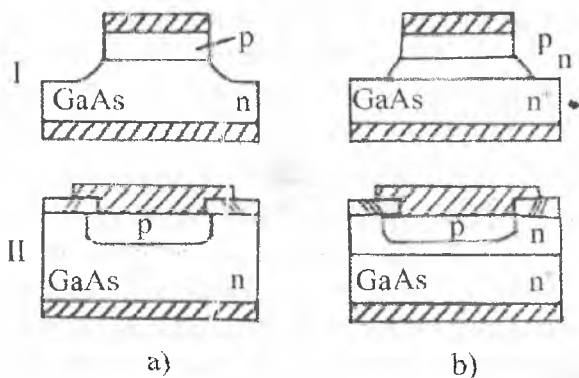
Epitaksiya, umuman, yarimo'tkazgich plastinkali asbob uchun keraksiz nofaol qism zararli qarshiligini kamaytirish yo'lini qidirish tufayli vujudga kelgan. Epitaksiya kichik omli plastinkalarda yuqori omli yarimo'tkazgichli qatlamlarni o'stirish imkonini beradi.

8.19-rasmda bir jinsli galliy arsenidi plastinkasida va  $n^+-n$  tuzilmada tayyorlangan planar va diskret meza diodlarning kristallari ko'rsatilgan. Bunda  $n$ -epitaksial qatlarni solishtirma qarshiligi bir jinsli  $n$ -GaAs plastinkasi solishtirma qarshiligiga teng. Meza kristallar (8.19-a rasm), planar kristallar (8.19-b rasm) va II kristallning qalinlik qarshiligi  $R$  kamligi ma'lum bo'ladi. Shunday qilib,  $n^+-n$  tur epitaksial tuzilmali diodlarning mezaepitaksial va epitaksial planarlarning chegara takroriyiligi yuqori bo'ladi. Chunki,  $f \approx 1/RC$ , bunda  $C - p - n$ -o'tishning to'siq sig'imi.

Epitaksiyaning afzalliklaridan yana biri, kirishma atomlari qatlamining qalinligi bo'yicha talab darajasidagi kirishmalar taqsimotiga ega bo'lgan legirlangan plastinkalar olish imkoniyatining berishidir. Bu esa, turli xildagi yarimo'tkazgichli elektron asboblar va IMS larning yaratilishiga imkon beradi.

### 8.4.2. Epitaksial o'tkazishning asosiy usullari

Yarimo'tkazgichli elektron asboblari va IMS lar tayyorlash texnologiyasida yarimo'tkazgich moddalarga ba'zi bir qarama-qarshi talablar ham qo'yiladi. Masalan, impulsli diodlarda tegishish kuchlanishini oshirish uchun yarimo'tkazgich plastinkaning solishtirma qarshiligini oshirish kerak, bu esa shu sohani yoyilma oqim qarshiligi o'sishiga, natijada elektron asboblari impuls xossalari va tezkorligining yomonlashishiga olib keladi. Tranzistorlar tayyorlash texnologiyasida kollektor sohasining solishtirma qarshiligi katta bo'lishi yuqori tegishish kuchlanishini olishga imkon bergan holda kollektor hajmida katta miqdordagi zaryadlar to'planishiga olib kelib, tranzistor tezkorligini kamaytiradi va quvvatini chegaralab qo'yadi. Xuddi shunday muammolar boshqa yarimo'tkazgichli asboblari va IMSlar tayyorlashda ham uchraydi. Epitaksiya usulining yaratilishi yuqoridagi muammolarni yechishda katta imkoniyat beradi.



8.20-rasm. Galliy arsenidi plastinkasida va p<sup>+</sup>-p tuzilma asosida tayyorlangan planar va diskret mezadiodlarning kristallari.

I) meza diodlar. II) planar diodlar. a) n-GaAs; b) n<sup>+</sup>-GaAs

Epitaksiya atamasi o'tgan asrning 50-yillarida paydo bo'lib, u "epi"--sirti, "takis"--joylashish ma'nolarini anglatadi. Binobarin, epitaksiya bu kristall taglik sirtida muayyan yo'nalishli kristall qatlamni o'stirishdir. Demak, epitaksiya qatlam-taglik tuzilishini saqlovchi, kristall taglikka o'tkazilgan monokristall modda. Epitaksial o'sish jarayonida hosil bo'luvchi sirtiy yupqa qatlam taglik kristall panjaraning tarkibiy tizimini davom ettiradi.

Demak, bu epitaksial qatlam taglik kristall tuzilishi to'g'risidagi ma'lumotlarni tashuvchi vazifasini ham bajaradi. Epitaksial yupqa pardalari olish jarayonining uch guruhi: avto-, getero- va xemoepitaksiya ko'rinishlari ma'lum.

Avtoepitaksiya (gomoepitaksiya) – taglik moddadan kimyoviy xususiyatlari farq qilmaydigan, yo'nalishli kristall qatlam o'stirish jarayonidir. Bu jarayonda gomogen elektron-kovak tuzilmalar hosil qilish imkoniyatlari mavjud.

**Geteroepitaksiya** – kristallokimyoviy o'zaro ta'sir natijasida taglik modda tarkibidan farq qiladigan modda qatlamining yo'nalishli o'sish jarayonidir.

**Xemoepitaksiya** – tashqi muhitdan keluvchi modda bilan taglikning o'zaro kimyoviy ta'siridan yangi faza hosil bo'lgani holda moddaning yo'nalishli o'sishi jarayonidir. Bunday xemoepitaksial qatlam tarkibi bo'yicha taglik moddadan va sirtga keluvchi moddadan ham farq qiladi.

O'suvchi qatlam hosil bo'lishidagi fizik-kimyoviy hodisalar tabiati bo'yicha epitaksiyaning uchta asosiy texnologik usuli mavjud:

- 1) vakuumda molekularlar oqimidan iborat molekular-nur epitaksiya,
- 2) gaz yoki bug'-gaz aralashmasida kimyoviy o'zaro ta'siridan iborat bo'lgan gaz fazali epitaksiya;
- 3) eritish yoki eritma suyuq fazasidan rekristallanish yo'li bilan yupqa parda olinadigan suyuq fazali epitaksiya.

Endi qisqacha bu usullarning asosiy belgilarini ko'rib chiqamiz.

**Molekular nur epitaksiya.** Vakuumda molekular nurlar oqimidan hosil qilinadigan epitaksiya moddaning to'g'ridan-to'g'ri ko'chishidan hosil bo'ladi. Modda-manba yuqori vakuumda, fokuslangan elektron nur oqimi yordamida uzluksiz bug'latish orqali (oraliq o'zaro ta'sirsiz) molekular zarralar oqimini taglikka yetkazib beriladi. Taglik sirtiga o'tirgan yarimo'tkazgich zarralari molekular o'zaro ta'sir natijasida yarimo'tkazgich kristalli yo'nalishlarni takrorlovchi tizimli epitaksial qatlam o'sishini ta'minlaydi.

Molekular nur epitaksiyasining boshqa turi – bu sublimatsiya usulidir. Bu usulda taglikdan bir necha yuz mikrometr narida joylashgan yarimo'tkazgichni elektr tokida qizdirish yo'li bilan bug'lantirib, epitaksial qatlam hosil qilinadi. Bu holda namuna-manba suyulmaydi, faqat bug'lanish va zarralarning taglikka ko'chishi yuz beradi. Vakuumli kamerada kirishmalar kam bo'lganligi sababli olingan qatlam o'ta yuqori solishtirma qarshilikka ega bo'ladi. Biroq, bu usulning unumdorligi kichik bo'lganligi uchun ishlab chiqarishda ko'p qo'llanilmaydi.

**Kimyoviy o'zaro ta'sir yordamida gaz fazada epitaksiya.** Gaz fazali epitaksiya jarayonlarida yarimo'tkazgich atomlari kimyoviy birikmalar tarkibiga ko'chib, kimyoviy o'zaro ta'sir yordamida ajralib, taglikka o'tiradi.

Kimyoviy birikmada elementar yarimo'tkazgichlar – germaniy va kremniy qatnashishi mumkin. Ishlab chiqarish sharoitida epitaksial qatlamlarni olish kimyoviy usullari ancha keng qo'llaniladi.

Gaz fazada epitaksial o'sishning ikki xil mexanizmini ko'rish mumkin. Birinchi mexanizmga, asosan, yarimo'tkazgich taglik sirtida kataliz dissotsiatsiya reaksiyasi natijasida epitaksial qatlam hosil bo'ladi. Ikkinchisiga, asosan, taglikdan yuqoriroqda yarimo'tkazgich birikmalarining parchalanishi sodir bo'ladi va hosil bo'lgan yarimo'tkazgich zarralari gaz fazada diffuziya yo'li bilan taglikka yetib boradi.

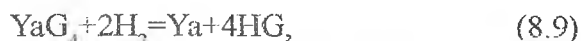
Yarimoʻtkazgich atomlarining ajralib chiqishi kimyoviy reaksiyalarini toʻrtta guruhga ajratish mumkin:

1. Galoid birikmalarining dissotsiatsiyalanishi:



Bunda Ya – yarimoʻtkazgich atomi (germaniy, kremniy); G – galoid atomi (xlor, flor, brom, yod).

2. Galoid birikmalarining vodorod bilan tiklash reaksiyasi:



3. Qizdirish natijasida birikmalarning parchalanishi – piroliz (issiqlik sochilishi):



4. Ikkita bosqichda oʻtuvchi kimyoviy koʻchish reaksiyasi:



Bundagi barcha reaksiyalar qaytar reaksiyalar boʻlib, qaytish yoʻnalishi va oʻtirish tezligi boshlangʻich moddalar zichligi va jarayon rejimiga bogʻliq.

**Suyuq fazali epitaksiya.** Suyuq fazali epitaksiya usuli toʻyingan yarimoʻtkazgich modda eritmasidan yarimoʻtkazgich monokristall qatlamini oʻstirishdan iborat. Eritmaga choʻktirilgan yarimoʻtkazgich taglik sirtida uni sovutish natijasida kristallanish yuz beradi. Koʻpchilik hollarda suyuq fazadan kristallanishda erituvchi sifatida yarimoʻtkazgich suyuq holatida eruvchanligi yuqori boʻlgan metall, masalan, Al-Si yoki Au-Si tizimlaridan

foydalaniladi. Yarimoʻtkazgich birikmalarining suyuq fazada epitaksiyasini olish uchun erituvchilar sifatida oson eruvchi birikma tarkiblovchilari, masalan, GaAs va GaP uchun Ga qoʻllaniladi. Bu esa kristallanish temperaturasining kamayishiga, taglik eritma chegarasida temperatura gradiyentining kamayishiga olib keladi va oʻstirilgan qatlam tozaligini oshiradi.

Oxirgi paytlarda qoʻllanilayotgan gaz va suyuq epitaksial oʻstirish usullarini qoʻshilgan usulining (bugʻ-suyuq-qattiq jism jarayoni) istiqbolliroq ekanligi koʻrinmoqda. Yarimoʻtkazgich taglik sirtiga elektrik tarkibli suyuq fazani hosil qiluvchi yupqa metall qatlam surkaladi. Bunday usul past temperaturalarda ham epitaksial qatlamlar olish imkonini beradi. Yarimoʻtkazgich atomlari suyuq qatlam bilan taglik hosil qilgan chegaraga oʻtiradi va ularning diffuziyalanishi natijasida kristallanish yuz beradi. Bunda eritma qatlami 1mm dan oshmaydi va amalda epitaksial qatlam oʻsish tezligi eritmada diffuziyalanish vaqtiga bogʻliq boʻlmaydi.

Epitaksial usulda olingan qatlamlar tavsifnomalari qotishmali usulida olinganlarnikiga, asosan, oʻxshashdir.

### 8.4.3. Kremniy va germaniy epitaksiyasi

Epitaksial qatlamlarni germaniy va kremniy asosida oʻstirish usullari ichida keng tarqalgani monosilan  $\text{SiH}_4$  va monogerman  $\text{GeH}_4$  larni tetroxlorid vodorodda tiklanishi va issiqlikda parchalanishidir. Kremniy va germaniy monokristallari qatlamlari qizigan tagliklar orqali xloridli yoki gidridli bugʻli vodorod gazini va legirlanuvchi kirishmalar taglik sirtiga oʻtiradi.

Epitaksial oʻstirish jarayoni quyidagi bosqichlardan iborat:

- 1) reaktorga plastinkalarni joylashtirish;
- 2) inert gaz va vodorodni reaktor orqali oʻtkazish (purchash bilan);



3) plastinkalarni tozalash, qizdirish va yedirish uchun reagentlarni yuborish;

4) yedirishni to'xtatish va o'stirish uchun zarur bo'lgan temperaturani ta'minlash;

5) epitaksial qatlam o'stirish va uni legirlash uchun reagentlarni berish;

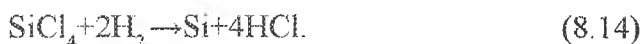
6) reagentlarni berishni to'xtatish va qisqa vaqt davomida vodorodni haydash;

7) qizdirish, vodorod va inert gazlarni berishni to'xtatish;

8) reaktorni bo'shatish.

Ishlab chiqarishda mana shunday usulda kremniy epitaksial qatlamlarini olish keng qo'llanilmoqda.

**Epitaksial kremniy xloridli olish usuli.** Bu usulning keng qo'llanilishiga uning yetarli darajada so'ddaligi va ishlatiladigan materiallar qulayligi sabab bo'lmoqda. Kremniy tetraxlorid bug'lari va vodorod reaktorga berilib, u yerda asosan kremniyning tiklanish reaksiyasi yuz beradi:



Ba'zan tetraxlorid o'rniga trixlorisilan  $\text{SiHCl}_3$  dan foydalanilib, tiklanish reaksiyasi asosida kremniy ajratib olinadi:

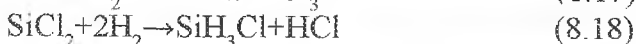


O'ng va chap yo'nalishda bo'ladigan reaksiya qoldig'idagi vodorod xlorididan (HCl) kremniy sirtidagi iflosliklar,  $\text{SiO}$  qoldiqlari, kremniy taglik sirtidagi tizim buzilishlarini olib tashlashda gazli yedirish sifatida foydalaniladi. Amalda  $\text{SiCl}_4$  tiklanishi jarayoni (8.14) ifodaga nisbatan ancha murakkab. Oraliq o'zaro ta'sir reaksiyalari ikki xil usulda borishini e'tiborga olish kerak. Birinchi usulga, asosan, tiklanish kremniy dixlorid

$\text{SiCl}_2$ ,  $\text{HCl}$  va  $\text{H}_2$  lar qatnashadigan reaksiyalar orqali kuzatiladi. Bu holda (8.14) reaksiya kremniyni yedirish reaksiyasi bilan birga boradi:



Bu reaksiyaga qo'shimcha vodorodda tetroxlorid konsentratsiyasining oshishi epitaksial qatlam o'sish tezligini kamaytirishga olib keladi. Bundan tashqari, bu jarayonda quyidagi reaksiya ham yuz berishi mumkin:



Hosil bo'luvchi kremniy vodorod xlorid birikmasi vodorod bilan sof kremniy hosil bo'lguncha tiklanadi.

Ikkinchi usulga, asosan, gaz fazada  $\text{SiCl}_4$  tiklanishi quyidagi reaksiyalardan birida yuz beradi:



yoki



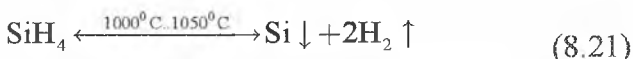
$\text{SiCl}_4$  ni qisman tiklanishi taglikda atomar kremniy hosil bo'lishi bilan xloridlar tiklanishi yoki disproporsiyalanish bo'yicha ketadi.  $\text{SiCl}_4$  molekulasiga nisbatan  $\text{SiHCl}_3$  molekulasining ancha yengil sochilishi  $\text{Si}-\text{Cl}$  energiya bog'lanishiga nisbatan  $\text{Si}-\text{H}$  bog'lanish energiyasining kichikligi bilan belgilanadi.

**Kremniy epitaksiya qatlamlari olishning gidrit usuli.** Yuqoridagi epitaksiyaning xlorid usulida taglik temperaturasi  $1200^\circ\text{C}$  ga yaqin. Shuning uchun yuqori legirlangan plastinka-taglikdan kirishmalarning o'sayotgan kuchsiz legirlangan epitaksiyasi qatlami tomon diffuziyalanishi yuz beradi. Bu hodisani *avtolegirlash* deyiladi. Avtolegirlashda o'sayotgan qatlamdan

taglikka, ya'ni teskari tomonga, kirishmalar diffuziyasi ham ro'y berishi mumkin. Avtolegirlash epitaksial qatlamda, qatlam-taglik chegarasida kirishmalar zichligini va epitaksial qatlamda berilgan zichlikdagi kirishma sohasi qalinligi o'zgarishiga olib keladi.

Taglikka kirishmalar diffuziyalanishini chegaralash uchun diffuziya koeffitsiyenti kichik bo'lgan kirishmalar, masalan,  $n$ -tagliklarda fosfor o'rniga Sb yoki As tanlanadi.

Kirishmalar diffuziyasining chegaralashning boshqa imkoniyati — jarayon temperaturasini kamaytirishdir. Kremniy epitaksiyasida temperaturani  $1000^{\circ}\text{C}$  gacha kamaytirish uchun o'stirish vaqtida taglikni ultrabinafsha nurlar bilan nurlantirishdan foydalanish mumkin. Ultrabinafsha nurlanish gaz fazada adsorblashgan kirishmalar ta'sirini kamaytiradi. Bu esa, kremniy taglik atomlarining sirt bo'ylab harakatchanligiga ta'sir qiladi. Avtolegirlashni ancha yuqori darajada chegaralash jarayoni temperaturasini kamaytirish imkonini beruvchi yana bir tadbir — epitaksiyaning gidrid usulidan foydalanishdir. Bu usulda monosilan piroliz bo'lganligi uchun uni ba'zan silanli usul deyiladi. Bu usul silanning termik parchalanishning qaytmas reaksiyasiga asoslangan:



Silan usulida epitaksial qatlamlarni o'stirish qurilmasining tuzulishi xloridli usulga yaqin va monosilan bilan ishlaganda ehtiyotkorlik uchun qurilma havo va nam qoldiqlarini haydash moslamalari bilan ta'minlangan bo'lishi kerak. Monokristall qatlamlarini  $1000^{\circ}\text{C}$ – $1050^{\circ}\text{C}$  temperaturalarda qizdirilganda monosilan parchalanishini ham hisobga olish zarur. Manba sifatida 4%–5% li monosilandan iborat aralashma va yuqori tozalikdagi 95%–96% He, Ar yoki  $\text{H}_2$  gazidan foydalaniladi. Jarayonni o'tkazish davrida vodorodda monosilan zichligi 0,5%–0,1% gaz oqimi tezligi 30 sm/s – 50 sm/s. Shu sharoitda o'sish tezligi sekundiga 0,2 dan 2 mkm gacha o'zgaradi.

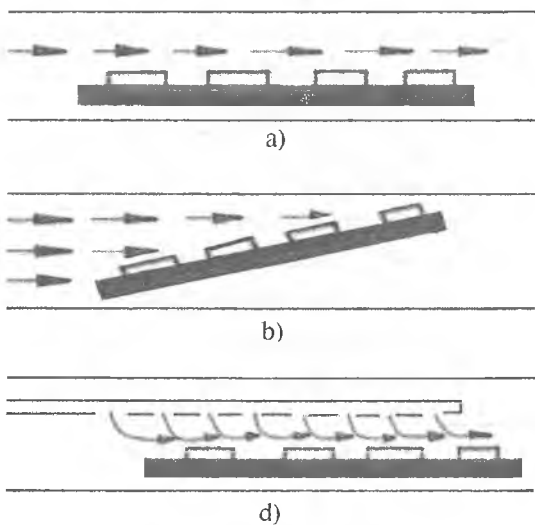
Usulning kamchiliklari – monosilanning o‘z-o‘zidan yonishi va portlashi ehtimoli bo‘lganligi uchun maxsus choralar ko‘rish kerak. Shuning uchun amalda monosilan vodorodli aralashma bilan birga qo‘llaniladi. 5%li monosilan aralashmasi o‘z-o‘zidan yonmaydi. Aralashma bilan ishlash xavfsizlik qoidalari toza vodorod bilan ishlashdagidek.

#### 8.4.4. Epitaksial qatlamlarni olish qurilmalari

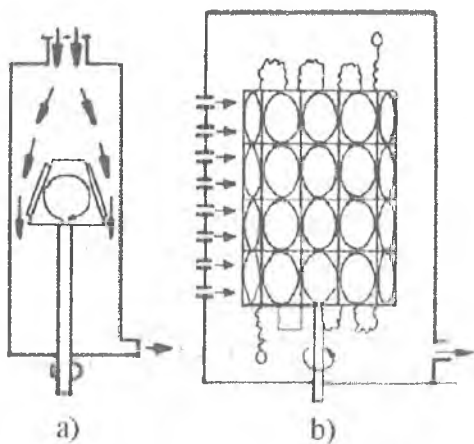
O‘sovchi epitaksial qatlamlar sifati, ko‘p jihatdan, temperatura va gazodinamik sharoitlarga bog‘liq. Shuning uchun epitaksiya qurilmalariga yuqori talablar qo‘yiladi. Epitaksial o‘stirish qurilmasi reaktorlar tuzilishiga bog‘liq. Ularning gorizonta va vertikal reaktori usullari mavjud.

Gorizonta reaktor ancha sodda tuzilishga ega (8.20-a rasm). Bunda bug‘-gaz aralashma oqimi taglik ushlagichga parallel o‘tadi va natijada epitaksial qatlamlar qalinligi va solishtirma qarshiligini o‘zgartirishga olib keladi. Yanada tekis o‘zgarishni hosil qilish uchun esa ikkita usuldan foydalaniladi: 1) taglik ushlagich gaz oqimi yo‘nalishiga ma‘lum bir burchak ostida joylashtiriladi (8.20-b rasm); 2) taglik ushlagich uzunligi bo‘yicha gazni taqsimlangan bo‘yicha kiritiladi (8.20-d rasm).

Vertikal reaktorlar tuzilishi nisbatan qulay bo‘lib, u aralashma gaz oqimi uchun yaxshi sharoitni ta‘minlaydi. Taglik ushlagichning aylantirilishi issiqlik va gazodinamik maydonlarning tekis taqsimlanishiga olib keladi. 8.21-a rasmda to‘rt qirrali taglik ushlagich va gaz-bug‘ aralashmali vertikal reaktor qurilmasi ko‘rsatilgan. 8.21-b rasmda yuqori unumdorlikka ega bo‘lgan ishchi aralashmani gorizonta kiritishning baraban ko‘rinishidagi vertikal reaktori ko‘rsatilgan. To‘rt qirrali grafitli taglik ushlagichni qizdirish yuqori chastotali tok induktori bilan amalga oshiriladi, reaktor kvarts naydan iborat. Barabanli taglik ushlagichni zanglamas po‘latdan tayyorlangan reaktor ichida rezistiv elementlar yordamida qizdiriladi. Bu qizdirish ba‘zan *reaktorning kamchiligi* deb ham ataladi.

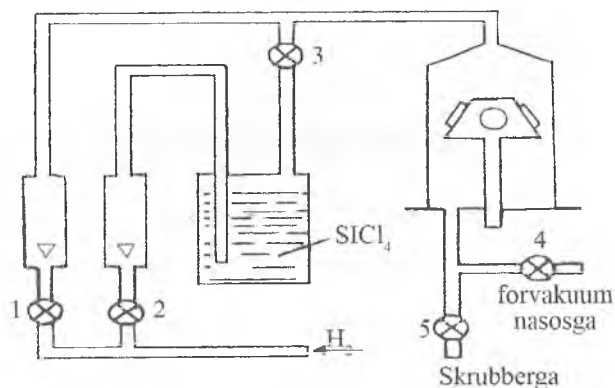


8.21-rasm. Gorizontalar reaktorlar turlari.



8.22-rasm. Vertikal reaktorning tuzilishi: a) kvars nayli reaktor, b) zanglamas po'lat qalpoqli reaktor.

8.22-rasmda xlorid usulda epitaksial qatlamlarni olish qurilmasi berilgan. Legirlangan epitaksial qatlamni olish uchun tetraxlorid kremniy yoki legirlovchi qo‘shimchalar  $p$ -turni  $\text{BBr}_3$  yoki  $n$ -turni  $\text{PCl}_3$  hosil qiluvchi legirlovchi qo‘shimcha tarkibli aralashmalar  $\text{SiCl}_4 + \text{BBr}_3$  yoki  $\text{SiCl}_4 + \text{PCl}_3$  termostat idishda tetraxlorid temperaturasini yuqori aniqlikda ushlab turiladi. Bu esa zaruriy bug‘ bosimini ta‘minlaydi. Odatda, bu temperatura  $0^\circ\text{C}$  dan past, chunki  $\text{SiCl}_4$  juda uchuvchi suyuqlik. Sistemaga palladiy tozalovidan o‘tgan vodorod beriladi.



8.23-rasm. Epitaksial kremniy olish uchun qurilma sxemasi

Chunki, palladiy vodorodni nam va kislorod qoldiqlaridan tozalaydi. Palladiy yoki platinali tozalov sistemasi  $400^\circ\text{C}$ – $450^\circ\text{C}$  gacha qizdirilgan diafragmadan iborat. Bu diafragma orqali yuqori tezlikda atomar vodorod diffuziyalanadi va uning sarfi  $1 \text{ m}^3/\text{soat}$  ni tashkil qilib, boshqa moddalar bu diafragma orqali umuman o‘tmaydi, chunki ularning diffuziya koeffitsiyenti kichik. Tozalov nuqtasi shudringdan so‘ng  $70^\circ\text{C}$  ni tashkil qiladi. Vodorod 1 kranvodorod sarfini o‘lchovchi rotometr orqali o‘tadi, 2, 3, 4 kranlar yopiq. Kremniyli tagliklar  $1000^\circ\text{C}$ – $1200^\circ\text{C}$  gacha qizdiriladi va ularning sirti vodorod oqimida tozalanadi. 1 jo‘mrak yopiladi, 2 va 3 jo‘mraklar ochiladi. Vodorod  $\text{SiCl}_4$  li idish orqali o‘tadi

va reaktorda tetroxlorid bug‘i bilan to‘yinib, elementar kremniy tiklanadi.

Reaksiyada qatnashmagan  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{HCl}$  va boshqa mahsulotlar 5 ochiq kran orqali skrubberga chiqadi. Skrubber vazifasi zaharli chiqindilarni ushlab qolib, vodorod alangasida yondirib yuborishdan iborat. Epitaksiya usulida o‘stirishda gaz yedirish uchun 1 jo‘mrak orqali epitaksiya jarayonidan oldin  $\text{HCl}$  yuboriladi.

Epitaksial o‘stirish texnologiyasi plastinkaga qo‘yilgan talablardan kelib chiqadi. Bu talablar epitaksial qatlam qalinligi va legirlanish darajasi qiymatlarining aniqligi ( $\pm 5 \div 10$ )% dan yomon bo‘lmagan holda hal etiladi. Epitaksial qatlamning qalinligi talab darajasidagi takroriylikiga erishish uchun o‘stirish tezligining doimiylikini saqlash kerak. Buning uchun esa  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{SiH}_2$  asosiy moddalar konsentratsiyasi darajasi va jarayon temperaturasini o‘zgarmas qilib ushlab turish kerak. Epitaksial qatlam solishtirma qarshiligining bir xil bo‘lishligi uchun qizdirish bir tekis bo‘lishi kerak.

**Germaniy epitaksiyasi.** Germaniy epitaksiyasiga qiziqish germaniyli kam shovqinli, o‘ta yuqori chastotali tranzistorlar va IMS yaratish muhimligidan kelib chiqadi. Chunki, bu asboblar kremniyli IMS larga nisbatan past temperaturalarda samaraliroq ishlaydi. Germaniy epitaksial qatlamlarini o‘stirishning xlorid usuli yaxshi o‘rganilgan.

O‘tkazish  $800^\circ\text{C}$  da bajariladi va germaniy tetraxloridi zichligi 0,2% ga yaqin bo‘ladi. Aralashma oqimi tezligi reaktor tuzilishi va oqim berish usuliga bog‘liq bo‘lib, odatda, 20 sm/s dan oshmaydi. Epitaksial qatlamning  $800^\circ\text{C}$  da o‘stirish tezligi 0,5 mkm/min ni tashkil qiladi.

Germaniy epitaksial qatlamlarni o‘stirishning gidrit usulida olish vodorod muhitida  $\text{GeH}_4$  yordamida  $700^\circ\text{C}$  temperatura yaqinida va  $\text{GeH}_4$  zichligi 0,1% – 0,2% bo‘lganida bajariladi. O‘stirish tezligi  $800^\circ\text{C}$  gacha oshib boradi, keyin gaz fazada  $\text{GeH}_4$

parchalanishi kamayadi.  $\text{GeH}_4$  ning gaz fazali parchalanishini kamaytirish uchun yuqori tezlikdagi gaz oqimidan foydalaniladi. Elektrotexnika sanoatida yetarli darajada toza germaniy tetraxlorididan foydalanganligi uchun bunday usul solishtirma qarshiligi 15 Om·sm dan katta bo'lgan epitaksial qatlamlarni olish imkonini beradi.

Yana kamroq qo'llaniladigan usullardan biri epitaksial qatlamlarni yopiq, havosi so'rilgan kvarts naylarda olishdir. Nayda germaniy tetraxloridini  $\text{GeI}_4$  bo'lib, bu soha  $550^\circ\text{C}$ – $700^\circ\text{C}$  gacha qizdiriladi. Nayning ikkinchi sohasida germaniy taglik bo'lib, uning temperaturasi  $300^\circ\text{C}$  –  $400^\circ\text{C}$  ni tashkil qiladi. Birinchi sohada quyidagi reaksiya ketadi:



Germaniy diyodidini taglikka diffuziyalanib, quyidagi reaksiya ketadi:



Natijada germaniy taglikka o'tiradi, bug'lari esa manba sohasiga diffuziyalanadi va reaksiya yana qaytariladi.

### **Bobga doir savol va mashqlar**

1. *Kristallar qattiq fazadan qanday hosil qilinadi?*
2. *Kristallar suyuq fazadan qanday hosil qilinadi?*
3. *Kristallar suyulmadan qanday hosil qilinadi?*
4. *Normal yo'nalgan kristallanish usullarini tavsiflang.*
5. *Suyulmadan kristallarni tortib olishning qanday usullari bor?*
6. *Zonaviy suyultirish usulida kristallar qanday o'stiriladi?*
7. *Kristallar eritmalardan qanday o'stiriladi?*
8. *Kvars monokristallari qanday o'stiriladi?*
9. *Kristallarni gazsimon fazadan o'stirish mumkin-mi?*
10. *Kerakli shakldagi monokristallar qanday usulda o'stiriladi?*



## Xulosa

Elektron texnikasining jadal sur'atlar bilan rivojlanishi uning istiqbolini, hatto qisqa davr uchun ham bashorat qilish katta ehtiyoqkorlikni talab etadi. Shunga qaramasdan aytish mumkin-ki, yaqin o'n yillar ichida bu soha fani va amaliyotining keskin o'zgarishlariga guvoh bo'lishimiz mumkin.

Mikroelektronikaning rivoji o'ta katta integral sxemalar yaratish yo'lida ayrim elementlarni nanoo'lchamlik darajasida bo'lishligini taqozo etmoqda. Buning uchun elektron texnikasi moddalarining mukammallik darajasi ham mana shunday yuqori darajada bo'lishini talab etadi. Mavjud texnologiyalar asosida yaratilayotgan elektron sanoatining yarimo'tkazgichli kremniy, germaniy, GaAs, InP, CdS kabi an'anaviy moddalarning sifatini yaxshilash uchun ularni olish texnologiyalarini mukammallashtirish, ularga ishlov berish va zaruriy shakllarni olish uchun yangi avtomatlashtirilgan asbob-anjomlar ishlab chiqarish samaradorligi va aniqligini ta'minlaydigan shart-sharoitlar yaratish muhim vazifa bo'lib qolmoqda.

Shu bilan birga, an'anaviy yarimo'tkazgichli dielektrik va tok o'tkazuvchi moddalarning fizik va kimyoviy xossalardan foydalanish imkoniyatlari ham o'zlarining chegaralariga yetib bormoqda. Shuning uchun, ularning imkoniyatlarini kengaytirishning usullarini qidirish bilan bir vaqtda yangi xususiyatlarga ega bo'lgan elektron texnikasi moddalarini olish texnologiyalarini yaratish ham yaqin kelajakdagi zarur vazifalardan biri bo'lmog'i kerak. Bu vazifalar doirasida oxirgi davrda rivojlanayotgan ko'p tarkibli yarimo'tkazgichli tuzilmalar, yupqa pardali geteroo'tishlar, ularning xususiyatlarini boshqarish uchun lazerli va radiatsion texnologiyalarni qo'llash muhim ahamiyat kasb etmoqda.

Hozirgi davrda mikroelektronikada kvant o'lchamli effektlarning ishlashini e'tiborga oluvchi o'ta yupqa ko'pqatlamli epitaksial tuzilmalardan iborat qurilmalar yaratish tez sur'atlar bilan rivojlanmoqda. Bu yo'nalishning istiqbolini belgilovchi omillardan biri — yangi turdagi modda — nanomoddalar yaratishdir. Fan va amaliyotda nanomoddalar tobora kengroq o'rin egallab borayotgani bunga yorqin misol bo'la oladi.

Elektron texnikasining boshqa muhim moddalaridan tok o'tkazuvchi, dielektrik va magnit moddalarning yangi xususiyatlarini aniqlash sohasida ham muhim tadqiqotlar olib borilmoqda. Dielektrik kristallarning noyob xususiyatlari ularning faqatgina passiv dielektriklar sifatidagina emas, balki keng o'lchamli parametrlarga ega lazerli nurlanishlar, yorug'likni elektr maydoni yordamida boshqarish, tasvirlarni yozib olish va qayta tiklovchi golografik qurilmalar, yuqori temperaturali o'ta o'tkazuvchi moddalar yaratishda faol moddalar sifatida ham keng qo'llanilmoqda.

Magnit moddalarining xususiyatlarini o'rganish ular asosida ko'plab ferromagnit, diamagnit, paramagnit, ferrit va boshqa moddalarni magnitli qattiq eritmalarini yaratish imkoniyatlarini bermoqda. Ammo, magnit moddalarni olish texnologiyalari yarimo'tkazgichlar olish texnologiyalaridan bir necha marta murakkabligi ularni kengroq qo'llash imkoniyatlarini cheklab kelmoqda edi. Bu sohaning hozirgi davrdagi rivoji kelajakda yuqori tozalikka va mukammal tuzilishga, katta imkoniyatlarga ega turlarini yaratish texnologiyalarini amalga oshirish mumkinligini ko'rsatmoqda.

Shu o'rinda e'tirof etish kerak-ki, elektron texnikasining yutuqlari faqatgina qo'llaniladigan moddalar bilan emas, ko'p jihatdan, bu moddalarni sifatli asboblardan va qurilmalarga aylantiradigan texnologiyalar holati va ularning asosiy xomashyosi bo'lgan ko'plab qo'shimcha moddalarga ham bog'liq.

Fan va amaliyotda kamroq e'tibor berilayotgan bunday

moddalarning xususiyatlarini yaxshilash va ularning yangi turlarini yaratish elektron asbobsozlikning muhim vazifalaridan biridir.

Elektron sanoatini, umuman, fan va texnikaning kelajak istiqbollari haqida fikr yuritish ekanmiz, bu sohaning yutuqlarida eng asosiy harakatlantiruvchi va ijrochi kuch – bu inson omili ekanligi haqiqat. Shuning uchun, ushbu kitob bu jarayonlar asosiy ishtirokchilari – yetuk mutaxassislar va yuqori malakali kadrlar tayyorlash ishiga munosib xizmat qiladi deb umid qilamiz.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. A.Teshaboyev, S.Zayniddinov, Sh.Ermatov. Qattiq jism fizikasi. Toshkent, "Moliya" nashriyoti, 2011
2. В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. Материалы электронной техники. Москва, "Высшая школа", 1987.
3. Я.С.Уманский, Ю.А.Сканов. Физика металлов. Москва, Атомиздат., 1978 .
4. А.И. Курносков. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. Москва, "Высшая школа", 1975.
5. М.Г.Мильвидский. Полупроводниковые материалы в современной электронике. Москва, "Наука", 1986 г.
6. С.В.Серебрянников. Материалы. Москва, "Высшая школа", 1992 г.,
7. И.С.Желудев. Физика кристаллических диэлектриков. Москва, "Наука", 1968 г.
8. М.К.Бахадирханов, И.Б.Ортиков. Малый энциклопедический справочник по полупроводниковым материалам. Ташкент. ТашГТУ., 2006 г.
9. В.С.Вонсовский. Современное учение о магнетизме. Москва, ГИТТЛ., 1953 г.
10. A.T.Teshaboyev, S.Z. Zaynobiddinov, Q.A. Ismoilov, Sh.A. Ermatov, V.A. Abduazimov. Nanozarralar fizikasi, kimyosi va texnologiyalari. Toshkent, "Tafakkur bo'stoni", 2014-y.
11. М.Т.Нормуродов, Б.Э.Умирзоков, И.П.Пармонкулов. Электрон техника материаллари ва курилмалари технологияси. Тошкент, "Меҳнат", 2004 й.
12. А.Тешабоев, С.Зайнобидинов, Э.А.Мусаев. Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли асбоблар технологияси. Тошкент, "ЎАЖБНТ" маркази, 2005 й.

13. S.Z.Zaynobiddinov, Sh. Sho'Ichiyev, D.E.Nazirov, M.Nosirov. Yarimo'tkazgichlarda atomlar diffuziyasi. Toshkent, "O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati" nashriyoti, 2012 y.

14. <http://www.set-svl.narod.ru/>

15. <http://www.techno.edu.ru/>

16. [www.mno.ru](http://www.mno.ru)

17. [www.ru](http://www.ru)

18. [www.nanobot.ru](http://www.nanobot.ru)

19. [www.microbot.ru](http://www.microbot.ru)

20. [www.neuroelectronics.ru](http://www.neuroelectronics.ru)

21. [www.nanonewsnet.com](http://www.nanonewsnet.com)

22. [www.nano.gov](http://www.nano.gov)

23. [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)

24. [www.universaldisplay.com](http://www.universaldisplay.com)

# MUNDARIJA

SO‘ZBOSHI.....	3
----------------	---

## I bob. ELEKTRON TEXNIKASIDA QO‘LLANILADIGAN MODDALAR HAQIDA UMUMIY TUSHUNCHALAR

1.1. Elektron texnikasi moddolari turlari.....	6
1.2. Qattiq jismlarning tuzilishi.....	8
1.2.1. Kristall panjarasi.....	8
1.2.2. Kristallardagi o‘zaro ta‘sir kuchlari.....	12
1.3. Kristallardagi nuqsonlar.....	17
1.3.1. Haqiqiy kristalldagi nuqsonlarning turlari.....	17
1.3.2. Termodinamik muvozanatdagi nuqtaviy nuqsonlar.....	18
1.3.3. Radiatsion nuqtaviy nuqsonlar.....	21
1.3.4. Stexiometrik nuqsonlar.....	26
1.4. Monokristallar va polikristallar.....	30
1.5. Amorf va polimer moddalar.....	33
1.6. Epitaksial pardalar va ko‘pqatlamli epitaksial tuzilmalar.....	35

## II bob. TOK O‘TKAZUVCHI MODDALAR

2.1. Metallarning tuzilishi va asosiy xossalari.....	40
2.2. Metallar elektr o‘tkazuvchanligining temperatura va nuqson konsentratsiyasiga bog‘liqligi.....	43
2.3. Metall qotishmalari va birikmalari.....	45
2.4. Nometall moddalarda elektr o‘tkazuvchanlik.....	48
2.4.1. Dielektrlarning elektr o‘tkazuvchanligi.....	48
2.4.2. Gazlarning elektr o‘tkazuvchanligi.....	53
2.4.3. Suyuq dielektrlarning elektr o‘tkazuvchanligi.....	54
2.4.4. Qattiq dielektrlarning elektr o‘tkazuvchanligi.....	57
2.4.5. Qattiq dielektrlarda sirtiy elektr o‘tkazuvchanlik.....	60
2.4.6. Nometall o‘tkazgichlar.....	63
2.5. O‘ta o‘tkazuvchan va krioo‘tkazgich moddalar.....	65
2.6. O‘tkazuvchanligi yuqori bo‘lgan toza metall va metall qotishmalarining qo‘llanilishi.....	72

## III bob. YARIMO‘TKAZGICH MODDALAR

3.1. Yarimo‘tkazgichli moddalar turlari.....	79
3.2. Yarimo‘tkazgichlarning asosiy xususiyatlari.....	80
3.3. Muhim yarimo‘tkazgichlar.....	86
3.3.1. Kremniy (Si).....	86

3.3.2. Germaniy (Ge).....	88
3.3.3. Galliy fosfidi (GaP).....	89
3.3.4. Galliy arsenidi (GaAs).....	90
3.3.5. Indiy fosfidi (InP).....	91
3.3.6. Indiy arsenid (InAs).....	91
3.3.7. Indiy antimonidi (InSb).....	92
3.4. Shishasimon va amorf yarimoʻtkazgichlar.....	92
3.5. Suyuq yarimoʻtkazgichlar.....	99
3.6. Kompersirlangan kremniy – yangi turdagi yarimoʻtkazgich modda.....	101

#### IV bob. DIELEKTRIK MODDALAR

4.1. Dielektrik moddalardagi asosiy fizik va kimyoviy jarayonlar.....	110
4.2. Dielektrlarning qutblanishiga koʻra turlari.....	116
4.3. Pyezoelektriklar.....	124
4.4. Segnetoelektriklar.....	126
4.5. Piroelektriklar va elektretlar.....	129
4.6. Shishasimon dielektrik kristallar.....	131
4.7. Keramik moddalar va sitallar.....	135
4.7.1. Qurilmalar va asboblarda qoʻllaniladigan keramika.....	136
4.7.2. Sitallar.....	139
4.8. Organik moddalar.....	142
4.9. Polimerlar.....	164
4.10. Kompozitsion moddalar.....	169
4.11. Suyuq kristallar.....	172

#### V bob. MAGNETIK MODDALAR

5.1. Magnetizm haqida umumiy maʼlumotlar.....	176
5.2. Ferromagnetiklar.....	182
5.3. Paramagnetiklar.....	189
5.4. Diamagnetiklar.....	194
5.5. Magnit moddalar.....	198
5.5.1. Yumshoq magnit moddalar.....	204
5.5.2. Qattiq magnit moddalar.....	213

#### VI bob. NANOMODDALAR

6.1. Nanozarralarning sinflanishi.....	217
6.2. Nanozarralarni olish usullari.....	225
6.3. Almazoid – kelajak nanomoddasi.....	230
6.4. Kremniy – istiqbolli nanomodda.....	234

## VII bob. ELEKTRON ASBOB SOZLIKNING QO'SHIMCHA MODDALARI

7.1. Elektron asboblarning haqida ma'lumotlar.....	242
7.2. Elektron asboblarning yaratishning texnologiyalari.....	246
7.3. Kontakt va elektrod moddalar.....	260
7.4. Sirtning himoyalovchi va mustahkamlovchi moddalar.....	265
7.4.1. Asbobning elektrik parametrlariga p-n o'tish sirt holatining ta'siri.....	266
7.4.2. Organik qoplamalar yordamida sirtning himoyalash.....	269
7.4.3. Kremniy oksid va nitridlar bilan himoyalash.....	272
7.4.4. Metall oksidining pardalari bilan himoyalash.....	273
7.4.5. Shisha pardalar bilan himoyalash.....	275
7.5. Mexanik ishlov moddalarini.....	277
7.6. Yarimo'tkazgichlarga kimyoviy ishlov berish moddalarini.....	282

## VIII bob. ELEKTRON TEXNIKASI MODDALARINI OLISH TEXNOLOGIYALARI

8.1. Kristallarni o'stirish mexanizmlari.....	292
8.1.1. Kristallarni qattiq fazadan hosil qilish.....	292
8.1.2. Kristallarni suyuq fazadan hosil qilish.....	293
8.1.3. Kristallarni eritmadan o'stirish.....	301
8.2. Monokristallar olish usullari.....	305
8.2.1. Choxralskiy usulida monokristallar o'stirish.....	305
8.2.2. Suyuqlik germetizatsiya usuli.....	309
8.2.3. Tigelsiz sohaviy suyultirish usuli.....	311
8.2.4. Brijmen gorizontal usuli.....	314
8.2.5. Yuqori darajada toza monokristallar o'stirish.....	315
8.3. Polikristallar o'stirish texnologiyasi.....	316
8.3.1. Tiklash jarayonlari.....	318
8.3.2. Polikristallik yarimo'tkazgichlar olish.....	321
8.4. Epitaksial pardalar olish.....	328
8.4.1. Umumiy ma'lumotlar.....	328
8.4.2. Epitaksial o'tkazishning asosiy usullari.....	330
8.4.3. Kremniy va germaniy epitaksiyasi.....	334
8.4.4. Epitaksial qatlamlarni olish qurilmalari.....	338
Xulosa.....	343
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR.....	346



**Muhammad Kabir Saidxonovich Bahodirxonov  
Sirojiddin Zaynobidinovich Zaynobidinov  
Xurshidjon Muhamedovich Madaminov**

# **ELEKTRON TEXNIKASI MODDALARI**

*Oliy o'quv yurtlari uchun darslik*

**Muharrir**

**Rassom**

**Sahifalovchi**

**Musahhih**

**X.Po'latxo'jayev**

**A.Muhammedov**

**Z.Shukurxo'jayev**

**B.Tuyoqov**



**Bahodirxonov Muxammad Kabir Saidxonovich** 1942-yil 23-avgustda Xitoyning G'ulja shahrida tug'ilgan. 1965-yilda Toshkent Davlat Universitetini tamomlagan. Fizika-matematika fanlari doktori. Fan va texnika sohasidagi O'zbekiston Respublikasi A. R. Beruniy nomli davlat mukofoti sohibi (1992). 500 dan ortiq ilmiy uslubiy ishlar muallifi, 40 ta fan doktori nomzodlari tayyorlagan, 20 ta o'quv adabiyotini chop ettirgan.



**Sirojiddin Zaynobidinov** 1945-yil 22-dekabrda Andijon viloyatida tug'ilgan. 1963-yil o'rta maktabni Oltin medal bilan tamomlab, ToshDU (hozirgi O'zMU) ga o'qishga kirdi. 1978-yilda nomzodlik, 1987-yilda doktorlik dissertatsiyasini himoya qildi. 1988-yilda professor unvoniga sazavor bo'ldi. 500 dan ortiq ilmiy maqola va ma'ruza tezislari, 8 ta mualliflik guvohnomasi va patentlar, 30 ta o'quv adabiyotlari, shulardan, 5 tasi o'quv adabiyotlari mualliflari Respublika tanlovi sovrindori, 10 ta risola muallifi.

30 yil (O'zMU va ADU da) kafedra mudiri, 5 yil O'zMuda Fizika fakulteti dekani, 10 yil Andijon davlat universiteti rektori, hozirda ADU professori. 20 ta fan nomzodi va 4 ta fan doktori tayyorlagan.



**Madaminov Xurshidjon Muxamedovich** 1974-yilda Andijon viloyatida tug'ilgan. Andijon davlat universiteti Fizika kafedrasida katta o'qituvchi lavozimida ishlaydi, fizika-matematika fanlari nomzodi.

Madaminov Xurshidjon pedagogik faoliyat bilan birga yarimo'tkazgichlarning fotoelektrik va elektrofizik xususiyatlarini modellashtirish bo'yicha ilmiy izlanishlar olib borgan. U mazkur yo'nalish bo'yicha 100ga yaqin maqola va ma'ruza tezislari, 5 ta o'quv-uslubiy qo'llanma, 1 ta darslik va 2 ta EHM dasturi uchun patent muallifidir.

