

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI
ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

NANOTEXNOLOGIYA KAFEDRASI

“ELEKTRON TEXNIKA MATERIALLARI VA MAHSULOTLARI TEXNOLOGIYASI”

fanidan tajriba ishlari bo'yicha o'quv qo'llanma

(Bakalavriyatning 5521700 – “Elektronika va mikroelektronika” va 5523300 -
“Nanotexnologiya” yo'nalishlari talabalari uchun)

Toshkent – 2008

I. P. PARMONQULOV, B. E. UMIRZAQOV

***Elektron texnika materiallari va
mahsulotlari texnologiyasi***

O`quv qo`llanma

Toshkent – 2008

UDK 621.315.592

Taqrizchilar:

O'zbekiston milliy universitetining "Fizikaviy elektronika"
kafedrasi professori f.-m.f.d. I. Bo`riboyev;
Toshkent davlat texnika universitetining "Umumiy va amaliy fizika"
kafedrasi dotsenti f.-m.f.n. A. G`oyipov.

I.P. Parmonqulov, B.E. Umirzaqov

Elektron texnika materiallari va mahsulotlari texnologiyasi: Oliy o'quv yurtlari uchun o'quv qo'llanma. – 1-nashr. Toshkent. 2008. – 102 bet.

Kitobda elektron texnika materiallarini va mahsulotlarini ishlab chiqarishda kechadigan asosiy jarayonlar (issiqlik, massa uzatish va kimyoviy jarayonlar, xomashyo materiallariga qayta ishlov berish - ajratish va tozalash usullari, kristallash, shishalanish) ning xususiyatlari yoritib berilgan hamda elektron texnikada keng foydalaniladigan eng asosiy yarim o'tkazgichli va dielektrik materiallar (kremniy va arsenid galliy monokristallari, shisha, keramika, sitallar va ular asosidagi mahsulotlar) hamda ular asosida mahsulotlar hosil qilishning texnologik jarayonlari bayon qilingan.

O'quv qo'llanma oliy o'quv yurtlarining "Elektronika va mikroelektronika" va "Nanotexnologiya" yo'nalishlari talabalari va o'qituvchilar uchun mo'ljallangan.

Kirish

O'zbekiston iqtisodiyotining intensiv rivojlanishi ishlab chiqarishda zamonaviy texnika va texnologiyaning qo'llanilishiga uzviy bog'liqdir. Bunda sanoatni, ishlab chiqarishni elektronizatsiyalash va kompleks avtomatlashtirish, hisoblash texnikasi vositalaridan keng foydalanish, EHM orqali boshqariladigan stanoklar, sanoat robotlari, moslanuvchan ishlab chiqarish tizimlarini tatbiq etish birinchi darajali ahamiyatga egadir.

Shu sababli avtomatlashtirish va hisoblash tizimlarining zamonaviy elementlar bazasi bo'lgan yarim o'tkazgichli asboblari va mikroelektronika mahsulotlari doimo rivojlanib va mukammallashib bormoqda.

Elektron texnika mahsulotlari va qurilmalarining ishonchligining ortishi va ishlab chiqarishining ko'payishi faqat ularni tayyorlashning texnologik usullari va ishlab chiqarish madaniyatigina bog'liq bo'lmasdan, balki yarim o'tkazgichli asboblari va integral mikrosxema

(IMS)larning asosiy parametrlarini belgilab beradigan kerakli elektrofizik xususiyatli materiallarni to'g'ri tanlay bilishga ham bog'liq bo'ladi.

Ishlab chiqarishda qo'llaniladigan barcha materiallar berilgan texnik shartlarni qanoatlantirishini aniqlash uchun kirish nazoratidan mukammal o'tkaziladi.

Elektron texnika materiallari, mahsulotlari va qurilmalari texnologiyasining rivojlanish darajasi yuqori malakali mutaxassislarning tayyorlanishi bilan uzviy bog'langandir. Xalq xo'jaligining rivojlanishida, iqtisodiyotning o'sishida, ilmiy texnik jarayonning tezlashuvida elektron texnika materiallari, mahsulotlari va qurilmalarining texnologiyasi muhim rol o'ynaydi.

Mazkur darslik 3 ta bobdan iborat bo'lib, 1-bobda mikroelektronikada qo'llaniladigan materiallar to'g'risida umumiy ma'lumotlar keltirilgan. 2-bobda elektron texnika materiallari va mahsulotlari texnologiyasidagi va xomashyo materiallarini qayta ishlashdagi asosiy jarayonlar ko'rib chiqilgan. 3-bob yarim o'tkazgichli va dielektrikli monokristall materiallarni olish texnologiyasiga bag'ishlangan. elektron asboblari va qurilmalar ishlab chiqarish texnologiyasiga bag'ishlangan.

Bu o'quv qo'llanma Beruniy nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti «Elektron texnika materiallari fizikasi va texnologiyasi» kafedrasining o'qituvchilari bo'lgan avtorlar tomonidan o'qiladigan «Elektron texnika materiallari va mahsulotlari texnologiyasi» fanining namunaviy o'quv dasturlari asosida «Elektronika va mikroelektronika» yo'nalishi bo'yicha ta'lim olayotgan oliy o'quv yurtlari talabalari va o'qituvchilari uchun mo'ljallab yozilgan.

1 - bob. Mikroelektronikada qo'llaniladigan materiallar to'g'risida umumiy ma'lumotlar

1.1. Mikroelektronika materiallarining tasnifi

Yarim o'tkazgichli asboblari va mikroelektronika mahsulotlarini tayyorlashda ishlatiladigan materiallarni to'rtta guruhga bo'lish mumkin: *asosiy, texnologik, konstruktiv va yordamchi materiallar*.

Asosiy materiallarga yarim o'tkazgichli asboblari, integral mikroshemalar, yorug'lik nurlantiruvchi asboblari, fotoo'zgartkichlar, quyosh batareyalari, qattiq jismli lazerlar va boshqa ko'pgina mikroelektronika mahsulotlari tayyorlashda ishlatiladigan yarim o'tkazgichli materiallar kiradi.

Texnologik materiallarga mikroelektronika qurilmalarini ishlab chiqarish texnologik jarayonlarida qo'llaniladigan materiallar kiradi. Bular: boshlang'ich yarim o'tkazgichli quyma va plastinalarga mexanik ishlov berishda ishlatiladigan abraziv materiallar; yarim o'tkazgichli plastinalarni yog'sizlantirish va emirish uchun ishlatiladigan kimyoviy materiallar; yarim o'tkazgichli plastinalar sirtida har xil himoyalovchi dielektrik qoplamalar (SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 plyonkalari) hosil qiluvchi kimyoviy reagentlar; plastina sirtida kerakli geometrik shakldagi rel'ef suratini shakllantirish imkoniyatini beruvchi materiallar (foto-, rentgen-

va elektronrezistlar); diffuzantlar – diffuziyali texnologik jarayonlarni o'tkazishda yarim o'tkazgichli plastinalarda kerakli turdagi elektr o'tkazuvchanlikli va solishtirma qarshilikli sohalarni hosil qiluvchi moddalar; legirlovchi materiallar (akseptorlar va donorlar) – yarim o'tkazgichlar va elektrod qotishmalarining elektrofizik xossalarini o'zgartirishda qo'llaniladigan moddalar; himoyalovchi materiallar (laklar, emallar, kompaundlar va boshqalar) – IMS aktiv va passiv elementlarini atrof muhit ta'siridan izolyasiyalashda qo'llaniladigan materiallar.

Konstruksion materiallar asosan yarim o'tkazgichli asboblari va IMS korpuslarini tayyorlashda ishlatiladi. Bularga metallar, qotishmalar, shishalar, keramikalar, plastmassalar va elimlar kiradi.

Yordamchi materiallar bir qancha texnologik operatsiyalar (diffuziya, oksidlash, omik kontaktlar hosil qilish, quritish, yifish, kavsharlash, germetiklash va shu kabilar) ni o'tkazishda kerakli sharoitlar (gazli muhit) ni ta'minlashda ishlatiladi. Yordamchi materiallarga qo'shimcha aslahalar (kassetlar, lodochkalar, tigellar, podstavkalar, emirtirish qurilmalari va shu kabilar)ni tayyorlash uchun kerak bo'ladigan materiallar ham kiradi. Bulardan tashqari ko'pgina texnologik operatsiyalarda o'ta toza (distirlangan, deionlashgan) suvdan foydalaniladi. Tayyor bo'lgan mahsulotlarga tovar ko'rinishini berish uchun har xil bo'yoqlardan foydalaniladi.

1.2 Metallar va qotishmalar tuzilishining fizik asoslari

Metallar deb, yuqori issiqlik va elektr o'tkazuvchanlikka, ishlov berishlikka, plastiklikka, mustahkamlikka va o'ziga xos yaltiroqlikka ega bo'lgan moddalarga aytiladi.

Metallarning xossalari kristall panjaralarining tuzilishiga bog'liq bo'ladi. Metallarning ko'pchiligi yoqli markazlashgan, hajm markazlashgan kub yoki zich joylashgan geksogonal panjarali bo'ladi.

Metallarda valent elektronlar atomlarga tegishli bo'lmasdan balki umumlashgan holatda kristall panjara ichida erkin siljib yuradi. Bunday umumlashgan valent elektronlar "elektronli gaz" ham deyiladi. Valent elektronlarini bergan atomlar musbat zaryadlangan ionlarga aylanadi va kristall panjara tugunlarida elektronlar bilan bo'ladigan elektrostatik ta'sir natijasida ushlab turiladi. Shunday qilib, bunday materiallardagi metall bog'lanish erkin valent elektronlar bilan musbat zaryadlangan ionlarning o'zaro ta'siri natijasida bo'ladi.

Metallar qora (temir) va rangli (alyuminiy, magniy, mis, rux va xokazolar)ga bo'linadi. Bular esa o'z navbatida engil, og'ir, qiyin eruvchan, nodir, kamyob, radiaktiv, transuran va xokazolarga bo'linadi.

Metallli qotishma deb, har xil metallarning bir fazali yoki ko'p fazali aralashmalariga aytiladi.

Ikki yoki bir necha metallarning birgalikda eritilganda hosil bo'ladigan fazalar yo qattiq qotishmalar, yo intermetall birikmalar ko'rinishida bo'ladi. Qattiq qotishma hosil bo'lganda metall – eritkichning kristall panjarasi saqlanadi. Kristall panjara turlari bir xil bo'lgan ko'pgina metallar bir-biri bilan ixtiyoriy nisbatlarda aralashib qattiq qorishmalarning uzluksiz qatorini hosil qiladi. Biroq shunday metallar ham borki, ular biri-biri bilan chekli eriydi yoki umuman qattiq fazada erimaydi.

Qattiq qorishmalarda uch xil turdagi struktura kuzatiladi: o'rin olish, kirish va ayrish. Ÿrin olish kuzatiladigan qattiq qorishmalarda erigan metallning atomlari kristall panjara tugunlarida joylashgan metall – eritkich atomllarining o'rniga o'tiradi. Bunda ular ma'lum bir qonuniyat asosida taqsimlanadi. Kirish kuzatiladigan qattiq qorishmalarda erigan metallning atomlari eritkich metall atomlarining

o`rnini olmasdan, uning kristall panjarasidagi atomlar oralig`iga joylashadi. Kirish kuzatiladigan qattiq qorishmalar atom radiuslari kichik bo`lgan metallar eriganda hosil bo`ladi. Ayrish kuzatiladigan qattiq qorishmalar qotishma komponentlarining birortasining etishmasligi natijasida hosil bo`ladi.

Erituvchi va erigan metallarning atomlari har xil radiusga ega bo`lganligi sababli qattiq qorishmaning kristall panjarasi o`rin olishda nisbatan kamroq, kirish va ayrish strukturalarda esa ko`proqqa buziladi.

1.3. Yarim o`tkazgichlar va ularning xossalari

*Yarim o`tkazgichlar* deb, elektr o`tkazuvchanliklari metall va dielektriklar oralig`ida bo`lgan moddalarga aytiladi.

Biroq bu ta`rif qisman to`g`ri bo`lib, yarim o`tkazgichlargagina xos bo`lgan xususiyatlarning hammasini o`zida aks ettira olmagan. Bu ta`rifni to`ldirish uchun yarim o`tkazgichlarning ikkita xususiyatini qo`shimcha qilish kerak. Birinchidan, temperatura oshishi bilan yarim o`tkazgichlarning elektr o`tkazuvchanligi oshadi, ikkinchidan, bu o`tkazuvchanlik kristall panjara davriyligini buzadigan yarim o`tkazgichdagi har xil kirishmalar va strukturaviy nuqsonlarning konsentrasiyalariga kuchli bog`liq bo`ladi. Yarim o`tkazgichga kirishma kiritilganda faqatgina uning elektr o`tkazuvchanligi o`zgarmasdan, balki temperaturaga bog`lanishining xarakteri ham o`zgaradi. Yarim o`tkazgichlar asosida mikroelektronika mahsulotlarini tayyorlashda asosiy kriteriy ularning kristall strukturasining mukammalligi hisoblanadi.

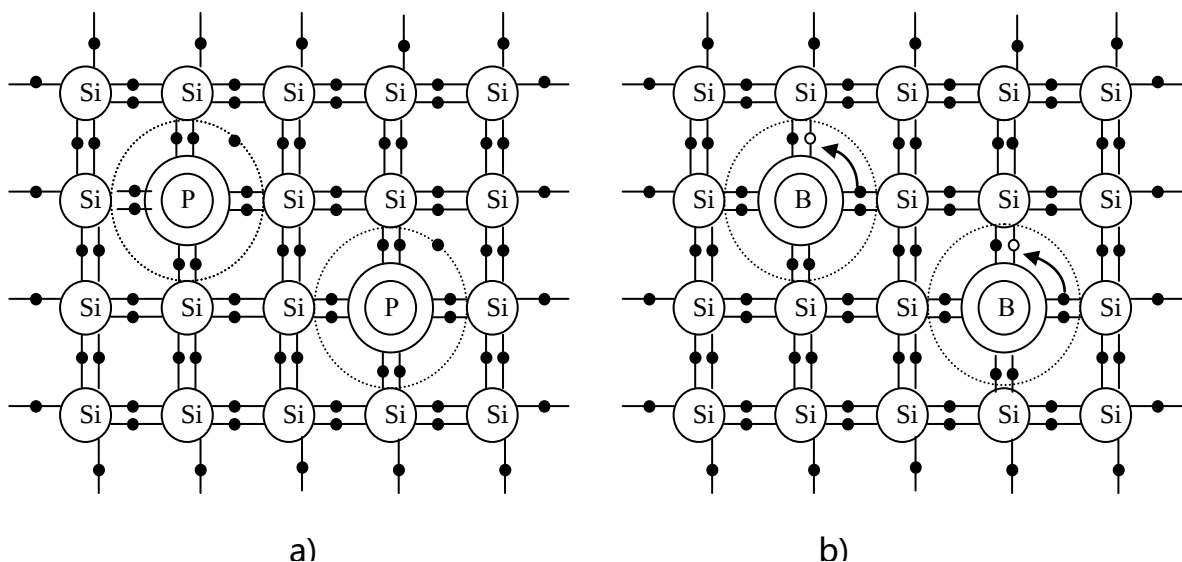
Yarim o`tkazgichlar materialining tozaligi bo`yicha *xususiy va kirishmali yarim o`tkazgichlarga* bo`linadi.

Xususiy yarim o`tkazgichlarda kirishmalar bo`lmaydi. Biroq kirishmasiz yarim o`tkazgich olish oson emas. Shu sababli xususiy yarim

o'tkazgich deyilganda, undagi qoldiq kirishmalarning ta'sirini ma'lum bir temperaturagacha hisobga olmasa ham bo'ladigan yarim o'tkazgichlar tushiniladi. Xususiy yarim o'tkazgich absolyut nol temperaturada (-273°C) elektr o'tkazuvchanlikka ega emas, chunki undagi valent elektronlar erkin holatda bo'lmaydi. Demak absolyut nolda yarim o'tkazgichlar xuddi dielektriklarday bo'ladi. Absolyut noldan farqli temperaturalarda elektron biror bir kovalent bog'ning uzilishi natijasida atomdan ajraladi (masalan, yarim o'tkazgichli materialga issiqlik ta'sir ettirilganda). Natijada xususiy yarim o'tkazgichda erkin elektron va uzilgan (to'lmagan) bog' hosil bo'ladi. Uzilgan yoki to'lmagan bog' shartli ravishda musbat zaryadga ega bo'lgan zarracha ya'ni kovak deb qabul qilingan. Demak xususiy yarim o'tkazgichlarda erkin elektronlar soni kovaklar soniga teng bo'ladi.

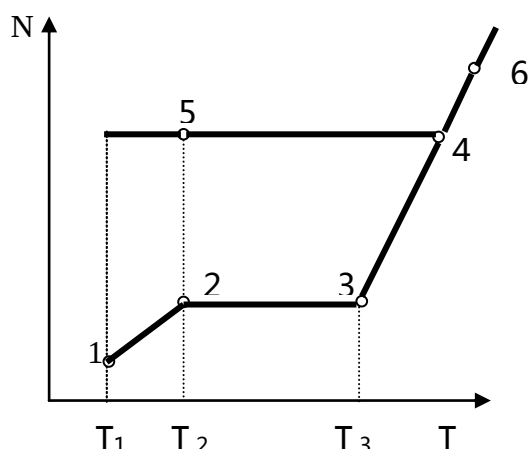
Kirishmali yarim o'tkazgichlarda ularning elektrofizikaviy xossalari kiritilayotgan kirishmaning turi va miqdori bilan aniqlanadi. Kiritilgan kirishmaning turiga bog'liq holda elektron – n turdagi va kovak – p turdagi elektr o'tkazuvchanlikli yarim o'tkazgichlar bir-biridan farq qilinadi. Qo'shimcha elektronlar yoki kovaklar hosil qiladigan kirishmalar mos holda donorlar va akseptorlar deyiladi (1-rasm: a,b).

Kiritilayotgan kirishmaning konsentratsiyasi ma'lum bir qiymatdan oshganda hosil bo'layotgan kirishma zonasi o'tkazuvchanlik zonasi



1.1-rasm. Kirishmali yarim o'tkazgichlarning strukturasini: a – fosfor bilan

bilan birlashib ketadi. Bunday yarim o'tkazgichlar *aynigan* yarim o'tkazgichlar deyiladi. Aynigan yarim o'tkazgichlarda kirishmali elektr o'tkazuvchanlik kuzatiladigan temperaturalar oralig'ida elektr o'tkazuvchanligining qiymati o'zgarmas bo'lib temperaturaga bog'liq bo'lmaydi. Shunday qilib, aynigan yarim o'tkazgichlar yuqori elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi va ularni yarim metall ham deyishadi. Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi N ning har xil turdagi yarim o'tkazgichlarda temperatura T ga bog'liqligi 1.2-rasmda keltirilgan.



1.2-rasm. Donor kirishma konsentratsiyalari har xil bo'lgan yarim o'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar

Temperatura T_1 dan T_2 gacha oshirilganda kirishma atomilari (donor) hisobiga erkin elektronlar hosil bo'ladi va erkin zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi oshadi (1-2 kesma). Temperaturaning keyingi T_2 dan T_3 gacha oshishida zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi o'zgarmaydi (2-3 kesma), chunki hamma kirishma atom-larining yarim o'tkazgich

atomlari bilan kovalent bog'lanmagan elektronlari erkin bo'lib qoladi, yarim o'tkazgich atomlarining elektronlari esa o'z atomlari bilan kovalent bog'langan holda bo'ladi. T_3 dan yuqori temperaturalarda xususiy yarim o'tkazgichning atomlari orasidagi kovalent bog'larning uzilishi natijasida erkin elektronlar hosil bo'la boshlaydi va erkin zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi yana osha boshlaydi (3-6 kesma). Donor kirishmaning katta konsentratsiyalarida yarim o'tkazgich aynigan holatga o'tadi va uning temperaturaviy bog'lanishi ikki kesmadan iborat siniq chiziq tarzida ifodalanadi (5-4 va 4-6 kesmalar). 5-4 kesma oralig'ida zaryad tashuvchilarning miqdori o'zgarmaydi, 4-6 kesma

oralig'ida esa xususiy yarim o'tkazgich kovalent bog'larning uzilishi natijasida ularning konsentrasiyasi yana osha boshlaydi.

Yarim o'tkazgichlarga xos xususiyatlardan biri ularning elektr o'tkazuvchanligining yorug'likka bog'liqligidir. Yorug'lik ta'sirida hosil bo'layotgan qo'shimcha erkin elektronlar hisobidagi elektr o'tkazuvchanlik fotoo'tkazuvchanlik deyiladi. Bunda yarim o'tkazgichning tabiatiga bog'liq holda erkin elektronlar tushayotgan nur ul'trabinafsha sohadan infraqizil sohagacha o'zgarganda hosil bo'lishi mumkin. Yarim o'ttkazgichning fotoo'tkazuvchanligi tushayotgan nurning intensivligiga va to'lqin uzunligiga bog'liq bo'ladi. Yarim o'tkazgichlarga xos bo'lgan yana bir xususiyatlardan biri unda hosil qilingan temperatura farqi natijasida termoelektr yurituvchi kuch deb ataladigan potentsiallar farqining hosil bo'lishidir. Kirishmalar bir tekis taqsimlangan yarim o'tkazgich kristalli notekis qizdirilganda unda zaryad tashuvchilarning konsentrasiyalari farqi hosil bo'ladi. Buning natijasida issiqroq sohadan sovuqroq sohaga zaryad tashuvchilarning diffuziya oqimi yuzaga keladi, bu esa termoelektr yurituvchi kuchning (termoe.yu.k) hosil bo'lishiga sabab bo'ladi.

Yarim o'tkazgich namunasidan ma'lum yo'nalishda elektr toki o'tayotganda unga tok yo'nalishiga perpendikulyar bo'lgan magnit maydoni ta'sir ettirilsa namunaning yon yoqlari orasida potentsiallar farqi hosil bo'ladi. Bu pol'tensiallar farqi Xoll e.yu.k. deyiladi (Xoll effekti).

Bundan tashqari yarim o'tkazgichning xossalari zaryad tashuvchilarning harakatchanligiga, yashash vaqti va diffuziyali uzunlik kabi parametrlar bilan xarakterlanadi.

Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi deganda, ularning tartibli harakati o'rtacha tezligining elektr maydoni kuchlanganligiga bo'lgan nisbati tushiniladi:

$$\mu = \frac{g_{yp}}{E} \cdot \left[\frac{\mathcal{M}^2}{B \cdot c} \right] \quad (1.1)$$

Harakatchanlik SI birliklar sistemasida $\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ bilan o'lchanadi. Amalda esa ko'proq $\text{sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ birligidan foydalaniladi.

Haqiqatdan ham, elektr maydoni ta'sirida zaryad tashuvchilar ma'lum bir tartibli harakat (dreyf) tezligiga ega bo'lib, elektr tokini hosil qiladi. Elektr o'tkazuvchanligi n- va r-turli bo'lgan yarim o'tkazgichlarda elektronlarning harakatchanligi - μ_n va kovaklarning harakatchanligi - μ_p larning qiymatlari bir – biridan farq qiladi. Ko'p hollarda $\mu_n > \mu_p$ bo'ladi.

Zaryad tashuvchilarning yashash vaqti deganda, tashqi ta'sir to'xtagandan so'ng ortiqcha konsentrasiyaning e marta kamayadigan vaqt tushiniladi (e – natural logarifm asosi). Umuman, yashash vaqti bu zaryad tashuvchining hosil bo'lgan (generasiya) vaqtdan to yo'q bo'lib ketishgacha (rekombinasiya) bo'lgan vaqt oralig'idir. Zaryad tashuvchilarning yashash vaqti xususiy yarim o'tkazgichlarda eng katta bo'ladi. Kirishmali yarim o'tkazgichlarda esa kamayadi, ayniqsa agar ularning kristall strukturasi nuqsonlar miqdori ko'p bo'lsa bu kamayish sezilarli bo'ladi. Temperatura oshishi bilan yashash vaqti oshadi, chunki bu holda zaryad tashuvchilarning nuqsonlar tomonidan ushlab qolinishi qiyinlashadi.

Diffuziyali uzunlik deganda, elektr va magnit maydonlarining ta'sirlari to'xtagandan so'ng yarim o'tkazgichdagi zaryad tashuvchilarning ortiqcha konsentrasiyasi e marta kamayadigan masofa tushiniladi. Boshqacha aytganda, zaryad tashuvchi o'zining yashash vaqti davomida diffuziya natijasida siljiydigan masofa diffuziyali uzunlik deyiladi.

1.4. Dielektriklar va ularning xossalari

Dielektriklar deb, amalda elektr toki o'tkazmaydigan moddalarga aytiladi. Dielektriklar qattiq, suyuq va gazsimon bo'ladi.

Mikroelektronikada eng ko'p qattiq dielektriklar qo'llanilishi sababli, ularda kuzatiladigan asosiy fizik jarayonlarni ko'rib chiqamiz.

Tashqi elektr elektr maydoniga kiritilgan dielektrlarda *qutblanish* jarayoni yuz beradi. Bunda dielektrikning har bir elementar hajmida elektr dipol momenti hosil bo'ladi. Tashqi elektr maydoni ta'sirisiz o'z-o'zidan (spontan) qutblanish yuz beradigan dielektriklar segnetoelektriklar deyiladi. Dielektrlarda qutblanish mexanik kuchlanish ta'sirida ham yuz berishi mumkin. Dielektrlarda qutblanish jarayonlari *dielektrik singdiruvchanlik* va *dielektrik qabul qiluvchanlik* deb ataladigan kattaliklar bilan xarakterlanadi.

Dielektrikning *dielektrik singdiruvchanligi* izolyator sifatida shu dielektrikdan foydalanilgan kondensator sig'imining izolyatori vakuum bo'lgan kondensator sig'imiga nisbati bilan aniqlanadi.

Dielektrik qabul qiluvchanlik dielektrikning elektr maydonida qutblana olish qobiliyatini ko'rsatadi.

Dielektrlarning asosiy xarakteristikalaridan biri bu *sirt elektr o'tkazuvchanligidar*. Dielektrik sirtida yuz beradigan fizik jarayonlar namli va gazlar adsorbsiyalangan qatlamlarning hosil bo'lishiga bog'liq. Dielektrikning sirtida yupqa namli qatlamning hosil bo'lishi unda sezilarli sirt elektr o'tkazuvchanlikning hosil bo'lishiga sabab bo'ladi. Bundan tashqari, dielektrlarning sirt elektr o'tkazuvchanligi sirtdagi iflosliklar, nuqsonlarning miqdori va xarakteriga hamda o'lchash o'tkazilayotgan muhitning nisbiy namligiga kuchli bog'liq bo'ladi. Dielektrlarning sirt elektr o'tkazuvchanligini kamaytirish uchun ularning sirtiga astoydil ishlov beriladi va iflosliklardan tozalaniladi.

Dielektrlarda elektr maydonining uzluksiz ta'siri natijasida ma'lum bir miqdorda issiqlik ajraladi, ya'ni elektr quvvatining yo'qolishi ro'y beradi. Bu *dielektrik yo'qotish* deyiladi va u dielektrik yo'qotish

burchagi yoki uning tangensi bilan xarakterlanadi. Sig'imli zan-jirda tok va kuchlanish orasidagi faza siljish burchagi - φ ni 90° gacha to'ldiruvchi burchak *dielektrik yo'qotish burchagi* - δ deyiladi. Ideal dielektrlarda faza siljish burchagi φ 90° ga teng bo'ladi va dielektrik yo'qotish burchagi δ esa nolga teng bo'ladi. Real dielektrlarda δ noldan farqli bo'ladi va dielektrlarda sochilayotgan quvvat qancha katta bo'lsa faza siljish burchagi shuncha kichik, dielektrik yo'qotish burchagi esa shuncha katta bo'ladi.

Elektr maydonining katta qiymatlarida dielektrikning *teshilishi* ro'y beradi. Bunda elektr maydoni kuchlanganligining ma'lum bir kritik qiymatdan oshib ketishi natijasida dielektrikning izolyasiyalovchi xossasi yo'qoladi. Dielektrikning teshilishiga olib keladigan eng kichik kuchlanish *teshuvchi kuchlanish* va bunga to'g'ri keladigan elektr maydon esa *dielektrikning elektr mustahkamligi* deyiladi.

1.5. Magnitli materiallar va ularning xossalari

Ba'zi bir materiallar tashqi magnit maydoni ta'sirida magnit momenti - M ga ega bo'lib qoladi. Materialning birlik xajmiga to'g'ri keladigan magnit momenti *magnitlanganlik* - J_m deyiladi:

$$J_m = M/V \quad (1.2)$$

Magnitlanganlik magnit maydoni kuchlanganligi bilan *magnit qabul qiluvchanlik* deb ataladigan koeffisient bilan bo'lanadi:

$$J_m = k_m N, \quad (1.3)$$

bu erda k_m - magnit kabul qiluvchanlik bo'lib, u razmersiz bo'lib berilgan moddaning magnit maydonida magnitlana olish xususiyatini xarakterlaydi.

Magnit maydonining ta'siriga bog'liq holda hamma materiallar beshta guruhga bo'linadi: *diamagnetiklar*, *paramagnetiklar*, *ferromagnetiklar*, *antiferromagnetiklar* va *ferrimagnetiklar*.

Diamagnetiklarga magnit qabul qiluvchanligi manfiy va u tashqi magnit maydon kuchlanganligiga bogʻliq boʻlmaydigan moddalar kiradi. Masalan, baʼzi bir metallar (mis, kumush, oltin, rux kabilar), yarim oʻtkazgichlar (germaniy, kremniy, $A^{III}V^V$ $A^{II}V^VI$ kabi birikmalar) va koʻpchilik organik birikmalar. Bularda magnit qabul qiluvchanlikning qiymati $k_m = - (10^{-6} - 10^{-7})$ atrofida boʻladi.

Paramagnetiklarga magnit qabul qiluvchanligi musbat va u tashqi magnit maydon kuchlanganligiga bogʻliq boʻlmaydigan moddalar kiradi. Pa-ramagnetiklarga ishqor, ishqorli-er va baʼzi bir oraliq metallar, temir, kobalʼt, nikelʼ va kamyob elementlar tuzlari misol boʻladi. Bularda mag-nit qabul qiluvchanlikning qiymati xona haroratida $k_m = (10^{-3} - 10^{-6})$ atrofida boʻladi.

Ferromagnetiklarga magnit qabul qiluvchanligi katta va musbat hamda uning qiymati tashqi magnit maydon kuchlanganligiga va temperatu-raga kuchli bogʻliq boʻlgan moddalar kiradi. Bularda magnit qabul qiluv- chanlikning qiymati 10^6 gacha boʻladi. Ferromagnetiklarning eng asosiy xossalardan biri bu ularning kuchsiz magnit maydonlarida ham magnitlana olishidir. Ferromagnetiklarga temir va ikki (kam hollarda - bir) valentli metallar oksidlari asosidagi murakkab tarkibli moddalar kiradi.

Antiferromagnetiklarga katta boʻlmagan musbat va temperaturaga kuchli bogʻliq boʻlgan magnit qabul qiluvchanlikka ega boʻlgan moddalar kiradi. Bularda magnit qabul qiluvchanlikning qiymati $k_m = (10^{-3} - 10^{-5})$ atrofida boʻlib temperaturaga kuchli bogʻliq boʻladi. Antiferromagnetiklar qizdirilganda paramagnetik holatga oʻtadi. Bularga xrom, marganes, kamyob er elementlari misol boʻladi.

Ferrimagnetiklarga magnit qabul qiluvchanligi katta va uning qiymati magnit maydoni hamda temperaturaga bogʻliq boʻlgan moddalar kiradi. Ferrimagnetiklarning magnit xossalari

kompensirlanmagan antiferromagnetizm hisobiga yuzaga keladi. Bunday materiallarga oksidli birikmalar-ferritlar kiradi.

Dia -, para- va antiferromagnit materiallarni kuchsiz magnit modda-lar guruhiga, ferro- va ferrimagnit materiallarni esa kuchli magnit moddalar guruhiga kiritish mumkin

Monokristalli ferromagnit materiallarning magnit xossalari har xil kristallografik yo`nalishlarda har xil bo`ladi, ya`ni *magnit anizotropiyaga* ega bo`ladi. Ferromagnit materiallarda kuchsiz va kuchli magnitlanish yo`nalishlari mavjud bo`ladi.

Materiallarning magnit xossalari magnit singdiruvchanlik deb ataladigan kattalik bilan xarakterlanadi. Bu kattalik magnit induksiyasining magnit maydoni kuchlanganligining magnit doimiysiga bo`lgan ko`payitmasiga nisbatiga teng bo`ladi:

$$\mu = B/\mu_0 N, \quad (1.4)$$

bu erda $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Gn/m}$ – SI birliklar sistemasidagi magnit doimiysi. Magnit singdiruvchanlik bilan magnit qabul qiluvchanlik bir-biri bilan quyidagicha bog`langan:

$$\mu = 1 + k_m \quad (1.5)$$

Magnit materiallarining asosiy xossalaridan bittasi bu – *magnitstriksiya* bo`lib, bunda magnit maydoni o`zgarganda, masalan, ferromagnetik namunalarning geometrik (chiziqli) o`lchamlari o`zgaradi. Magnitstriksiya magnit maydoni ta`siri yo`nalishida namunaning nisbiy deformasiyasi bilan baholanadi.

Materiallarning magnit xossalariga temperatura katta ta`sir ko`rsatadi. Ferromagnetiklar qizdirilganda ularning spontan magnitlanish kamayadi, magnit singdiruvchanlik avvaliga oshadi, maksimumga erishgandan so`ng esa kamaya boshlaydi, hamda magnitstriksiya effekti va magnit kristallografik anizotropiyasi kuchsizlanadi.

1.6. Plastik materiallar va ularning xossalari

Plastmassalar deb, tabiiy yoki sintetik smolalar (polimerlar) asosida olinadigan hamda qizdirish va bosim ta'sirida kerakli shakldagi mahsulot tarzida shakllanadigan, keyin esa bu shaklni uzoq vaqt saqlaydigan materiallarga aytiladi.

Plastmassalar *asosdan (bog'lovchi moddadan), to'ldirg'ichdan, qotirg'ichdan, plastifikatordan va yoqlovchi qo'shilmalardan* tashkil topadi. Bog'lovchi modda sifatida har xil epoksidli, kremniyorganikli va poliefirli smolalardan foydalaniladi. To'ldirg'ich shisha kukuni, tal'k, asbest, grafit yoki boshqa materiallardan iborat bo'lib, plastmassalar-ning kerakli mexanik xossalarini ta'minlaydi. Qotirg'ich plastmassaning eng kerakli tashkil etuvchi qismi bo'lib, u smolalarning suyuq cho'ziluvchan holatdan qattiq holatga o'tishini ta'minlaydi. Qotirg'ich sifatida dietilentriamin, geksametilendiamin va boshqalardan foydalaniladi. Plastifikator plastmassaning elastikligini oshiradi. Plastifikator sifatida ko'p atomli spirtlarning efirlari, olein kislotasi, stearin va dibutilftalatlar ishlatiladi. Yog'lovchi qo'shilmalar (vosk, parafin) plastmassaning qolip devoliga yopishib qolishining oldini oladi.

Bog'lovchi materialning turi bo'yicha plastmassalar termoplapstik va termoreaktivga bo'linadi.

Termoplastik plastmassalar sovutilgan suyuq holatdan qattiq holatga va qayta qizdirilganda esa qattiq holatdan suyuq holatga o'tishi mumkin, ya'ni termoqaytuvchan bo'ladi.

Termoreaktiv plastmassalar harorat ta'sirida suyuq holatdan qattiq holatga (sovutilganda) o'tadi, lekin qayta qizdirilganda qattiq holatdan suyuq holatga o'tmaydi, ya'ni termoqaytmas bo'ladi.

Plastmassalarning xossalari tarkibga va tashkil etuvchilarning miqdoriy nisbatlariga bog'liq bo'ladi. Ularning asosiy xususiyatlari

quyidagicha: zichligining kamligi ($1-2 \text{ g/sm}^3$); issiqlik o'tkazuvchanligining kichikligi; temperaturaviy chiziqli kengayish koeffitsientining qiymati $5 \cdot 10^{-6}$ dan $10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{S}$ gacha bo'ladi; yaxshi elektr izolyasiyalovchi hossalarga egaligi (dielektrik singdirivchanligi $1-10$ ga teng, solishtirma qarshiligi – $10^{12} - 10^{18} \text{ Om}\cdot\text{sm}$, dielektrik yo'qotishlar $0,1$ dan oshmaydi, elektr mustahkamligi esa $10-70 \text{ kV/mm}$ ni tashkil qiladi); korroziya va kimyoviy chidamligi yuqori; mexanik hamda texnologik xossalarning yaxshiligi (shakl berish, presslash va quyish imkoniyatlari).

Plastmassalarni ishlatilishiga qarab shartli ravishda quyidagi guruhlariga bo'lish mumkin: yuqori mexanik xossalarga ega bo'lgan konstruksiyaviy; dielektrik xossalari yaxshi bo'lgan elektrizolyatsiyaviy; uzoq kimyoviy ishlov berish va yuqori namlik sharoitida xossalarni saqlab qola oladigan namlikka va kimyoviy chidamli; urilishga mustahkamlikli; issiqlikka chidamli; radiasiyaga chidamli; tropik iqlimga chidamli; tebranishga chidamli; yorug'lik texnikasi va optikaviy.

2- bob. Elektron texnika materiallarini hosil qilishda xomashyo materiallariga qayta ishlov berish jarayonlari

2.1. Elektron texnika materiallari texnologiyasidagi asosiy jarayonlarning umumiy xarakteristiklari

Elektron texnika materiallarini xosil qilishning texnologik jarayoni xomashyoni o'tkazgichlar, yarimo'tkazgichlar, dielektriklar va magnit materiallariga aylantiradigan usullar va jarayonlarning yig'indisidir. Texnologik sxema deganda mos apparatlarda kechadigan operasiyalar ketma ketligi tavsiflangan usullar tushuniladi. Operatsiya – bitta yoki bir qancha uskunalarda kechadigan har xil texnologik jarayonlar: issiqlik, massa almashuvi, mexanik, kimyoviy va shu kabi jarayonlar yig'indisidan iborat bo'ladi. Elektron texnika materiallari asosan kimyoviy texnologik jarayon yordamida hosil qilinib, ular o'z navbatida bir qancha elementar fizikaviy, fizik-kimyoviy va kimyoviy jarayondan tashkil topadi. Ular quyidagi bosqichlarga bo'linadi:

1. Xomashyo tayyorlash va reaksiya zonasiga komponentlarni olib kelish.
2. Kimyoviy reaksiya.
3. Hosil bo'lgan maxsulotlarni reaksiya zonasidan olib ketish va asosiy mahsulotni ajratib olish.

Birinchi bosqichda kechadigan fizikaviy jarayonlar natijasida qayta ishlanayotgan materiallar faqat tashqi shakllarini yoki fizikaviy xossalarini o'zgartiradi va ikkinchi bosqichga kimyoviy o'zgarmasdan o'tadi. Reaksiyaga kirishadigan komponentalar reaksiya zonasiga gazlarning diffuziyasi yoki konveksiyasi, absorbsiyasi yoki desorbsiyasi, bug'larning kondensasiyasi, qattiq moddalarning suyultirilishi yoki ularning suyuqliklarda eritilishi, suyuqliklarning bug'lanishi yoki qattiq moddalarning vozgonkasi orqali olib kelinadi.

Ikkinchi bosqichda kechadigan jarayonlar natijasida boshlang'ich materiallarda chuqur o'zgarishlar yuz beradi. Buning natijasida nafaqat fizik xossalar balki moddaning agregat holati va kimyoviy tarkibi ham o'zgaradi.

Uchinchi bosqichda kimyoviy o'zgarishlar kuzatilmaydi, faqat ajralish bo'ladi: kerakli (asosiy) va qo'shimcha mahsulotlar ajratib olinadi va qolganlari jarayon boshiga qaytariladi.

Texnologik jarayonni tashkil etish va optimallashtirishda texnologik rejimning ahamiyati katta. Texnologik rejim deb jarayonning tezligiga, mahsulotning chiqishi va sifatiga ta'sir etuvchi asosiy omillar (parametrlar) yig'indisiga aytiladi.

Elektron texnika materiallari ishlab chiqarishda texnologik rejimning asosiy parametrlariga: harorat, bosim, reagentlarni olib kelish va aralashtirish usullari hamda boshqalar kiradi. Texnologik rejim parametrlarining optimal qiymatlari apparatlarning sermahsulligini va personalning mehnat umumdorligi maksimal bo'lishini ta'minlashi kerak. Texnologik jarayonlar vaqt bo'yicha kechish xarakteriga qarab 3 xil bo'ladi:

1. Davriy.
2. Uzluksiz.
3. Kombinatsiyali.

Davriy jarayon alohida bosqichlarning bitta joyda kechishini ifodalaydi va bunda oxirgi mahsulot apparatdan ma'lum bir vaqt oralig'ida to'liq yoki qisman olib turiladi.

Uzluksiz jarayonda oxirgi mahsulot uzluksiz ravishda olib turiladi, bunda uzluksiz ishlayotgan apparatning ixtiyoriy qismidagi fizik kattaliklar va parametrlar jarayonning kechish vaqtida o'zgarishsiz turadi.

Kombinatsiyali jarayonda uzluksiz jarayonning ba'zi bir bosqichlari davriy bo'ladi yoki davriy jarayonning ba'zi bir bosqichlari uzluksiz bo'ladi.

Uzluksiz boshqariladigan jarayon boshqalarga qaraganda bir qator ustunliklarga ega.

2.2. Issiklik uzatish jarayonlari

Jismlar orasida issiqlik ko'chishi yoki issiqlik almashuvi jarayonining harakatlantiruvchi kuchi haroratlar farqi bo'lib, buning natijasida termodinamikaning ikkinchi qonuniga binoan, issiqlik o'z holicha issiqroq jismdan issiqligi kamroq jismga o'tadi.

Issiqlik tarqalishining uchta usuli mavjud:

1. Issiqlik o'tkazuvchanlik hisobiga.
2. Issiqlik nurlanishi hisobiga.
3. Konveksiya.

Real sharoitlarda issiqlik almashishining bu turlari alohida kuzatilmasdan ko'pincha ular bir biri bilan bog'liq holda birgalikda namoyon bo'ladi. Masalan, konveksiya ko'pincha issiqlik nurlanishi bilan birgalikda kechadi, g'ovak jismlarda issiqlik o'tkazuvchanlik - konveksiya va g'ovaklardagi nurlanish bilan, issiqlik nurlanishi esa issiqlik o'tkazuvchanlik va konveksiya bilan kechadi.

2.2.1. Issiklik o'tkazuvchanlik hisobiga issiqlik uzatish

Issiqlik o'tkazuvchanlik hisobiga issiqlik uzatishning asosiy qonuni Fur'e qonunidir. Bu qonunga binoan, issiqlik oqimiga perpendikulyar bo'lgan dS sirt yuzasi elementiga $d\tau$ vaqt ichida tushayotgan dQ issiqlik miqdori temperatura gradienti dT/dx ga, sirt yuzasi elementi dS ga va vaqt $d\tau$ ga to'g'ri proporsionaldir:

$$dQ = -\lambda_T dT/dx dS d\tau, \quad (2.1)$$

bu erda λ_T - issiqlik o'tkazuvchanlik koeffisienti bo'lib, son jihatdan birlik yuzadan birlik vaqt ichida temperatura gradienti birga teng bo'lganda o'tadigan issiqlik miqdoriga teng bo'lib, moddalarning fizik xarakteristikasi hisoblanadi va uning qiymati, vt/ (m·grad): metallar

uchun – $2 \div 417$; suyuqliklar uchun – $0,1 \div 0,7$; gazlar uchun – $0,0062 \div 0,165$ atrofida bo'ladi.

Fur'e qonunini boshqacha quyidagicha yozish mumkin:

$$J = -\lambda_T dT/dx, \quad (2.2)$$

bu erda J - issiqlik oqimining zichligi, yoki birlik yuzadan birlik vaqt ichida uzatilayotgan issiqlik miqdori.

Ko'zg'almas muhitda temperaturaning taqsimlanishi umumiy ko'rinishda issiqlik o'tkazuvchanlikning differensial tenglamasi yoki Fur'e tenglamasi ko'rinishida ifodalanadi:

$$dT/d\tau = a_T \nabla^2 T, \quad (2.3)$$

bu erda $a_T = \lambda_T / (c \cdot \rho)$ - temperatura o'tkazuvchanlik koeffitsienti; ρ - muhitning zichligi, c - solishtirma issiqlik sig'imi; a_T ning o'lchami m^2/s bo'lib, jismlarning issiqlik inersiya xossasini ifodalaydi.

Issiqlik o'tkazuvchanlik hisobiga issiqlik uzatish muvozanatlashgan jarayonda $dT/d\tau = 0$ ga teng va (2.3) tenglama $a_T \cdot \nabla^2 T = 0$ ko'rinishga ega bo'ladi. Bu erda a_T 0 ga teng bo'lolmaydi, shu sababli ifodani quyidagicha yozish mumkin:

$$\nabla^2 T = 0. \quad (2.4)$$

(2.4) tenglama qo'zg'almas muhitda issiqlik rejimi muvozanatida issiqlik o'tkazuvchanlikning differensial tenglamasi hisoblanadi.

2.2.2. Issiqlik nurlanishi hisobiga issiqlik uzatilishi

Kondensirlangan jismlar (qattiq, suyuq) uzluksiz nurlanish spektriga ega bo'ladi. Issiqlik nurlanishning intensivligi temperatura oshishi bilan oshib boradi va temperatura $T > 600$ °C da kondensirlangan jismlar orasidagi nurli issiqlik almashuvi boshqa usullarga nisbatan ustunlikka erishadi.

Issiqlik va yorug'lik nurlanishining fizik tabiati bir xil bo'lib, bir xil qonunlarga, ya'ni qaytish, sinish va yutilish qonunlariga bo'ysinadi. Ular bir biridan fakat to'lqin uzunliklari bilan farqlanadi: ko'rinadigan nurlar uchun to'lqin uzunliklarining qiymati $0,4 \div 0,8$ mkm, ko'rinmaydigan issiqliq (infrakizil) nurlarining to'lqin uzunliklari esa $0,8 \div 40$ mkm ga teng bo'ladi.

Qizdirilgan jismdan chiqayotgan nurlar oqimi boshqa jism sirtiga tushganda uning bir qismi qaytadi, bir qismi yutiladi, bir qismi esa jismning ichidan o'tib ketadi. Agar jismga tushayotgan nurlarning umumiy energiyasini - Q , yutilayotgan energiyani - Q_{yut} , qaytgan energiyani - Q_{kayt} , jism ichidan o'tib ketgan energiyani - $Q_{o't}$ deb belgilab olsak, unda:

$$Q = Q_{yut} + Q_{kayt} + Q_{o't} . \quad (2.5)$$

(2.5) tenglamaning o'ng va chap tarafini Q ga bo'lib va belgilashlar kiritib quyidagi tenglamani hosil qilamiz:

$$A + R + D = 1 , \quad (2.6)$$

bu erda $A = Q_{yut}/Q$ - yutilish koeffisienti; $R = Q_{kayt}/Q$ - qaytish koeffisienti; $D = Q_{o't}/Q$ - o'tish koeffisienti. Bo'lishi mumkin bo'lgan xususiy chegaraviy xollar:

$A=1$ bo'lgan hol, bunda $R=D=0$, jism yuzasiga tushayotgan nurlarning hammasini yutadi. Bunday jismlar absolyut qora jism deyiladi.

$R=1$ bo'lgan hol, bunda $A=D=0$, jism o'ziga tushayotgan nurlarning hammasini qaytaradi. Bunday jismlar absolyut oq jism deyiladi.

$D = 1$ bo'lgan hol, bunda $A = R=0$, jism tushayotgan nurlarning hammasini o'tkazib yuboradi. Bunday jismlar absolyut shaffof yoki diatermik jism deyiladi.

Tabiatda absolyut jismlar bo'lmaydi. Yarim o'tkazgichli va dielektrik materiallar tushayotgan yorug'lik kvantlarining energiya

diapazonlari taqiq-langan zona kengligidan kichik bo'lgan nurlar uchun yuqori shaffoflikka ega. Har qanday to'liq uzunlikdagi tushayotgan nurlar energiyasining fakat bir qisminigina yutadigan, qaytaradigan va o'tkazib yuboradigan jismlar kulrang jismlar deyiladi. Issiqlik nurlanishining asosiy xarakteristikalaridan biri bu jismning integral nur chiqarish (nurlanish) qobiliyati E_T bo'lib, u berilgan T temperaturada birlik vaqtda to'liq uzunligining barcha intervalida ($\lambda = 0$ dan $\lambda = \infty$ gacha) jismning birlik yuzasidan nurlanayotgan energiya miqdoridir:

$$E_T = Q / (s\tau), \quad (2.7)$$

bu erda Q – jismdan nurlanayotgan energiya.

Nur chiqara olish qobiliyatining to'liq uzunlik intervaliga (λ dan $\lambda + d\lambda$ gacha) nisbati issiqlik nurlanishining spektral xarakteristikasi xisoblanadi. Uni jismning nurlanish intensivligi deyiladi va quyidagi nisbat bilan ifodalanadi:

$$I_{T\lambda} = dE_T / d\lambda. \quad (2.8)$$

E_T va $I_{T\lambda}$ bir biri bilan quyidagi ifoda orqali bog'langan:

$$E_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} I_{T\lambda} d\lambda. \quad (2.9)$$

Absolyut qora jism har qanday teperaturada, berilgan to'liq uzunlikda eng ko'p nurlanish intensivligiga ega bo'ladi. Absolyut qora jismning nurlanish intensivligi Plank tenglamasi bilan aniqlanadi:

$$I_{0T\lambda} = c_1 \lambda^{-5} / [\exp(-c_2 / (\lambda T)) - 1], \quad (2.10)$$

bu erda: T - absolyut temperatura; λ - nurlanishning to'liq uzunligi; $c_1 = 3,22 \cdot 10^{-16}$ Vt/m²; $c_2 = 1,24 \cdot 10^{-2}$ Vt/m².

(2.9) ifodani $\lambda=0$ dan $\lambda=\infty$ gacha integrallab absolyut qora jism uchun nurlanishning to'liq energiyasi yoki nur chiqara olish qobiliyatining ifodasini hosil qilamiz:

$$E_{0T} = \sigma_0 T^4, \quad (2.11)$$

bu erda $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Vt}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ – absolyut qora jismning nur chiqarish konstantasi.

(2.11) formula Stefan-Boltsman qonunini ifodalaydi. Bu qonunni kulrang jismlar uchun ham qo'llash mumkin:

$$E_T = \varepsilon \sigma_0 T^4, \quad (2.12)$$

bu erda $\varepsilon = \sigma / \sigma_0$ – nisbiy nur chiqarish koeffisienti yoki kulrang jismning qoralik darajasi, σ – kulrang jismning nur chiqarish koeffitsienti. ε ning kiymati doim birdan kichik bo'lib, temperaturaga bog'liq holda 0,01dan 0,96 (qora kuya) gacha bo'ladi.

Kulrang jismlarning nur chiqarish qobiliyati bilan yutish qobiliyati Kirxgof qonuni orqali bog'langan bo'lib, bunga binoan, har qanday jismning nur chiqarish qobiliyati E_T ning nur yutish qobiliyati A_T ga nisbati temperatura bir xil bo'lganda o'zgarmas kattalik bo'lib, absolyut qora jismning nur chiqarish qobiliyatiga teng bo'ladi.

$$\frac{E_T}{A_T} = \frac{E_{OT}}{A_{OT}} = E_{OT}, \quad (2.13)$$

bu erda $A_{OT} = 1$ - absolyut qora jismning yutish qobiliyati. Shu sababli notekis sirtli jismlarning yutish qobiliyati issiqlik nurlarining ko'p marta qaytishi hisobiga silliq sirtga qaraganda ancha yuqori bo'ladi.

2.2.3. Issiqlikning konveksiya hisobiga uzatilishi

Har qanday tashqi kuchlar maydonining ta'sirisiz faqat og'irlik kuchi maydonida yoki uning yo'qligida suyuq muhitning nobirjinsligi tufayli statik muvozanat turg'unligining yo'qolishi yoki muvozanatning buzilishi natijasida tabiiy konveksiya yuz beradi.

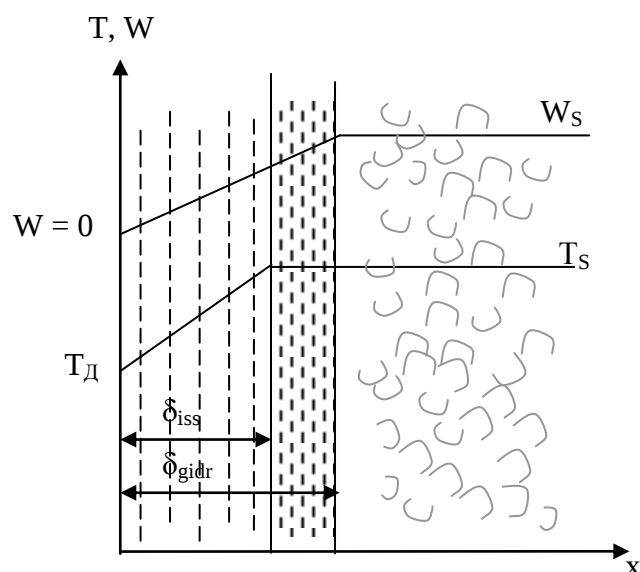
Issiqlik konveksiyasi deb, notekis qizdirilgan suyuqlik yoki gazlarda og'irlik kuchi maydonida muhit zichligining temperaturaga bog'liqligi

natijasida yuz beradigan harakatga aytiladi. Suyuqliklarning zichligi odatda temperaturaning oshishi bilan kamayadi. Agar temperaturaning farqi uncha katta bo'lmasa, unda zichlikning temperaturaga chiziqli bog'lanishidan foydalanish mumkin:

$$\rho = \rho_0(1 - \beta_T \Delta T), \quad (2.14)$$

bu erda β_T – suyuqlikning temperaturaviy kengayish koeffisienti.

Suyuq va gazsimon jismlarda issiqlikning uzatilishi o'sha muhitning mexanik uzatilishiga uzviy bog'langan bo'ladi, ya'ni suyuqlik oqimining gidrodinamik sharoitiga bog'liq bo'ladi. Suyuqlik va gazlarning massasi qancha ko'proq turbulent (quyunsimon) harakatlansa va uning zarrachalari kuchliroq aralashtirilsa, konveksiyali issiqlik uzatish shuncha intensiv bo'ladi. Suyuqliklarning asosiy massasida issiqlik uzatilishi asosan issiqlik o'tkazuvchanlik va konveksiya hisobiga ro'y beradi. Bunday birgalikdagi issiqlik uzatish konvektiv issiqlik uzatish deyiladi. Idish devoriga yaqinlashib borilgan sari turbulent harakatning intensivligi kamayadi, issiqlik o'tkazuvchanlikning hissasi oshib boradi, natijada issiqlik almashuvi kamayadi. Devor yaqinida issiqlik uzatilishi faqat devorga normal bo'lgan issiqlik o'tkazuvchanlik bilangina amalga oshiriladi, natijada bu sohada ma'lum bir temperatura gradienti hosil bo'ladi.



2.1-rasm. Issiqlik va gidrodinamik

Mana shu qatlam gidrodinamik chegaraviy qatlam δ_{gidr} ga o'xshatilib *issiqlik chegaraviy qatlam* δ_{iss} deyiladi, lekin ularning qalinliklari bir biridan farq qiladi. Issiqlik chegaraviy qatlamda issiqlik o'tkazuvchanlik asosiy rol o'ynaydi (2.1-rasm). Qovushqoqlikning oshishi bilan

δ_{gidr} oshishiga o'xshab, suyuqlikning issiqlik o'tkazuvchanligining oshishi δ_{iss} qalinligining oshishiga olib keladi. Issiqlik chegaraviy qatlam - δ_{iss} chegarasida issiqlik uzatilishining intensivligi temperatura o'tkazuvchanlik koeffisienti α orqali ifodalanadi.

Oqim turbulentligining kuchayishi issiqlik chegaraviy qatlam δ_{iss} ning kamayishiga olib keladi. Bu esa issiqlik uzatilish intensivligida konveksiyaning ta'siri oshib borishi bilan ifodalanadi. Shunday qilib, konvektiv issiqlik o'tkazish jarayoni murakkab mexanizmga ega. Shu sababli u issiqlik uzatishning soddalashgan qonuni yoki N'yutonning sovutish qonuni bilan aniqlanadi. Bu qonunga binoan, dS devor yuzasi elementi orqali $d\tau$ vaqt ichida uzatilayotgan issiqlik miqdori dQ devor va suyuqlik temperaturalari farqiga, dS va $d\tau$ ga to'g'ri proporsional bo'ladi:

$$dQ = -\alpha(T_0 - T_C)dS \cdot d\tau. \quad (2.15)$$

Muvazanat holatida:

$$Q = -\alpha(T_{\mathcal{A}} - T_C)S \cdot \tau, \quad (2.16)$$

bu erda α - issiqlik uzatish koeffisienti deyiladi va tajriba yo'li bilan aniqlanadi.

2.3. Massa uzatish jarayoni

Massa uzatish jarayoni bir fazadan boshqa fazaga modda uzatish bilan ifodalanadi. Bunda bitta yoki bir nechta komponentlarning bir fazadan boshqa fazaga ko'chishi natijasida geterogen yoki gomogen tizimlar (gazlar aralashmasi, suyuq yoki qattiq eritmalar va boshqalar) hosil bo'lishi mumkin.

Massa uzatish murakkab jarayon bo'lib, bunda bitta faza chegarasida yoki fazalar farqini chegaralovchi sirt orqali va boshqa faza chegarasida modda uzatilsa *massa uzatish* deyiladi. Har bir faza ichida moddaning taqsimlanishi molekulyar va konvektiv diffuziya yo'li bilan

boradi. Shu sababli massa ko'chish jarayoni *diffuziyali jarayon* ham deyiladi. *Massa uzatish jarayonlarining xarakatlantiruvchi kuchi taqsimlanayotgan moddalarning kimyoviy potentsiallar farqi hisoblanib, ular tizimning muvozanat vaziyatidan og'ish darajasini ifodalaydi. Hisoblashlarda massa ko'chish jarayonining harakatlantiruvchi kuchini taxminan konsentrasiyalar farqi bilan ifodalaydilar.*

Texnologik jarayonlar o'tkazishning ko'pincha uchraydigan real sharoitlarida massa uzatishning yo'nalishini aniqlash uchun konsentrasiyalar farqidan tashqari tashqi kuchlar ta'sirida bo'layotgan temperatura va bosim gradientlarini ham hisobga olish kerak bo'ladi.

Massa uzatish jarayonlarini hisoblashda va analiz qilishda hodisalarning quyidagi uchta tomoni ko'rib chiqiladi:

1. Fazalar qoidasi va muvozanat qonunlari bilan aniqlanadigan fazalar miqdori va ulardagi komponentlar taqsimoti qonunlarining tizimda amal qilishlari uchun kerakli va etarli shartlar.

2. Ishchi sharoitlar deb ataladigan va jarayonni o'tkazish uchun hosil qilinadigan kerakli va etarli shartlar; ishchi shartlar orasidagi bog'la-nishlar jarayonning ishchi liniyasi deb ataladigan holda ifodalanadigan qayta ishlanadigan mahsulotlarning boshlang'ich va oxirgi konsentrasiya-lyari va miqdorlarining qiymatlarini berish yo'li bilan aniqlanadi.

3. Jarayonning harakatlantiruvchi kuchiga, tizimning fizik xossalriga va jarayon o'tadigan gidrodinamik sharoitlarga bog'liq bo'lgan moddaning bir fazadan boshqasiga o'tish tezligini aniqlaydigan kerakli va etarli shartlar; bu omillar orasidagi bog'lanish diffuziya kinetikasining tenglamasi yordamida aniqlanadi.

Massa uzatish jarayonlaridagi muvozanat holatini bilish mana shu jarayonlarning kechishi mumkin bo'lgan chegaralarni aniqlash imkoniyatini beradi. Tizimdagi fazalar muvozanati fazalar qoidasi bilan aniqlanadi:

$$F+S=K+2, \quad (2.17)$$

bu erda F -fazalar soni, S -erkinlik darajasi soni, ya'ni tizimdagi fazalar sonini va tarkibini buzmasdan ixtiyoriy o'zgartirish mumkin bo'lgan ixtiyoriy o'zgaruvchanlar soni, K -tizimdagi komponentalar soni.

Demak, fazalar qoidasi massa uzatish jarayonida muvozanatni hisoblashda ixtiyoriy o'zgartirish mumkin bo'lgan parametrlar sonini belgilaydi. Odatda massa uzatish jarayonlarida ikki fazali tizimlar qatnashadi va ular uchun $F=2$. Unda ikki komponentli tizimda ($K=2$) erkinlik darajasi soni $S=2$ bo'ladi. Demak, bunday tizimlarda muvozanat quyidagi parametrlar kombinasiyasi bilan aniqlanadi: $S_x, P;$ yoki $S_x, T;$ yoki C_u, C_x . Bu erda P - tizimdagi bosim, T - tizimning temperaturasi, $C_u - F_u$ fazadagi komponentning miqdori, $C_x - F_x$ fazadagi shu komponentning muvozanat miqdori.

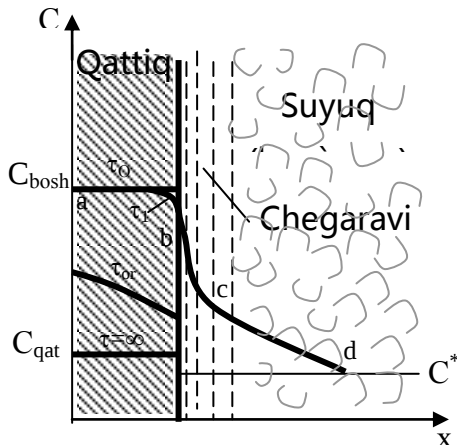
Massa uzatish tezligi massa almashuv kuzatilayotgan fazalardagi taqsimlanayotgan moddalarning ko'chish mexanizmlariga bog'liq bo'ladi.

Faza ichida modda molekulyar diffuziya yoki konveksiya va molekulyar diffuziya birgalikda bo'lgan usullar yordamida uzatilishi mumkin. Modda bitta molekulyar diffuziya yordamida faqat qo'zg'almas muhitdagina siljishi mumkin. Harakatlanayotgan muhitda moddaning ko'chishi ham molekulyar diffuziya bilan, ham muhitning o'zi bilan uning harakati tomonga yoki uning alohida zarrachalari bilan har xil yo'nalishlarda amalga oshiriladi. Turbulent oqimda molekulyar diffuziya orqali ko'chish asosan fazalar chegarasi yaqinida ko'proq bo'ladi. Suyuqlikning turbulent oqimida tezlikning pul'sasiyalanishi yuz beradi. Buning natijasida zarrachalar hamma tomonga harakat qilishi mumkin. Turbulent pul'sasiya natijasida, moddalarning konvektiv ko'chishi *turbulent diffuziya* deb ataladi.

Qattiq va harakatlanuvchi suyuq fazalar orasidagi massa uzatish ikkita jarayondan iborat bo'ladi:

Taqsimlanayotgan modda qattiq jism ichida fazalar chegarasi sirtiga ichki massa uzatish yoki massa o'tkazuvchanlik natijasida siljiydi.

Shu moddaning suyuqlikka (gaz yoki bug'ga) uzatilishi tashqi massa uzatish yo'li bilan boradi.



2.2-rasm. Qattiq fazali tizimda massa uzatish jarayoni uchun fazalarda taqsimlanayotgan

Shunday qilib, massa uzatish ichki va tashqi diffuziyalar yig'indisidan iborat bo'ladi.

Qattiq fazada diffuziya tezligi juda kichik bo'lganligi sababli undagi massa uzatish beqaror jarayondir. Vaqtning boshlanish lahzasida, ya'ni τ_0 da qattiq jism ichidagi taqsimlanadigan moddaning konsentrasiyasi o'zgarmas ($C_{bosh} = \text{const}$) bo'ladi. Moddaning sirt qatlamdan uni yuvib turgan fazaga

o'tishi davomida qattiq jismda konsentrasiya gradienti $\frac{dC}{dx}$ hosil bo'ladi va u vaqt bo'yicha o'zgaradi (2.2- rasm). Undan keyin modda qattiq jismni yuvib turgan suyuqlik (gaz, bug') oqimiga o'tadi. Yuvayotgan fazada massa uzatish jarayoni undagi turbulent oqimning strukturasi bog'liq bo'ladi. Turbulent harakatda qattiq devor yaqinida laminar chegaraviy qatlam hosil bo'ladi. Chegaraviy qatlamda qattiq jismning sirti yaqinida massa uzatish molekulyar diffuziya hisobiga ro'y beradi va bu erda to'g'ri chiziqqa yaqin keskin kamayadigan modda konsentrasiyasining o'zgarishi kuzatiladi. Bo'linish chegarasidan uzoqlashgan sari turbulent diffuziyaning roli oshib boradi va oxirida yuvayotgan fazaning asosiy massasida modda asosan turbulent diffuziya natijasida ko'chadi. Fazaning bu qismida taqsimlanayotgan moddaning konsentrasiyasi nisbatan sekin tekis kamayib, o'zining chegaraviy muvozanatli konsentrasiyasi C^* ga intiladi.

Bir-biriga tegib turgan fazalarda taqsimlanayotgan modda konsentrasiyasining τ_1 vaqt mobaynida o'zgarishi abvg chizig'i bilan ifodalanadi (2.2-rasm). Cheksiz vaqt o'tgandan keyin, ya'ni $\tau = \infty$ da qattiq fazadagi modda konsentrasiyasi ham muvozanat konsentrasiyasi C^* gacha kamayadi.

Qattiq jismlarda massa o'tkazuvchanlik natijasida modda uzatish jarayoni molekulyar diffuziya uchun bo'lgan Fik qonunlariga bo'ysunadi.

Fikning 1-qonuni quyidagicha ifodalanadi:

$$\vec{J} = -K\nabla C, \quad (2.18)$$

bu erda C - konsentratsiya, J - modda oqimining zichligi, ∇C - diffuziyalanayotgan atomlarning konsentrasiya gradienti bo'lib, $\nabla C = \frac{\partial C}{\partial X} + \frac{\partial C}{\partial Y} + \frac{\partial C}{\partial Z}$ Laplas operatori bilan aniqlanadi, K - massao'tkazuvchanlik yoki qattiq jismdagi taqsimlanayotgan moddaning diffuziya koeffitsienti deyiladi va u qo'zg'almas muhitga moddaning diffuziya natijasida kira olish qobiliyatini ifodalaydi. Diffuziya koeffisientining qiymati diffuziyalanayotgan moddaning xossalariga, muhitning xossalariga, temperaturasiga, bosimga va oz miqdorda diffuziyalanayotgan moddaning konsentrasiyasiga bog'liq bo'ladi.

Fikning 2-qonuni quyidagicha ifodalanadi:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = K\left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2}\right) \quad (2.19)$$

Massa o'tkazuvchanlik masalasining echimi ta'sirlashayotgan fazalar chegarasidagi uzatish shartlarini, ya'ni chegaraviy shartlarni tavsiflaydigan tenglama hamda (2.19) tenglamani birgalikda echish bilan bog'langan.

2.4. Vaznsizlik sharoitida issiqlik va massa uzatish jarayoni

Uzoq vaqtga mo'ljallangan orbital stansiyalarning yaratilishi yangi ilmiy texnik yo'nalishning shakllanishiga sabab bo'ldi. Bu yo'nalishning maqsadi Er sharoitida olish mumkin bo'lmagan yoki nihoyatda qimmatga tushadigan yuqori sifatli elektron texnika materiallarini kosmik-fazo sharoitlaridan foydalanib olishdir.

Kosmik texnologiyaning erdagi texnologiyadan farq qiladigan asosiy omillar quyidagilar: 1) o'ta quvvatli radiasiyali maydon; 2) o'ta chuqur va cheksiz vakuum; 3) katta miqdordagi quyosh energiyasining borligi, 250 km balandlikda quyosh energiyasi oqimining zichligi taxminan $1,4 \text{ kVt/m}^2$ ni tashkil qiladi; 4) vaznsizlik, to'g'rirog'i Er sharoitiga nisbatan og'irlik kuchining kamligi, u $10^{-3}g$ dan $10^{-7}g$ gachani tashkil qiladi (ya'ni Erdagiga nisbatan $10^3 \div 10^6$ marta kichik).

Materiallar olishning kosmik texnologiyasini ishlab chiqish uchun vaznsizlik sharoitida gidrodinamika, issiqlik va massa almashuvlarning qanday borishini bilish kerak.

Vaznsizlikning «nazariy» holati $g = 0$ ning real holatdan qanchalik farqlanishining miqdoriy o'lchovi g/g_0 hisoblanadi, bu erda g_0 – og'irlik kuchining Er sirtidagi tezlanishi; g – orbital uchish sharoitidagi tezlanish. Orbital stansiyaning real sharoitdagi uchishida $g/g_0 \approx 10^{-3} \div 10^{-6}$ bo'lganligi uchun vaznsizlikning real holatini mikrogravitasiya yoki kuchsiz gravitasiya deb ham aytiladi.

Vaznsizlik sharotida suyuqlikka botirilgan jismga ta'sir qilayotgan kuchlarning teng ta'sir etuvchisining qiymati g/g_0 marta kamayadi. Bu esa vaznsizlik sharoitida texnologik jarayonlarga quyidagi imkoniyatlarni yaratadi:

1. Suyuqlik hajmi ichida jismlarning, shular qatorida suyuq massaning erkin osilib turishi va siljishi;

2. Tashkil etuvchilarining zichligi asosiydan katta yoki kichik bo'lgan har xil turdagi ko'p fazali strukturalar yaratish (suyuqlikdagi pufakcha, suyuqlikdagi og'ir zarrachalar, suspenziyalar);

3. Yer sharoitida zichliklari har xil bo'lgan, aralashmaydigan komponentlardan yangi qotishmalar hosil qilish;

4. Suyuqlikdagi alohida zarrachalarni juda kam energiya sarf qilib aralashtirish mumkinligi geterogen strukturalar yaratishda va chet aralashmani chiqarib tashlashda qo'llaniladigan ko'p fazali tizimlarning dinamikasini boshqarish uchun har xil vibrasiyali ta'sirlardan foydalanish imkoniyatini beradi.

2.5. Kimyoviy jarayonlar

Kimyoviy jarayonlar elektron texnika materiallari texnologiyasida modda tarkibining kimyoviy o'zgarishi bilan kechadigan eng asosiy jarayonlardan bittasi hisoblanadi.

Ko'p hollarda kimyoviy texnologik jarayondagi qonuniyatlar bir-biri bilan o'ta murakkab bog'langan va ular tenglamalar sistemasi ko'rinishida ifodalanadi. Amalda bu tenglamalarni birgalikda echish mumkin emasligi sababli kimyo – texnologik jarayonlarni tahlil qilishda uning eng kerakli tomonlari ajratib olinadi va ularning o'zaro ta'siri ko'rib chiqiladi. To'liq nazariy tahlil asosida texnologik rejimlar tanlash va kimyoviy texnologik jarayonlar o'tkaziladigan reaktorlar ishlab chiqish termodinamik va kinetik tahlil o'tkazishni talab qiladi.

Termodinamik tahlilning asosiy bosqichlari quyidagicha: kerakli mahsulotni hosil qilish uchun texnologik jarayonni ishlab chiqish, bunda birinchi navbatda tanlab olingan xomashyoni qayta ishlashda kechadigan hamma kimyoviy reaksiyalarni aniqlash zarur; undan keyin esa, reaksiyaning issiqlik effektlari hisoblanadi; reaksiyalarning o'z holicha kechish imkoniyati tahlil qilinadi, ya'ni kimyoviy muvozanat ko'rib chiqiladi. Izobar-izotermik holatdagi tizimlarda muvozanat izobar-izotermik potensial kattaligining (Gibbsning erkin energiyasining) shu sharoit uchun minimal qiymatida, ya'ni $G=\min$ yoki $\Delta G=0$

bo'lganida o'rnatiladi. Agar $\Delta G > 0$ bo'lsa, reaksiya o'z-o'zidan o'ngdan chap tomonga, $\Delta G < 0$ bo'lsa chapdan o'ng tomonga kechish ehtimoli ko'proq bo'ladi.

Asosiy reaksiyaning muvozanati to'g'risidagi ma'lumotlarga asoslanib kerakli maxsulotning maksimal chiqishi to'g'risidagi tasavvurga ega bo'lishi mumkin. Termodinamik tahlil asosida mahsulot chiqishini ko'paytirish yo'lini aniqlash mumkin, reaksiya kechadigan optimal sharoit: temperatura, bosimni tanlash va boshlang'ich aralashmaning tarkibini aniqlash mumkin.

Termodinamik tahlildan keyin texnologik sharoitning optimal holatini belgilash uchun reaksiyaning vaqt bo'yicha kechish xarakteristikasini ham bilish kerak, ya'ni kinetik tahlil o'tkazilishi shart.

Kimyoviy reaksiyalarning kechish tezligiga har xil omillar ta'sir qiladi. Umumiy holda kimyoviy reaksiya tezligi quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$U = \frac{dC}{d\tau} = \kappa C^n, \quad (2.20)$$

bu erda $\kappa = \kappa_0 \exp\left(-\frac{E}{\kappa T}\right)$ - reaksiya tezligi konstantasi deyiladi; κ_0 - eksponenta oldi koeffisienti yoki ko'paytma; E - aktivlash energiyasi; n - reaksiya tartibi; C - konsentrasiya. Umumiy holda,

$$U = \kappa_0 e^{-\frac{E}{\kappa T}} C^n \quad (2.21)$$

(2.21) tenglamadan tezlik temperaturaga va komponentlar konsentrasiyasiga bog'liq ekanligi kelib chiqadi. Umumiy holda reaksiya tezligiga bosim (agar reaksiyada gaz fazasi ham bor bo'lsa) va katalizatorlar ham ta'sir qiladi.

2.6. Qattiq fazali reagent va mahsulotlarning aktiv holati

Qattiq jismlarning reaksiyaga kirisha olish qobiliyati faqat kimyoviy yoki fazaviy tarkib bilangina aniqlanib qolmasligi uning o'ziga xos

xususiyatlaridan biri hisoblanadi. Qattiq fazali reagentlarning aktivligi xususan kristall panjaradagi nuqsonlarning qanday hosil bo'lganligi (reagentlarni tayyorlash va qayta ishlash usullari, masalan: ionlashtiruvchi reaksiya, lazer yoki akustik nurlanish, uruvchi to'lqin va x.k.) bilan aniqlanadigan holatlarga bog'liq bo'ladi.

Qattiq jismning *normal holati* deganda ulardagi nuqsonlarning holat parametrlarining bir qiymatli funksiyasi hisoblangan panjaraning xususiy tartibsizligi natijasida hosil bo'lgan holatiga aytiladi. Bunga mos holda qattiq jismlarning *aktiv holati* ulardagi nomuvozanatli nuqsonlar borligi bilan xarakterlanadi.

Qattiq fazaning aktivlik o'lchovi sifatida normal xolatdagi o'xshash tarkibli fazaga nisbatan undagi erkin energiyaning ortiqqligi tushuniladi:

$$\Delta G^{opm} = G_K^* - G_K, \quad (2.22)$$

bu erda G^* va G - normal va aktiv xolatdagi fazaning erkin energiyasi.

Qattiq fazalarning aktivligini oshirish uchun ko'pincha mikroqo'shilmalar qo'shiladi, ya'ni legirlanadi. Legirlashning qattiq fazaning aktivligiga ta'siri mikroqo'shilmaning tabiati, konsentrasiyasi va uning matrisadagi taqsimlanish xarakteriga bog'liq bo'ladi.

2.7. Texnologik yonish

Yonish reaksiyalari ikkita xususiyatga ega:

1. Sekin hajmiy ta'sirlashuvdan juda tez ta'sirlashuvga o'tishning kritik sharoitlari mavjud bo'ladi. Bunday holda texnologik yonish rejimlaridan biri bo'lgan *issiqlik portlashi* amalga oshadi.

2. Kimyoviy reaksiya modda bo'ylab o'zgarmas tezlik bilan mustaqil tarqalishi mumkin; bunda texnologik yonishning yana bir rejimi - *o'z-o'zidan kechadigan yuqori haroratli sintez* amalga oshadi.

Elektron texnika materiallarini sintez qilishda (masalan, keramikali) yonish reaksiyasidan foydalanish kukunlar aralashmasi asosida amalga oshiriladi. Boshlang'ich kondensirlangan kukunlar aralashmasida yonishni amalga oshirish uchun quyidagi shartlar bo'lishi kerak:

1. Yonishning aktivlash energiyasi E shu jarayonning harorati T^* ga to'g'ri keladigan molekulalarning issiqlik harakati energiyasidan katta bo'lishi, ya'ni β ning nisbati quyidagi tengsizlikni qanoatlantirishi kerak:

$$\beta = \frac{RT^*}{E} \ll 0,025 \quad (2.23)$$

2. Yonish reaksiyasi ekzotermik bo'lishi shart. Uning issiqlik effekti Q ning qiymati ma'lum bir masshtabli issiqlik miqdoridan ancha katta bo'lishi kerak.

$$\gamma = \frac{c_P \left(\frac{RT^*}{E} \right)}{Q} \ll 1 \quad (2.24)$$

bu erda s_R – issiqlik sig'imi ($r = \text{const}$).

Boshlang'ich komponentlarning yonish reaksiyasiga elektron texnika materiallari sintezining ikkita texnologik usuli asoslangan: 1) o'zi tarqaladigan yuqori temperaturali sintez (O'YuS); 2) energiyaning qo'shimcha nokimyoviy (elektr) manbali issiqli portlashi (EIP).

Asosiy texnologik vazifa tarkibida oraliq mahsulotlar bo'lmagan muvozanatli kristall struktura hosil bo'lish boshlanadigan boshlang'ich namunaning minimal xarakterli o'lchamini aniqlashdan iboratdir. Bu struktura hosil bo'ladigan kimyoviy reaksiya vaqti τ_k bilan issiqlik relaksasiyasi vaqti τ_u ni solishtirishdan kelib chiqadi:

$$\tau_k = \left[\frac{Q}{c_p} \cdot \frac{E}{RT^2} K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \right]^{-1}; \quad \tau_u = \frac{L^2}{a_T}, \quad (2.25)$$

bu erda K_0 – Arrenius qonunidagi eksponentaoldi ko'paytmasi; L – namunaning xarakterli o'lchami; a_T – temperatura o'tkazish koeffisienti. Agar $\tau_k > \tau_u$ bo'lsa, unda struktura hosil bo'lish jarayoni oxirigacha amalga oshmaydi va nomuvozanatli kristall panjara hosil bo'lishiga olib keladi. Agar $\tau_k \leq \tau_u$ bo'lsa, unda muvozanatli kristall panjara hosil bo'ladi.

τ_k va τ_u ning qiymatlari boshlang'ich aralashmalarning tarkibiga bog'liq bo'ladi.

Struktura hosil bo'lish jarayonini tashqi fizikaviy maydonlar ta'sirida faollashtirish mumkin. Masalan, yonishda struktura hosil bo'lish jarayonini tezlashtirish uchun namunadan elektr toki o'tishini ta'minlovchi elektr maydonidan EIP usulida foydalaniladi. O`YuS va EIP usullarida esa tashqi bosimdan foydalaniladi.

2.8. Xomashyo materiallarini qayta ishlash jarayonlari

2.8.1. Qattiq jismlarni maydalash va ajratish jarayonlari

Texnologik jarayonning tezligi reagentlarning kontakt sirtlarining yuzasiga va ularning ortiqcha erkin energiyasiga to'g'ri proporsional bo'ladi. Shu sababli yarimo'tkazgichli va dielektrik materiallarni qattiq xomashyo moddalardan hosil qilishdagi ko'pgina texnologik jarayonlar intensivligini oshirish uchun boshlang'ich material bo'lakchalarining o'lchamlari kichraytiriladi. Bu jarayon *bo'laklash* deyiladi. Ko'pincha yirik bo'laklarni maydalash *bo'laklash*, kichik bo'laklarni maydalash esa *talqonlash* deyiladi. Maydalash quruq yoki nam holda o'tkazilishi mumkin. Eng yirik bo'laklarning ko'ndalang o'lchamlarining maydalashgacha va maydalashdan keyingi nisbatlari *maydalash darajasi* deyiladi:

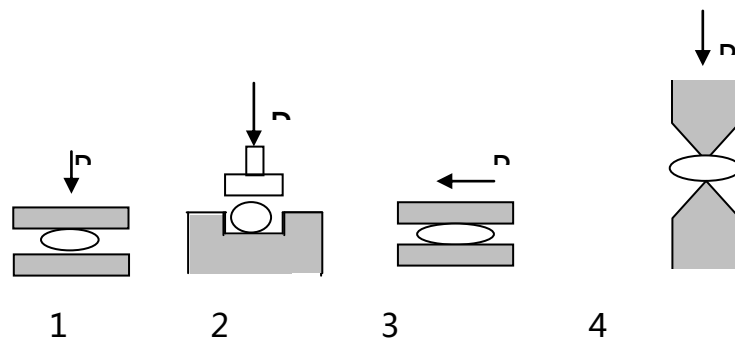
$$n = d_1/d_2, \quad (2.26)$$

bu erda d_1 – bo'lakning maydalashgacha bo'lgan o'lchami, d_2 – bo'lakning maydalashdan keyingi o'lchami.

Bir marta ishlov berishdagi maydalash darajasining qiymatlari: yirik bo'laklar ($d_1 > 250$ mm) uchun - $n = 2 \div 6$; o'rta bo'laklar ($50 < d_1 < 250$ mm) uchun - $n = 5 \div 10$; mayda bo'laklar ($20 < d_1 < 50$ mm) uchun - $n = 10 \div 50$; eng mayda bo'laklar ($d_1 < 3$ mm) uchun - $n > 60$ ni tashkil qiladi. Kerakli maydalash darajasi bir necha marta bo'laklashdan keyin hosil qilinadi.

Maydalashning bir qancha usullari mavjud:

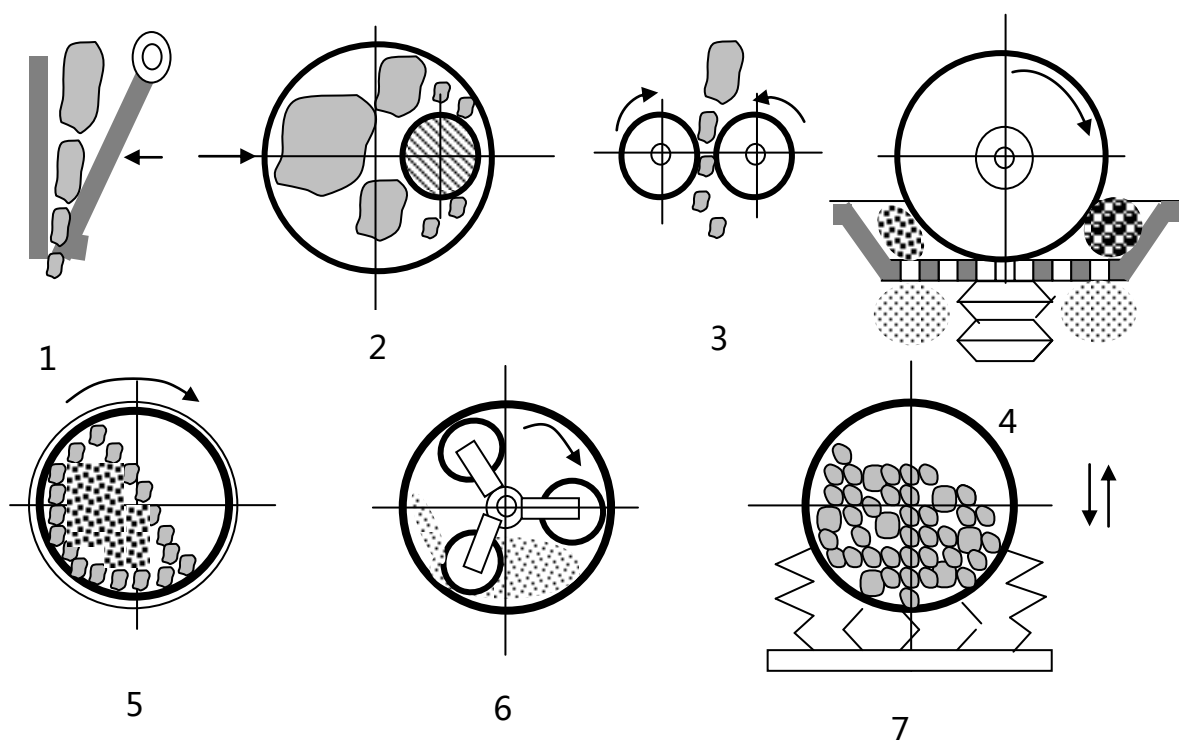
1. Bosib maydalash (2.3-rasm, 1).
2. Urrib maydalash (2.3-rasm, 2).
3. Ishqalab maydalash (2.3-rasm, 3).
4. Yorib maydalash (2.3-rasm, 4).



2.3 -rasm. Materiallarni maydalash usullari

Maydalash usullari materialning fizik xossalari asosida tanlab olinadi. Qattiqligi yuqori bo'lgan materiallarni maydalashda 1 va 2 - usul, qovushqoq materiallarni maydalashda 3-usul, mo'rt materiallarni maydalashda esa 4 - usuldan foydalanilsa, maydalashning samaradorligi yuqori bo'ladi.

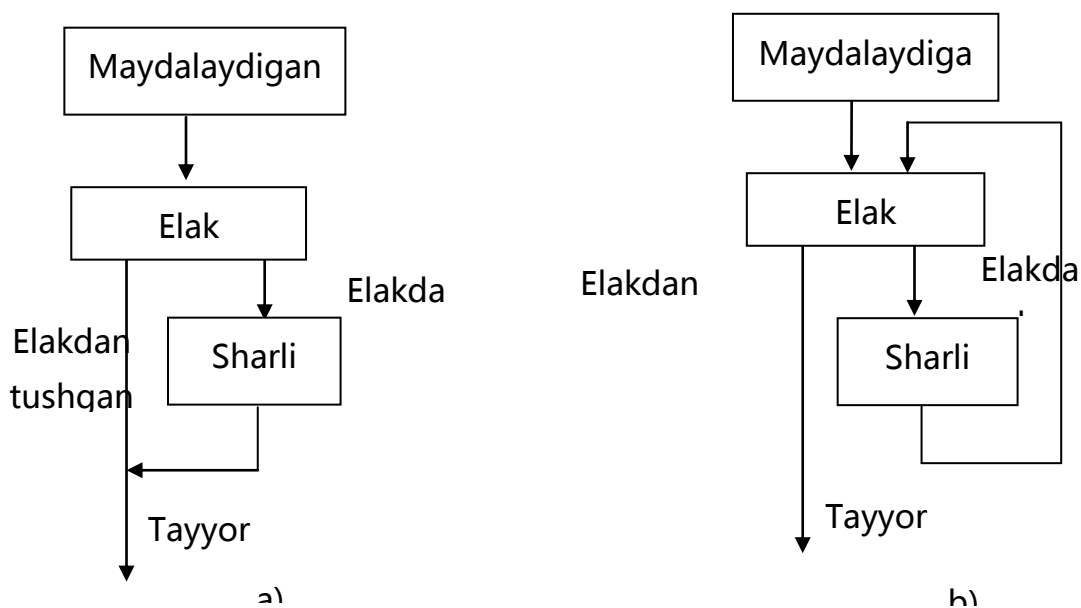
Texnologik jarayon talablariga mos ravishda boshlang'ich xomashyoni maydalash yirik, o'rtacha va nozik maydalash mashinalarida amalga oshiriladi. Eng ko'p tarqalgan maydalash mashinalariga sharli, markazdan qochma va halqali tegirmonlar kiradi (2.4-rasm).



2.4 - rasm. Materiallarni maydalash uchun ishlatiladigan mashinalar

Maydalangan materiallarning donalarini bir xil kattalikda boʻlgan fraksiyalarga ajratish uchun elakli apparatlardan foydalaniladi.

Odatda nozik maydalash maydalash sxemasida ajratish operatsiyasi bilan birlashtirilib, ochiq yoki berk sikl boʻyicha amalga oshiriladi (2.5-rasm).



2.5-rasm. Materiallarni maydalash sikllarining sxemasi:

a – ochiq sikl, b – yopiq sikl

Ochiq sikl bo'yicha ishlanganda elakdan o'tmagan yuqorigi mahsulot sharli tegirmonga tushadi va undan chiqib elangan pastki mahsulot bilan birgalikda texnologik jarayonning keyingi bosqichiga o'tadi. Yopiq siklda esa keyingi bosqichga faqat berilgan granulali tarkibli material elak orqali o'tadi, elakdan o'tmagan kattaroq donalar esa qaytadan maydalovchi agregatga o'tib maydalanib yana elakka tushadi.

Maydalangan materiallarni har xil texnologik reaktorlarga aniq miqdorda bir xil berib turish uchun oziqlantirgich yoki dozator deb ataladigan mahsus mexanizmlardan foydalaniladi.

2.8.2. Ajratish va tozalash jarayonlarining asoslari

Modda tozaligining umumiy xarakteristikasi. Materiallarning kimyoviy tozaligi degan tushuncha va uni belgilash usullari har xil bo'lib, materialning qaysi sohada qo'llanilishiga bog'liq bo'ladi. Agar modda tarkibidagi chet kirishmalarning miqdori asosiy moddaning kerakli hossalarga ta'sir qilmaydigan darajada kichik bo'lsa, *shu modda etarlicha toza hisoblanadi.*

Kimyoviy va metallurgiya amaliyotida toza moddalar uchun tozalanish darajasiga bogʻliq holda quyidagi tasniflar belgilangan:

1. «Toza» – Ch rusumli deyiladi va bunda kirishmalarning miqdori $2 \cdot 10^{-5}$ dan 1% gacha boʻladi.

2. «Tahlil uchun toza» - ChDA rusumli deyiladi va bunda kirishmalarning miqdori $1 \cdot 10^{-5}$ dan 0,4% gacha boʻladi.

3. «Kimyoviy toza» - XCh rusumli deyiladi. Kirishmalarning miqdori $5 \cdot 10^{-6}$ dan 0,5% gacha boʻladi.

"Oʻta toza» - OSCh rusumli deyiladi va bunda kirishmalarning miqdori 0,05% dan kichik boʻlishi kerak.

Metallmaslar va kimyoviy birikmalarda limitlangan kirishmalar XCh rusumli moddaga qaraganda 10 marta, ChDA rusumli moddaga qaraganda 100 marta va Ch rusumli moddaga qaraganda 1000 marta kichik boʻlgandagina ularni yuqori tozalikdagi modda deb hisoblash mumkin.

Metall va yarim oʻtkazgichli materiallarda nazorat qilanadigan har bir kirishmaning miqdori $1 \cdot 10^{-4}$ % dan oshmasa (massa boʻyicha), hamda gazlarda harbir nazorat qilinadigan kirishmalarning miqdori $1 \cdot 10^{-3}$ % oshmasa (hajm boʻyicha) ular yuqori tozalikdagi moddalar deb hisoblanadi.

Yuqori tozalikdagi moddalarga nazorat qilanadigan kirishmalarning soni va konsentrasiyalar yigʻindisiga bogʻliq holda VECh va OSCh rusumlari beriladi.

VECh rusumli moddalarda ham kirishmalarning umumiy miqdori, ham pastroq sathda baʼzi bir keraksiz kirishmalarning soni va miqdori chegaralanadi. VECh belgidan avval kirishmalarning umumiy miqdorini koʻrsatuvchi son yoziladi, undan keyin esa tire orqali ikkita son: birinchisi keraksiz kirishmalarning chegaralangan sonini, ikkinchisi esa bu kirishmalar miqdori yigʻindisining manfiy daraja koʻrsatkichini koʻrsatadigan son yoziladi. Masalan: 003 VECh 4-5 rusumi umumiy

kirishmalar miqdori 0,003% ligini, ya'ni asosiy modda miqdori 99,997% ekanligini, keraksiz kirishmalar soni 4 ta bilan chegaralanganligini va ularning yig'indisi $n \cdot 10^{-5} \%$ bo'lishini ko'rsatadi.

OSCh rusumli moddalarda juda ham past sathda katta sondagi keraksiz kirishmalar miqdori chegaralanadi. OSCh belgisidan keyin tire orqali ikkita son keladi: birinchi son berilgan o'ta toza moddada chegaralangan kirishmalar sonini, ikkinchisi esa shu kirishmalar miqdori yig'indisining manfiy daraja ko'rsatkichini ko'rsatadi. Masalan: OSCh 10-5 rusumli o'ta toza SiO_2 da chegaralangan kirishmalar soni 10ta bo'lib (Al, B, Fe, Ca, Mg, Na, P, Ti, Sn, Pb), ularning umumiy miqdori esa massa bo'yicha $1 \cdot 10^{-5} \%$ dan oshmaydi.

Chet el adabiyotida moddalarning tozaligi asosiy moddaning 1000 atomiga to'g'ri keladigan kirishma atomlarining (molekulalarining) soni n bilan tasniflanadi va $n \text{ ‰}$ (n promille) bilan belgilanadi. Agar asosiy moddaning 10^6 atomiga (molekulasiga) to'g'ri kelsa - $n \text{ ppm}$ (n parts per million), agar asosiy moddaning 10^9 atomiga (molekulasiga) to'g'ri kelsa - $n \text{ ppb}$ (n parts per billion) belgi bilan belgilanadi. Masalan: 1ppm yozuvi 10^6 asosiy modda atomiga 1 kirishma atomi, 1 ppb yozuvi esa 10^9 asosiy moddaning atomiga 1 kirishma atomi to'g'ri kelishini ko'rsatadi.

Bundan tashqari yuqori darajali toza moddalarni belgilash uchun N simvoldan foydalaniladi va moddalar sifat bo'yicha sonli indeks orqali farqlanadi. Bunda N ning oldida turgan son asosiy komponentning prosentda ifodalangan konsentratsiyasidagi 9larning umumiy miqdorini ko'rsatadi. N dan keyingi son esa shu sonning oxirgi soni hisoblanadi. Masalan: $5N8 = 99,9998 \%$, $2N5 = 99,5 \%$, $3N3 = 99,93 \%$. Agar o'ta toza modda olish uchun zonali eritish usuli qo'llanilgan bo'lsa, unda Z xarfi qo'shiladi. Masalan: $6N(Z) = 99,9999 \%$.

Yanada aniqroq bo'lishi uchun ko'pincha harbir nazorot qilinayotgan kirishmaning miqdori ko'rsatiladi. Bunda tarkibida

massa bo'yicha $1 \cdot 10^{-2}$, $2 \cdot 10^{-5}$ % kirishmalar bo'lgan materillar deb gapiriladi yoki materialning bir kub metrida (yoki santimetrida) bo'lgan kirishma atomlarining soni deyiladi va 10^{17} , 10^{24} at/m³ kabi ko'rsatiladi.

Ajratish va tozalash jarayonlarining umumiy xarakteristikasi.

Dielektrik va yarim o'tkazgichli materiallar hamda ularning komponentlarini chuqur tozalashning hamma usullari ajratiladigan komponentlarning kimyoviy, fizikaviy va fizik kimyoviy hossalarning harxilligiga asoslangan.

Yarimo'tkazgichli va dielektrik fazadagi materiallarni ajratish va tozalash asosiy jarayonlarining tasnifi quyidagicha:

1. Sorbsiyaga asoslangan jarayonlar. Bunga adsorbsiyali jarayonlar, ion almashish va xromatografiya jarayonlari kiradi.
2. Suyuqlik ekstraksiyasiga asoslangan jarayonlar.
3. Kristallanish jarayonlari.
4. Gaz fazasi orqali haydashga bog'liq jarayonlar. Bunga sublimasiya, distillyasiya, rektifikasiya jarayonlari va kimyoviy transport jarayoni kiradi.
5. Elektrolizga asoslangan jarayon.
6. Diffuziya koeffisientlarining har xilligiga asoslangan jarayonlar.
7. Tanlab o'tqazish, oksidlash va qaytarilish jarayonlari.

Harbir individual materialni tozalash uchun eng samarali usulni yoki usullarni tanlashda shu materialning va uning birikmalarining aniq fizik- kimyoviy xossalari e'tiborga olinadi.

2.8.3. Sorbsiyali jarayonlar yordamida moddalarni ajratish va tozalash

Moddalarning ikki faza chegarasida: qattiq va suyuq, qattiq va gazsimon, suyuq va gazsimon chegaralarda sirtga (*adsorbsiya*) va hajmga (*absorbsiya*) yutilishi *sorbsiyali jarayon* deyiladi.

Sorbsiyali jarayonlar yarim o'tkazgichlar va dielektrlarning zamonaviy texnologiyasida eng asosiy rol o'ynaydi, chunki ular fizik-kimyoviy hossalari bir-biriga juda yaqin bo'lgan moddalarni bir-biridan ajratish imkoniyatini beradi.

Yarim o'tkazgichlar va dielektrlar texnologiyasida suyuq fazada erigan moddalarni qattiq sorbentlarga yuttirishga asoslangan ajratish va tozalash jarayonlarining turlari ko'proq qo'llanilmoqda. Bular asosan *adsorbsiya*, *ion almashish* va *xromatografiya* jarayonlaridir.

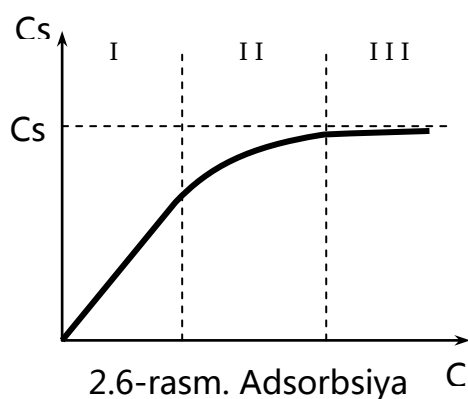
Adsorbsiyali tozalashning mohiyati. Adsorbsiya tizimi *adsorbentdan* (yuzasiga yutib oluvchi modda) va *adsorbatdan* (molekulalar yutilayotgan modda) tashkil topadi. Adsorbsiya *fizikaviy* va *kimyoviy* turga bo'linadi. *Fizikaviy adsorbsiyada* adsorbat molekulalari adsorbent bilan fizikaviy (Van Der Val's kuchlari) bog'lanadi. *Kimyoviy adsorbsiyada* (*xemosorbsiya*) adsorbat molekulalari adsorbent bilan kimyoviy birikib yuzada kimyoviy birikma xosil qiladi.

Adsorbsiyaga teskari jarayon, ya'ni yuzadan molekulalarning chiqib ketishi

desorbsiya deyiladi. Fizikaviy adsorbsiyada, kimyoviydan farqli o'laroq, teskari jarayon kuzatilishi mumkin. Desorbsiya jarayonidan ham tozalash usuli sifatida foydalanish mumkin. Adsorbsiya tanlovchi jarayon bo'lib, adsorbentning yuzasiga faqat sirtqi qatlamning erkin energiyasini kamaytiruvchi moddalargina yutiladi.

Shunday qilib, eritmadagi moddalar-ning adsorbsiyalik qobiliyatlarning harxilligidan foydalanib tozalash va ajratish jarayonlarini o'tkazish mumkin. Bunda moddalardan bittasi adsorbatga yutiladi, ikkinchisi esa eritmada qoladi.

Adsorbsiya tizimining miqdoriy xarakteristikasi sifatida *adsorbsiya izotermasidan* foydalaniladi (2.6 - rasm). U eritmadagi modda konsentrasiyasi S



2.6-rasm. Adsorbsiya

ning o'zgarmas temperaturada muvozanat holatda adsorbentning birlik yuzasiga yutilgan miqdori C_s bilan bog'lanishni ifodalaydi. 2.6-rasmda keltirilgan bog'lanishdan eritmadagi modda konsentrasiyasining oshishi uning adsorbsiyalangan holatdagi modda miqdorining oshishiga olib kelishi ko'rinib turibdi. Boshlang'ich I uchastkada eritmadagi modda konsentrasiyasi oshishi bilan uning yutilayotgan miqdori ham oshib boradi va bu bog'lanish to'g'ri proporsional bo'ladi. Tashqi fazadagi modda konsentrasiyasining undan keyingi oshishi bilan bu bog'lanish ancha susayadi (II uchastka). Katta konsentrasiyalarda izoterma S_s asimptotaga intiladi (III uchastka). Izotermaning bunday xarakteri adsorbent yuzasining yutiladigan modda bilan sekin asta to'yinib borishi bilan tushintiriladi.

Adsorbsiya jarayonining ikkinchi miqdoriy xarakteristikasi tempera-turaviy bog'lanishni va adsorbsiya muvozanatining mexanizmini xarakter-laydigan *adsorbsiya issiqligi* hisoblanadi. Uning kattaligi fizik adsorbsiyada kondensasiya issiqligiga yaqin bo'lib, oddiy molekulalar uchun 4÷20 MJ/kmol, murakkab molekulalar uchun 40÷80 MJ/kmol atrofida bo'ladi. Kimyoviy adsorbsiyada xemosorbsiya issiqligi kimyoviy reaksiya issiqligiga yaqin bo'lib 40÷400 MJ/kmol atrofida bo'ladi.

Eng ko'p tarqalgan sorbentlarga silikagel'lar, aktivlangan ko'mir va boshqa kuchli g'ovaklashtirilgan alyuminosilikatlar misol bo'ladi.

Silikagel kremniy kislotasining quritilgan geli bo'lib, globulyar strukturaga ega bo'ladi. Silikagel` rivojlangan g'ovak tizimiga ega bo'lib, ularning o'lchamlari va shakllari sferik zarrachalarning o'lchamlari va taxlanish zichligiga bog'liq bo'ladi. Sferik zarrachalarning sirtlari g'ovaklarning ichki sirtlarini tashkil qiladi. Bu g'ovaklarning solishtirma sirti silikagelning tayyorlanish texnologiyasiga bog'liq bo'lib $(3\div7)\cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$ atrofida bo'ladi. Silikagel` geteropolyar sorbent bo'lib,

polyar va kuchsiz polyar moddalarni yaxshi yutadi, hamda u effektiv quritgich sifatida ham ma'lum.

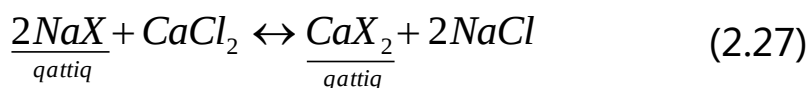
Ion almashlab tozalashning mohiyati. Ion almashish deganda suyuq eritma va u bilan kontaktda bo'lgan, erimaydigan qattiq modda orasida bir xil zaryadli ionlarning o'zaro qaytuvchan almashinuvi tushuniladi. Ionlar almashinishi-ni amalga oshirayotgan qattiq jism *ionit* yoki *ion almashtirgich* deyiladi. Faqat musbat ionlar almashiladigan ionit *kationit*, manfiy ionlar almashiladigani esa *anionit* deyiladi. *Amfoter* ionitlar bir vaqtning o'zida kation va anion almashishlarni amalga oshiradi.

Ion almashish stexiometrik o'rinni olish kabi bo'lib, eritmadan yutilayotgan ionning harbir ekvivalentining o'rniga ionit shu eritmaga zaryad ishorasi bir xil bo'lgan boshqa ionning bir ekvivalentini beradi. Mana shu bilan ion almashish adsorbsiya jarayonidan farq qiladi.

Ionitlardan foydalanib eritmadan ma'lum turdagi ionni butunlay chiqarib olish mumkin. Buning uchun tozalanadigan eritma ionit donachalari bilan to'ldirilgan ion almashgichli reaksiya kolonkasidan o'tkaziladi.

Kuyida ion almashish reaksiyalariga doir misollarni ko'rib chiqamiz.

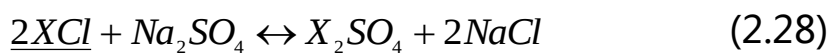
Masalan: kationli almashish reaksiyasida kal'siy ionini chiqarib olish quyidagicha bo'ladi:



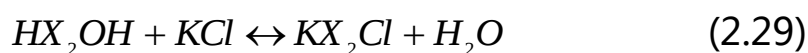
(bu reaksiyada va keyingilarida qattiq fazaning tagiga chizilgan; X – ionitning ma'lum guruhi).

Bu reaksiyadan shu narsa ko'rinib turibdiki, NaX qattiq ionit qatlami orqali eritmaning o'tkazilishi natijasida eritmadagi Ca^{2+} ionlari ionit tomonidan yutiladi, eritmaga esa Na^{1+} ionlari o'tadi ya'ni ion almashinishi kuzatiladi.

Anionli almashish reaksiyasiga umumiy misol tariqasida eritmadan $(\text{SO}_4)^{2-}$ ionini chiqarib olish reaksiyasini keltirish mumkin:



Bir vaqtning o'zida kation va anion almashinishda amfoterli ionitlardan foydalaniladigan reaksiyaga misol:



Ionit ishining samaradorligini va uning tanlab ajrata olish xarakteristikasini baholash uchun *ajratish koeffitsienti* kiritiladi. Bu koeffitsient ionitning A va B ionlarini miqdoriy jihatdan ajrata olish qobiliyatini ko'rsatadi.

Ajratish koeffitsienti K_B^A ionit va eritmadagi A va B ionlar ekvivalent qismlari nisbatlarining nisbati bilan ifodalanadi:

$$K_B^A = \frac{\overline{\gamma_A}}{\gamma_A} : \frac{\overline{\gamma_B}}{\gamma_B} = \frac{\overline{\gamma_A \gamma_B}}{\gamma_A \gamma_B} \quad (2.30)$$

Agar ionit A ionlarni ko'proq yutsa, unda $K_B^A > 1$, agar B ionlarni ko'proq yutsa, unda $K_B^A < 1$ bo'ladi. K_B^A ning qiymati birdan qancha kattaroq miqdorga farq qilsa, ionitning selektivligi shuncha yuqori bo'ladi.

Sorbentning eng zarur fizik – kimyoviy xarakteristikasi uning sig'imi bo'lib, u eritmadan chiqarib olinadigan komponentning sorbent tomonidan yutish qobiliyatini ko'rsatadigan miqdoriy o'lchov hisoblanadi. Sig'im berilgan hajmdagi eritmani tozalash uchun qancha miqdordagi sorbent kerakligini bildiradi.

Sorbentlarning sig'imi ko'pincha sorbentning massa birligiga nisbati (massali sig'im) yoki hajm birligiga nisbati (hajmiy sig'im) bilan aniqlanadi. Ko'pincha u quruq sorbentning kilogrammiga to'g'ri

keladigan milliekvivalentlarda (mekv/kg), yoki 1 m³ yoki 1 kg sorbentga to'g'ri keladigan adsorblangan moddaning kilogrammlarida ifodalanadi.

Ko'pgina tabiiy va sun'iy moddalar ionitlik hossalarni namoyon qiladi. Bulardan asosiylari sintetik smola va ko'mir asosidagi ionitlar, hamda ba'zi bir mineralli ionitlardir (harxil alyumosilikatlar, oksidlar va shu kabilar).

Ion almashish jarayoni qaytuvchan jarayon bo'lganligi uchun ionitdan ko'p marta foydalaniladi. Ionit ajratilishi kerak bo'lgan ionlar bilan to'yin-ganidan so'ng ion almashinish reaksiyasi to'xtatiladi. Shundan so'ng ionit adsorbsiyalangan B ionlarni chiqarib, uning o'rniga A ionlarni almashtiradigan eritma bilan yuviladi. Bu jarayon ionitni regenerasiyalash deyiladi.

Xromatografiya yordamida ajratishning mohiyati.

Xromatografiya grekcha so'zlardan tashkil topgan (xromas - rang, grafo – yozish) bo'lib, «rangni yozaman» degan ma'noni bildiradi.

Xromatografiya moddalarni chuqurroq ajratish va tozalashda keng qo'llaniladi. Hamma xromatografik usullar ajralishi kerak bo'lgan aralashma komponentlarining sorbentga har xil so'rilishiga asoslangan. Bu ajralishi kerak bo'lgan aralashma komponentlarining g'ovak sorbsiyali muhitda harxil tezlik bilan harakatlanishiga sabab bo'ladi. Aralashmadagi harbir komponentning harakat tezligi ularning so'rilish darajasiga teskari proporsional bo'ladi. Buning natijasida aralashmalar bir qator yo'l va zonalarga ajralib xromatogrammani hosil qiladi. Ajralgan komponentlar keyin mexanik usulda bir biridan ajratiladi.

Xromatografik usul deb ajratishning shunday usuliga aytiladiki, bunda ajratiladigan komponentlar ikki faza o'rtasida – kuchli g'ovak sirtga ega bo'lgan qattiq holdagi harakat siz yutuvchi qatlam va mana shu harakat siz qatlam orqali fil'trlanayotgan suyuq eritma oqimlari o'rtasida taqsimlanadi.

Ajralayotgan aralashmaning va yutuvchining agregat holatlariga qarab xromatografiya usullari to'rt turga bo'linadi (2.1- jadval).

Xromatografiyalik ajratish jarayonlari ularni amalga oshirishning shakllari bo'yicha bir-biridan ancha farq qiladi. Misol tariqasida suyuqlikli - adsorbsiya xromatografiyani ko'rib chiqamiz. Uning uchta usuli mavjud:

1. Ochiltiruvchi.
2. Siqib chiqaruvchi.
3. Frontal.

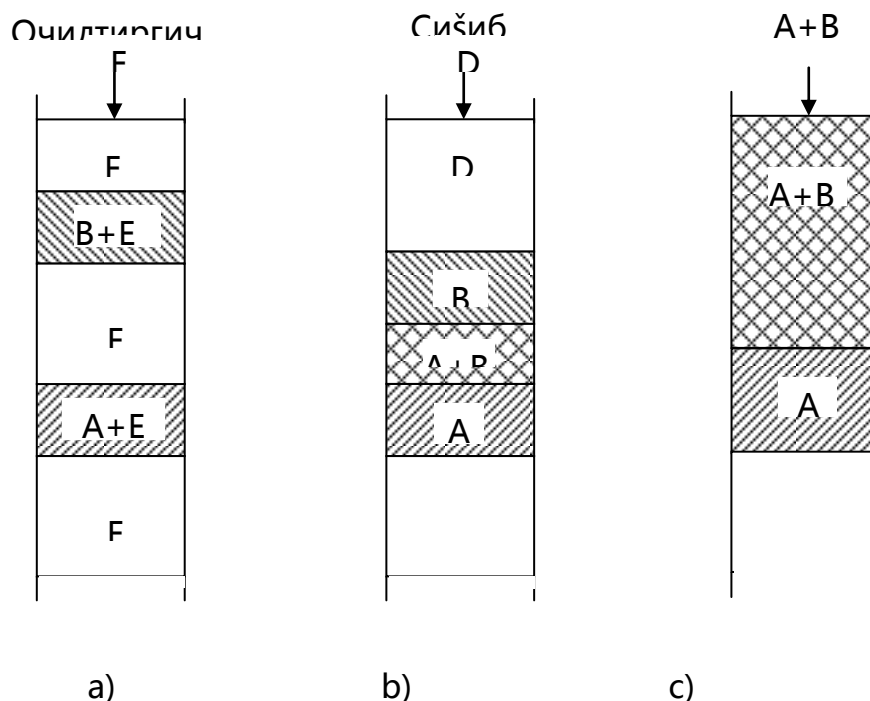
2.1 - jadval

Ajralgan aralashma va yutuvchining agregat xolati	Xromatografiya usullarining turlari			
	Suyuqlikli-adsorbsiya	Gazli-adsorbsiya	Suyuqlikli taqsimlovchi	Gazli-suyuqlikli
Qo'zg'almas qatlam	Qattiq jism	Qattiq jism	Suyuq yutuvchi qattiq jismda	
Qo'zg'aluvchi qatlam	Suyuqlik	Gazli aralashma	Suyuqlik	Gazli aralashma

Mana shu usullarni A va B komponentlardan tashkil topgan aralashmani ajratish misolida ko'ramiz. Bunda B modda A ga qaraganda adsorbsiyalanishi kuchliroq bo'lsin.

1. Ochiltirish usuli (elyuent yoki yuvish usuli). Bu usulda sorbentli kolonkaning yuqori qismiga ajratiladigan A+B aralashmasi kiritiladi va u shu zahoti adsorbsiyalanadi. Shundan so'ng kolonka orqali A va B komponentlarning ikkaloviga ham nisbatan adsorbentga kuchsizroq so'riladigan suyuqlik (ochiltirgich) E o'tkaziladi. Ochiltirgich adsorbsiyalangan A va B komponentlar bo'lgan qatlam orqali o'tib, sekin asta ikkita komponentni yuvib tusha boshlaydi.

Biroq A komponent kuchsiz adsorbsiyalanganligi uchun u ko'proq yuviladi. Ma'lum bir vaqtdan so'ng A va B komponentlar har xil adsorbsiya



2.7-rasm. Xromatografiyaning uchta usuli bilan ajralayotgan A + B aralashmadagi komponentlarning zonalariga ajraladi (2.7 - rasm, a). Kolonkaning pastki qismida toza ochiltirgich

yordamida bir biridan ajritilgan A va B komponentlar kolonkadan yuvuvchi suyuqlik bilan birgalikda alohida alohida chiqarib olinadi.

2. *Siqib chiqaruvchi usul (siqib chiqarish bilan ochiltirish).* Bu usulda yuvuvchi suyuqlik sifatida ikkala A va B komponentga qaraganda ham ko'proq adsorbsiyalanadigan D suyuqligi (siqib chiqargich) qo'llaniladi. Natijada, aralashmaning ikkala komponenti A va B siqib chiqaruvchi D tomonidan adsor-bentdan siqib chiqariladi. Bunda A komponent kuchsiz adsorbsiyalanganligi sababli tezroq siqib chiqariladi. Bu komponentlarning ajralishiga olib keladi (2.7 - rasm, b),

lekin bunda alohida bo'lgan A va B zonalardan tashqari ikkala komponent bo'lgan oraliq zona ham mavjud bo'ladi.

3. Frontal usul. Bu usulda kolonka orqali faqat ajraladigan aralashma o'tkaziladi. A komponent kuchsizroq adsorbsiyalanganligi uchun komponentlarning ajralishi ro'y beradi (2.7 - rasm, c). Bu usul bilan faqat kuchsiz adsorbsiyalanadigan A komponentning toza holdagi ma'lum bir miqdorini ajratib olish imkoniyatini beradi.

Yuqorida ko'rib chiqilgan xromatografiyaning usullarida adsorbent sifatida aktivlangan ko'mir, silikagel, alyuminiyning aktiv oksidi va hokazolar qo'llaniladi.

Xromatografik usul bilan murakkab aralashmalardan ionlari bir-biriga yaqin bo'lgan komponentlarni ajratib olishda (masalan: kam uchraydigan kamyob metallar ionlarini ajratishda) qo'llaniladi.

2.8.4. Suyuq ekstraksiya jarayonlari yordamida ajratish

Ekstraksiya jarayoni umuman tanlangan moddani suyuq fazaga chiqarib olib ajratish jarayonidir. Bunda chiqarib olib ajratish gazsimon, suyuq yoki qattiq fazali aralashmalardan amalga oshiriladi.

Ekstraksiyaning harxil turlari mavjud bo'lib, gazni suyuqlik bilan ekstraksiyalash *absorbsiya*, qattiq jismlarni suyuqlik bilan ekstraksiyalash esa – *ishqorlash* (*vishelachivanie*), erigan moddani bir suyuq fazadan ikkinchi suyuq fazaga ekstraksiyalash *suyuq ekstraksiya* yoki oddiy qilib *ekstraksiya* deyiladi.

Suyuq ekstraksiyada erigan moddani bir suyuq erituvchidan boshqa suyuq erituvchi yordamida chiqarib olish jarayoni yuz beradi. Bunda ikkita erituvchi bir biri bilan aralashmasligi shart.

Yarim o'tkazgichlar va dielektriklar texnologiyasida erigan moddaning ekstraksiyasi o'tkaziladigan suyuqlik sifatida suv ishlatiladi. *Ekstragent* deb ataladigan, uning yordamida ekstraksiya o'tkaziladigan

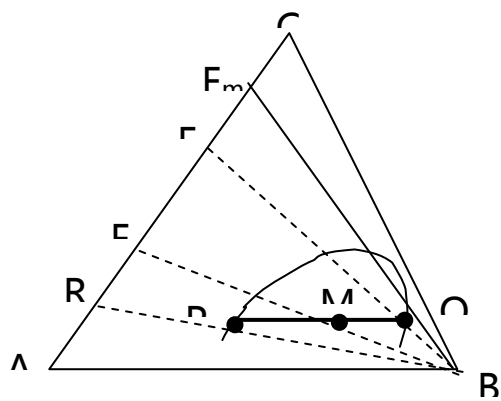
ikkinchi suyuqlik sifatida esa organik tabiatli suyuqlikdan foydalaniladi. Odatda ekstragent deganda toza erituvchi emas, balki reagent (ajratib olinadigan modda bilan kimyoviy birikadigan komponent) va suyultiruvchidan (qovushqoqlikni kamaytirish uchun) tashkil topgan suyuqlik tushuniladi.

Ko`pincha erigan modda ekstraksiyalanadigan suvli eritgich tarkibiga tuzlovchi deb ataladigan (tuz yoki kislota ko`rinishidagi) modda qo`shiladi. Bu modda ekstraksiyalanayotgan birikma bilan bir xil nomli ionga ega bo`lib, uning eruvchanligini kamaytiradi va uning suvli qorishmadan ajralish darajasining oshishiga olib keladi.

Suyuq ekstraksiya yarim o'tkazgichlar va dielektriklar texnologiyasida keng qo'llaniladi va uning yordamida quyidagi vazifalar hal qilinadi:

1. Ikkita modda aralashmasini harxil erituvchilarda konsentrsiyalangan holda alohida ajratish (masalan, suv va organik erituvchida);
2. Aralashmadagi asosiy komponentni organik erituvchiga ekstraksiya qilish va kirishmalarni suvli qorishmada qoldirish;
3. Organik erituvchiga kirishmalarni ekstraksiya qilish, asosiy komponentni esa suvli qorishmada qoldirish.

Ekstraksiyalı ajratish jarayonining mohiyatini 2.8 - rasmda kelitirilgan uch komponentli xolat diagrammasi yordamida ko'rib chiqamiz. Bir biri bilan butunlay aralashadigan, tarkibi F bo'lgan A va C suyuqliklarga B erituvchi (ekstragent) qo'shilgan. Bunda u aralashma bilan to'liq aralashmaydigan va bitta komponentni tanlab olib, masalan



2.8-rasm Bir bosqichli ekstraksiyada olinayotgan

bizning misolimizda C ni, eritadigan (ekstraksiyalaydigan) bo'lishi kerak. Bunda uchlangan tizimning tarkibiga mos keluvchi nukta FB chizig'i bo'ylab xarakat qiladi. Ko'rayotgan misolimizda hosil bo'layotgan uchlangan tizimdagi aralashma miqdori bilan ekstragent tarkibi orasidagi nisbat M nuqtaga mos kelsin. Uchlangan tizimning qatlamlanishi natijasida hosil bo'layotgan geterogen fazaning tarkibi M nuqta orqali o'tkazilgan PQ konodaning holati bilan aniqlanadi. Q nuqtaga mos keluvchi fazada erituvchining tarkibi yuqori va bu faza ekstrakt fazasi yoki erituvchining fazasi deyiladi. P nuqtaga mos keluvchi fazada erituvchining miqdori kam va bu faza rafinat fazasi yoki qoldiq faza deb ataladi.

Q va R fazalarni bir-biridan ajratib va undan erituvchini chiqarib yuborib (distillyasiya yoki yuvish bilan) erituvchisi bo'lmagan va mos holda tarkibi E va R bo'lgan ekstrakt va rafinat olinadi. Boshlang'ich F tarkibli aralashmaga qaraganda E aralashma C komponentga ko'proq, R aralashma esa kamroq ega bo'ladi. Bundan keyin R rafinatga ekstragent qo'shib, fazalar ajratilib va ekstragent chiqarilgandan so'ng C ning miqdori yanada kam bo'lgan yangi rafinat hosil qilamiz va hokazo. Shunday yo'l bilan Boshlang'ich F tarkibli aralashmadan ko'p bosqichli (davriy) ekstraksiya o'tkazib istalgan darajali tozalikdagi A komponentni olishimiz mumkin.

Ekstraktdan C komponentni olish masalasiga kelsak, uning bu ko'p bosqichli jarayondagi mumkin bo'lgan maksimal tozalik darajasi B nuqtadan binodal egri chiziqqa o'tkazilgan urinma bilan AS chiziqning kesishish nuqtasi E_m ning holati bilan aniqlanadi (2.8 - rasm).

2.8.5. Kristallanish jarayonlari yordamida tozalash

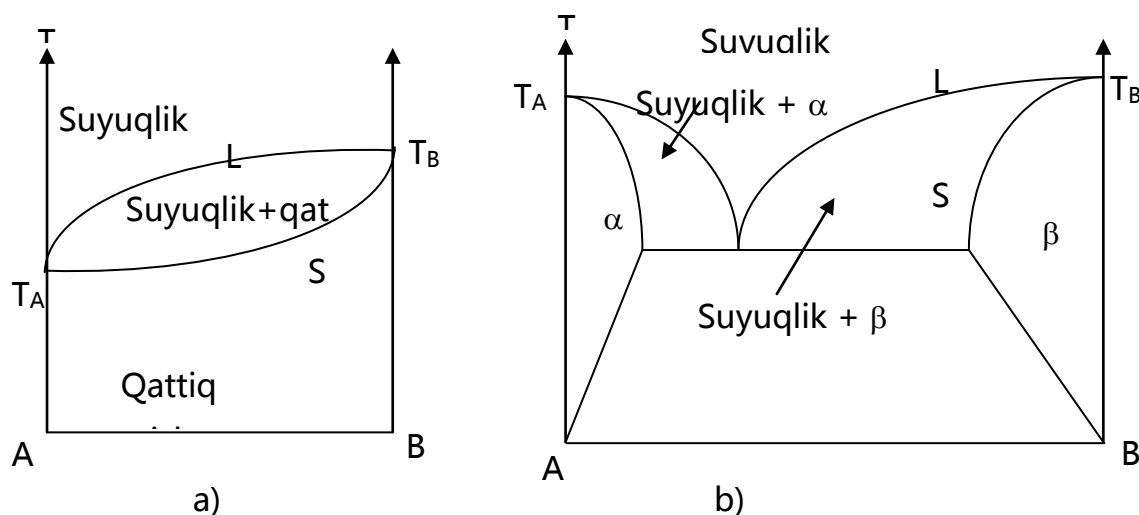
Kristallanish jarayoni deb, moddalarning suyuq holatdan qattiq kristall holatga o'tishiga aytiladi. Tozalashning kristallanish usullari

kirishmalarning suyuq va qattiq fazalarda eruvchanligining har xilligiga asoslangan.

Hozirgi vaqtda yarim o'tkazgichli va dielektrikli materiallarni tozalashda eritmalarni kristallashtan keng foydalanilmoqda. Bu usul odatda moddalarni tozalash texnologik jarayonining oxirgi bosqichida qo'llaniladi.

Moddalarni kristallashtirish jarayonlari yordamida tozalashni o'tkazish uchun shu moddaning undagi kirishmalar bilan hosil qiladigan fazalar holati diagrammasini bilish shart. Kristallashtirish usullari tozalash jarayonining oxirgi bosqichida qo'llanilgani sababli moddadagi qoldiq kirishmalar miqdori juda kam bo'ladi va ularning o'zaro yoki asosiy material bilan ta'sirlashuvi amalda kuzatilmaydi. Shu sababli keltirilgan fazalar diagrammasi ancha ixchamlashadi va murakkab ko'p komponentli tizimning fazalar diagrammasidan binar tizimning: asosiy komponent – kirishma faza diagrammasiga o'tish mumkin.

Binar tizimlarning erish-qotish diagrammalari turli tuman bo'ladi. 2.9 - rasmda yarim o'tkazgichlar va dielektriklar texnologiyasida eng ko'p to'qnash keladigan asosiy fazalar diagrammasining turlari keltirilgan. Moddalarda kirishmalarning konsentrasiyalari juda kichik bo'lgan hollari uchun bu diagrammalar yanada soddalashadi. Haqiqatda kirishmaning kichik



2.9-rasm. Fazalar diagrammasining asosiy turlari: a – uzluksiz qattiq va suyuq qorishmalarning holat diagrammasi; b - α va β sohali qattiq

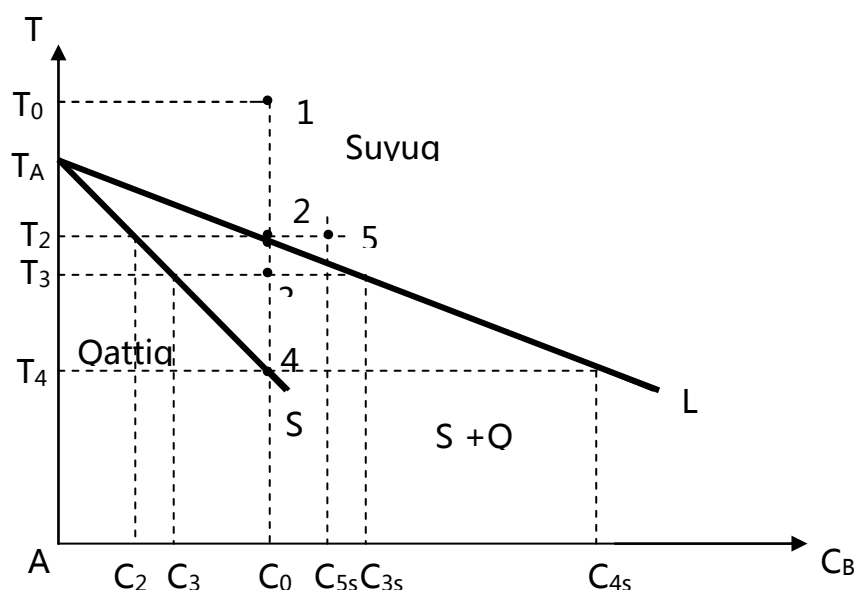
konsentratsiyalari sohasida, ya'ni toza komponentning erish nuqtasiga yaqin bo'lgan fazalar diagrammasining Boshlang'ich burchagida harxil tipdagi fazalar diagrammalari orasidagi farqlar yo'qoladi. Buning natijasida kristallashli tozalash

jarayonlarini tavsiflashda fazalar diagrammasining hamma turlarini asosiy komponentning erish nuqtasidan likvidus va solidus chiziqlariga urinma qilib o'tkazilgan ikkita chiziq bilan almashtirish mumkin. Agar kirishma qorishmaning temperaturasi kamaytirs, bu chiziqlar pastga yo'naladi, agar oshirs, tepaga yo'naladi.

Endi binar tizimli suyultirilgan qorishmani kristallanish jarayonlari yordamida tozalashning prinsipini ko'rib chiqamiz. Bunda kirishma qorishmaning erish temperaturasi kamaytiradigan va konsentratsiyasi juda kichik bo'lgan hol uchun likvidus va solidus egri chiziklari bilan ustma ust tushadigan to'g'ri chiziqli fazalar diagrammasi qismidan foydalanamiz (2.10-rasm). Konsentratsiyasi C_0 ga teng bo'lgan B kirishmali, T_0 haroratli A komponentning eritmasi mavjud bo'lsin. Tizimning bunga mos keluvchi boshlang'ich holati koordinatlari C_0 va T_0 bo'lgan 1-figurativ nuqta bilan ifodalanadi.

Harorat pasaytirilganda figurativ nuqta vertikal chiziq bo'yicha pastga harakatlanadi va tizimning ketma-ket xolatlarini belgilaydi. 2-nuqta vertikal traektoriyaning likvidus chizig'i bilan kesishgan nuqtasi bo'lib, u qorishmaning kristallanishining boshlanish haroratini aniqlaydi.

Bu haroratda kristallanishning boshlanish harorati bilan belgilanadigan 2 - nuqtadan o'tkazilgan gorizontaal chiziqning solidus chizig'i bilan kesishishidan aniqlanadigan tarkibi C_{2q} bo'lgan qattiq faza hosil bo'ladi.



2.10-rasm. A komponentda eritilgan B komponentli
suyultirilgan korishmaning kristallanishida kirishmalarning

Haroratning bundan keyingi pasayishlaridan to kristallanishning oxirigacha tizimning holati ikkita nuqta bilan ifodalanadi. Bu esa tizimda bir vaqtning o'zida bir biri bilan muvozanatda bo'lgan ikkita fazaning borligini ko'rsatadi. Bu nuqtalarning bittasi solidus chizig'ida bo'lib qattiq fazaning tarkibini beradi, ikkinchisi esa likvidus chizig'ida bo'lib suyuq fazaning tarkibini beradi. Erish intervali C_0 vertikal chizig'ining solidus va likvidus chiziqlari bilan kesishish nuqtalarining o'rinlari bilan aniqlanadi. 4-nuktaga mos keladigan haroratda suyuq faza butunlay yo'qoladi va tizim yana bir fazali bo'lib qoladi, qattiq fazaning tarkibi esa suyuqlikning boshlang'ich tarkibi C_0 bilan bir xil bo'lishi kerak. Haroratning keyingi pasayishi bilan qattiq fazaning tarkibi o'zgarmaydi. Agar haroratni oshiradigan bo'lsak, shu holatlarni tizim teskari ketma ketlikda bosib o'tadi.

Demak, ko'rib o'tilganlardan shunday xulosa chiqadiki, bunda kristallanayotgan quymaning tarkibi boshlang'ich eritma tarkibidan farq qilishi kerak emas va bir fazali sohadagi eritmaning tarkibi kabi bo'lishi kerak. Shunday qilib, kristallanayotgan materialda bir jinsli bo'lmagan tarkib hosil bo'lmasligi kerak edi, lekin odatda bunday tarkiblar hamma

vaqt hosil bo`ladi. Bunday bo`lishiga sabab kristallanish jarayonining tahlilida termodinamik yondashishdan foydalanganlikdadir, ya`ni har qanday vaqtda tizim muvozanat holatida bo`ladi deb xulosalar chiqarilgan. Aslida kristallanish jarayonida harorat uzluksiz ravishda o`zgarib turadi. Demak bunday sharoitda tizim yangi muvozanat holatga kelishga ulgurishi uchun haroratning o`zgarishi cheksiz sekin bo`lishi shart, ya`ni kvazistatik jarayon amalga oshishi kerak.

Real tizimda yangi tashqi sharoitga (haroratga) javob beradigan muvozanat suyuq va qattiq fazalarda komponentlarning diffuziyasi bilan bog`liq mexanizmli jarayonlar yordamida amalga oshadi. Suyuq fazadagi diffuziya koeffisienti qattiq fazadagiga qaraganda bir necha tartib yuqori bo`ladi. Masalan, 800 °C li haroratda germaniyda indiyning diffuziya koeffisienti $2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ ga teng bo`lsa, suyuq germaniyda esa  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  atrofida bo`ladi. Shu sababli eritmada muvozanatga kelish tezligi qattiq fazadagiga qaraganda ancha katta bo`ladi.

Real sharoitda, ya`ni qattiq fazada diffuziyaning juda xam kichik bo`lgan sharoitdagi eritmaning kristallanish jarayonini ko`rib chiqamiz. Bunda kristallanish jarayoni eritmada va fazalarning bo`linish chegarasidagi muvozanat cheksiz bo`lib turishiga ulguradigan tezlikda bo`lmoqda deb faraz qilamiz. Bundan tashqari qattiq fazada diffuziya shunchalik sekin bo`ladiki, bunda kristall ichki qismining tarkibi kristallanish haroratidagi tegib turgan eritmaning tarkibiga mos kelmaydi. Bunda qattiq faza tarkibining diffuziya ta`siridagi o`zgarishlarini hisobga olmasa ham bo`ladi.

Eritmaning haroratini kristallanishning boshlanish haroratigacha kamaytirilganda (2.10-rasm, likvidus chizig`idagi 2 - nuqta) tarkibi  $C_{q2}$  va suyuq fazaga qaraganda A komponentga boyroq bo`lgan qattiq faza hosil bo`ladi. Eritma esa B kirishma komponentiga boyib qoladi. Buning natijasida bu eritmani ifodalaydigan figurativ nuqta 2-nuqtaga qaraganda birmuncha o`ng tomonga siljiydi (5-nuqta). Ko`rinib

turibdiki, T_2 harorat 5-nuqta bilan ifodalanadigan eritmaning kristallanish haroratidan birmuncha yuqoridir. Haroratning keyingi kamayishi natijasida 5-figurativ nuqta yana likvidus chizig'iga keladi va buning natijasida ajralayotgan qattiq faza qatlamlarining tarkibi endi B komponentga boyroq bo'lib qoladi. Bularning kristallanishi natijasida figurativ nuqta yana o'ng tomonga siljiydi va shunday qilib eritmaning keyingi qismlari pastroq haroratda kristallana boshlaydi. Qattiq fazada diffuziyaning tezligi juda kichik bo'lganligi sababli, kristallning o'sish jarayonida o'sayotgan qatlamlar borgan sari B komponentga boyib boradi.

Shunday qilib, real sharoitdagi kristallanish jarayonlari natijasida qattiq faza tarkibiga ko'ra bir jinsli bo'lmagan holda kristallanar ekan. Hosil bo'lgan kristall quymasi konsentrasiyasi uzluksiz o'zgaradigan qattiq qorishma ko'rinishida bo'ladi. Bu hodisa va o'zgarmas tarkibning bunday buzilishi *segregatsiya* deyiladi. Yuqorida keltirilganlardan shu narsa ayon bo'ldiki, segregatsiya ikkita holatning birgalikdagi ta'siri natijasida yuzaga keladi:

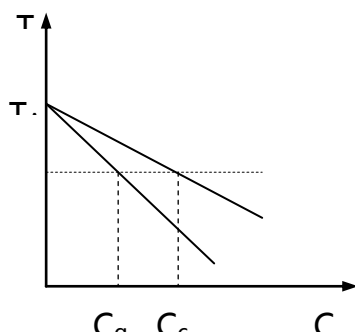
1. Muvozanat holatdagi suyuq va qattiq fazalar tarkibidagi farq;
2. Qattiq fazada tekislanish jarayonlarining (diffuziyaning) sekinligi.

Kristall real sharoitlarda o'sayotganida fazalar chegarasi $0,01 \div 10$ mm/min tezlik bilan harakatlanadi. Bunga nisbatan qattiq faza ichidagi komponentlarning diffuziyali siljish tezligi juda ham kichik. Bundan tashqari o'sayotgan kristallning qatlami bir zumda kristall o'sishida hosil qilinadigan harorat gradientining past haroratli sohasiga tushib qoladi va bu erda diffuziya jarayonlari yanada sekinlik bilan kechadi. Buning natijasida tarkibning bir jinsli emasligi saqlanadi, hamda kristallanish jarayoni yordamida moddalarni ajratish yoki tozalash mumkin bo'ladi.

Eritmani kristallash natijasida moddalarning tozalanish samaradorligini baholash uchun taqsimlanish koeffitsienti K qabul qilingan. K son jihatdan qattiq fazada erigan modda konsentrasiyasining shu moddaning suyuq fazadagi konsentrasiyasiga nisbatiga teng. Asosiy komponent – kirishma tizimiga bogʻliq holda K birdan katta yoki kichik boʻlishi mumkin va uning qiymati $10^{-5} - 10$ oraligʻda oʻzgaradi.

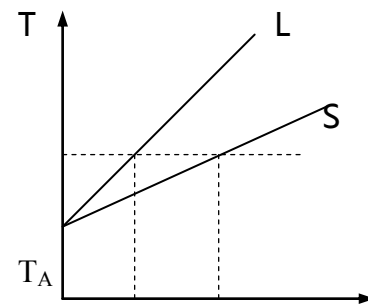
Taqsimlanish koeffitsienti ikki xil boʻladi: *muvozanatli taqsimlanish koeffitsienti va samarali taqsimlanish koeffitsienti*.

Muvozanatli taqsimlanish koeffitsienti kristall va eritma orasidagi har bir muvozanat paytida aralashmadagi komponentlarning ajralish



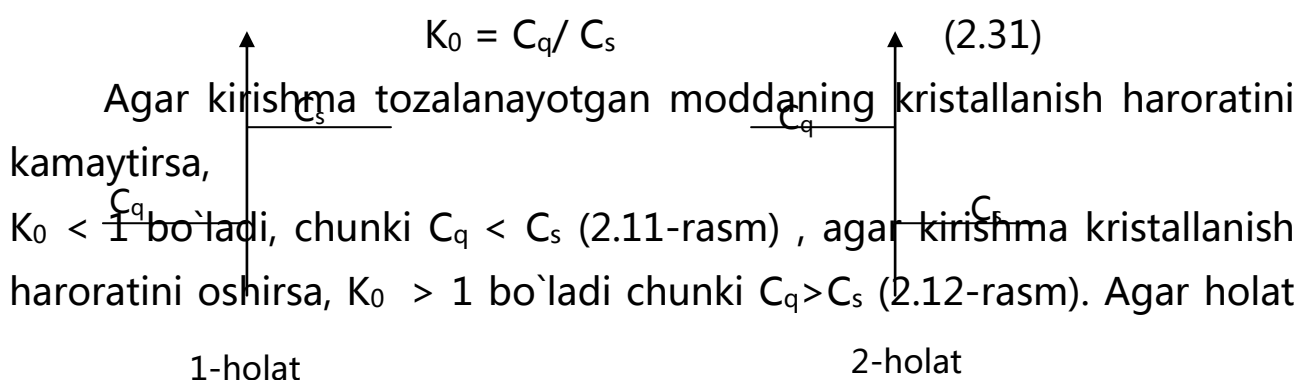
2.11 – rasm. Kirishma asosiy komponentining erish temperaturasi kamaytiradigan

$$\begin{aligned} &<= \\ K_0 &= \frac{C_q}{C_s} < 1 \\ &=> \\ K_0 &= \frac{C_q}{C_s} > 1 \end{aligned}$$



2.12 – rasm. Kirishma asosiy komponentining erish temperaturasi oshiradigan

holatini xarakterlaydi. Muvozanatli taqsimlanish koeffitsienti fazalar diagrammasi asosida hisoblanadi. Bunda u berilgan T harorat uchun izoterma chiziq bilan likvidus va solidus chiziqlari kesishishidan hosil boʻlgan gorizontall kesmalar - « C_{qat} » va « C_{suyuq} » konsentrasiyalarning nisbatidan topiladi:



2.13-rasm. Qattiq va suyuq fazalarning chegara qatlamidagi kirishmalar taqsimotining sxematik tasviri (kristallanish tezligi cheksiz kichik)

diagrammasida likvidus va solidus chiziqlari to'g'ri chiziqlardan iborat bo'lsa, unda har xil haroratlarda C_q va C_s kesmalarda qurilgan uchburchaklar o'xshashligidan K_0 ning konsentrasiya va haroratga bog'liq bo'lmasligi kelib chiqadi.

Muvozanat sharti eritmaning kristallanishi juda kichik bo'lgan tezliklardagina bajariladi. Bunda eritmaning hajmida C_s o'zgarmas bo'ladi (2.13-rasm) va uning kristallangan qismdagi konsentrasiyasi quyidagi formula bo'yicha topiladi:

$$C_q = K_0 C_s, \quad (2.32)$$

Real sharoitda kristallanish frontining harakat tezligi eritmadagi aralashmaning diffuziya tezligidan katta bo'ladi. Buning natijasida



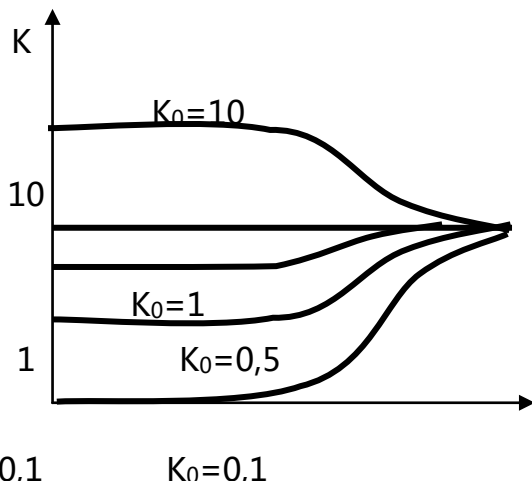
2.14-rasm. Nomuvozanat sharoitda fazalarning bo'linish chegarasida

kirishmalarning taqsimoti: kristallanish tezligi chekli qiymatda ega kristallanish frontining oldida, agar $K_0 < 1$ bo'lsa, effektiv qalinligi « δ » bo'lgan kirishmaga boyigan (2.14-rasm, a), agar $K_0 > 1$ bo'lsa, kirishmaga taqchil eritma qatlami hosil bo'ladi (2.14-rasm, b).

Bunday sharoitda kristallangan qismdagi kirishmaning konsentrasiyasi « C_q » kristallanish fronti yaqinida eritmadagi kirishma konsentrasiyasi $(C_s)_0$ bilan aniqlanadi. Umumiy holatda $(C_s)_0$ noma'lum bo'lgani uchun qattiq va suyuq fazalardagi kirishmalarning konsentrasiyasi effektiv taqsimlanish koeffisienti bilan aniqlanadi:

$$K = \frac{C_K}{C_C}, \quad (2.33)$$

Kirishmalarning δ qatlamdagi massa uzatilishi diffuziyali xarakterga ega bo'lgan hol uchun effektiv va muvozanatli taqsimlanish koefitsientlari bir-biri bilan quyidagicha bog'lanadi:



2.15-rasm. Kirishma taqsimoti effektiv koefitsienti K ning xar xil qiymatlari uchun o'qishning keltirilgan tezligi Δ

$$K = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \cdot e^{-\frac{\nu\delta}{D}}} \quad (2.34)$$

Bu tenglamadagi $\Delta = \frac{\nu\delta}{D}$ o'lchamsiz kattalik bo'lib, «keltirilgan kristallanish tezligi» deyiladi; ν - kristallanish tezligi; D - eritmadagi kirishmaning diffuziya koefitsienti.

Shunday qilib, agar mana shu kattaliklar va muvozanatli taqsimlanish koefitsienti ma'lum bo'lsa, K ning qiymatini hisoblash mumkin.

2.15-rasmda harxil asosiy komponent-kirishma tizimlari uchun effektiv taqsimlanish koefitsientining Δ kattalikka bog'lanishi keltirilgan. Bu bog'lanishlardan shu narsa ko'rinayotgani, keltirilgan kristallanish tezligi Δ ning oshishi bilan K ning qiymati birga tomon intiladi. Δ ning kamayishi esa K ning qiymatini K_0 ga yaqinlashtiradi. Bundan tozalash jarayonining effektivligini oshirish uchun effektiv taqsimlash koefitsientining qiymatini muvozanatli taqsimlash koefitsienti qiymatiga mumkin qadar yaqinlashtirish kerakligi kelib chiqadi. Mana shu effektga kristallash bilan tozalashda suyuq fazani intensiv aralashtirib turiladigan sharoitda ham erishish mumkin.

2.8.6. Gaz fazasi orqali haydash jarayonlari yordamida tozalash

Gaz fazasi orqali haydash jarayonlarini bug'larining bosimi yuqori qiymatlarga ega bo'lgan oddiy moddalar va kimyoviy birikmalarni

tozalash uchun qo'llash mumkin. Masalan P, Sb, S, Mg, Ca, Zn va ba'zi bir elementlarning suyuq xloridlari (GeCl_4 , SiCl_4 , TiCl_4 kabi) hamda yarim o'tkazgichli va dielektrik materiallarni ishlab chiqarishda uchuvchan birikma shaklidagi oraliq mahsulotlar (past galogenidlar) va shu kabilarni tozalashda gaz fazasi orqali haydash jarayonlaridan foydalaniladi. Gaz fazasi orqali haydash jarayonlarining sublimasiya va distillyasiya, kimyoviy transport reaksiyasi yordamida tozalash kabi usullari moddalarni ajratish va tozalashda keng qo'llaniladi.

Sublimasiya va distillyasiya usuli bilan moddalarni ajratish va tozalash. Sublimasiya deganda moddaning qattiq holatdan bug' holatiga to'g'ridan to'g'ri o'tish jarayoni tushuniladi. Sublimasiyani ajratish va tozalash usuli sifatida erish haroratidan past haroratlarda qizdirilganda bug'larining bosimi keraklicha yuqori bo'lgan moddalar uchungina qo'llash mumkin. Bunda moddada asosiy moddaga nisbatan ko'proq uchuvchan kirishmalar bo'lsa ular past haroratlarda haydaladi. Kamroq uchuvchan kirishmalar esa asosiy komponent uchib ketgandan so'ng qoldiqda yig'iladi.

Distillyasiya – bu suyuq qorishmani bug'ining bosimi harxilligi bilan xarakterlanadigan tarkibiy qismlarga ajratish jarayoni bo'lib, bunda ular avval bug'latiladi, keyin esa bug'lar kondensasiyalanadi.

Cheksiz qattiq va suyuq qorishmalar qatorini hosil qiladigan A va B komponentlardan tashkil topgan ikkilangan tizim misolida moddani ajratish va tozalashda bug'latish va kondensasiyalash jarayonining asosini ko'rib chiqamiz.

Agar A va B komponentlar tarkibi, molekulalarining kattaligi, tuzilishi va xossalari jihatdan bir-biriga yaqin bo'lsa va ular bir-biri bilan kimyoviy birikma hosil qilmasa, unda qorishma ustidagi harbir komponent to'yintiruvchi bug'ining parsial bosimi o'zgarmas haroratda uning qorishmadagi molli qismiga proporsional bo'ladi, ya'ni:

$$P_A = N_A P_A^O, \quad (2.35)$$

$$P_B = N_B P_B^O, \quad (2.36)$$

bu erda P_A va P_B - A va B komponentalarning qorishma ustidagi parsial bosimlari; N_A va N_B – ularning qorishmadagi molli qismlari; P_A^O va P_B^O – toza holatdagi A va B komponentalarning bug` bosimi.

Qorishma bilan muvozanatdagi bug` ning umumiy bosimi:

$$P_{AB} = N_A P_A^O + N_B P_B^O \quad (2.37)$$

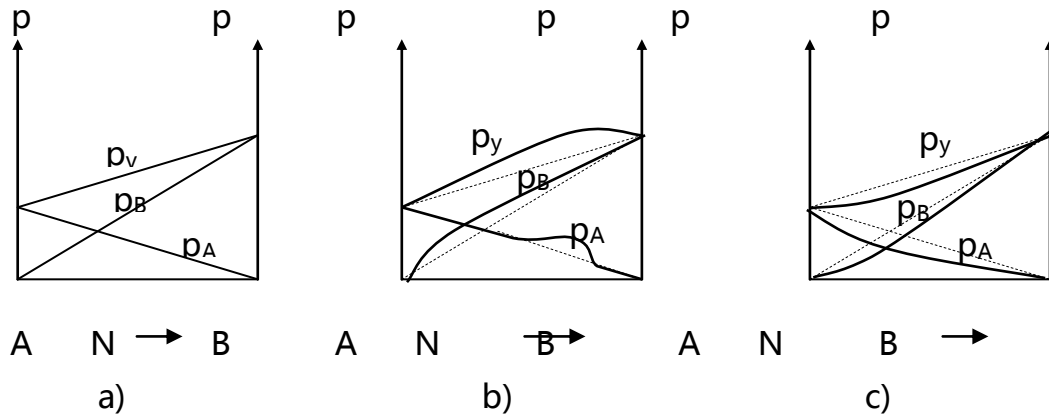
Odatda $N_A + N_B = 1$ va $N_A = 1 - N_B$ bo`lgani uchun (2.35) va (2.36) tenglamalardan:

$$(P_A^O - P_A) / P_A^O = N_B, \quad (2.38)$$

$$P_{AB} = P_A^O + N_B (P_B^O - P_A^O). \quad (2.39)$$

Bu ifodalar molli qismga nisbatan chiziqli funksiyalar bo`lib, ularga o`zgarmas haroratda bug` ning umumiy va parsial bosimlarining eritma tarkibiga bog`liqligi keltirilgan diagrammadagi to`g`ri chiziqlar mos keladi (2.16-rasm, a).

Yuqoridagi (2.39) - ifoda ideal tizim uchun Raul` qonuni deyiladi va u quyidagicha ta`riflanadi: A erituvchi to`yingan bug` bosimining nisbiy kamayishi undagi erigan B moddaning molli qismiga teng va aksincha.



2.16-rasm. Ikki komponentli tizimlarda bug`ning umumiy va parsial bosimlarining tarkibga bog`lanish grafiklari:

a – ideal tizim; b – Raul` qonunidan musbat chetlangan tizim; c – Raul`

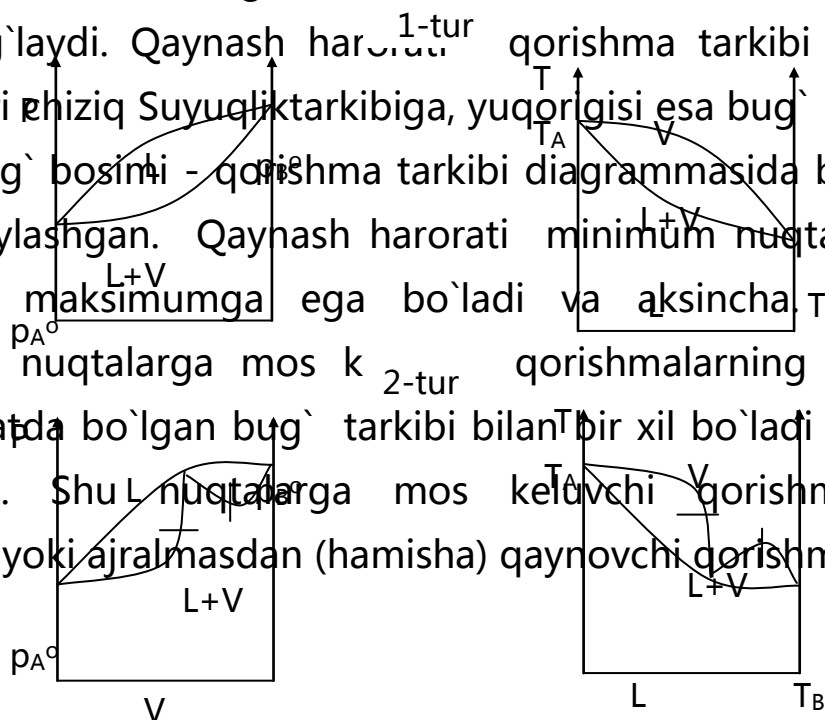
Amalda ideal qorishmalar nisbatan kam uchraydi va ularning hosil bo`lishida issiqlik effekti yoki hajm o`zgarishi kuzatilmaydi. Real eritmalarda esa qorishma bug` bosimi bilan uning tarkibi o`rtasidagi chiziqli bog`lanishdan chetlanish kuzatiladi (2.16-rasm, b, c). Bunda Raul` qonunidan musbat va manfiy chetlanadigan eritmalar farq qiladi. Musbat chetlanishli eritmalar issiqlik yutilishi va hajmning kengayishi orqali hosil bo`ladi (2.16-rasm, b). Manfiy chetlanishli eritmalarining hosil bo`lishida esa issiqlik ajralishi va hajmning kamayishi kuzatiladi (2.16-rasm, c).

Qorishma ustidagi bug`ning tarkibi bilan qorishmaning tarkibi orasidagi bog`lanishni ko`rib chiqamiz. Umumiy holatda bug`dagi qorishma komponentlarining nisbiy miqdori ularning qorishmadagi nisbiy miqdorlaridan farq qiladi. Faqat bug` bosimlari toza holatda bir xil bo`lgan komponentlardan tashkil topgan ideal tizimdagina qorishma ustidagi bug` va qorishmadagi komponentlar nisbati bir xil bo`ladi. Boshqaideal holatlarda esa bug` fazasi qorishmaga nisbatan bug` bosimi toza holda yuqoriroq bo`lgan komponentga boyroq bo`ladi.

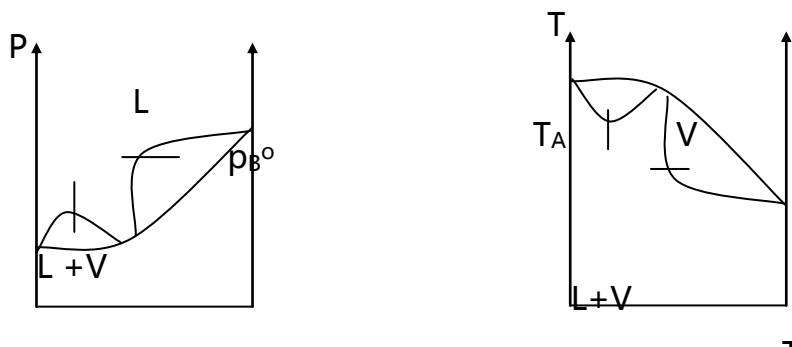
Bug` tarkibining qorishma tarkibiga va tizimdagi umumiy bosimga bog`lanishi D.P. Konovalov ochgan qonunlar bilan ifodalanadi.

Bu qonunlarning asosiy mazmuni koordinatalari qaynash harorati – qorishma tarkibi va bug` bosimi – qorishma tarkibi bo`lgan diagrammalarda aks ettirilgan (2.17-rasm).

Bu rasmlarda holat diagrammasining uch xil turi keltirilgan. Bularning harbirida ikkita egri chiziqli qurilgan bo`lib, ularning bittasi holat parametrlarini bug` tarkibi bilan, ikkinchisi esa suyuq faza tarkibi bilan bog`laydi. Qaynash harorati 1-tur qorishma tarkibi diagrammasida pastki egri chiziqli suyuqlik tarkibiga, yuqorigisi esa bug` tarkibiga to`g`ri keladi. Bug` bosimi - qorishma tarkibi diagrammasida bu egri chiziqlar teskari joylashgan. Qaynash harorati minimum nuqtali tizimlar bug` bosimida maksimumga ega bo`ladi va aksincha, maksimum va minimum nuqtalarga mos  $k_2$ -tur qorishmalar tarkibi u bilan muvozanatda bo`lgan bug` tarkibi bilan bir xil bo`ladi (Konovalovning 2-qonuni). Shu nuqtalarga mos keluvchi qorishmalar azeotrop qorishma yoki ajralmasdan (hamisha) qaynovchi qorishmalar deyiladi.



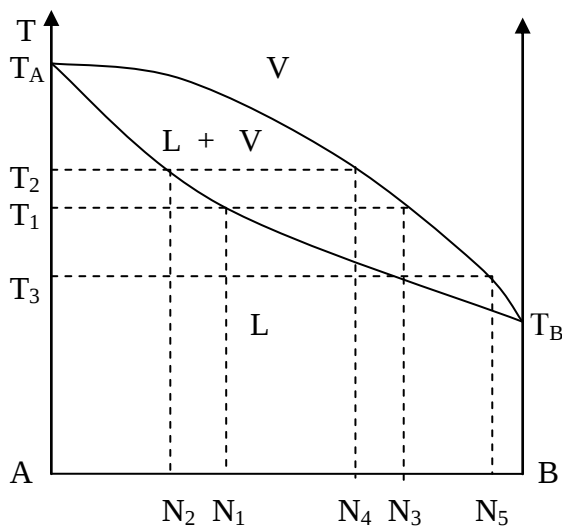
3-tur



2.17-rasm. Cuyuqlik L – bug` V tizimining har xil turlari uchun tarkib - bug`

Har xil turdagi fazali diagramma bilan xarakterlanadigan tizimlar distillyasiya jarayonida o'zini har xil tutadi.

Avval eng sodda bo'lgan birinchi turdagi diagrammaga mos keladigan A va B komponentlardan iborat tizimni ko'rib chiqamiz (2.18-rasm). B komponentning qaynash temperaturasi A ga qaraganda pastroq bo'lsin. Agar tarkibi N_1 bo'lgan eritmani qizdira boshlasak, temperatura T_1 ga etganda qaynay boshlaydi. Bu qorishma bilan muvozanatda bo'lgan bug' N_3 tarkibga ega bo'ladi va bu tarkib qorishmaga qaraganda B komponentga boyroq bo'lib qoladi. (Konovalovning 1-qonuni).



2.18-rasm. Distillyatsiyada qorishma va bug'

Qorishmaning ma'lum bir miqdori bug'lanib ketganidan keyin qorishma A komponentga boyib qoladi va uning tarkibi endi N_2 nuqta bilan xarakterlanadi. N_2 tarkibli qorishmaning temperaturasi T_2 ga etganda qaynay boshlaydi va bu qorishma bilan muvozanatda bo'lgan bug' ning tarkibi qorishmaga qaraganda B

komponentga yanada boyroq bo'lib qoladi. Bug'lanish davom etishi natijasida qoldiq qorishma A ga borgan sari boyib boraveradi, qaynash temperaturasi mos ravishda kattalashib T_A ga yaqinlashadi va oxirida toza holdagi A komponent qoladi va uning qaynash temperaturasi T_A ga teng bo'ladi. Agar T_1 temperaturada qorishmadan bug' lanayotgan N_3 tarkibli bug'ni kondensasiyalasak va bu kondensatni distillyasiya qiladigan bo'lsak, u T_3 temperaturada qaynaydi va uning bug' i N_5

tarkibga ega bo'ladi, ya'ni B komponentaga boyib qoladi. Bu kondensasiya va distillyasiya jarayonini takrorlab ajralayotgan bug` toza B komponentdan iborat bo'lishini ta'minlash mumkin. Shunday qilib, bunday turdagi tizimlarda har qanday ikki komponentlik aralashmani distillyasiya usuli bilan toza komponentlarga ajratish mumkin.

Ikkinchi va uchinchi turdagi tizimlarda esa bu usul bilan qorishmani toza komponentlarga ajratish mumkin emas.

Azeotrop bug`lanish vaqtida komponentlarga bo`linmaydi va uni ajratish uchun boshqa usullardan (ekstraksiya, kristallash kabi) foydalaniladi. Azeotrop qorishmalar amaliy jihatdan zarur bo`lgan ko`pgina tizimlarda uchraydi: xlorli vodorod + suv – ($\text{H}_2\text{O} + \text{HCl}$), azot kislotasi + suv – ($\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$), etil spirti + suv, oltingugurtli uglerod + aseton va shu kabilar.

Distilyasiya usulida tozalash yoki ajratish jarayonlarni miqdoriy xarakterlash uchun taqsimlanish koeffisientidan foydalaniladi:

$$K = \frac{N'}{N}, \quad (2.40)$$

bu erda N' va N – mos ravishdagi bug` va qorishmadagi komponentlarning molli qismi.

Ko`rilayotgan ikki komponentli tizim uchun :

$$K_A = \frac{N'_A}{N_A}; \quad K_B = \frac{N'_B}{N_B}. \quad (2.41)$$

Modda distillyasiya usuli bilan chuqur tozalanganda asosiy komponent va kirishmaning bug` va suyuq fazalar orasida taqsimlanishining effektivligini baholash uchun ham ajratish koeffisientidan foydalaniladi:

$$K_{AK} = \frac{\frac{N'_A}{N_A}}{\frac{N'_B}{N_B}} = \frac{K_A}{K_B}. \quad (2.42)$$

Ideal (Raul` qonuniga bo`ysunadigan) eritmalar uchun ajratish koeffitsienti qorishmaning tarkibiga bog`liq bo`lmaydi va uni quyidagicha yozish mumkin:

$$K_{AK}^{u\partial} = \frac{P_A^0}{P_B^0}. \quad (2.43)$$

Bu koeffitsient nisbiy uchuvchanlik koeffisienti ham deyiladi. Real qorishmalar uchun ajralish koeffitsienti (nisbiy uchuvchanlik koeffitsienti) quyida ko`rinishga ega bo`ladi:

$$K_{AK} = \left(\frac{P_A^0}{P_B^0} \right) \cdot \left(\frac{\gamma_A}{\gamma_B} \right), \quad (2.44)$$

bu erda γ_A va γ_V - A va V komponentlarning aktivlik koeffisienti bo`lib, qorishma xossalari ideal holatdan qanchalik chetlanganlik darajasini ifodalaydi va quyidagi nisbat bilan aniqlanadi:

$$\gamma = \left(\frac{P}{P^0} \right) \cdot \left(\frac{1}{N} \right). \quad (2.45)$$

Kirishma komponenti konsentratsiyasining juda kichik qiymatlarida asosiy komponentning aktivlik koeffitsienti $\gamma \rightarrow 1$ ga intiladi. Masalan: A asosiy komponentni B kirishmaning izlaridan tozalashda $\gamma_A \rightarrow 1$ va (2.44) ifoda quyidagicha yoziladi:

$$K_{AK} = \left(\frac{P_A^0}{P_B^0} \right) \cdot \left(\frac{1}{\gamma_B} \right) = K_{AK}^{u\partial} \left(\frac{1}{\gamma_B} \right). \quad (2.46)$$

Demak, kirishmalar konsentratsiyasining juda kichik qiymatlarida tozalash jarayoni asosan kirishmaning aktivlik koeffisienti bilan aniqlanadi yoki qorishmaning ideal holatidan chetlanganlik kattaligi va xarakteri bilan aniqlanadi.

Masalan, ba`zi bir binar tizimlarda ajratish koeffisientlarining (nisbiy uchuvchanlik) qiymatlari kirishmalarning kichik konsentratsiyalari uchun quyidagicha bo`ladi:

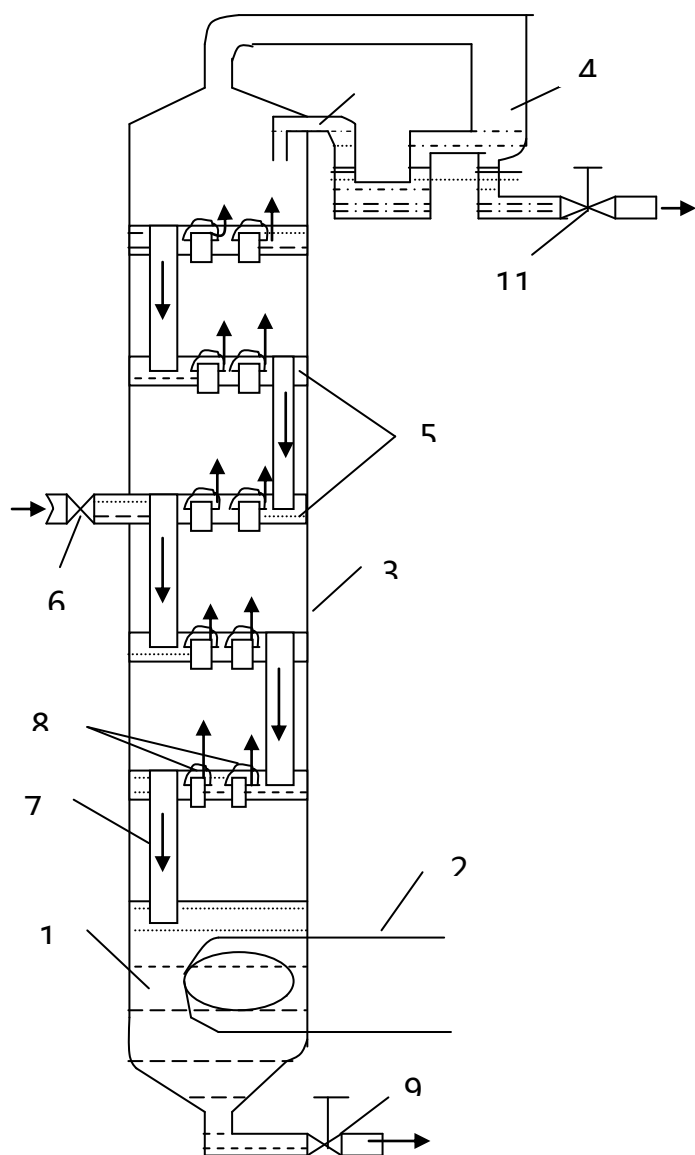
?? - жалвал

Асосий	Киришма	K_{AJ}
$SiHCl_3$	$- PCl_3$	$- 4,47$
$SiHCl_3$	$- CCl_3$	$- 2,65$
$SiHCl_3$	$- TiCl_4$	$- 3,10$
$SiHCl_3$	$- SnCl_4$	$- 11,0$
$SiHCl_3$	$- CHCl_3$	$- 5,25$

2.2-jadvalda keltirilgan binar tizimlar uchun K_{AJ} ning qiymati birdan ancha katta ekanligi bu tizimlarni shu kirishmalardan distillyasiya yordamida tozalash mumkinligini ko'rsatadi.

Sublimatsiya - distillyatsiya usuli bilan moddalarni ajratish va tozalash jarayonlarining samaradorligi va sifati tozalanayotgan moddalardagi kirishmaning tarkibi, bug'lanish va haydash sirti kattaligi, modda va kondensator temperaturasi, apparatdagi gazlarning tarkibi va bosimi kabi kattaliklarga bog'liq bo'ladi.

Asosiy komponent va kirishmalarning nisbiy uchuvchanliklariga bog'liq holda oson uchadigan kirishmalar past temperaturalarda haydaladi, yuqoriroq temperaturalarda esa kam uchadigan kirishmalar haydaladi. Bug'lanish va haydash jarayonlarining tezligini oshirish uchun ajraladigan moddalarning sirtini imkon qadar katta bo'lishligini ta'minlash kerak. Tozalash samaradorligini oshirish maqsadida ko'pincha gaz holatdagi toza vodorod qo'llaniladi. U juda ko'p oksidlarni, sul'fidlarni, selenitlarni va galogenitlarni qaytarish xususiyatiga ega. Qaytarilgan kirishmalar esa eritmadan bug'lanib ketadi. O_2 , S, Se va galogenlar esa N_2 ning birikmalari sifatida uchib chiqib ketadi. Nam vodorod kremniy eritmasidan borni uchuvchan BN_3 gidridini hosil qilish yo'li bilan haydash uchun ishlatiladi.



2.19-rasm. Rektifikasiya

Texnikada uzluksiz jarayon faqat distillyasiya usuli uchun amalga oshiril-gan. Ajratish va tozalashning bunday uzluksiz jarayoni va bunda alohida fraksiyalar uchun distillyasiya va kondensasiya operatsiyalarining ko`p marta qaytarilishi rektifikatsiya deyiladi va bu jarayon o`tdigan apparat esa rektifikatsiya kolonnasi deyiladi. Rektifikasiyaning samaradorligi distillyatsiyaga qaraganda juda yuqori hisoblanadi. Masalan: ikki komponentli suyuq aralashmani ajratishda ularning qaynash harorati distillyasiya usulida kamida 50 gradusga farq qilishi kerak. Rektifikasiya usulida esa 0,5 °C va ba`zi hollarda 0,05 °C farq qilsa ham etarli hisoblanadi.

Shu bilan bir qatorda rektifikatsiya ajratishning eng mahsuldor jarayonlaridan biri hisoblanadi. Bundan tashqari u nisbatan oddiy, qurilmalari ixcham, jarayon uzluksiz, isrofgarchilik yo`q darajada. Mana shularning hammasi sanoatda yarim o`tkazgich va dielektriklarning toza komponentlarini (oddiy modda yoki uchuvchan birikmalar ko`rinishda haydash bilan) olishda, xususan SiCl_4 , TiCl_4 , CCl_4 , GeCl_4 , CH_3SiCl_3 , AlCl_3 , SbCl_3 , BBr_3 , oltingugurt, selen, fosfor, sirkoniy va gafniy birikmalarini tozalashda va hokazolarda rektifikasiya usulining keng qo`llanilishiga asos bo`ldi.

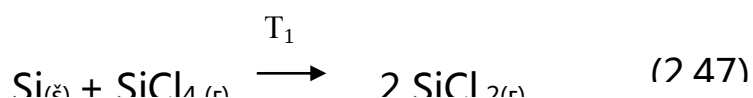
2.19-rasmda rektifikasiya qurilmasining prinsipial sxemasi keltirilgan. Qurilmaning asosiy qismlariga kub (qozon) 1, qizdirgich 2, rektifikasiya kolonnasi 3 va kondesator 4 kiradi. Rektifikatsiya kolonnasi gorizontal joylashgan qator 5 taqsimchalarga ega. Oldindan isitilgan, rektifikasiya qilinadigan qorishma kran 6 orqali o`rtadagi taqsimchalarning bittasiga beriladi. Uni to`ldirgandan so`ng quvur 7 orqali pastdagi taqsimchaga oqib tushadi. Pastdan tepaga ko`tarilayotgan bug`lar quvurcha 8 orqali taqsimchadagi qorishmadan o`tayotganda unda pufakchalar hosil qilib tepaga ko`tariladi. Quvurchadagi qalpoqchalar taqsimchadagi qorishma bilan bug`larning yaxshi kontaktda bo`lishini ta`minlaydi. Qo`shimcha qizdirgichlar yordamida kolonna bo`ylab temperatura gradienti hosil qilinadi. Bunda eng yuqori temperatura kubda eng past temperatura esa kondensatorda bo`ladi. Buning natijasida bug`lar va qorishmalarning qarama-qarshi harakat i hamda ular orasida uzluksiz massa va issiqlik almashuvi ta`minlanadi. Natijada kolonnaning tepa qismidan toza, oson uchuvchan komponentning bug`lari chiqadi, kubga esa toza, qiyinroq uchuvchan komponentdan tashkil topgan suyuqlik oqib tushadi. Kondesator 4 ga kelib tushgan oson uchuvchan komponentning bug`lari kondensasiyalanadi va uning *flegma* deb ataladigan bir qismi quvur 10 orqali kolonna tepa qismining normal holatda ishlashini ta`minlash uchun yuqori taqsimchaga berib turiladi. Ajratilgan va tozalangan mahsulotlar kondensator va kubdan mos holda 11 va 9 kranlar orqali chiqarib olinadi.

Kimyoviy transport reaksiyalari yordamida tozalash. Kimyoviy transport reaksiyalari (uzatish reaksiyalari) deb, gaz fazasi qatnashadigan va bunda hosil bo`ladigan oraliq gazsimon mahsulotlar yordamida moddani bosim va temperaturalari harxil bo`lgan ikkita reaksiya zonasi oralig`ida uzatish (ko`chirish) amalga oshiriladigan qaytariluvchan geterogen reaksiyalariga aytiladi. Odatda transport

reaksiyalarini amalga oshirish uchun teperataralar farqi bo'lgan tizimlardan foydalaniladi.

Ko'pgina yarim o'tkazgichlar va dielektriklarni chuqur tozalashda mumkin bo'lgan texnologik temperaturalarda kirishmalar hosil qiladigan bug' bosimlari juda kichik bo'ladi. Natijada bunday moddalar uchun sublimasiya va distillyasiya usullarini qo'llash o'ta samarasiz bo'lib qoladi. Bunday holda samaradorlikni oshirish uchun asosiy moddani kirishmalarga qaraganda ko'proq uchuvchan kimyoviy birikmalarga aylantirish yaxshi natijalar beradi. Bunda hosil bo'lgan oson uchuvchan birikmalardan yana ajratib hosil qilingan asosiy modda sublimasiya va distillyasiya usuliga nisbatan tozaroq bo'ladi. Misol tariqasida kremniyning digalogenid ko'rinishida ko'chishini ko'rib chiqamiz.

Kremniyni $T_1 = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda tetraxlorid bilan qayta ishlash



natijasida oraliq gazsimon modda - SiCl_2 xosil bo'ladi:

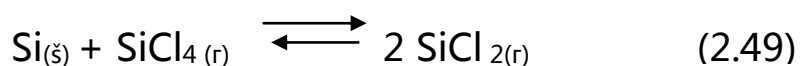
Hosil bo'lgan gazsimon SiCl_2 reaktorning oxiriga ko'chadi, u erda $T_2 = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda kremniy quyidagi reaksiya bo'yicha ajraladi:

Bu reaksiyalar qaytariluvchan bo'lganligi sababli ularni



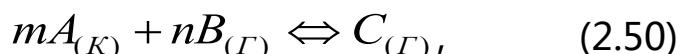
quyidagicha yozish mumkin:

Shunday qilib, transport reaksiyasi bilan moddani tozalashda



tozalanadigan moddadan tashqari maxsus reagent (masalan: kremniy tetraxloridi), ba'zan esa o'z oqimi bilan reagent va oraliq gazsimon mahsulotni ko'chiruvchi inert gazi qatnashishlari shart.

Umumiy holda transport reaksiyasi tenglamasi quyidagicha ifodalanadi:



bu erda, A - tozalanayotgan modda, qattiq yoki suyuq fazada bo'lishi mumkin; B- gazsimon reagent bo'dib, A komponenta bilan gazsimon oraliq birikma C ni hosil qiladi.

Amalda bu reaksiyaning yo'nalishi reaksiya bo'ladigan xajmdagi zonalar orasidagi haroratlarning farqi bilan beriladi.

Ko'chishning samaradorligi va yo'nalishi reaksiya vaqtidagi erkin energiyaning o'zgarishi bilan aniqlanadi:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (2.51)$$

bu erda ΔH va ΔS - entalpiya va entropiyalarning reaksiya davomida T haroratda o'zgarishlari. Agar ΔS kichik bo'lsa, ko'chishning yo'nalishi ΔH ning ishorasi bilan aniqlanadi. Ekzotermik reaksiyalarda ko'chish past haroratsdan yuqori harorat tomonga, endotermik reaksiyalarda esa yuqori haroratsdan past harorat tomonga bo'ladi.

2.9. Qotish jarayonlarining fizik-kimyoviy asoslari

2.9.1. Kristall o'simtaning hosil bo'lishi

Kristallanish jarayonlari birinchi turdagi fazali o'zgarish bo'lib, bunda atom-lar to'la yoki qisman tartibsiz joylashgan holatdan (bug', suyuqlik) o'ta tartibli joylashgan holatga o'tadi. Har qanday fazali o'zgarishning, ya'ni kristallanishning harakat lantiruvchi kuchi uning erkin energiyasini kamaytirishga bo'lgan intilishi-dir. Kristallanish o'ta to'yingan (o'ta sovutilgan), ya'ni metastabil holatda bo'lgan tizimlarda kuzatiladi. Bunda kristallanish (masalan: eritmaning qotishi yoki bug'ning kondensatsiyalanishi) odatda metastabil fazali hajmda bir jinsli bo'lmasdan kechadi. Jarayonning boshlanishida Boshlang'ich fazaning

har xil joylarida kristallanish markazlari hosil boʻladi va ular issiqlik hamda massa uzatish jarayonlari hisobiga oʻsa boshlaydi. Boshlangʻich fazani kristallash uchun hosil qilinadigan oʻta toʻyinish (oʻta sovitish) tizimga yangi fazadagi oʻsimtalar sirtini hosil qilish uchun talab qilinadigan qoʻshimcha energiyani berish uchun kerak.

Boshlangich fazada qattiq zarrachalar yoki markazlarni hosil qiluvchi sirtlar boʻlmasa, unda yangi fazadagi oʻsimta hosil boʻlish mexanizmi gomogen hisoblanadi, agar boʻlsa, unda geterogen hisoblanadi.

Kristallanish markazlarining gomogen hosil boʻlishida fazali oʻzgarish shartlarini aniqlaydigan asosiy parametrlarni koʻrib chiqamiz.

Issiqlik muvozanati holatida boʻlgan gazsimon, suyuq yoki qattiq, molekulyar yoki atomli tizimlarning harxil nuqtalarida uzluksiz ravishda fluktuasiyalar hosil boʻlib turadi, yaʼni harxil kattaliklarning ehtimoli eng katta boʻlgan qiymatlaridan chetga ogʻishlar kuzatiladi. Boshlangʻich fazadagi zichlik yoki konsentrasiyaning fluktuasiyasi faza holatining oʻzgarishiga olib kelishi mumkin (masalan: yangi fazadagi oʻsimta hosil boʻlishi). Bunday holatni geterofazali fluktuasiya holati deyiladi. Agar fluktuasiya natijasida faza holati oʻzgarmasa, unda gomofazali fluktuasiya deyiladi.

Geterofazali fluktuasiyalarning hosil boʻlishida harxil holatdagi zarrachalar energiyalarining harxilligi natijasida tizimning faqat erkin energiyasining oʻzgarishigina emas, balki ajralish sirti S ning hosil boʻlishi ham kuzatiladi.

Misol tariqasida oʻta toʻyingan bugʻ dan suyuq tomchining hosil boʻlish jarayonini koʻrib chiqamiz. P bosimli oʻta toʻyingan bugʻ dan (T haroratda P_0 muvozanatli bosim bilan xarakterlanadigan) uncha katta boʻlmagan r radiusli tomchining paydo boʻlishi ikkita tashkil etuvchidan iborat boʻlgan tizim erkin energiyasining ΔG oʻzgarishi bilan yuz beradi:

$$\Delta G = \Delta G_x + \Delta G_{CHPT}, \quad (2.52)$$

bu erda ΔG_x – bug` erkin energiyasining kondensasiyalanish natijasida o`zgarishi, ΔG_{sirt} – erkin energiyaning Suyuqlik–bug` bo`linish sirtini hosil qilishga sarf qilinadigan ish hisobiga o`zgarishi.

Ideal gazni izotermik qisishda molyar erkin energiyaning o`zgarishi

$$\Delta G_{\mu} = -RT \ln \frac{P}{P_0} \quad (2.53)$$

ni hisobga olib, sferik r radiusli tomchi uchun quyidagini xosil qilamiz:

$$\Delta G_x = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\pi r^3}{V} RT \ln \frac{P}{P_0}, \quad (2.54)$$

bu erda R – universal gaz doimiysi, V - suyuqlikning molyar xajmi.

Sferik o`simta uchun  $\Delta G_{sirt}$  ning qo`shgan hissasi quyidagiga teng bo`ladi:

$$\Delta G_{sirt} = 4\pi r^2 \gamma_{s-b}, \quad (2.55)$$

bu erda γ_{s-b} - suyuqlik–bug` bo`linish sirtining solishtirma erkin energiyasi.

(2.50) va (2.51) ni (2.48) tenglamaga qo`yamiz:

$$\Delta G = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\pi r^3}{V} RT \ln \frac{P}{P_0} + 4\pi r^2 \gamma_{s-b}. \quad (2.56)$$

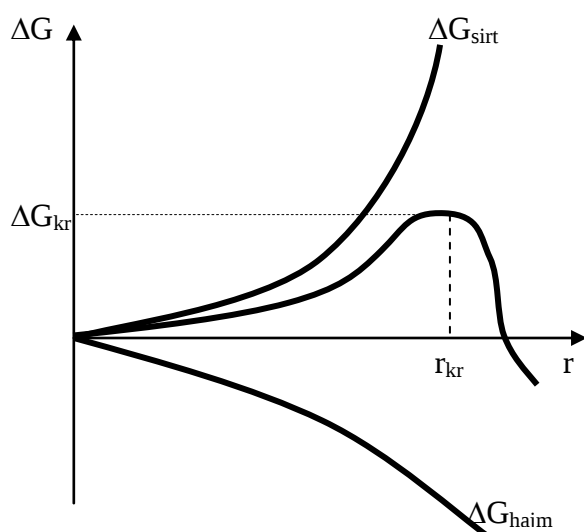
(2.56) tenglamaning tahlili (2.20-rasm) shuni ko`rsatadiki,  $r$  ning kichik qiymatlarida ikkinchi qo`shiluvchi ustun keladi va ΔG musbat bo`ladi,  $r$  ning katta qiymatlarida esa birinchi qo`shiluvchi asosiy rol o`ynaydi va  $\Delta G$  manfiy bo`ladi.

r ga nisbatan (2.56)ning maksimum shartidan:

$$\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = -\frac{4\pi r^2}{V} RT \ln \frac{P}{P_0} + 8\pi r \gamma_{s-b}. \quad (2.57)$$

Bundan kritik radius r_{kr} ning qiymati quyidagi (2.58) tenglama orqali topiladi:

$$r_{kr} = \frac{2\gamma_{s-b} \cdot V}{RT \ln \frac{P}{P_0}} \quad (2.58)$$



2.20-rasm. Tizimning erkin energiyasi

(2.58) ni (2.56) tenglamaga qo'yib, kritik razmerli tomchining xosil bo'lish jarayonini kuzatib boruvchi erkin energiyaning o'zgarishini topamiz:

$$\Delta G_{kr} = \frac{16\pi V^2 \gamma_{s-b}^3}{3 \left(RT \ln \frac{P}{P_0} \right)^2}. \quad (2.59)$$

(2.58) va (2.55)

tenglamalardan foydalanib, ΔG_{KR} ning kattaligi kritik o'lchamli o'simta sirtini hosil qilishdagi

ishning 1/3ga tengligini ko'rsatish mumkin.

Yuqoridagi (2.57) va (2.59) formulalardan shu narsa kelib chiqadiki, geterofazali fluktuasiya natijasida xosil bo'lgan tomchining o'lchami $r < r_{kr}$ bo'lsa, bug'lanib ketish ehtimoli kattaroq bo'ladi, agar $r > r_{kr}$ bo'lsa, o'sish ehtimoli ko'payadi, chunki ikkala holda ham ΔG erkin energiya kamayadi.

Kritik radiusdan kichik bo'lgan tomchilar «murtak» deyiladi, kritik radiusdan kattalari esa yangi faza markazlari deyiladi (yoki kristallanish holatida - kristallanish markazlari deyiladi).

Agar $R/R_0 \leq 1$ bo'lsa, r oshishi bilan ΔG oshadi va geterofazali fluktuatsiya natijasida hosil bo'ladigan ixtiyoriy o'lchamli tomchilar bug'lanishga moyil bo'ladi.

Shunday qilib, yangi fazaning murtaklari yangi fazadagi moddaning erkin energiyasi shu moddaning Boshlang'ich fazadagi (bug', qorishma yoki eritma) erkin energiyasidan kichik bo'lgandagina paydo bo'ladi va o'sadi. Erkin energiyani aynan o'lchashning iloji yo'qligi sababli o'simtalarning hosil bo'lish sharoiti va ularning keyinchalik o'sishini aniqlash uchun o'ta to'yinish va o'ta sovutilish

degan tushunchalardan foydalaniladi. Kristallarning hosil bo'lishi va o'sishi uchun Boshlang'ich faza unda paydo bo'ladigan qattiq fazaga nisbatan o'ta to'yingan yoki o'ta sovutilgan bo'lishi shart. Agar berilgan haroratda gaz fazasining bosimi R suyuq yoki qattiq fazalarning to'yintiruvchi bug'larining bosimi R_0 dan katta bo'lsa, gazli faza o'ta to'yingan deyiladi. Bunda o'ta to'yinish quyidagi usullardan biri bilan ifodalanadi:

1) $\Delta R = R - R_0$ - absolyut o'ta to'yinish;

2) $\sigma = \Delta R / R_0$ - nisbiy o'ta to'yinish (ko'pincha foizlarda ifodalanadi);

3) $\alpha = R / R_0$ - o'ta to'yinish koeffitsienti.

O'ta to'yinishni quyidagi kattalik bilan ham ifodalash mumkin:

$$\delta = \ln(P/P_0) \quad (2.60)$$

Bu kattalikning energetik koeffitsient kT ga ko'paytmasi atom yoki molekulaning ikki fazadagi erkin energiyalarining farqini (yoki ikki fazadagi kimyoviy potentsiallarning farqi $\Delta\mu$ ni) beradi:

$$\Delta\mu = kT \ln(P/P_0) \quad (2.61)$$

Qorishmalar (suyuq va qattiq) uchun o'ta to'yinish yuqoridagiga o'xshash ifodalanadi:

$\Delta C = C - C_0$ - absolyut o'ta to'yinish ;

$\sigma = \Delta C / C_0$ - nisbiy o'ta to'yinish ;

$\alpha = C / C_0$ - o'ta to'yinish koeffitsienti (C - qorishmadagi kristallanadigan komponentning konsentratsiyasi, C_0 - uning kristallanish temperaturasiidagi muvozanatli konsentratsiyasi).

Eritmalar esa o'ta sovutilish bilan ifodalanadi:

$$\Delta T = T_{ER} - T, \quad (2.62)$$

bu erda T_{ER} - moddaning erish harorati; T - o'ta sovutilgan eritmaning harorati.

Kritik o'lchamli o'simtalar hosil bo'lishining aktivlash energiyasi uchun olingan (2.59) ifoda gazli fazada yangi faza markazlari hosil

bo'lish tezliklarining to'yinishga bog'liq holda hisoblash imkonini beradi. Nisbatan noturg'un tizimlarda (masalan o'ta to'yingan bug') yangi faza markazlarining hosil bo'lish tezligi kritik o'lchamli o'simtalarning o'z o'lchamlarini oshirishining o'rtacha tezligiga teng bo'ladi. Metastabil ona faza bilan fluktuasiyali muvozanat shartidan aniqlanadigan kritik o'simtalarning konsentrasiyasini n_{kr} ga teng deb qabul qilsak, unda gazli fazaning birlik hajmida o'simta hosil bo'lish tezligi quyidagicha ifodalanadi:

$$J = \omega_{kr} n_{kr}, \quad (2.63)$$

bu erda ω_{kr} – kritik o'simtalarning atom yoki molekulalarni o'ziga qo'shib olish chastotasi bo'lib, bu bilan ular yangi faza markazlariga aylanadilar.

Suyuq tomchilarning gomogenli murtak xosil bo'lishida o'simtaning zarrachani ushlab olish chastotasi ω kritik o'lchovli o'simtaning sirt yuzasi $S_{kr} = 4\pi r_{kr}^2$ ning bug' fazasidan kelayotgan oqim $d = \frac{(S_{kr} \cdot \rho \cdot L)}{V} \cdot \frac{1}{N}$ ga ko'paytmasi ko'rinishida tasvirlanishi mumkin. Bularni hisobga olganda (2.63) ifoda quyidagicha yoziladi:

$$J = a_c q S_{kr} n_{kr}, \quad (2.64)$$

bu erda a_c – kondensatsiya koeffitsienti bo'lib, murtak sirtiga urilayotgan monomerlarning kondensatsiyalanayotgan qismiga teng.

Agar murtaklarning umumiy soni kamligini nazarga tutsak, ular kvazi-muvozanatli taqsimlangan deb hisoblashimiz mumkin. Bunda Boltsman statistika-kasidan foydalanib, kritik o'lchamli murtaklar konsentratsiyasi n_{kr} ni topamiz:

$$n_{kr} \approx n_1 \exp\left[-\frac{\Delta G}{kT}\right], \quad (2.65)$$

bu erda $n_1 = P/(kT)$ bo'lib, gaz fazasidagi zarrachalar (murtak tarkibiga kirmagan atom va molekulalar) konsentrasiyasi.

(2.64) formula tarkibiga kirgan kattaliklarning ifodalarini qo'yib murtak xosil bo'lish tezligini topamiz:

$$J = \frac{a_c P}{\sqrt{2\pi m k T}} 4\pi r_{kr}^2 \cdot n_1 \exp\left[-\frac{\Delta G_{kr}}{kT}\right] \quad (2.66)$$

O`simtalarning hosil bo`lishi va parchalanishlarining tahlili (2.66) ifodada quyidagi ko`rinishga ega bo`lgan «nomuvozanatlik faktori» - Z ni hisobga olish kerakligini ko`rsatadi:

$$Z = \left[\Delta G_{kr} / (3\pi k T i_{kr}^2) \right]^{1/2}, \quad (2.67)$$

bu erda i_{kr} – kritik o`lchovli murtakdagi zarrachalar soni. Baholashlar

natijasida $Z \sim 10^{-2}$ ekanligi aniqlandi.

(2.67) ni e`tiborga olib gaz fazasidagi gomogenli tomchi hosil bo`lish tezligining natijaviy ifodasini hosil qilamiz:

$$J = a_c q S_{kr} n_{kr} Z, \quad (2.68)$$

yoki (2.66) ifodani quyidagicha yozish mumkin:

$$J = 4\pi r_{kr}^2 \frac{a_c P}{\sqrt{2\pi m k T}} \left(\frac{\Delta G_{kr}}{3\pi k T i_{kr}^2} \right)^{1/2} \cdot n_1 \exp\left[-\frac{\Delta G_{kr}}{kT}\right]. \quad (2.69)$$

(2.58) va (2.59) formulalarni hisobga

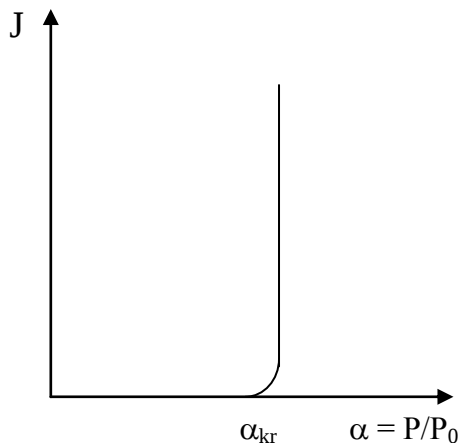
olgan holda (2.69) ifodaning tahlili shuni ko`rsatadiki, ma`lum bir o`ta to`yinishdan boshlab yangi faza markazlari hosil bo`lishi tezligining o`ta to`yinishga bog`liq holda keskin oshib ketishi kuzatiladi (2.21-rasm). Bunday o`ta to`yinish kritik o`ta to`yinish deyiladi.

2.9.2. Murtakning hosil bo`lish jarayonlari va shishalanish

Suyuq fazada murtak hosil bo`lishining gomogen jarayonlarini ko`rib chiqamiz.

O`ta sovutilgan eritmada kristall murtaklarning hosil bo`lishi geterofazali fluktuasiyalar natijasida erkin energiyaning o`zgarishi natijasida yuz beradi va u yuqoridagidek ifodalanadi:

$$\Delta G = \Delta G_X + \Delta G_{sirt} \quad (2.70)$$



2.21-rasm. O`ta to`yingan bug`da suyuq tomchilarning xosil bo`lish tezligining o`ta to`yinish

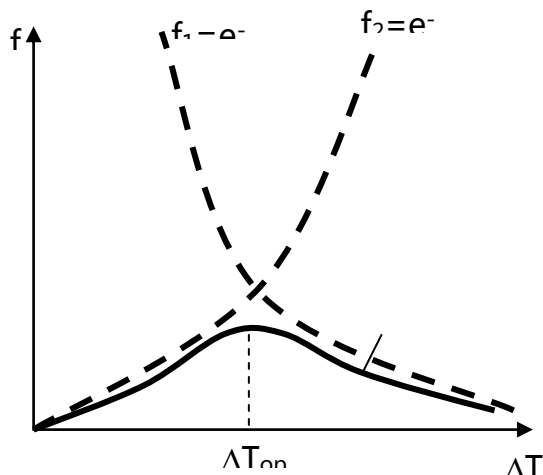
Mana shu tenglikni eritmada hajmi V^1 , sirti S^1 , suyuqlik-qattiq jism bo'linish chegarasidagi solishtirma erkin sirt energiyasi γ_{s-q} ga teng bo'lgan qattiq fazadagi murtakning hosil bo'lishiga tadbqiq etamiz.

Misol tariqasida qirradi $a=2r$ ga teng bo'lgan kub shaklidagi kristall murtak hosil bo'layotgan hol uchun r_{kr} va ΔG_{kr} ifodalarini topamiz. Unda $V'=8r_{kp}^3$, $\eta=6$ (o'simtaning shaklini hisobga oladigan koeffitsient). Qiymatlarni qo'yib quyidagilarni hosil qilamiz:

$$r_{kr} = \frac{2\gamma_{s-k} V T_{er}}{L \cdot \Delta T} \quad , \quad (2.71)$$

$$\Delta G_{kr} = \frac{32\gamma_{s-k}^3 V^2 T_{er}^2}{L^2 \Delta T^2} \quad , \quad (2.72)$$

bu erda V – suyuqlikning molli xajmi, T_{er} - erish harorati, L - kristallanishning yashirin molyar issiqligi, $\Delta T = T_{er} - T$ – o'ta sovutilganlik, T - kristallanish harorati.



2.22-rasm. Suyuq fazada gomogen o'simta xosil bo'lish tezligini aniqlovchi

Shunday qilib, o'simtaning kritik o'lchami va mos holda uning hosil bo'lish energi-yasi suyuqlik-qattiq jism bo'linish chegara-si solishtirma erkin sirt energiyasi qancha kichik va o'ta sovutilish qancha katta qiymatga ega bo'lsa, shuncha kichik bo'ladi.

Kristall faza markazlarining birlik hajmda hosil bo'lish tezligining umumiy ko'rinishi quyidagicha

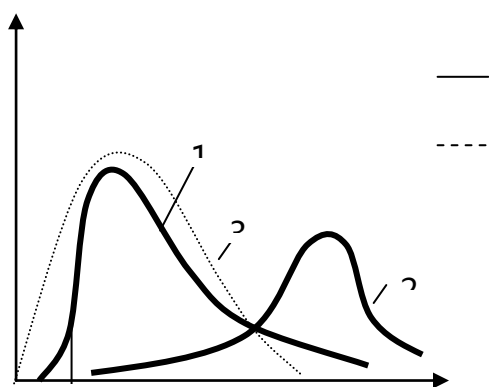
bo'ladi:

$$J = K \exp\left(-\frac{U}{\kappa T}\right) \exp\left(-\frac{\Delta G_{kp}}{\kappa T}\right) \quad , \quad (2.73)$$

bu erda: U - suyuq faza va kristall o'simta oraliqi chegarasidagi energetik bar'er, K - harorat o'zgarishi bilan kam o'zgaradigan koeffitsient.

(2.73) tenglamadan ko`rinib turibdiki,  $\Delta G_{kr}$  bilan aniqlanadigan kristall faza markazlarining paydo bo`lish ehtimolligi eritmaning o`ta sovutilishining oshishi bilan oshadi (2.22-rasm). Shu vaqtning o`zida sovutilishning oshishi bilan U bilan aniqlanadigan atomlarning harakat chanligi esa, ayniqsa qovushqoq suyuqliklarda (masalan, oksidli shisha, organik polimerlar) kamayadi. va shu bilan kristall faza markazlarining hosil bo`lishi hatto katta o`ta sovutilishlarda ham sekinlashadi. Shu sababli har bir qovushqoq suyuqlik optimal o`ta sovutilishga ega bo`lib, bunda markazlarning hosil bo`lish tezligi maksimal bo`ladi (2.22-rasm).

Demak, o`simtalarning tug`ilish tezligiga termodinamik omildan tashqari kristall faza markazlari o`shishining chiziqli tezligiga ta`sir qiladigan kinetik omil ham ma`lum bir ta`sir o`tkazadi (2.23-rasm).



2.23-rasm. Kristall faza markazlarining gomogen xosil bo`lish tezligi (1,2) va kristall faza markazlari o`shishining (3) o`ta sovutilishga bog`lanish

Noqovushqoq suyuqliklarning kristallanishida (kremniy va germaniy eritmaları) kinetik omil kam rol o`ynaydi va shu sababli markazlarning hosil bo`lish tezligida maksimal qiymat kuzatilmaslgi mumkin va ma`lum bir  $\Delta T_{kr}$  kritik o`ta sovutilganlikda kristall faza markazlarining hosil bo`lish tezligi keskin oshadi va suyuqlikning hamma hajmida bir zumda kristallanish yuz beradi.

Ko`rib chiqilgan qonuniyatlar eritmada kristall va amorf qattiq jismlar hosil bo`lish sharoitlarini bayon qilish imkoniyatini beradi. Masalan, SiO_2 asosidagi qovushqoq eritmani sovutishda real foydalaniladigan ΔT o`ta sovutilganlikda kristallanish markazlarining soni kam (2.23-rasm) va bunda kristall faza markazlari o`shishining chiziqli tezliklari katta bo`lsa ham, eritma o`ta sovutilgan suyuqlik

ko`rinishda qotadi. Bu jarayon, ya`ni o`ta sovutilgan eritmaning shishasimon holatga sekin astalik bilan o`tishi kristallanishdan farqli ravishda shishalanish deyiladi. Shishaning mo`rt xolatga o`tish temperaturasi shishalanish temperaturasi T_g deb aytiladi. Bunday shisha deb ataladigan amorf qattiq jismlarda suyuqliklardagi kabi uzoq tartiblik kuzatilmaydi. Ularda yaqin tartiblik kuzatiladi (0,7 nm dan kichik masofalarda).

Eritmalarning qovushqoqligi ularning shishasimon holatga o`tish qobiliyatini aniqlovchi asosiy omil xisoblanadi. Temperatura pasaytirilganda qovushqoqliklari sovutilish jarayonida tez va uzliksiz ko`p tartibgacha oshadigan (masalan $\sim 10^{13}$ Pa-s gacha) o`ta sovutilgan suyuqliklargina shisha ko`rinishda qotadi. 2.3 - jadvalda ba`zi bir kristall va shisha holatida qotadigan eritmalarning qovushqoqliklari solishtirilgan.

Jadvaldan ko`rinib turibdiki, shishalanadigan moddalarning qovushqoqligi kristallanadigan moddalarnikiga qaraganda 6-9 tartibga yuqori ekan. Mana shu farq bu moddalarning o`ta sovutilishda o`zlarini har xil tutishlarini belgilab beradi. Shunday qilib moddalarning eritma xolatidan qattiq xolatga o`tishi ikki xil yo`l bilan boradi:

1. Kristallanish; 2. Shishalanish.

Eritmaning kristallanishi belgilangan temperaturada yuz beradi va bunda moddaning xossalari keskin o`zgaradi. Eritmaning shishalanishi esa har bir modda uchun ma`lum bir temperatura intervalida yuz beradi va bunda moddaning xossalari bir tekis o`zgarib boradi.

O`ta to`yingan suyuq qorishmalardan gomogen o`simta hosil bo`lish jarayonlari ko`p hollarda o`ta to`yingan bug`lardan va o`ta sovutilgan eritmalardan o`simtalar hosil bo`lish jarayonlariga o`xshash bo`ladi.

2.3-jadval

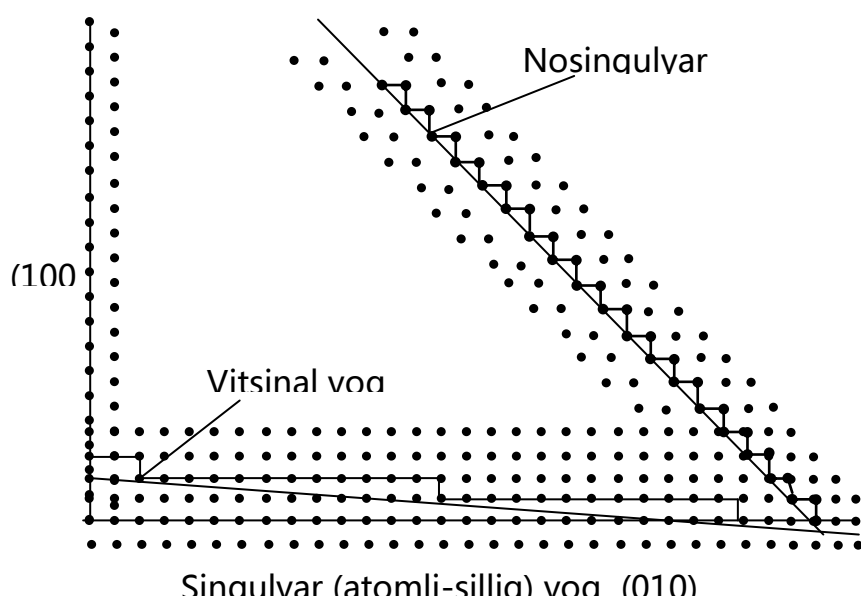
Modda	Erish	Qovushqoqli	Modda	Erish	Qovushqoqli
-------	-------	-------------	-------	-------	-------------

	harorati, °C	k, Pa·s			harorati, °C	k, Pa·s
Ge	937	$0,8 \cdot 10^{-3}$		SiO ₂	1722	10^6
Si	1414	$0,9 \cdot 10^{-3}$		GeO ₂	1116	$7 \cdot 10^4$
GaAs	1237	$1,8 \cdot 10^{-3}$		B ₂ O ₃	450	10^4
H ₂ O	0	$2 \cdot 10^{-3}$		As ₂ O ₃	312	10^5
Al ₂ O ₃	2050	$60 \cdot 10^{-3}$		BeF ₂	550	10^5

2.10. Kristallarning o`lish mexanizmi va kinetikasi

2.10.1. Bo`linish sirtlari strukturasi

Termodinamika qonunlariga binoan fluktuatsiya natijasida hosil bo`lgan kristall o`simtalarning o`ishi boshlang`ich muhitdagi kichik o`ta to`yinishlarda ham kuzatilishi kerak edi. Biroq, berilgan o`ta to`yinishda kristall yoqlarining o`ish tezligi bir xil sharoitlarda sirtning atom strukturasi bog`liq bo`lar ekan. Ideal kristallarda yoqlarning sirtlari atom strukturalari bo`yicha uch xilga bo`linadi: singulyar, vitsinal va nosingulyar (diffuzli). Singulyar deb, ideal sharoitda xech qanaqa zina bo`lmagan atomli silliq yoqqa aytiladi (2.24-rasm).



Bunday sirtlarga mi-sol qilib oddiy kub panjaradagi (100) yoqni yoki olmossimon panjaradagi (111) yoqni ya`ni kichkina Miller indeksleri bilan

2.24-rasm. Oddiy kub panjarada har xil

ifodalanadigan yoqlarni ko'rsatish mumkin. Singulyar yoqlar boshqalarga qaraganda eng kichik erkin sirt energiyasiga va retikulyar zichlikka (atomlarning taxlanish zichligiga) ega. Yoqlarning erkin sirt energiyasi γ ning orientasiyaga bog'lanishini ko'rsatadigan Vul'f diagrammasida singulyar yoqlarga o'tkir minimum to'g'ri keladi va birlamchi xosila $d\gamma/d\theta$ da uzilish ro'y beradi (2.25-rasm, 1).

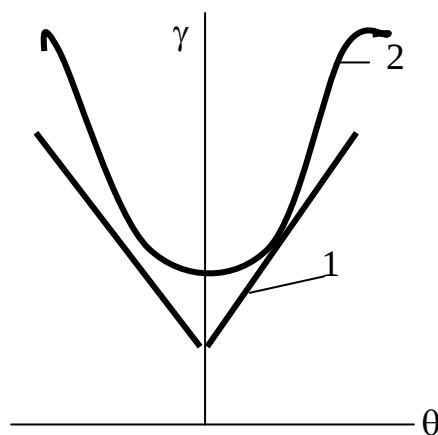
Vitsinal yoq deganda, singulyar yoqqa yaqin orientasiyalangan sirt tushuniladi (2.24-rasm). Visinal yoqlar singulyar yoqlar bilan uncha katta bo'lmagan burchak tashkil qilib, singulyar yoqlarning monoatom balandlikdagi zinalar bilan kesishgan silliq platolardan tashkil topadi. Visinal yoqlar zinalar bo'lganligi uchun singulyar yoqlarga qaraganda yuqoriroq sirt energiyasi bilan xarakterlanadi.

Nosingulyar sirtlar singulyar sirtlar bilan nisbatan katta burchak hosil qiladi va zinalarning konsentrasiyasi yuqoriroq bo'ladi (2.24-rasm).

Nosingulyar yoqlar eng katta erkin sirt energiyasiga ega bo'ladilar. Singulyar yoqlar yuqori temperaturalarda o'zining silliqqligini yo'qotadi va nosingulyar bo'lib qoladi. Atom-silliq sirtlarning atom-g'adir-budur sirtlarga o'tishida erkin sirt energiyasi anizotropiya xarakterida o'zgarish yuz beradi va $d\gamma/d\theta$ dagi sakrash yo'qoladi hamda γ uchun o'tkir minimum silliq o'tishga almashadi (2.25-rasm, 2).

Kristallarning o'sish mexanizmi o'sayotgan sirtning holatiga bog'liq holda ikki xil bo'ladi: qatlamma-qatlam o'sish va normal o'sish.

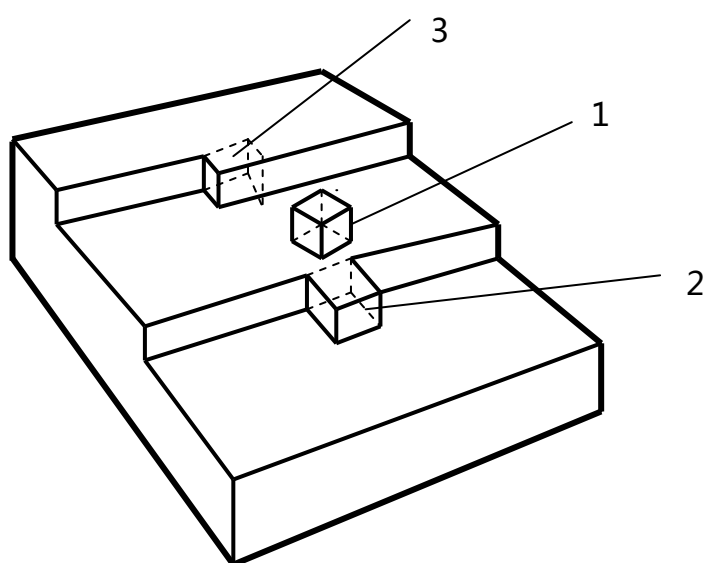
1. Qatlamma-qatlam o'sish singulyar va visinal sirtlarda amalga oshadi. Qatlamma-qatlam o'sish nazariyasining asoschilari Kossel',



2.25 - rasm. Kristallning erkin sirt energiyasi anizotropiyasi:

Stranskiy va Fol`merdir. Bu nazariyaga binoan, o`sayotgan kristall sirtiga tushgan atom zinaning uzilgan joyida eng mahkam bog`lanadi (2.26-rasm, 3), chunki bunday holatda (agar misol tariqasida oddiy kub panjara qaralayotgan bo`lsa) atom eng yaqin oltita qo`shni atomdan uchtasi bilan bog` hosil qiladi.

Shu vaqtda zinaning o`zidagi atom (2.26-rasm, 2) faqat ikkita qo`shni atom bilan, silliq yoqdagi atom esa (2.26-rasm, 1) faqat bitta



2.26 - rasm. Atom – silliq

qo`shni atom bilan bog` hosil qiladi. Tashqi fazadan kristall sirtiga tushayotgan atom energiyasining bir qismini panjaraga beradi va kristall sirt atomlarining bog`lanish kuchlari maydoniga tushib adsorbsiyalangan holatga o`tadi. O`shning oddiy sharoitlarida

adsorbsiyalangan atomlarda

kristall sirtida siljib yurishlari uchun kerakli energiya zahirasi mavjud bo`ladi. Atom kristallga bog`lanishi yoki qaytadan bug`lanib ketishi uchun sirt bo`ylab bir necha atomlararo masofaga teng bo`lgan o`rtacha migrasiya yo`li  $\lambda_s$  ni bosib o`tishi kerak. Demak, tashqi fazadan kelayotgan atomning to`g`ridan to`g`ri zina uzilishiga tushish ehtimoli juda ham kichik bo`lib, atom sirt diffuziyasi orqali zinaga etib keladi va uzilishgacha bo`ylama siljib kristall bo`lib taxlanadi. Qator to`lgandan keyin atom zinaga birikib yana uzilish hosil qiladi. Uzilishning paydo bo`lishi uchun yanada yuqoriroq o`ta to`yinish talab qilinadi, chunki zinaga adsorbsiyalangan atom faqat eng yaqin ikkita qo`shni atom bilan bog`lanish hosil qiladi.

Nazariy baholashlar shuni ko'rsatdiki, tipik moddalar va o'sish temperaturasi uchun zinada harqaysito'rt-o'n atomlararo masofaga bitta uzilish to'g'ri keladi. Bunday uzilishlarning zichligi keraklicha katta bo'lib, bunda zina kristallning o'sish jarayonida adsorbsiyalangan atomlar uchun uzluksiz stok sifatida harakat qiladi.

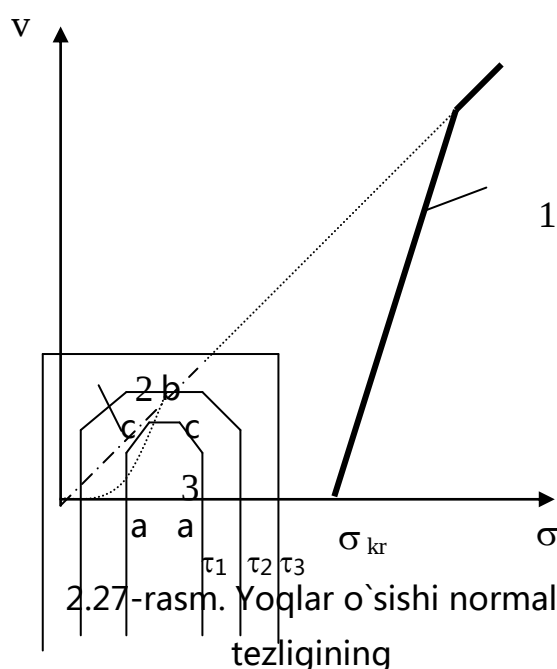
Monomolekulyar qatlam to'lgandan so'ng ikki o'lchamli o'simta hosil bo'lish yo'li bilan yangi qatlamning tug'ilishi uchun ancha katta o'ta to'yinish talab qilinadi. Agar o'sishning oddiy sharoitida zinaning harakat i uchun bir foizdan kichik bo'lgan o'ta to'yinish etarli bo'lsa, ikki o'lchamli o'simtaning hosil bo'lishi uchun esa o'ta to'yinish o'n foiz atrofida bo'lishi kerak. Demak Kossel – Stranskiy - Fol'mer nazariyasi bo'yicha singulyar yoqlar uzilib-uzilib o'sishi kerak va ularning o'sishi uchun ma'lum bir kritik o'ta to'yinish kerak bo'ladi. Bu o'ta to'yinish ikki o'lchamli o'simtaning hosil bo'lishini ta'minlaydi (2.27-rasm, 1).

Bu nazariyada bayon qilingan hodisalar sirtida o'sish nuqsonlari bo'lmagan ideal kristallar o'sishining jarayonlari uchun to'g'ri bo'lib, kristallar o'stirilishining real sharoitlarida juda kam kuzatiladi. Ko'p hollarda kristallar juda kichik o'ta to'yinishlarda ham ma'lum bir tezliklar bilan o'sa olish fakti kristallar o'sish sirtida doimiy ta'sir

qiladigan zina manbai bo'lib, uning vazifasini *vintli dislokasiya* bajarar ekan, degan xulosaga olib keladi.

2. Normal o'sish.

Kristallar-ning normal o'sishi nosingulyar sirtlarda amalga oshadi. Bu sirtlar atomli – g'adir-budur bo'lib, uzilishlar bilan bir teis qorplanganligi



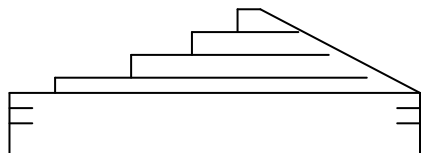
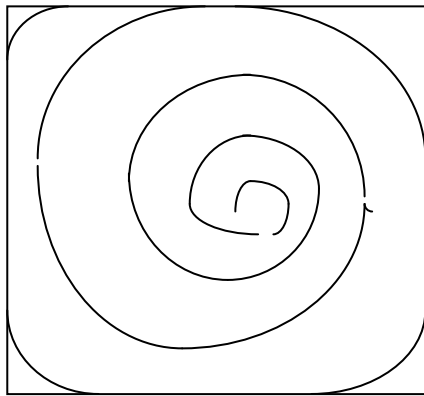
2.28-rasm. Kristallning o'sish o'ta to'yinishga bog'lanish grafigi: jaryoni davomida undagi 1- ikki o'lchamli o'simta hosil bo'lishligi no-singulyar yoqlarning

uchun yangi zarrachalarning birikishi amalda ixtiyoriy joyda yuz beradi. Uzilishlar miqdori kristal-lanish tezligini chegaralamaydi va yoqlar o'z-o'ziga perpendikulyar holda o'sadi, ya'ni o'sishning normal mexanizmi amalga oshadi. Demak, har qanday o'ta to'yinishda nosingulyar yoqlarning o'sish jarayoni davom etadi. Nosingulyar yoqlarning o'sish tezligi to'yinishga proporsional bo'ladi va chiziqli funksiya (Gers-Knudsen tenglamasi) bilan ifodalanadi (2.27-rasm, 2). Nosingulyar yoqlarda o'sish nuqtalarining konsentrasiyasi singulyarga qaraganda yuqori bo'lganligi uchun nosingulyar yoqlarning o'sish tezligi ham ancha katta bo'ladi. Kristallning o'sish jarayonida uning nosingulyar yoqlari yo'q bo'lib ketishi mumkin. Buning natijasida kristall kichik Miller indeksli sekin o'suvchi, asosan singulyar yoqlar bilan qoplanadi. Buni 2.28-rasmda keltirilgan sxema orqali tushuntirish mumkin. Bu rasmda yoqlari o'ziga-o'zi parallel ko'chishi bilan o'sayotgan kristallning qirqimi keltirilgan. Bunda a va b yoqlar sekin o'suvchi yoqlar; s yoq – nosingulyar, demak tez o'suvchi yoq. Kristallning o'sishi davomida nosingulyar yoqlarning yuzalari tez kamayadi va bu yoqlar yo'qolib ketadi.

2.10.2. Kristallar o'sishining sirt kinetikasi

Barton, Kabrera va Frank tomonidan birinchi marta kristallarning qatlam-spiral o'sish nazariyasi gaz fazadan kristallanishga qo'llanilgan bo'lib uni suyultirilgan qorishmadan va eritmadan o'sishga ham ishlatish mumkin. Bu nazariyaga binoan singulyar (yoki visinal) yoqlardagi zinalar o'sishining manbai vintli dislokasiyalar bo'lishi mumkin. Vintli dislokasiya hosil qilgan zina, unga zarrachalar taxlanganda spiralsimon bo'lib aylanadi va hosil bo'layotgan ketma-ket o'ramlar zinalar eshelonini shakllantiradi. Buning natijasida o'sayotgan sirtida piramidalar hosil bo'ladi (2.29-rasm). Bu piramidalarni hosil

qilayotgan zinalarning konsentrasiyasi katta bo'lib, o'sish sirtiga chiqayotgan vintli dislokasiyalarning miqdoriga bog'liq bo'lmaydi. Oziqlantiruvchi muhit bilan kontaktda bo'lgan kristall sirtida kristallni tashkil qilgan moddaning zarrachalari adsorbsiya holatida turadi. Adsorbsiyalangan zarrachalar uchta yo'nalishda issiqlik tebranishlarida qatnashadi: perpendikulyar sirtida va unga parallel bo'lgan ikkita sirtida. Birinchi turdagi tebranishlarda energiyaning fluktuasiyasi zarrachaning sirtidan uzilishiga va uning muhitga o'tishiga olib keladi. Ikkinchi turdagi tebranish bu zarrachalarning sirt bo'ylab diffuziyali migrasiya qilishiga



2.29-rasm. Vintli dislokatsiya ta'sirida o'sayotgan sirtning

sharoit yaratadi. Agar o'sayotgan sirt ustida o'ta to'yinish hosil qilinsa, unda atrof muhitda va adsorbsiyali qatlamda to o'ta to'yinish yo'qolmaguncha kristallanish ketadigan zina tomonga diffuziya boshlanadi.

Gaz fazadan kristallanishda o'sish zinasining qirrasiga to'g'ridan to'g'ri bug` dan tushayotgan zarrachalar miqdori, bug` zichligining kamligi va qirra sirtining kichikligi tufayli, uncha katta emas. Shu sababli kristallning o'sishiga asosiy hissani sirtning har xil

qismlarida adsorbsiyalangan zarrachalarning tekis diffuziyali oqimi beradi. Bu holat uchun qatlam-spiral mezanizmli sirt o'sishining normal tezligi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$V = \kappa_1 \Omega n_0 \nu \kappa_2 e^{-\frac{W}{kT}} \left(\frac{\sigma^2}{\sigma_1} \right) \text{th} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma} \right) , \quad (2.74)$$

bu erda κ_1 – adsorbsiyali qatlam bilan sinishlar o'rtasidagi zarrachalar almashinish tezkorligini ifodalaydigan koeffisient; κ_2 – X_0/λ_s nisbat kattaligini ifodalaydigan koeffisient (X_0 – zinadagi sinishlar orasidagi

o`rtacha masofa);  $\Omega$  - zarrachaning hajmi;  $n_0$  – kristalldagi atomlarning sirt zichligi;  $\nu$  - zarrachaning issiqlik tebranishlari chastotasi;  $\sigma$  - o`ta to`yinish;  $\sigma_1 = (2\pi r_{kr}/\lambda_s)\sigma$  ( $r_{kr}$  - kritik o`simtaning radiusi, λ_s – adsorbsiya holatidagi zarrachaning o`rtacha siljishi);  $W$  – zarrachaning bug`lanish energiyasi; k – Bol`sman doimiysi; T – harorat.

(2.74) - ifodadan kichik o`ta to`yinishlar uchun ($\sigma \ll \sigma_1$) o`sinh tezligining o`ta to`yinishga parabolik qonun bo`yicha bog`langanligi kelib chiqadi:

$$\nu = \kappa_1 \Omega n_0 \nu \kappa_2 e^{-\frac{W}{kT}} \left(\frac{\sigma^2}{\sigma_1} \right) \quad (2.75)$$

Katta o`ta to`yinishlar $\sigma \gg \sigma_1$ uchun chiziqli qonunga ega bo`lamiz:

$$\nu = \kappa_1 \Omega n_0 \nu \kappa_2 \sigma e^{-\frac{W}{kT}}. \quad (2.76)$$

Kristallarning gaz fazasidan qatlam-spiral o`sinhida o`sinh tezligining o`ta to`yinishga yig`indi bog`lanishi 2.27 -rasm, 3 da ko`rsatilgan.

Qorishmalardan o`sinh jarayonlarining tahlili shuni ko`rsatdiki, bunda kichik o`ta to`yinishlarda o`sinh tezligining o`ta to`yinishga bog`liqlik qonuni parabolik qonunga yaqin bo`lar ekan. O`ta to`yinish  $\sigma$  ning oshib borishi bilan bu bog`lanish chiziqli qonunga yaqinlashadi. Parabolik qonundan chiziqli qonunga o`tish kristallning sirtiga yaqin joylashgan diffuzion qatlam  $\delta$  ning qalinligiga, ya`ni qorishmani aralashtirish intensivligiga bog`liq bo`ladi.

Eritmadan kristall o`sinhning sirt kinetikasi faqat kristallanish frontining tuzilishigagina bog`liq bo`lmasdan, balki qovushqoq eritmalardan o`stirilayotgan kristallarning o`sinhiga halaqit qiladigan eritmaning qovushqoqligiga ham bog`liq bo`ladi (2.23-rasmga qarang) (masalan, kvars kristallari).

Atom - g'adir-budur sirtlar normal mexanizm holida o'sadi. Bunda o'sish markazlarining zichligi sirt atomlari zichligi 10^{18} m^{-2} ga yaqin bo'ladi. Bu holda sirtning o'sish tezligi kristallanish frontidagi o'ta sovutilish ΔT ga proporsional bo'ladi:

$$v \sim \Delta T \quad (2.77)$$

Atom-silliqlik sirtlarning o'sishi ikki xil mexanizmli bo'lishi mumkin:

- 1) ikki o'lchamli o'sish zinalarining tug'ilishi bilan boradigan qatlamli o'sish mexanizmi;
- 2) 2) o'sish zinalarining manbai bo'lgan vintli dislokasiyalar qatnashgan qatlamli – spiralli mexanizm.

Birinchi mexanizm bo'yicha eritmadan kristall o'sish tezligi kristallanish frontidagi o'ta sovutilishning o'sish harorati bilan o'ta sovutilishning eksponensial funksiyasiga ko'paytmasiga proporsional bo'ladi:

$$v \sim \Delta T \exp(-V/(T \Delta T)), \quad (2.78)$$

bu erda $V = \text{const}$.

Ikkinchi mexanizm bo'yicha o'sishda o'sish tezligi va kristallanish frontidagi o'ta sovutilish bir - biri bilan kvadratik qonun bilan bog'langan:

$$v \sim \Delta T^2 \quad (2.79)$$

2.10.3. Kristallarning o'sish jarayoniga kirishmalarning ta'siri

Kristallarning o'sish jarayoniga kirishmalarning ta'siri xar xil bo'lganligi bu jarayon mexanizmini o'rganishni qiyinlashtiradi. Bu erda asosiy rolni kirishmaning tabiati, uning konsentrasiyasi va zaryad holati o'ynaydi. Ba'zi bir holatlarda kirishmalar kristallarning o'sishini tezlashtirsa, boshqaholatlarda esa sekinlashtiradi.

Agar o'sayotgan kristall zinalarning uzilishlari kirishma molekularini adsorbsiyalagandan keyin o'sishning aktiv nuqtasi bo'lmay qolsa

(zaharlansa), unda zinalar harakat ining yig'indi tezligi, demak kristallning o'sish tezligi kamayadi. Kirishmalar ishtirokidagi o'sayotgan kristallning boshqa modelida, agar aktiv (zaharlanmagan) uzilishlar oralig'idagi o'rtacha masofa zarrachalarning sirt bo'ylab o'rtacha diffuziya yugurish uzunligidan katta bo'lsa, unda zinalarning harakat tezligi kamayadi. Bunday kirishmaga gaz fazasidan o'sayotgan germaniy kristallari uchun kislorod misol bo'ladi. Uning bosimi $10^{-3} - 1$ Pa atrofida bo'lganda kristallning o'sish tezligi bir – ikki tartibga kamayib ketadi.

Kristallning sirtida joylashgan kirishmalarning yirik harakat siz zarrachalari harakat lanayotgan zina bilan uchrashib, uni mahkamlashi mumkin, ya'ni uning harakatlanishini to'xtatadi.

Gaz fazasidan o'sayotgan kristallning sirtidagi kirishmalarning yuqori konsentrasiyalarida suyuq fazali mikrotomchi hosil bo'lishi mumkin va buning natijasida shu joydagi kristallning o'sish tezligi gaz – kristall o'sish mexnizmidan gaz – suyuqlik– kristall o'sish mexanizmiga o'tishi hisobiga bir necha tartibga oshib ketadi. Bunday jarayonga sur'ma kirishmasi ishtirokidagi germaniy kristallining gaz fazasidan yoki kremniy kristallining oltin kirishmasi ishtirokidagi o'sishi misol bo'ladi.

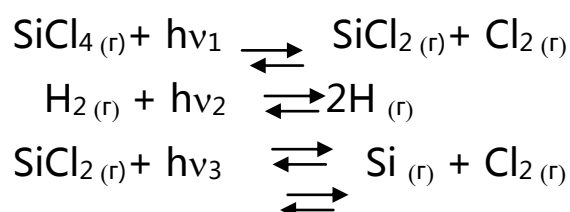
2.10.4. Kristallarning o'sish jarayonlarini tezlashtirishning zamonoviy usullari

Har xil tashqi ta'sirlar yordamida kristallarning o'sish jarayonlarini anchaga tezlashtirish, ularning strukturalarining mukammallik darajasini oshirish, kristallanish temperaturasini kamaytirish va legirlash jarayonlarini boshqarish mumkin.

O'sayotgan kristallni elektromagnit nurlar bilan nurlantirib va unga elektr yoki akustik maydonlar ta'sir ettirib o'sish jarayonlarini stimullash mumkin, deb hisoblanadi.

Elektromagnit nurlar ta'sirida oziqlantirilayotgan muhitning molekulari uyg'ongan (aktivlashgan) holatga o'tishi yoki parchalanishi (fotoliz) mumkin. Gaz fazasidan o'stirilayotgan kremniy kristallarini to'lqin uzunligining diapozoni $\lambda = 230 \div 370$ nm bo'lgan ul'trabinafsha nurlar bilan nurlantirilsa jarayonning haroratini pasaytirish, o'stirilayotgan kristall strukturasi mukammalligini yaxshilash va kristall o'sish tezligini ikki marta oshirish imkoniyatini beradi. Ÿsish jarayonlariga nurlantirishning sezilarli ta'siri nurlanishning solishtirma quvvati $1 - 10 \text{ Vt/sm}^2$ atrofida bo'lganda kuzatiladi.

Nurlanishning to'lqin uzunliklarini tanlab butun tizimning yoki alohida molekulaning, yoki alohida qismning, yoki molekula bog'ining tebranish chastotalari nurlanish chastotasi bilan rezonans holatda bo'lganda ularga se-lektiv ta'sir etish mumkin. Ayniqsa yorug'likning monoxromatik manbalaridan (masalan, lazerlardan) foydalanilganda nurlantirish effektivligini oshirish, jarayon yoki reaksiyalarning alohida bosqichlariga nisbatan ma'lum bir tanlash imkoniyatigya ega bo'lamiz. Masalan, $\text{SiCl}_4 - \text{H}_2$ tizimida kremniy kristallarini o'stirishda energiyaning $h\nu$ kvantlari ta'sirida quyidagicha fotokimyoviy reaksiyalar bo'lishi mumkin:



Boshlang'ich molekularning bog'lanish energiyasi har xil bo'lganligi uchun u yoki bu reaksiyaning boshlanishiga turtki bo'ladigan nurlanishning to'lqin uzunlik diapazonlari ham har xil bo'ladi. Bu tizimda o'stirilayotgan kremniy kristali strukturasi

mukammalligi esa fotokimyoviy reaksiyada hosil bo'ladigan atomar vodorodning ta'siri natijasidadir.

Bundan tashqari elektromagnit nurlanish, ayniqsa yarim o'tkazgichlarda o'sish sirtini uyg'otadi va fotoadsorbsiya hamda fotokatalizning ta'siri natijasida o'sish jarayonining fazoviy tanglanishiga erishish mumkin, ya'ni nurlangan joyda kristallning lokal o'sishi ta'minlanadi. Bu mikroelektronikada katta ahamiyatga ega.

3 - bob. Mikroelektronikada asosiy yarim o'tkazgichli va dielektrikli materiallarni hosil qilish texnologiyasi

3.1. Qattiq fazadan kristallarni o'stirish

Qattiq fazadan kristallarning o'sishini ta'minlaydigan qattiq fazali o'zgartirish jarayonlari kristall panjara simmetriyasini o'zgartmasdan (rekristallash) yoki boshqa simmetriyali panjaraga ega bo'lgan yangi struktura (qayta kristallash) hosil qilish bilan borishi mumkin. Qattiq fazali o'zgartirishning har xil turdagi jarayonlari ko'pincha qayta kristallash (perekristallizasiya) degan umumiy tushuncha bilan birlashtiriladi.

Qattiq fazadan monokristall va epitaksial qatlamlar olishning asosiy usullari uch turga bo'linadi:

1. Qattiq fazada deformasiyani kuydirish (otjig) va «spekanie» qilish yo'li bilan rekristallash;
2. Polimorfli o'zgartirishlarda qaytakristallash;
3. Amorf holatdan va o'ta to'yingan qattiq qorishmadan qayta-kristallash.

Kristall o'stirishning qattiq fazali usullarining afzalliklari quyidagicha: jarayonlarni materiallarning erish temperaturasidan past

temperaturada o'tkazish imkoniyati, buning natijasida kristallarni olish texnologiyasi soddalashadi, ayniqsa eriganda parchalanib ketadigan kimyoviy birikmalar bo'lsa; kerakli profilli kristallarni olish soddalashadi, chunki o'zayotgan kristallning shakli o'sish jarayoni boshlangungacha oldindan berib qo'yiladi; o'stirish temperaturasining nisbatan kichikligi, ya'ni unga mos holda diffuziya koeffisientining kichikligi sababli o'stirilayotgan kristallda, ayniqsa yupqa monokristall qatlam o'stirilayotganda, kirishmalarning taqsimoti ham qatlamda, ham taglikda boshlang'ich materialdagiday o'zgarmasdan saqlanadi.

Kristall o'stirishning qattiq fazali usullarining kamchiliklariga qattiq fazali kristallanishning potensial markazlari zichligining yuqoriligi, murtak hosil bo'lishni boshqarishning qiyinligi va shu sababli nisbatan katta o'lchamli monokristallar olishning murakkabligi kabilar kiradi. Mana shuning uchun ham yirik monokristallar hosil qilishda qattiq fazali usullar kam qo'llaniladi. Faqat amorf holatdan va o'ta to'yingan qattiq qorishmalardan qaytakristallash usullari yarim o'tkazgichli va mikroelektron asboblari texnologiyasida yupqa epitaksial qatlamlar olishda keng ishlatilmoqda.

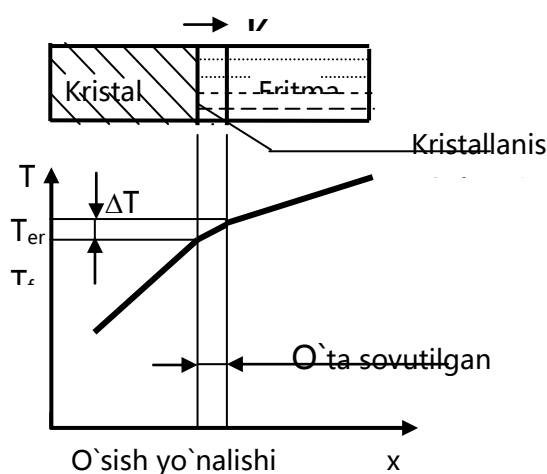
3.2. Suyuq fazadan kristallarni o'stirish

Suyuq fazadan monokristallar o'stirishning barcha texnologik usullarini ikkita guruhga ajratish mumkin: o'z xususiy eritmasidan va qorishmasidan.

Eritmadan kristallar o'stirish. Eritmadan kristallar o'stirish jarayoni sanoatda eng ko'p tarqalgan, chunki bunda unumdorlik boshqa jarayonlarga qaraganda ancha yuqoridir. Ayniqsa bir komponentli eritmalardan, ya'ni chet kirishmalar bo'lmagan (bo'lsa ham kichik miqdorda) tizimlardan kristallar o'stirish tezligi boshqa usullarga qaraganda 100 martadan ortiq kattadir.

Kongruent eriydigan, ya'ni erigan holatda kristall tarkibi bilan bir xil bo'lgan materiallar hamda erish temperaturasida bug' bosimlari kichik bo'lgan materiallar uchun eritmadan o'stirish jarayoni nisbatan sodda jarayon hisoblanadi. Kongruent erimaydigan materiallar uchun o'stirish usuli va jarayonni o'tkazish uchun kerak bo'ladigan uskunalar murakkablashadi.

Eritmadan monokristallar o'stirishda har xil usullardan foydalaniladi. Bu usullarning hammasi asosida eritmani yo'nalishli kristallash yotadi. Bunda eritmada ΔT o'ta sovutilish hosil qilinganda kristallning paydo bo'lishi va o'sishi bir faza chegarasida amalga oshadi hamda issiqlik kristallanish frontidan bitta yo'nalishda olib ketiladi (3.1-rasm). Bu esa eritmani bitta monokristall holda



3.1-rasm. Kristallni eritmadan yo'nalishli kristallash bilan

kristallash imkoniyatini beradi.

Yo'nalishli kristallash usullarini uchta guruhga bo'lish mumkin:

1. Bu guruhga kiradigan usullarda boshlang'ich mahsulotning (zagotovka-ning) hammasi eritiladi va bir tomondan kristallanadi. Bu usullar *normal yo'nalishli kristallash usullari* deyiladi;

Ikkinchi guruhga eritilgan boshlang'ich mahsulotdan cho'zib tortish yo'li bilan monokristall o'stirish usullari kiradi. Bu usullar *eritmadan kristal-larni tortib o'stirish usullari* deyiladi;

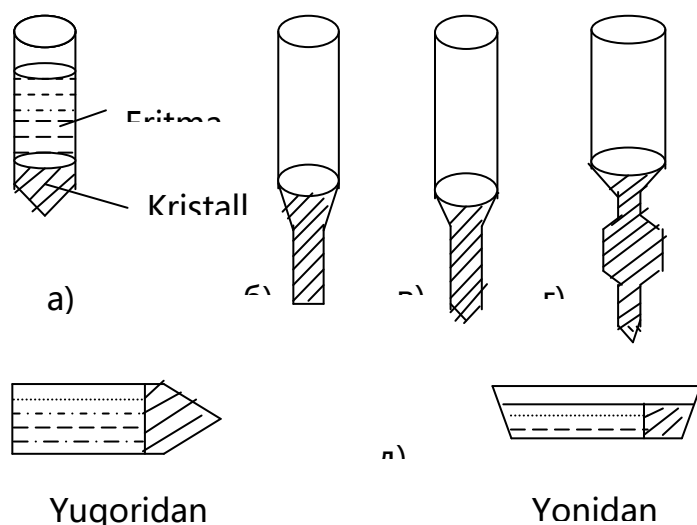
Uchinchi guruhga har bir vaqt mobaynida boshlang'ich mahsulotning faqat uncha katta bo'lmagan bir qismi (zonasi) eritiladigan va kristallanadigan usullar kiradi. Bu usullar *zonali eritish* yoki *zonali qaytakristallash usullari* deyiladi.

Monokristall oʻstirishning bu guruhlariga taaʼluqli boʻlgan eng asosiy usullarini koʻrib chiqamiz.

3.2.1. Eritmalarni normal yoʻnalishli kristallash usullari

Bu usullarning hammasi uchun umumiy boʻlgan narsa oʻsish jarayoni davomida oʻsayotgan kristallning eritma turgan konteyner (tigelʼ) devorlari bilan kontaktda boʻlishidir. Bu usullarda kristallanish frontidagi oʻtasovutilish temperaturaviy gradientli issiqlik maydonini hosil qilayotgan qizdirgichga nisbatan eritmali tigelni siljitib yoki qizdirgichni eritmali tigelga nisbatan harakatlantirib hosil qilinadi.

Normal yoʻnalishli kristallash jarayonini maxsus oʻstirmasiz (zatravkasiz) amalga oshirish mumkin. Bu usulda kristallanadigan materialning hammasi jarayonning boshida erigan holatda boʻladi. Sovutilish jarayonida kristallning erish temperaturasidan past boʻlgan tigelning sohalarida bir nechta kristallanish markazlari hosil boʻladi. Kristallni faqat bitta kristallanish markazidan oʻsish ehtimolini oshirish uchun maxsus har xil konstruksiyali tigellardan foydalaniladi (3.2-rasm). Bunda tigellar issiqlik maydonida vertikal (3.2-rasm, a-g; Brijmen usuli), va gorizontal (3.2-rasm, d) joylashishi mumkin.



3.2-rasm. Normal yoʻnalishli kristallanish usuli bilan kristallar oʻstirish uchun qoʻllaniladigan har

Normal yoʻnalishli kristallash jarayonini oʻtkazish uchun quyidagi aslahalar kerak boʻladi: materiali eritmaga va kristallanish jarayoni oʻtkazila-yotgan atmosfera gaziga kim-yoviy chidamli, berilgan shaklli tigel; kerakli issiqlik maydoni-ni

hosil qilib beradigan pech`; pechning temperaturasi bosh-qaruvchi va tigel yoki qizdir-gichni mexanik harakatlantiruv-chi tizimlar.

Tigelning materiali erit-ma bilan xo'llanmasligi kerak, chunki shu holdagina o'stiril-gan kristallni tigeldan uni sindirmasdan chiqarib olish, hamda qoldiq deformasiya va nuqsonlarni minimumga keltirish mumkin. Bundan tashqari tigel kerakli termik va mexanik mustahkamlikka ega bo'lishi kerak. Tigellar tayyorlash uchun ko'pincha kvartsl shisha, alyuminiy oksidi, grafit, platina, berilliy oksidi, magniy oksidi, sirkoniy dioksidi, toriy dioksidi va boshqa materiallardan foydalaniladi.

Agar tigel materialini ho'llaydigan moddalardan kristall o'stirilayotgan bo'lsa, unda juda ham yupqa devorli, masalan platinali konteyner tayyorlanadi. Bunday konteynerlar sovutilganda oson deformasiyalanadi va o'stirilayotgan kristallarda katta mexanik kuchlanishlar hosil qilmaydi.

Normal yo'nalishli kristallash usuli bilan bir qator yarim o'tkazgichli va dielektrik materiallarning yirik monokristallari hosil qilinadi. Al_2O_3 korundning kristallari molibdenli tigelda 2037°C temperatura va 10^{-1} Pa bosimli vakuumda 10 mm/soat tezlik bilan o'stiriladi. Hozirgi vaqtda vertikal yo'nalishli kristallash usuli (Brijmen usuli) bilan murtakdan foydalanib diametri 200 mm va uzunligi 300 mm bo'lgan kristallar o'stirilmoqda. Bunday kristallarda dislokasiyalarning zichligi 10^2 sm^{-2} dan oshmaydi. Gorizontaal yo'nalishli kristallash usuli (asosan X.S.Bagdasarov tomonidan rivojlantirilgan) bilan qalinligi 30 mm va yuzasi $300 \times 300 \text{ mm}^2$ bo'lgan korundning monokristalli plastinalari hosil qilinmoqda. Kristallari normal yo'nalishli kristallash usuli bilan o'stiriladigan ba'zi bir materiallarga misollar quyidagi 2.1 - jadvalda keltirilgan.

2.1-jadval

Kristallning	Erish tempera-	O'stirish tezligi,	Tigelning
--------------	----------------	--------------------	-----------

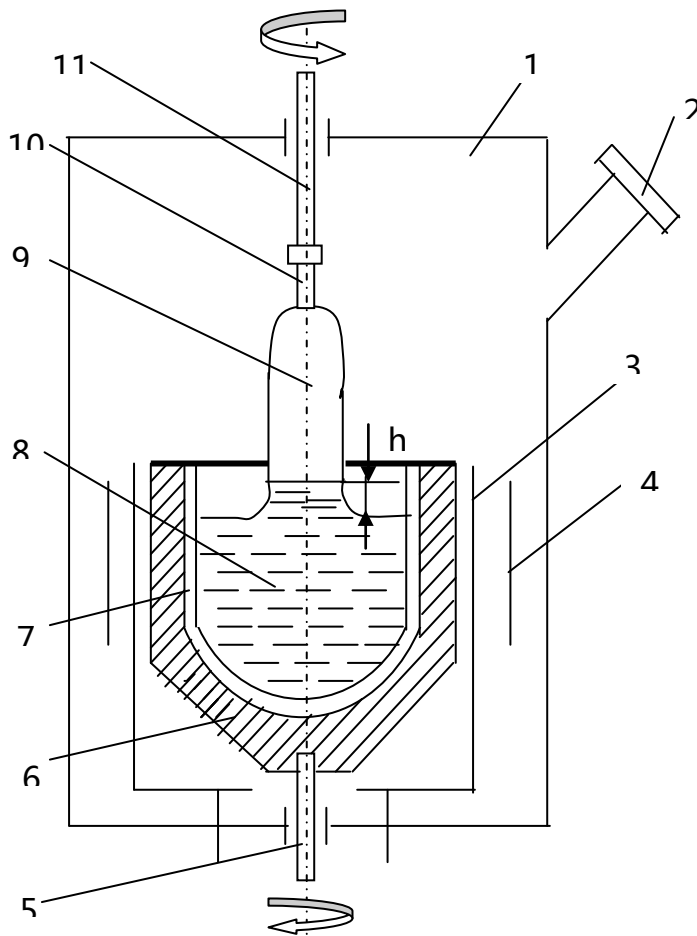
materiali	turasi, °S	mm/soat	materiali
Al_2O_3	2037	10	Molibden
$\text{V}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	1975	2	Molibden
$\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	1825	2	Iridiy
FeAl_2O_4	1790	10	Iridiy
VFeO_3	1685	2	Platina
CaF_2	1392	1	Grafit
LiF	870	3	Platina

Ko'rib o'tilgan usulning asosiy kamchiligi o'stirilayotgan kristall bilan tigelning chiziqli kengayish temperaturaviy koeffisientlarining har xilligi natijasida mukammal kristallar olishning qiyinligidir.

3.2.2. Kristallarni eritmadan tortib o'stirish usullari

Bu usullar hozirgi vaqtda sanoatda nazoratlanadigan va qaytariladi-gan xossali yarim o'tkazgichli va dielektrik materiallarning yirik mono-kristallarini ishlab chiqarishda eng ko'p tarqalgan usullardan hisoblanadi. Bu usullarning xar xil modifikatsiyalari ko'p bo'lib bularning hammasi Choxral'skiy usuli nomi bilan ataladi. Kristallarni eritmadan tortib o'stirish usulining prinsipi birinchi marta 1916 yilda Choxral'skiy tomonidan taklif qilingan edi. Bu usulning mohiyati quyidagicha. Boshlang'ich material (kukun yoki polikristall bo'lagi ko'rinishida) yaxshilab tozalangandan so'ng tigelga solinadi va eritilish holatigacha qizdiriladi.

Bu jarayon germetik kamerada vakuumda yoki neytral (inert), oksidlovchi yoki qaytaruvchi atmosferada o'tkaziladi. Keyin o'lchamlari



3.3-rasm. Eritmadan tortish usuli bilan yarim o'tkazgichli materiallarning monokristallarini o'stiruvchi qurilmaning sxemasi:

1 - ishchi kamera; 2 – ko'rish oynasi; 3 – qizdirgich; 4 – ekran; 5,11 – tigel va o'stirmani

bir necha millimetr bo'lgan o'stirma (zatravka) sovutiladigan kristall ushlagichga o'rnatilib va kerakli kristallografik yo'nalishda orientasiyalanib eritmaga botiriladi. O'stirmaning botirilgan uchi qisman erigandan keyin va kerakli temperatura rejimiga chiqilgandan so'ng yuqoriga qarab shunday tezlikda tortiladiki, bunda eritmaning kristallanishi o'stirma kristalidan boshlanishi kerak. Kristallning diametri tortish tezligini va eritma temperaturasini tanlab olish bilan boshqariladi. Eritmadan tortish usuli bilan kristall

o'stirish sxemasi 3.3 -rasmda keltirilgan.

Eritma – o'stirmaning bo'linish chegarasi eritma sirtidan yuqorida joylashgan bo'ladi (3.3-rasm). Uning balandligi h esa eritmaning qizdirilganligiga va o'stirmadan issiqlik olib ketilish sharoitiga bog'liq bo'ladi. Eritmaning silindrik ustuni balandligini uning og'irligi bilan bo'li-nish chegarasidagi sirt taranglik kuchini tenglashtirib baholash mumkin:

$$2 \pi r \gamma = h \rho_s \pi r^2 g, \quad (3.1)$$

bu erda r - eritma ustunining radiusi; γ - eritmaning sirt tarangligi; h – eritma ustunining balandligi (odatda 2 –5 mm atrofida bo`ladi);  $\rho_s$  – eritmaning zichligi;  $g$  – og`irlik kuchi tezlanishi.

Bu usulda eritmani ko`p ham, kam ham qizdirib bo`lmaydi. Chunki eritma kuch-li qizdirilib yuborilsa cho`zish vaqtida ustun uzilib ketadi. Pastroq temperatura-da esa o`stirma atrofida o`ta sovutilgan soha hosil bo`ladi va tortish boshlanmasdan o`stirmada kristall o`sishi boshlanadi. Shu sababli kristall mana shu ikki holatning o`rtasiga tegishli bo`lgan temperaturada tortiladi, chunki bunda o`stirma eritma bilan keraklicha bog`lanadi va tortish davomida uzilib ketmaydi hamda bu temperaturada kristall o`sishi kuzatilmaydi.

Bu bosqichda asosiy rol jarayonning issiqlik sharoitlariga taalluqli bo`lib, ular kristallanish frontining shakliga bog`liq bo`ladigan kristall va eritmadagi temperatura gradientini, kristallanish fronti yaqinidagi eritmaning o`ta sovutilgan sohasining o`lchamlarini, kristallning diametri va o`sish tezligini, undagi termik kuchlanish va xokazolarni aniqlaydi. Bu jarayondagi issiqlik uzatilishi qizdirgichdan tigelga kelayotgan issiqlik oqimi, hamda eritma va kristalldan olib ketilayotgan issiqlik oqimlarining yig`indilaridan tashkil topadi. Bu oqimlarning o`zaro nisbati o`stirilayotgan monokristalldagi va eritmadagi izoterma shakli va temperatura gradientini aniqlaydi. Issiqlik uzatish jarayonlariga o`sish kamerasidagi atmosferaning xarakteri sezilarli ta`sir ko`rsatadi. Vakuumda kristall o`stirilganda issiqlik uzatilishi faqat nurlanish yo`li bilan amalga oshadi. Gazli muhitda esa issiqlik uzatishda asosiy rol ni konveksiyali jarayonlar o`ynaydi. Bu holatda issiqlik uzatilishining intensivligi gazning bosimi va uning issiqlik sig`imini oshishi bilan ortadi.

Temperatura gradienti ta`sirida o`sayotgan monokristallda termik kuchlanishlar hosil bo`ladi va buning natijasida dislokasiyalar paydo

boʻladi. Temperatura gradientining kamayishi dislokasiyalar hosil boʻlishini kamaytiradi va kristallning oʻsish tezligini oshiradi.

Oʻsayotgan kristalldan olib ketilayotgan issiqlik oqimi eritmadan kelayotgan issiqlik oqimi va boʻlinish chegarasida kristallanish tufayli ajralayotgan issiqlik miqdori yigʻindilaridan tashkil topadi. Eritmadan kelayotgan issiqlik oqimi Q_E eritmadagi temperatura gradientiga proporsional boʻladi; kristallanish issiqligi Q_K kristall massasining oʻsish tezligiga (kristallning chiziqli oʻsish tezligi v ni koʻndalang kesim yuzasi $S = \pi d^2/4$ va kristall zichligi ρ ga koʻpaytmasiga teng) va kristallanishning solishtirma issiqligi L ga proporsional. Kristall oʻsishining mumkin boʻlgan maksimal tezligi unda ajralib chiqayotgan issiqlik Q_0 ning olib ketilish tezligi bilan aniqlanadi. Issiqlik balansi sharti

$$Q_0 = (Q_E + Q_K). \quad Q_K = (\pi d^2/4)v\rho L$$

larni eʼtiborga olsak, unda

$$v = (4/\pi d^2) \cdot (Q_0 - Q_E)/\rho L, \quad (3.2)$$

$$d = 2((Q_0 - Q_E)/\pi v\rho L)^{1/2} \quad (3.3)$$

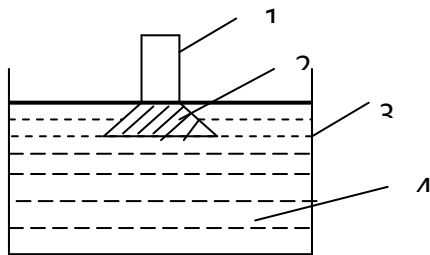
larni hosil qilamiz.

Demak kristallning oʻsish tezligini oshirish uchun eritmadagi temperatura gradientini minimumga keltirish, yaʼni undan olib ketilayotgan Q_E issiqlikni kamaytirish kerak ekan. Boʻlinish fazasidan uzatilayotgan Q_0 issiqlikning kattaligi oʻzgarmas boʻlganda oʻsayotgan kristallning diametrini oshirish uchun oʻsish tezligini kamaytirish kerak (Q_E bilan aniqlanadigan eritmaning temperaturasi oʻzgarmas boʻlganda) yoki eritmaning temperaturasi pasaytirish kerak (tortish tezligi oʻzgarmas boʻlganda). Lekin amalda kristallning diametri eritmaning temperaturasi oʻzgartirib boshqariladi. Oʻsish sharoitini stabillash uchun zamonaviy qurilmalar qizdirgichning temperaturasi ushlab

turadigan, o' sayotgan quymaning diametrini, tigel va kristalni ko'tarish va aylantirishni uzluksiz nazorat qilib turadigan avtomatik tizimlar bilan ta'minlangan. Bu tizimlar EHM orqali boshqariladi.

Kristalni o'stirish jarayoni uni eritmadan uzish bilan yakunlanadi.

Kiropulos usuli. Eritmadan kristalni tortib o'stirish usuliga yaqin usullardan biri Kiropulos usuli hisoblanadi (3.4-rasm).



3.4-rasm. Kiropulos usuli bilan kristallar o'stirish sxemasi:

1 - o'stirma; 2 - o'sayotgan

Bu usulning farqi shundaki, bunda o'stirma eritmaga tushirilgandan keyin tortilmaydi va unda kristallning o'sishi moddaning erish temperaturasi mos keluvchi izoterma hisobiga bo'lib, u eritma ichkarisiga siljib boradi. Buni kristall ushlagich orqali o'stirmani sovutish bilan eritmaning

temperaturasi pasaytirib amalga oshiriladi. Bu usul yordamida ko'ndalang kesimi diametri balandlikka qaraganda katta bo'lgan kristallar o'stiriladi.

Kristallarni tortib o'stirish usullarining ustunligi shundaki, bunda kristallar fazoda erkin o'sadi, tashqaridan mexanik ta'sir bo'lmaydi, hamda kristallning o'lchamlarini oson boshqarish mumkin.

1990 yilda butun dunyoda 2000 t kremniy tortish usuli bilan o'stirilgan. Bu esa o'stirilgan hamma kremniyning 90-95% ni tashkil etadi. Ularning maksimal gabaritlari: diametri $\varnothing 150-300$ mm ga, uzunliklari $L=1,5-2$ m ga etdi va yildan yilga oshib bormoqda hamda borgan sari o'stirilayotgan kristallarning strukturalari mukammallashmoqda. Masalan, yuqorida o'lchamlari keltirilgan kristallar amalda dislokatsiyasiz o'stirilmoqda. Kristall o'stiriladigan qurilmalar quvvat va temperaturani yuqori aniqlikda boshqaradigan tizimlar bilan ta'minlanmoqda. Bunday tizimlar yordamida 1500°C gacha

qizdirishda temperaturani $\pm 0,1$ °C aniqlikkacha ushlab turish mumkin.

Hozirgi vaqtda eritmadan tortish usuli bilan uchuvchan komponent bug'ining bosimi uncha yuqori bo'lmagan ko'pchilik yarim o'tkazgichli materiallarning monokristallari o'stirilmoqda (masalan, A^{III}V^V guruhidagi yarim o'tkazgichli birikmalarning nitridlari kabi).

Monokristallari eritmadan tortish usuli bilan o'stiriladigan dielektrik materiallar 3.2- jadvalda keltirilgan.

3.2 – jadval

№	Material	Erish temperaturasi, °S	O'sish tezligi, mm/ soat *	Tigelning materiali
1	MgAl ₂ O ₄	2100	6	Iridiy
2	V ₃ Al ₅ O ₁₂	1975	2	Iridiy
3	LiTaO ₃	1650	10	Iridiy
4	CaWO ₄	1550	10	Rodiy
5	MnFe ₂ O ₄	1500	5	Platina
6	NaBa ₂ Nb ₅ O ₁₅	1450	5	Platina
7	Sr _{0.75} Ba _{0.25} Nb ₂ O ₆	1406	5	Platina
8	LiNbO ₃	1238	5	Platina
9	ZnWO ₄	1200	10	Platina
10	BaClF	1008	8	Platina
11	Bi ₁₂ SiO ₂₀	900	5	Platina
12	KCl	770	5	Platina yoki farfor

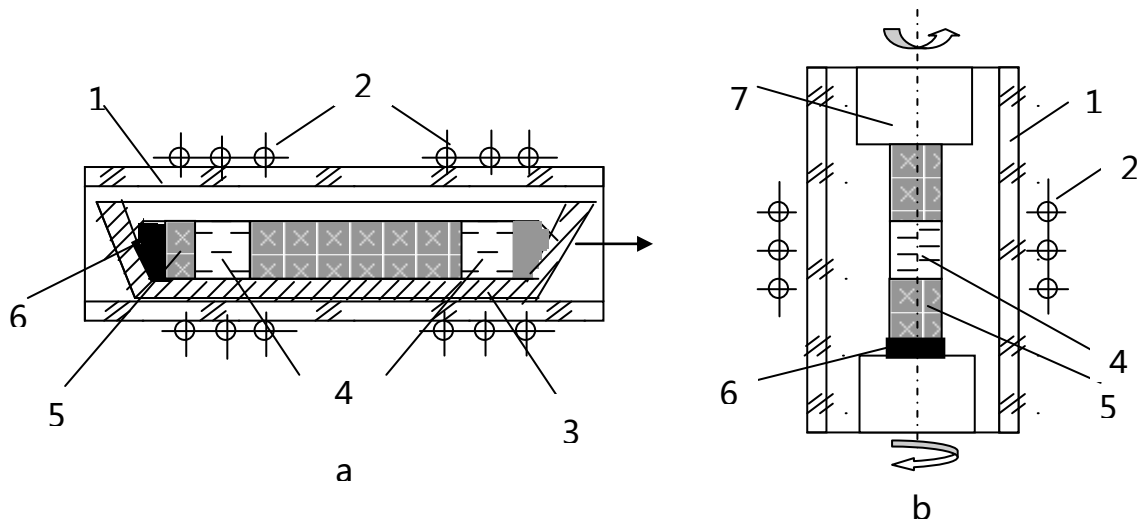
* O'sish tezligi diametri 20 mm bo'lgan kristallar uchun keltirilgan, o'stirilayotgan kristallning diametri kattalashgan sari tortish tezligi kamayadi

3.2.3. Zonali eritish usullari

Zonali eritish usullaridan materiallarni o'ta chuqur tozalash bilan bir qatorda yarim o'tkazgich va dielektrik monokristallarini o'stirish uchun ham foydalanish mumkin. Bu usulning ikki xil varianti mavjud:

1) *Gorizontal zonalni eritish usuli* (3.5, a - rasm). Bu usulda kristallanayotgan material tigelga joylashtiriladi. Bunda tigel materialiga ham normal yo'nalishli kristallash usulidagi tigelga qo'yiladigan talablar qo'yiladi.

Zonali eritish usullari bilan kristallar o'stirishda tigelning bir chekkasida joylashtirilgan o'stirmadan foydalaniladi. Jarayonning boshla-nishida murtak bilan boshlang'ich material chegarasida eritilgan zona xosil qilinadi. Bunda o'stirmaning boshlang'ich materialga tegib turgan qismi eritiladi. Undan keyin eritilgan zona sekin astalik bilan o'stirmadan boshlab boshlang'ich materialning bir boshidan oxiri tomon siljitib boriladi. Buning natijasida boshlang'ich materialning monokristallga aylanib o'sishi ta'minlanadi. Zonali eritish bilan kristallash usulining ustunligi tigeldan foydalanmasdan o'stirish imkoniyati bo'lib, bu vertikal tigelsiz zonalni eritish usulidir.



3.5-rasm. Yarim o'tkazgichli materiallarni zonalni eritib tozalash qurilmasining sxemasi:

a – tigelli gorizontal zonalni eritish, b – tigelsiz vertikal zonalni eritish;

2) *Vertikal tigelsiz zonalni eritish usuli (ZEU)* (3.5, b - rasm).

Vertikal tigelsiz ZEUda (suzuvchi zona usuli) eritma tigel materiallari bilan ifloslanishdan holi bo`ladi, hamda tigel devorlari tomonidan o`sayotgan kristallga ta`sir qiladigan mexanik kuchlanish bo`lmaganligi uchun nuqsonlar hosil bo`lmaydi. Suzuvchi zona usuli yarim o`tkazgich va dielektrlarning o`ta toza monokristallarini o`stirishda, hamda erish temperaturasi va erigan holatda kimyoviy aktivligi yuqori bo`lgan materiallarni o`stirishda qo`llaniladi.

Boshlang`ich materialning solishtirma elektr qarshiligiga bog`liq holda erigan zona yuqori chastotali qizdirgich, elektron nurli qizdirgich, fokuslangan nurlar energiyasi kabi manbalar orqali shakllanadi. Ko`proq eritmaning samarali aralashishini ta`minlaydigan yuqori chastotali qizdirgichdan foydalaniladi.

Namuna bo`ylab ertilgan zonani siljitish uchun namuni qizdirish manbaiga nisbatan yoki qizdirish manbai namunaga nisbatan siljiriladi.

Yuqorgi va pastki kristall ushlagichlar qarama qarshi yo`nalishlarda aylantiriladi. Buning natijasida eritma yaxshi aralashadi va kristall silindr shaklida o`sadi.

Tigel`siz ZEUda erigan zona sirt taranglik kuchlari yordamida ushlab turiladi. Uning shakli gidrostatik bosim va eritmaning sirt taranglik kuchlari nisbatlariga bog`liq bo`ladi. Stabil holatdagi erigan zonaning maksimal balandligi eritma sirt tarangligining uning zichligiga nisbati qancha katta bo`lsa, shuncha katta bo`ladi.

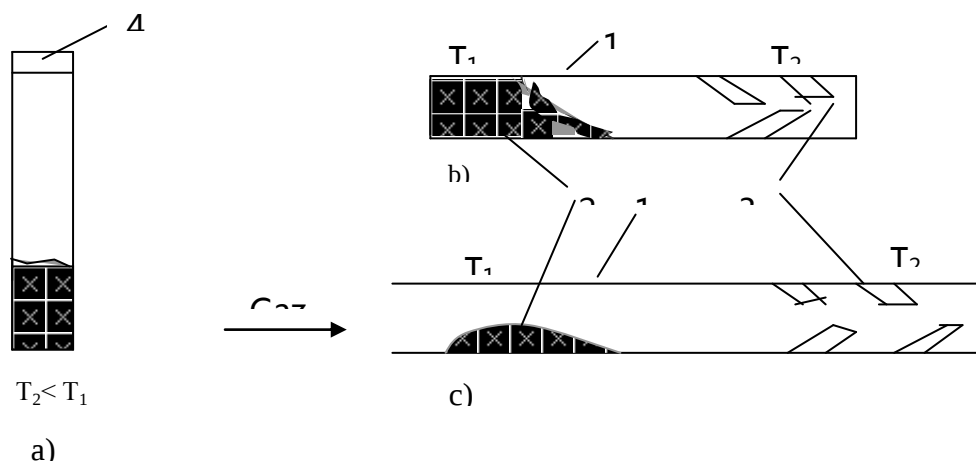
3.3. Gaz fazasidan kristallar o`stirish

Gaz fazasidan kristallar bir necha usullar yordamida o`stiriladi. Bu usullarni ikkita guruhga birlashtirish mumkin: a) fizik kondensasiyaga asoslangan usullar; b) kimyoviy reaksiya ishtirok etadigan usullar.

Birinchi guruh usullaridan eng asosiysi sublimasiya-kondensasiya jarayoniga asoslangan usuldir.

Ikkinchi guruh esa gazsimon birikmalarning kristallanish zonasida ajralishi (yoki qaytarilishi) natijasida kimyoviy sintez va kimyoviy transport usullariga asoslangan.

Gaz fazali usullar yordamida eng kerakli elektron texnika materiallarining monokristallari, birinchi navbatda $A^{IV}V^{VI}$, $A^{IV}V^{IV}$, SiC kabi birikmalar hosil qilinadi.



3.6-rasm. SKU yordamida gazli fazadan kristall o'tirish:

a, b – berk tizimlar; c – oqar tizim.

1 - konteyner; 2 - qaynayotgan modda (shisha); 3 - qaynayotgan modda.

Gaz fazasidan kristallar o'tirish nisbatan past temperaturalarda, materialning erish temperaturasidan ancha past temperaturalarda o'tkaziladi.

Sublimasiya - kondensasiya usuli (SKU) bilan erish temperaturasidan past temperaturalarda kerakli yuqori bug' bosimiga ega bo'lgan moddalarning monokristalli o'tiriladi. Bu jarayonlar yo berk (ba'zi hollarda kvaziberk) yoki oqar tizimlarda o'tkaziladi (3.6-rasm).

Berk tizimni eng oson holda kavsharlangan kvarsli ampulada hosil qilish mumkin (3.6-rasm: a, b). Qiyin eruvchan moddalar uchun korunddan yoki qiyin eruvchan metallardan kavsharlab yasalgan tigellardan foydalaniladi. Agar kristallanayotgan moddaning komponentlari kimyoviy aktiv bo'lsa, unda tigel grafit, shishauglerod

kabi materiallardan nogermetik holda shunday yasaladiki, bunda tigeldan bug'larning chiqib ketishi hisobga olmaydigan darajada bo'ladi. Bunday tizimlar kvaziberk tizimlar deyiladi.

Berk tizimlarda massa uzatish gazli muhitga bog'liq holda molekulyar oqim (vakuumda) hamda molekulyar yoki konvektiv diffuziya holatdarda amalga oshiriladi.

Oqar tizimlarda kristall o'stirishda boshlang'ich moddaning bug'larini kristallanish zonasiga inert gaz oqimi olib keladi (3.6–rasm, c).

Kimyoviy reaksiya bilan boradigan kristallash usullari (kimyoviy transport usullari va kimyoviy birikmalarning parchalanishi yoki tiklanishi) erish temperatu-rasidan past temperaturalarda xususiy bug'ining bosimi kichik bo'lgan moddalarda yoki sublimasiya jarayonida stexiometriyasi buziladigan moddalarda qo'llaniladi.

Gaz fazasidan kristallar o'stirishning hamma usullarida kristallar o'z holicha spontan holda hosil bo'ladigan kristallanish markazlaridan (masalan, reaktor devorlarida) (3.6 – rasm: b, c), yoki o'stirmadan foydalanib (3.6 – rasm, a) o'stirilishi mumkin. Spontan kristallanishda hosil bo'ladigan kristallning o'lchamlari kichik bo'lib, ulardan sanoatda foydalanishning samaradorligi kam bo'ladi.

O'stirma yordamida kristallga bug'larni nazoratli o'tqazish bilan o'lchamlari nisbatan katta (diametri 100 mm gacha) bo'lgan, kimyoviy tarkibini va stexiomertiyasini nazorat qilsa bo'ladigan kristallar o'stirish mumkin.

3.4. Profilli monokristallar hosil qilish

3.4.1. Shakllantirishning asosiy prinsiplari

Yuqorida ko'rsatilgan usullar yordamida kerakli shakldagi va kerakli o'lchamli kristallarni o'stirish mumkin emas. Profillash

yordamida o`stirishga shunday usullar kiradiki, bunday usullar bilan eng rasional geometrik shakldagi kristallar o`stiriladi va ular asosida asboblari yaratiladi. Yarim o`tkazgich va dielektriklarning profillangan kristallari quyidagi maqsadlar uchun o`stiriladi:

1). Materiallardan, ayniqsa qimmatbaho noyob materiallardan asboblarni kesib va jilvirlab tayyorlashda yo`qotishlar kamaytiriladi (mexanik qayta ishlavda yo`qotishlar 70-90% ga boradi);

2). Yuqori qattqlikka ega bo`lgan, ishlav berish qiyin bo`lgan materiallarda mexanik qayta ishlavga sarflanadigan mehnat kamaytiriladi;

3). Ular asosida tayyorlanadigan asboblarga qo`yiladigan talablardan kelib chiqib, kerakli elektrofizik va geometrik parametrli kristallar olish (disklar, membranalar, ipsimon va lentali kristallar, silindrik shakldagi kristallar va sh.k.);

4). Materiallar va ular asosida asboblari ishlab chiqarishni avtomatlashtirish va uzluksiz jarayonlarni ishlab chiqish uchun shart-sharoitni yaratish;

5). Materialni rasional sarf qilish oqibatida va profillangan kristallarda paydo bo`ladigan yangi xossalari asosida uning qo`llaniladigan sohalarni qarab chiqish.

Profillangan kristallarni o`stirish uchun kristallanayotgan moddani shakllantiradigan har xil fizik kimyoviy omillardan foydalaniladi:

- kristallning o`shishini mexanik chegaralash;
- kristallanish tezligining anizotropiyasi;
- kristallanish jarayoniga kapilyar kuch va issiqlik maydonlarining ta`siri.

Profillangan kristallarni qattiq fazali aylanishdan, eritmadan, suyuq qorishmadan va gazli fazadan kristallab o`stirish mumkin.

Gaz va suyuq fazalardan plyonkalarni epitaksial o`stirish monokristall taglikda yupqa kristall qatlamlarning profilli kristallanish jarayoniga misol bo`la oladi.

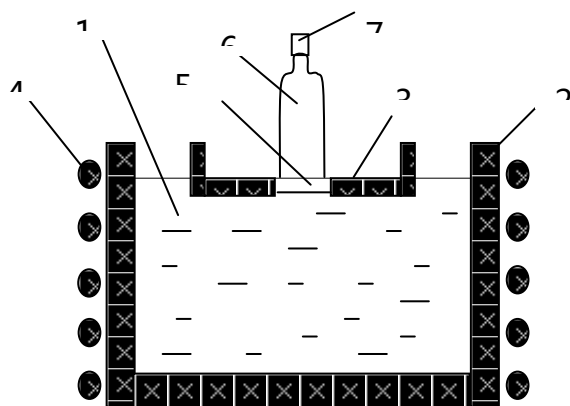
Profillangan kristallarning eritma meniskini shakllantirish yordamida o`stirishni Stepanov tomonidan taklif qilingan. Bu usulda meniskka shakl berish uchun maxsus shakllantiruvchilar yordamidan foydalanildi. Bunday shakllan-tiruvchilar suzgich ko`rinishida bo`lib, eritmaning meniski suzgichdagi teshikdan teparoqda bo`ladi va u eritma bilan xo`llanmaydigan materialdan yasaladi.

Stepanov usuli yordamida lenta, plastina va boshqa shakldagi monokristallarni o`stirish mumkin.

3.4.2. Stepanov usuli bilan profilli kristallar o`stirish texnologiyasining xususiyatlari

Yupqa plastina shaklida kristalni Stepanov usuli bilan o`stirishda foydalaniladigan oddiy qurilmaning sxemasi 3.7-rasmda ko`rsatilgan.

Bu qurilmada shakllantirgich kesilgan tirqishli suzgich ko`rinishida



3.7-rasm. Plastina ko`rinishdagi monokristalni tortib o`stiruvchi qurilmaning sxematik

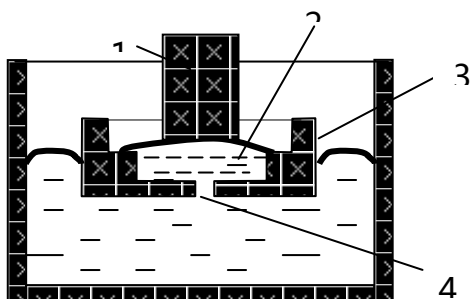
bo`lib, grafitdan tayyorlangan. Tirqish eritma sathidan 8-9 mm pastda joylashgani uchun eritmaning bosim ostida tirkishdan o`tishi ta`minlanadi. Tirqishning shakli va chuqurligi kristallanish jarayonining turg`unligiga kuchli ta`sir qiladi.

Stepanov usulida profillangan kristallarni o`stirish tezligi 1-10 mm/min ni tashkil qilishi mumkin. Bu usulning kerakli xususiyatlaridan

biri o'sayotgan kristallning tirqish devoli bilan kontaktda bo'lmastir. Kristall lentasi bilan tirqish orasidagi ochiqlik tekislik qismida 10-20 mkm, chekkasida esa 50-100 mkm atrofida bo'ladi.

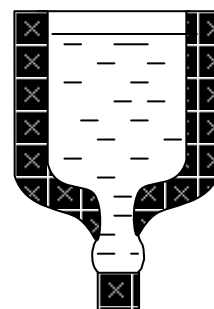
3.8 – rasmda kvarsdan tayyorlangan suzgichning fasonli chuqurchasidan lentali monokristalni o'stirish sxemasi tasvirlangan. Bunda fasonli chuqurchaga eritma kapillyar teshik orqali o'tadi. Bu esa suzgichdagi eritma atomlarining tigelga diffuziyali uzatilish jarayonini yo'q qilish imkoniyatini beradi.

3.9-rasmda tigelning tubidagi tor teshikcha orqali Stepanov usuli bilan yarim o'tkazgichli monokristallar o'stirish sxemasi tasvirlangan.



3.8-rasm. Kapillyar kanalli suzuvchi tigelning fasonli o'yma orqali ma'lum shakldagi monokristal o'stirish qurilmasining sxemasi: 1 - lenta ko'rinibda tartib o'stirilayotgan

Bunda kristallanuvchi tomchi o'sayotgan kristall va tigel o'rtasidagi sirt taranglik kuchlari bilan ushlab turiladi.



3.9-rasm. Tubida tor teshik bo'lgan tigel orqali profillandin monokristall

Stepanov usuli bilan germaniy kristallini o'stirishda shakllantiruvchilar ko'pincha grafitdan tayyorlanadi. Grafit germaniy eritmasi bilan ho'llanmaydi va u yarim o'tkazgich darajasidagi tozalikda bo'lganligi sababli o'sayotgan kristallarni ifloslantirmaydi. Germaniyni profillangan monokristallarini o'stirishda shakl beruvchilar sirtiga qurumning yupqa qatlami surtilgan kvarsdan ham tayyorlanishi mumkin.

Kremniyning profillangan monokristallarini o`stirishda shakl beruvchilar uchun materiallar tanlash ancha murakkab muammodir, chunki kremniy erish temperaturasida yuqori kimyoviy aktivlikka ega bo`ladi. Shu sababli sinab ko`rilgan ko`p materiallarning orasidan faqat nitrit bordan tayyorlangan shakl beruvchilarda qoniqarli natijalarga erishildi. Eni 35 mm gacha va qalinligi 2,5 mm gacha bo`lgan lentasimon kremniy argon atmosferasida yoki vakuumda 2 mm/min tezlik bilan o`stiriladi.

Hozirgi davrda germaniy va sapfirning profillangan monokristallarini o`stirishda eng katta muvaffaqiyatlarga erishildi. Stepanov usuli bilan germaniy va sapfirning monokristallari plastina, kvadrat qirqimli bo`lgan ingichka lentalar, silindr, trubacha va hokazo shakllarda o`stirilmoqda. Ayniqsa sapfirning kristallarini o`stirishda bitta murtakdan shakl beruvchining tirqishidan bir paytning o`zida eni 100 mm bo`lgan ettita plastina o`stirilmoqda. Bu plastinalar mikroelektronika uchun kremniy asosida epitaksial qatlamlar o`stirishda keng qo`llanilmoqda.

3.5. Monokristall o`stirishda texnologik jarayonlarni boshqarish

Kristallarni o`stirish ko`p omilli murakkab jarayon bo`lib, uning parametrlari o`stirilayotgan monokristallning materialiga va o`stirish usuliga bog`liq bo`ladi. O`stirilayotgan kristallning sifati uning kristall strukturasi mukammalligiga, dislokasiyaning borligiga va zichligiga, termoelastik kuchlanishlarga, solishtirma qarshilikning bir hilligiga, kirishmalarning ko`ndalang kesim va uzunlik bo`yicha bir hil taqsimlanganligiga bog`liq bo`ladi. Sifatli monokristall olish uchun texnologik rejimlar mukammal bo`lgan nazorat va boshqaruvchi qurilmalar yordamida aniq ushlab turiladi. Hozirgi davrda

avtomatlashtirilgan boshqarish tizimlarini yaratish maqsadida texnologik jarayonlarni nazorat qilish va boshqarish sohalaridagi eng katta yutuqlar eritmadan kristallarni o`stirish usullari uchun erishilgan.

Monokristallarni hosil qilish usullaridan qat`iy nazar texnologik jarayon va kristall – eritma tizimi parametrlarini nazorat qilish usullari alohida ajratiladi. Kristallarni olish usuliga bog`liq holda texnologik jarayonlarning parametrlariga kristall va tigelning aylanish tezliklari, kristallni tortish tezligi va erigan zonaning o`tishi, qayiqchani tortish tezligi, qizdirgichning va atrof muhitning (kristallash kamerasi-ning ichki hajmi) temperaturasi, kamera devorini va murtakni sovituvchi suvning bosimi va o`tish tezligi, va hokazolar.

Kristall – eritma tizimining parametrlariga eritma va kristallning temperaturasi va ulardagi temperatura gradientlari, konvektiv oqimlar hosil qilayotgan eritmadagi tezliklar maydoni, meniskning shakli va balandligi, eritilgan zonaning balandligi va shakli, kristallanish frontining shakli, o`sayotgan kristallning diametri va shu kabilar kiradi.

O`sayotgan kristallning sifatini boshqarish uchun kristall - eritma tizimidagi parametrlarning nazorati asosiy ahamiyatga ega. O`sayotgan kristallning diametrini nazorat qilishda Stepanov usulidagi shakl beruvchilardan, telekameralardan, rentgen qurilmalardan va tortuvchi moslamalardan foydalaniladi. Meniskning balandligini nazorat qilishda fotopirometr, lazerli lokatsiya kabi usullardan foydalaniladi.

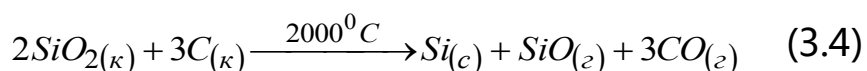
3.6. Asosiy monokristalli materiallar texnologiyasi

3.6.1. Kremniy monokristallini hosil qilish texnologiyasi

Yarim o`tkazgichli kremniy monokristallini hosil qilish texnologiyasi quyidagi asosiy bosqichlardan tashkil topadi: 1) texnik kremniy olish; 2) texnik kremniyni oson qaytariladigan uchuvchan

birikmaga aylantirish; 3) birikmani tozalash va qaytarish hamda undan kremniyning polikristall sterjenlarini hosil qilish; 4) kristallash usuli bilan kremniyni yakuniy tozalash (tigelsiz zonali eritish); 5) legirlangan monokristallarni o`stirish (Choxral`skiy usuli bilan).

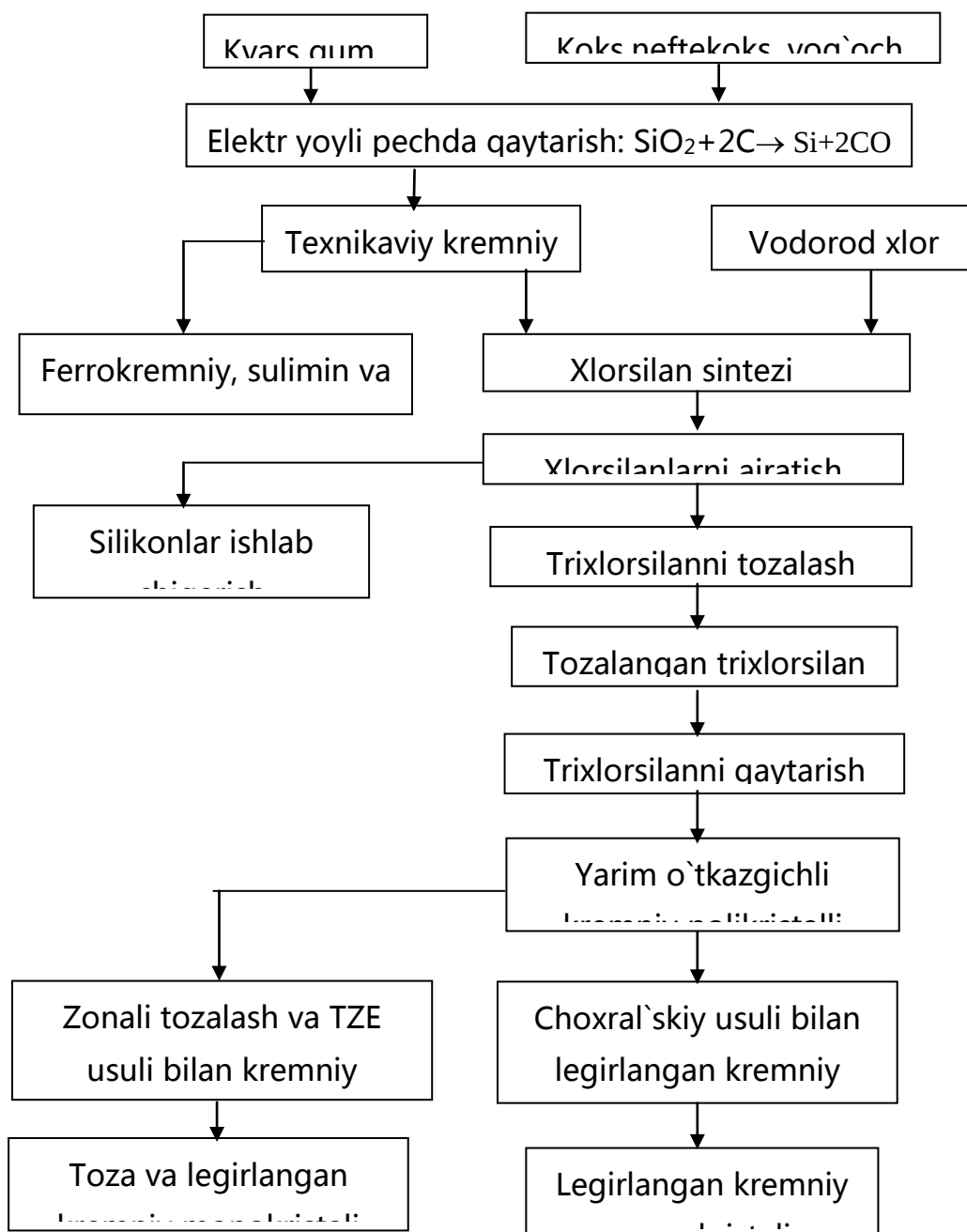
3.10-rasmda kremniy ishlab chiqarish asosiy bosqichlarining sxemasi keltirilgan. Texnik kremniy olish uchun kremniy dioksidi (SiO_2) uglerod (S) bilan qaytariladi. Bu jarayon elektr yoyli pechlarda grafitli elektrodlar yordamida o`tkaziladi. Pech eng toza navli kvars qumi va ko`mir, koks va yog`och payraqasi ko`rinishidagi uglerod aralashmasi bilan to`ldiriladi. Elektr tokining ta`sirida bu aralashma 2000 °C gacha qizdiriladi va natijada umumiy ko`rinishi quyidagicha bo`lgan reaksiya ketadi:



Bunday yo`l bilan hosil qilingan texnik kremniyning tarkibi: 98 ÷ 99 % Si, 1 ÷ 2 % (Fe, Al, B, P, Ca, Cr, Cu, Mg, Mn, Ni, Ti, V va boshqalar) dan iborat bo`ladi.

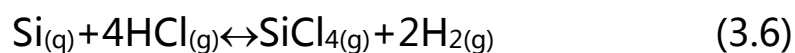
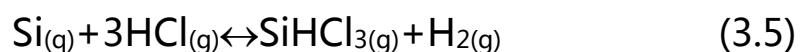
Polikristall kremniy olishning zamonaviy texnologiyasi trixlorsilanni vodorod bilan qaytarilishiga, kremniy tetraxloridini rux bilan qaytarilishiga va monosilanni piroliz qilishga asoslangan. Kremniyning 80% ga yaqini trixlorsilanni (TXS) vodorod bilan qaytarish (tiklash) yo`li bilan olinadi. Bu jarayon quyidagi afzalliklarga ega: TXS hosil qilishning osonligi va tejamkorligi, TXSni tozalashning samaradorligi, kremniyni ajratib olish va o`tqizish tezligining yuqoriligi (kremniy tetraxlorididan foydalanilganda kremniyning ajralishi 15%ni, TXSdan foydalanilganda esa eng kami bilan 30%ni tashkil qiladi), mahsulot tannarxining kamligi.

Trixlorsilan kremniyni gidroxlorlash yo`li bilan hosil qilinadi: bunda texnik kremniy 260÷400°C temperaturada xlorid kislotasi bilan ta`sir ettiriladi.



3.10-rasm. Yarim o'tkazgichli kremniyni ishlab chiqarishning texnologik sxemasi

Kremniyning xlorsilanlarini olish reaksiyalari qaytariluvchan va ekzotermik bo'ladi:



300 °C dan yuqori boʻlgan temperaturada oʻtkazilgan reaksiya mahsulotlarida TXS boʻlmaydi. TXSning chiqish miqdorini oshirish uchun jarayonning temperaturasi kamaytiriladi. Bu esa (3.6) reaksiyaning tezligini anchaga sekinlashtiradi. (3.5) reaksiyaning tezligini oshirish uchun katalizatorlardan (mis, temir, alyuminiy va boshqalar) foydalaniladi. Masalan, boshlangʻich kremniyga 5% gacha mis kiritilsa reaksiya mahsulotlarida 265 °C temperaturada TXSning miqdori 95% ga etadi.

TXSning sintezi «qaynovchi» qatlamli reaktorda olib boriladi. Bunda zarrachalarining oʻlchamlari 0,01 – 1 mm boʻlgan texnik kremniyning kukuni uzluksiz ravishda tepadan berib turiladi.

TXS sintezi jarayonida hosil boʻlgan bugʻsimon aralashma sovutish zonasiga oʻtadi va u bu erda tezda 40-130°S gacha sovutiladi. Natijada har xil kirishmalarning qattiq zarrachalari (temir, alyuminiy va boshqa xloridlar) chang koʻrinishda ajraladi va reaksiyaga kirishmay qolgan kremniy hamda polixloridlar ($\text{Si}_n \text{Cl}_{2n+2}$) bilan birgalikda filʼtrlar yordamida ajratib olinadi. Changdan tozalangandan soʻng bugʻgazli aralashma -70°S da kondensasiya qilinadi. Bunda TXS SiHCl_3 va tetraxlorosilan SiCl_4 (qaynash temperaturalari mos holda 31,8 va 57,2°C) vodoroddan va HCl dan (qaynash temperaturasi 84 °C) ajratiladi. Kondensasiya natijasida olingan aralashma asosan 90 – 95 % gacha TXSdan tashkil topadi. Qolganlari kremniyning tetraxloridi boʻlib, u rektifikasiya usuli yordamida ajratiladi.

Hosil qilingan TXSda katta miqdorda aralashmalar mavjud boʻlib, bulardan tozalash oʻta murakkab jarayondir. Tozalashning rektifikasiya usuli eng samarador usul hisoblanadi, lekin bu usul bilan hamma kirishmalardan tozalab boʻlmaydi. Shu sababli chuqurroq tozalash uchun qoʻshimcha tadbirlardan foydalaniladi. Masalan, kristallizasiya usullari bilan TXSni bor, fosfor, ugleroddan keraklicha tozalash qiyin. Tozalashning effektivligini oshirish uchun bu mikroaralashmalar

uchmaydigan yoki kompleksli birikmalarga aylantiriladi. Bordan tozalash uchun, masalan, TXS bug'lari 120°C da alyuminiy payrahasi orqali o'tkaziladi. Payrahaning sirti borni yutib, TXSni bordan butunlay tozalaydi. Alyuminiydan tashqari kumush, mis yoki sur'madan ham foydalanish mumkin.

Fosfordan tozalash uchun TXS xlor bilan to'yintirilib fosforuchxloridi pentaxloridga aylantiriladi. Qorishmaga alyuminiy xloridi qo'shilganidan so'ng uchmaydigan birikma $\text{PCl}_5\text{-AlCl}_3$ hosil bo'ladi. U esa rektifikatsiya bilan chiqarib yuboriladi.

Tozalangandan so'ng TXSda mikrokirishmalarning qoldiq miqdorlari massa bo'yicha: bor uchun - $3\cdot 10^{-8}$, fosfor uchun - $1\cdot 10^{-7}$, mish'yak uchun - $5\cdot 10^{-10}$, uglerod uchun (uglevodorodlar ko'rinishida) - $5\cdot 10^{-7}\%$ dan oshiq bo'lmasligi kerak.

Namunalarni elektr o'lchashda donorlarning qoldiq miqdori n-turli kremniylarda solishtirma qarshilikning $5000\text{ Om}\cdot\text{sm}$ dan, p-turli kristallarda akseptorlarning qoldiq miqdori esa $8000\text{ Om}\cdot\text{sm}$ dan kam bo'lmasligini ta'minlashi kerak.

Yuqori tozalikdagi kremniyni olish uchun polikristall sterjenlar vakuumda zonali eritish usuli yordamida kristallizasiyali tozalashdan o'tkaziladi.

Kremniy monokristallarini ishlab chiqarish asosan Choxral'skiy usuli bilan (elektron sanoati talabining $80 - 90\%$ ga yaqini) va kamroq miqdorda tigelsiz zonali eritish usuli bilan amalga oshiriladi.

Kremniy monokristallarini Choxral'skiy usuli bilan o'stirish kirishmalardan maxsus tozalangan argon oqimida $\sim 10^4\text{ Pa}$ past bosimda amalga oshiriladi. Past bosimda o'stirilganda kremniy eritmasidan uchuvchan kirishmalarning uchib chiqib ketishi osonlashadi.

Kerakli solishtirma qarshilikli n - yoki p - turli monokristall hosil qilish uchun boshlang'ich polikristall kremniy yoki eritma mos holda

legirlanadi. Qozonga solinadigan polikremniyga mos elementlar (P, B, As, Sb va boshqalar) yoki ularning kremniy bilan qotishmasi kiritiladi. Bu esa legirlashning aniqligini oshiradi.

Choxral'skiy usuli bilan hosil qilinadigan kremniy monokristallarining asosiy qismi integral mikroshemalar ishlab chiqarishda foydalaniladi, ozgina qismi (2 %) quyosh elementlarini tayyorlashga sarf bo'ladi.

Tigelsiz zonali eritish usuli bilan kremniy kristallarini o'stirish ichki diametri boshlang'ich polikristall sterjeni va kristalldan kichik bo'lgan bir o'ramli induktor asosida amalga oshiriladi. Hozirgi zamonaviy tizimlarning deyarli hammasida induktor stasionar holatda bo'ladi, polikristall sterjen va o'sayotgan kristall esa siljiriladi. Tigelsiz zonali eritish usulida kristallarni o'stirish tezligi Choxral'skiy usuliga qaraganda ikki marta katta, lekin texnik qiyinchilik sababli kremniy kristalining diametri (~150 mm) Choxral'skiy usuli bilan olinadigan kristall diametridan kichik bo'ladi.

Tigelsiz zonali eritish usuli bilan olinadigan kremniy monokristallari ishlab chiqarilayotgan kremniy monokristallari umumiy hajmining 10 % ni tashkil qilib, asosan diskret asboblari, ayniqsa katta quvvatli tiristorlar tayyorlash uchun sarflanadi.

3.6.2. Galliy arsenidi monokristallarini hosil qilish texnologiyasi

Texnologik siklning birinchi bosqichida galliy arsenidi – GaAs ning polikristalli galliy va mish'yak komponentlarining qotishmasi holida sintez qilinadi. Bunda galliy eritmasi mish'yak bug'i bilan ta'sir ettiriladi. Ko'pincha arsenid galliyning sintezi natijasida hosil qilinadigan polikristallni monokristallga aylantirish bitta texnologik qurilmada amalga oshiriladi. Mish'yak komponenti oson uchuvchan bo'lgani uchun galliy va mish'yakni bir-biriga himoya qatlami ostida eritilgan

holatda qo`shiladi. Himoyalovchi qatlam quyidagi talablarni qanoatlanti-rishi kerak: GaAs ning erish temperaturasi kimyoviy barqarorlik; GaAs ga qaraganda zichligi kam; GaAs eritmasi bilan aralashmaslik; unda mish`yak bug`larining erimasligi; kristallni o`stirishda monokristallning murtakdan o`sish jarayonini nazorat qilish uchun bu qatlam shiffof bo`lishi. Bu talablarning ko`pchiligiga bor oksidi -  $B_2O_3$  (yumshash temperaturasi  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) asosidagi himoya qatlami javob bera oladi. Biroq  $820\text{ }^{\circ}\text{C}$  da eriydigan mish`yak kuchsiz bo`lsa ham  $B_2O_3$  da eriydi. Bu esa mish`yakning isrof bo`lishiga sabab bo`ladi. Bu isrofni kamaytirish uchun himoya qatlamining ustida inert gazining yuqori bosimi hosil qilinadi.

Kvarsli tigelga Ga va As aralashmasi solinadi. Bunda mish`yak sintez paytida bug`lanish natijasida isrof bo`lishini kompensasiyalash uchun stexiometriyaga nisbatan ortiqcharok qilib olinadi. Aralashma bor oksidi -  $B_2O_3$  bo`lakchalari bilan berkitiladi. Bu bo`lakchalar 600°S da erib, qalinligi 20-40 mm li qatlam hosil qiladi.

Tigel`  $820\text{--}850^{\circ}\text{C}$  temperaturada, yuqori bosim kamerasida (6 MPa), inert gaz atmosferasida qizdiriladi. Buning natijasida mish`yak - As (erish temperaturasi 817°S) va galliy - Ga (erish temperaturasi - 30°C) erib komponentlarning suyuq aralashmasini hosil qiladi va GaAs sintezining ekzotermik reaksiyasi boshlanadi. Bunda hosil bo`lgan temperatura GaAs ning erish nuqtasidan birmuncha yuqoriroq bo`ladi (GaAsning erish temperaturasi - 1238°C). Sintez jarayoni sintez reaksiyasining tugallanishi va eritmaning gomogenlashishini ta`minlaydigan vaqt mobaynida o`tkaziladi.

Eritma sovitilgandan so`ng GaAs ning polikristali hosil bo`ladi va uni Choxral`skiy usuli yordamida monokristallga aylantiriladi.

Sintez jarayonida eritmani ushlab turish vaqti τ eritmaga mish`yakning diffuziyasi bilan chegaralanadi va quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$\tau = 2,3V \lg[(C_s^* - C_s)/(C_s^* - C_s^O)]/(s_e K_{sg}), \quad (3.7)$$

bu erda V - sintez qilinayotgan eritmaning hajmi; C_s^*, C_s^O, C_s - mish`yakning eritmadagi mos holda muvozanatli, boshlang`ich va ayni paytdagi konsentratsiyalari; s_e - eritmaning bug`li faza bilan kontakt yuzasi;  $K_{sg}$  - mish`yakning bug`lanish (ta`sirlashish) koeffitsienti.

Sintez jarayoni tugaganidan so`ng eritma sovutiladi, natijada arsenid galliyning polikristall quymasi hosil bo`ladi

Arsenid galliy monokristallarini hosil qilishning asosiy usuli bo`lgan Choxral`skiy usuli bilan doiraviy qirqim diametri 75 mm bo`lgan dislokasiyasiz arsenid galliy monokristallari hosil qilinadi. Bunda kristallar  $B_2O_3$  himoya qatlami tagidan GaAs polikristali eritmasidan tortib o`stiriladi. Jarayon argon yoki azot atmosferasida $(2\div 6) \cdot 10^6$ Pa gacha bo`lgan bosimda o`tkaziladi. O`stirilayotgan kristallning bir jinsliligini ta`minlash uchun eritmaga vertikal magnit maydoni ta`sir ettiriladi. Kristall hosil qilishdagi umumiy sharoitlar: o`stirish tezligi 3 - 9 mm/soat; kristallni va tigelni aylantirish tezliklari mos holda 6 ayl/minut va 15 - 30 ayl/minut; B_2O_3 qatlamdagi temperatura gradienti 100 - 150 grad/sm.

GaAs asosida integral mikroshemalar ishlab chiqarishda yarim izolyasiyalovchi kristallar hosil qilish amaliy ahamiyatga ega. Buning uchun kristallar o`sish jarayonida taqiqlangan zonada chuqur joylashgan akseptor sathlarini beruvchi xrom bilan  $5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$  gacha legirlanadi hamda salgina mish`yak bilan boyitilgan eritma yoki stexiometriyalik eritmadan toza kristallar o`stiriladi. Bunday o`stirilgan kristallarning solishtirma qarshiligi $10^9 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ ga etadi.

3.7. Nokristall materiallar texnologiyasi

3.7.1. Shishasimon holat va uning xossalari

Kimyoviy birikmalarning har xil organik va noorganik sinflariga tegishli boʻlgan moddalar shishasimon holatda boʻlishi mumkin. Shisha hosil qilish usullarining mukammallashib borishi bilan bunday materiallarning soni ortib bormoqda.

Organik shishalarga poliakrilatlar, polikarbonatlar, polistirol, vinilxloridning metilmetakrilat bilan qoʻshma polimerlari kabi organik polimerlarning shishasimon holatdagilari misol boʻladi.

Elektron texnikada noorganik birikmalar asosidagi shishalar eng koʻp ishlatiladi. Bu shishalar quyidagi sinflarga boʻlinadi: elementar (oddiy), galogenli, xalkogenli, oksidli, metalli, sulʼfatli, nitratli, karbonadli va hokazolar.

Bitta elementning atomlaridan tashkil topgan shishalar elementar shishalar deyiladi. Faqat ozgina sondagi elementlarninggina shishasimon holati hosil qilingan. Bularga oltingugurt - S, selen - Se, mishʼyak - As, fosfor -P va uglerod - C elementlari kiradi.

Shishasimon oltingugurt va selen - eritmalarini tezlik bilan sovutish orqali, shishasimon mishʼyak – vakuumda sublimasiyalash usuli bilan, shishasimon fosfor - 100 MPa dan yuqori bosimda 250 °C da qizdirish bilan, shishasimon uglerod – organik smolalarni uzoq vaqt piroliz qilish natijasida hosil qilinadi.

Galogenid shishalar deb galogenlar asosida tashkil topgan shishalarga aytiladi. Bularning ichidan shisha xosil qiluvchi BeF₂ birikmasi asosidagi shishalar koʻproq qoʻllanilmoqda.

Xalkogenidli shishalar deb ataladigan shishalar quyidagi birikmalar koʻrinishida boʻlgan kislorodsiz tizimlar asosida hosil qilinadi: As-X, Gt-As-X, Ge-Sb-X, Ge-P-X va boshqalar. Bu erda X = S, Se, Te.

Oksidli shishalar eng keng sinfli birikmalardan tashkil topadi. Bunda quyidagi oksidlar oson shisha hosil qiluvchi oksidlar hisoblanadi: SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , As_2O_3 . Oksidlarning katta guruhi – TeO_2 , TiO_2 , SeO_2 , MoO_3 , WO_3 , Bi_2O_3 , Al_2O_3 , Ga_2O_3 , V_2O_5 lar boshqa oksidlar va oksid aralashmalari bilan eritilganda shisha hosil qiladi. Masalan, quyidagi tizimlarda shisha oson hosil boʻladi: $\text{SaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3$, $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{V}_2\text{O}_5$, $\text{Me}_m\text{O}_n - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{V}_2\text{O}_5$, bu erda Me_mO_n – har xil modifikasiyalovchi oksidlar. Shunday qilib, shisha hosil qiluvchi oksidning turiga qarab shishalar quyidagi sinflarga boʻlinadi: silikatli, boratli, fosfatli, germanatli, telluritli, alyuminatli va shu kabilar.

Sanoatda ishlab chiqariladigan shishalarning tarkibi kamida 5ta komponentdan, maxsus va optik shishalar esa 10ta komponentdan tashkil topadi. Shishalarning tarkibini oʻzgartirib, ularning xossalarini kerakli tomonga, hoxlagancha oʻzgartirish mumkin.

Shishalarning qotish va erish jarayonlari, kristallardan farq qilib, maʼlum bir temperatura oraligʻida sekin - asta yuz beradi, yaʼni shishalarda aniq bir qotish yoki erish temperaturasi boʻlmaydi. Shisha pishirish jarayonida eritma suyuq holatdan avval plastik holatga keyin qattiq holatga oʻtadi. Teskari jarayonda esa (shishaning yumshatilishida) shisha avval qattiq holatdan plastik holatga, yuqoriroq temperaturalarda esa suyuq holatga oʻtadi. Shishalarning qotish yoki erish jarayonlari maʼlum bir temperatura oraligʻida yuz beradi. Bu interval shishalanish intervali deyiladi. U ikkita temperatura bilan chegaralangan: yuqori temperatura tomondan yumshash temperaturasi - T_f (f- Flussigkeit-suyuqlik) bilan; past temperatura tomondan – shishalanish temperaturasi – T_g (g- Glas – shisha) bilan (3.11-rasm). Shisha temperatura sohasiga bogʻliq holda har xil xossalarga ega boʻlgan uchta holatda boʻlish mumkin: T_f dan yuqorida qovushqoqli suyuq holatda, $T_f - T_g$ yumshash intervalida plastik holatda va T_g dan past temperaturalarda qattiq (moʻrt) holatda. T_f temperaturalarda

shisha massadan ingichka iplarni tortish mumkin boʻladi. Eng zarur shisha hosil qiluvchi moddalarning asosiy texnologik hossalari 3.3 – jadvalda keltirilgan.

3.3-jadval

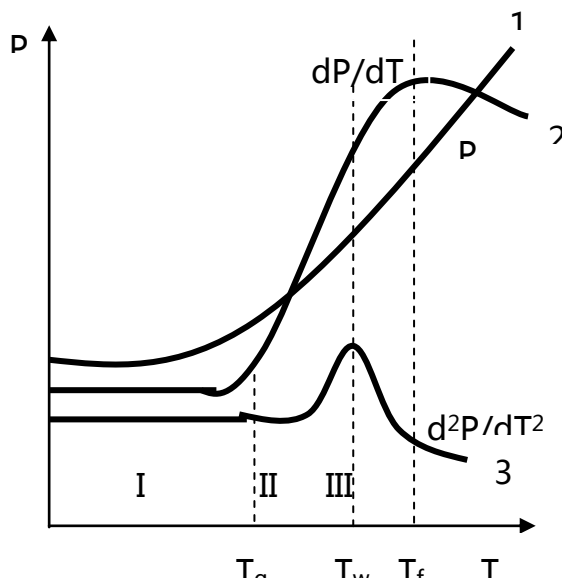
Modda	Yumshash temperaturasi, K	Shishalanish temperaturasi, K	Erish entalpiyasi, KJ/mol`	Yumshash temperaturasidagi qovushqoqlik, Pa·s
SiO ₂	1995	1495	8	10 ⁶
GeO ₂	1389	853	17,2	7·10 ⁴
B ₂ O ₃	723	550	23	10 ⁴
P ₂ O ₃	853	537	71	5·10 ⁵
As ₂ O ₃	585	420	18,7	10 ⁵
BeF ₂	823	523	41,2	>10 ⁵
Se	493	305	6,2	2,2
P ₄ Se ₄	603	455	-	-

Kristall moddalarning erishidan (yoki eritmaning kristallanishidan) farqli ravishda shishaning yumshash (yoki shishamassaning qotish) jarayonlari bir fazali boʻladi. Shishalanish intervalida shishaning

yumshashi suyuq faza xosil boʻlmasdan yuz beradi.

Mana shularga asosan shishalanish intervalida shisha hossalaring oʻzgarish xarakteriga koʻra ular uchta guruhga boʻlinadi.

Birinchi guruhga modda ho-latlarining funksiyalarini ifodalay-digan (ichki energiya, molli hajm, entalpiya,



3.11-rasm. Shishaning (R) va uning ho-silalari hossalaring shishalanish intervalida temperaturaga boqʻlanishlari:

entropiya) P ning hossalari kiradi. Bu hossalar temperatura ortishi bilan tekis o'zgaradi (3.11-rasm, 1 - egri chiziq).

Shishaning ikkinchi guruhga kiradigan hossalari P holat funksiyasining temperatura bo'yicha olingan birinchi hosilasi dP/dT (chiziqli va hajmiy termik kengayish koeffitsientlari, issiqlik sig'imi) bo'lib, T_f nuqtada egilishga ega (3.11-rasm, 2-egri chiziq). Uchinchi guruhga kiradigan xossalari (issiqlik o'tkazuvchanlik, dielektrik yo'qotishlar) P dan temperatura bo'yicha olingan ikkinchi hosila bo'lib, T_w nuqtada maksimum yoki minimumga ega bo'ladi.

Bulardan tashqari, shishaning xarakteristik parametrlariga shishaning tarkibiga bog'liq bo'lgan T_g , T_f temperaturalari, hamda shisha-lanish intervali ($T_g - T_f$) kiradi. Shishalanish temperaturasi T_g ga shisha massaning 10^{12} - 10^{13} Pa·s qovushqoqligi, T_f temperaturaga esa 10^8 Pa·s qovushqoqlik mos keladi.

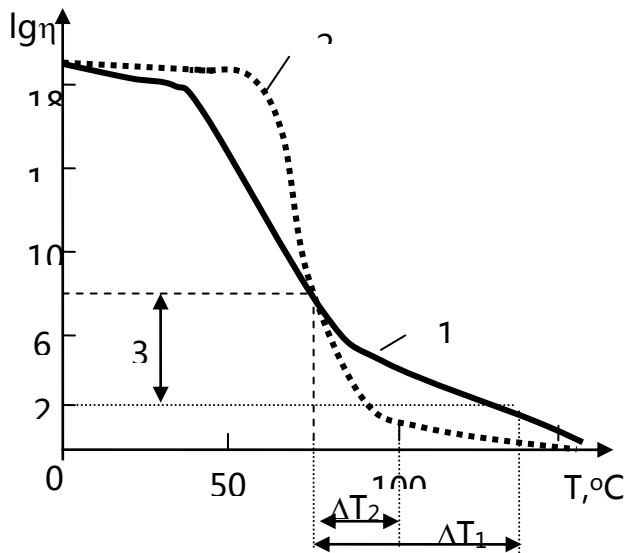
3.7.2. Shisha pishirishning fizik-kimyoviy asoslari

Elektron texnikaning eng kerakli materiallaridan biri bo'lgan oksidli shisha pishirish jarayonlarini ko'rib chiqamiz.

Shisha va eritmalarning qovushqoqligi va sirt tarangligi. Qovushqoqlikning temperaturaviy bog'lanishi eng zarur texnologik xarakteristika bo'lib, shisha texnologiyasi asosiy bosqichlarining parametrlarini belgilab beradi: shisha hosil bo'lish, shishamassaning gomogenlashuvi va tiniqlashuvi, buyumlarga shakl berish, ularni kuydirish yoki toblash va hokazolar. Shishaning qovushqoqligi temperaturaga bog'liq holda juda keng qiymatlarda o'zgaradi: eritma holatdagi 10 Pa·s dan qattiq holatdagi 10^{19} Pa·s gacha. Oksidli shishalar qovushqoqligining temperaturaviy bog'lanishi 3.12-rasmda ko'rsatilgan. Past temperaturalarda (T_g gacha) qovushqoqlik juda kam o'zgaradi. qovushqoqlikning keskin kamayishi $10^{15} - 10^7$ intervalida yuz beradi.

Eritma holatdagi shishalarning temperaturaviy bogʻlanishi (T_f dan yuqori temperatura sohalarida) taxminan quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$\eta = A \exp[E_\eta / (RT)] , \quad (3.8)$$



3.12-rasm. Oksidli shishalar qovushqoqligi-ining temperaturaga bogʻlanish grafiklari:

1,2 – uzun va qisqa shishalarning dinamik

bu erda η - dinamik qovushqoqlik koeffisienti; A – kons-tanta (10^{-4} – 10^{-5} Pa·s) moddaning kimyoviy tabiatiga bogʻliq boʻlib, Eynshteyn tenglamasidan hisoblanishi mumkin: $A = Nh/V$ (bu erda N – Avogadro soni; h – Plank doimiysi; V – molli hajm); E_η - aktivlash energiyasi (oksidli shishalar uchun 80 – 630 kDj/mol) boʻlib, tortishish kuchlarini engish va undan keyingi zarracha-larning siljish

jarayonlaridan kelib chiqadi va temperaturaga bogʻliq boʻladi, hamda taxminan quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$E_\eta = E_0 / T, \quad (3.9)$$

bu erda E_0 – element-kislorod bogʻning mustahkamligiga proporsional boʻlgan kattalik.

Shakl berishning temperaturaviy oraliqida qovushqoqlikning oʻzgarish xarakteri boʻyicha shishalar qisqa va uzun shishalarga boʻlinadi (3.12-rasm). Shisha massa qovushqoqligining 10^2 – 10^8 Pa·s oraliqida undan shisha buyumlar tayyorlash mumkin boʻladi. Qovushqoqlikning bu diapazoniga shisha massaning tarkibiga bogʻliq holda oʻzining shakl berish temperatura oraliq'i mos keladi. Shakl berish temperatura intervali nisbatan kichik boʻlgan (~ 100 – 150 °C) shisha massa qisqa, intervali katta (~ 250 – 500 °C) boʻlganlarini esa uzun

deyiladi. Uzun shishalar uchun shakl berish rejimini ishlab chiqish qisqa shishalarga qaraganda ancha oson.

Shishalarning qovushqoqligi zarrachalar orasidagi kimyoviy bog'larning mustahkamligiga bog'liq bo'lib, ular o'z navbatida zarrachaning turiga bog'liq bo'ladi. Silikat shishalar ichida kvars shisha bir xil temperaturaviy sharoitda eng katta qovushqoqlikka ega. Uning tarkibiga ishqoriy metallarning oksidlari kiritilishi bilan hosil bo'ladigan binar ishqoriy – silikat shishaning qovushqoqligi keskin kamayib ketadi (3.4-jadval).

3.4 - jadval

Tarkib	SiO_2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	$2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
η , Pa·s (1400 °S da)	10^9	28	0,16	0,1

Oson eruvchan, qovushqoqligi kichik bo'lgan glazurlar tayyorlash uchun glazur tarkibiga fluor, bariy, qo'rg'oshin birikmalari qo'shiladi.

Shisha ishlab chiqarish uchun xomashyoviy materiallar. Shisha ishlab chiqarishda xomashyo sifatida qo'llaniladigan materiallar texnologik belgi bo'yicha ikki guruhga bo'linadi: asosiy va yordamchi.

Asosiy materiallarga shishaning asosini tashkil etuvchi va uning xossalarini belgilovchi materiallar kiradi.

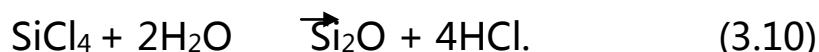
Yordamchi materiallar shishaning xossalarini har tomonga o'zgartirish imkoniyatini beradigan va pishirishni tezlashtiradigan komponentlarni o'z ichiga oladi. Bularga rang beruvchi, tiniqsizlantiruvchi, tiniqlantiruvchi, rang ketkazuvchi, oksidlovchi, qaytaruvchi, tezlatuvchi va shunga o'hshash materiallar kiradi.

Materiallar kelib chiqishi jihatidan tabiiy va sintetik materiallarga bo'linadi. Sintetik materiallar tabiiy materiallarga qaraganda ancha toza

hisoblanadi. Xomashyo materiallarining sifatiga (kimyoviy tarkib, kirishmalar, disperslik va boshqalar) qo'yiladigan talablar shisha mahsulotlarning turiga va qaerda ishlatilishiga bog'liq bo'ladi. Elektron texnikada qo'llaniladigan shishalar ishlab chiqarish uchun (mikroelektronikada qatlamlararo izolyasiyalash, germetiklovchi kompaund-lar, rezistor va kondensatorlarning komponentlari, elektromagnit, optik, lazer nurlanish-larning sezgir datchiklari va boshqalar uchun) kerak bo'ladigan xomashyoga qo'yiladigan talablar tayyor shisha mahsulotning sifatiga qo'yiladigan talablar bilan aniqlanadi.

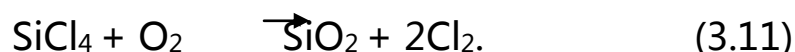
Shisha sanoatida har xil shisha mahsulotlar tayyorlashda kremniy dioksidi uchun material sifatida kvars qumi, maydalangan qum, kvarsit va tolali kvars kabilardan foydalaniladi. Bunda tozalik darajasi bo'yicha qumning 15 markasi ishlatiladi. Elektron texnikada xomashyolarning tozaligiga bo'lgan talab kuchayganligi sababli sintetik SiO_2 ni hosil qiladigan quyidagi usullar ishlab chiqilgan:

a) gaz fazali sintez, bunda tetraxlorid kremniydan vodorod-kislorod alangasida quyidagi reaksiya bo'yicha hosil qilinadi:



Bu usul bilan olingan kvars shishada gidrooksil guruhining miqdori ko'p bo'lib, issiqlikka chidamligi kamroq bo'lishi uning kamchiligi hisoblanadi;

b) kislorodli, past temperaturali plazmada to'g'ridan to'g'ri oksidlash:



Bu holatdagi kvars shishasida gidrooksil guruhining miqdori eng kam, biroq unda massaning 0,05 % gacha xlor ionlari mavjud bo'ladi;

c) SiO_2 gelidan, uni quritib, termik ishlov berib va 1800 °C da eritib hosil qilinadi.

Bunday xomashyodan hosil qilinadigan kvars shisha yuqori darajali tozalik bilan xarakterlanadi va undagi qoldiq kirishmalar massaning 10^{-5} – 10^{-6} % dan oshmaydi. Bunday shishalardan hususiy holda, Choxral'skiy usuli bilan kremniy monokristallari o'stirish uchun kvarsli tigellar, diffuziya jarayonlari va yarim o'tkazgichlar epiitaksiyasi o'tkaziladigan kvarsli reaktorlar, optik va lazer shishalarini ishlab chiqarishda va hokazolar tayyorlashda foydalaniladi.

Shixta tayyorlash. Ma'lum takrkibli shisha mahsulotini tayyorlash uchun avval shixta tayyorlanadi. Shixta tayyorlash uchun kerak bo'ladigan materiallar yaxshilab tozalanadi, optimal donador qilib maydalanadi, kerakli nisbatlarda o'lchanib yaxshilab aralashtiriladi. Bunda shixtaning asosiy texnologik ko'rsatkichi tarkibning bir jinsligidir. Pishirilgan shishamassaning sifati boshlang'ich materiallarning aniq va qunt bilan tayyorlanganligiga va ularning qanday aralashganiga bog'liq bo'ladi.

Komponentlarning kimyoviy tarkibi shishalarning elektrofizikaviy xossalarini belgilaydi.

Shixtani tashkil etuvchilari tayyorlanib yaxshilab aralashtirilgandan so'ng uni pechga yuklashdan oldin shisha pishirish jarayonini optimallashtirish maqsadida shixtani zichlantirish kerak bo'ladi. Buning uchun u avval o'ta nozik maydalanadi. Undak keyin shixta briketlash, granulatlash, yopib pishirish (spekanie) kabi usullardan foydalanib zichlantiriladi. Undan keyin shisha pishirishni boshlash mumkin.

Shisha pishirish. Shisha pishirish deb shunday termik jarayonga aytiladiki, bunda har xil komponentlarning aralashmasi bir jinsli eritmaga aylanadi. Shisha pishirish murakkab jarayon bo'lib, shixta komponentlari orasida kechadigan har xil fizik-kimyoviy ta'sirlashuv natijasida suyuq shisha massaning hosil bo'lishi yuz beradigan ma'lum bir kattalikdagi temperatura intervalida kuzatiladi. Masalan, silikat shisha pishirishda shisha qaynatishning besh bosqichi farqlanadi: silikat hosil

bo'lishi; shisha hosil bo'lishi; tiniqlantirish (gazsizlantirish); gomogenlashtirish; sovutish.

Silikat va shisha hosil bo'lish jarayonlari bir vaqtning o'zida kechadi. Silikat hosil bo'lish jarayonida shixta komponentlari o'zaro kimyoviy ta'sirlashib karbonatlar, sul'fatlar va boshqa moddalar silikatlarga va boshqa oralig'i birikmalarga aylanadi.

3.7.3. Shisha mahsulotlari texnologiyasi

Shisha qaynatishdan keyingi asosiy texnologik bosqich shishaga shakl berish hisoblanadi. Bunda qovushqoq eritma (shisha massasi) tashqi kuchlar natijasida kerakli konfiguratsiyali qattiq mahsulotga aylantiriladi va sekin-astalik bilan sovutilib qattiq holatga keltiriladi. Shakllan-tirish jarayonida shishaning qovushqoqligi 10^2 dan 10^{12} Pa·s gacha o'zgaradi.

Shakllantirish jarayoni ikki bosqichga bo'linadi: shakl hosil qilish bosqichi va shaklni fiksasiyalash boqichi.

Shakl hosil qilish shisha massa oqish va plastik deformasiya holatlari mumkin bo'lgan temperaturaviy qovushqoq sohasida o'tkaziladi. Bu qovushqoqlikning $10^2 - 4 \cdot 10^7$ Pa·s oralig'iga mos keladi va bunda temperatura oralig'i taxminan $1200-800^\circ\text{C}$ atrofida bo'ladi.

Shaklni fiksasiyalash (qotirish) shakllantirilayotgan mahsulotni hosil qilingan konfiguratsiyasi saqlab qolingan holda qotirishdir. Bu shishaning intensiv qotadigan sohasiga to'g'ri keladigan, temperaturaning $900-500^\circ\text{C}$ dipazonida, qovushqoqlikning $10^8 - 10^{12}$ Pa·s oralig'ida amalga oshiriladi.

Shishaga shakl berishning quyidagi usullari mavjud:

- cho'zish;
- prokatlash;
- presslash;

- havo puflash;
- press-havo puflash;
- markazdan qochma shakllantirish;
- shisha massaning taglikda erkin oqishiga asoslangan float usuli.

Shakllangan shisha mahsuloti sovutilganda uning tashqi va ichki devor qatlamlari orasidagi temperaturaning farqi tufayli hosil boʻladigan mexanik kuchlanishni olib tashlash uchun shisha mahsulotlar qizdiriladi. Qizdirish jarayoni quyidagi bosqichlarni oʻz ichiga oladi:

- mahsulotni qizdirish temperaturasiigacha qizdirish (yoki sovutish);
- kuchlanishni olib tashlash uchun kuydirish temperaturasida ushlab turish;

- masʼuliyatli sovutish. Bunda shishada qoldiq kuchlanish hosil boʻlishidan saqlash uchun kuydirishning past temperaturasiigacha sekin asta sovutiladi;

- xona temperaturasiigacha tez sovutiladi.

Shishani toblash deb, unda sunʼiy ravishda bir xil taqsimlangan kuchlanish hosil qilishga aytiladi. Toblashda shisha $T_g - T_f$ oraligʻidagi temperaturagacha qizdiriladi va maʼlum bir vaqt bu temperaturada ushlab turilgandan soʻng tezlik bilan bir tekis sovutiladi. Buning natijasida mahsulotning mustahkamligi oshadi.

3.8. Keramika va shishakeramika materiallari texnologiyasi

3.8.1. Keramikali materiallar texnologiyasining asoslari

Keramikali texnologiya hozirgi vaqtda dielektrikli, yarim oʻtkazgichli, magnitli, oʻtkazuvchi va oʻta oʻtkazuvchi materiallar asosida elektron texnikaning har xil mahsulotlarini tayyorlashda keng qoʻllanilmoqda. Keramikali materiallar uchun umumiy boʻlgan texnologik operatsiya bu moddalarni erish temperaturasidan past

temperaturada pishirishdir (spekanie). Keramikali texnologiyaning shisha texnologiyasidan asosiy farqi shundaki, bunda moddalarning eritilishiga yo'l qo'yilmaydi.

Keramika ko'p fazali murakkab tizimdan iborat. Uning tarkibida kristalli, shishasimon va gazli fazalar (odatda, berk g'ovaklar ko'rinishida) mavjud bo'ladi.

Kristall faza keramikaning asosiy fazasi bo'lib, materialning mazmunini va xossalarini (dielektrik va magnit singdiruvchanliklar, yo'qotish quvvati, chiziqli kengayishning temperatura koeffisienti, mexanik mustahkamlik) belgilaydi.

Shishasimon faza shisha qatlam bo'lib, kristall fazani tashkil qiluvchi donachalarni bog'lab turadi. Shishasimon fazaning miqdori keramikaning texnologik xususiyatlarini (pishirish temperaturasi, plastiklik darajasi va boshqalar) belgilaydi. Uning qiymati 30-40%dan oshmasligi kerak.

Keramikadagi gazli faza (berk g'ovaklar ko'rinishida) mahsulot tayyorlashning o'ziga hos texnologik jarayoni natijasida hosil bo'ladi. Ko'pincha u keramikaning xossalariga (mexanik va elektr mustahkamlik, dielektrik yo'qotishlar kabi) salbiy ta'sir qiladi. Keramikali mahsulotlar ishlab chiqarishda asosiy texnologik jarayonlar quyidagicha:

- 1) shixta uchun massa tayyorlash;
- 2) shakl berish;
- 3) quritish;
- 4) kuydirish (objig).

BaTiO₃ asosida segnetokeramik mahsulotlar ishlab chiqarish jarayonining texnologik sxemasi 3.13-rasmda keltirilgan. Albatta, keramikaning har bir konkret turi va mahsuloti uchun bu sxemaga o'zgartirishlar kiritiladi. Endi bu sxemada keltirilgan asosiy texnologik jarayonlarni ko'rib chiqamiz.

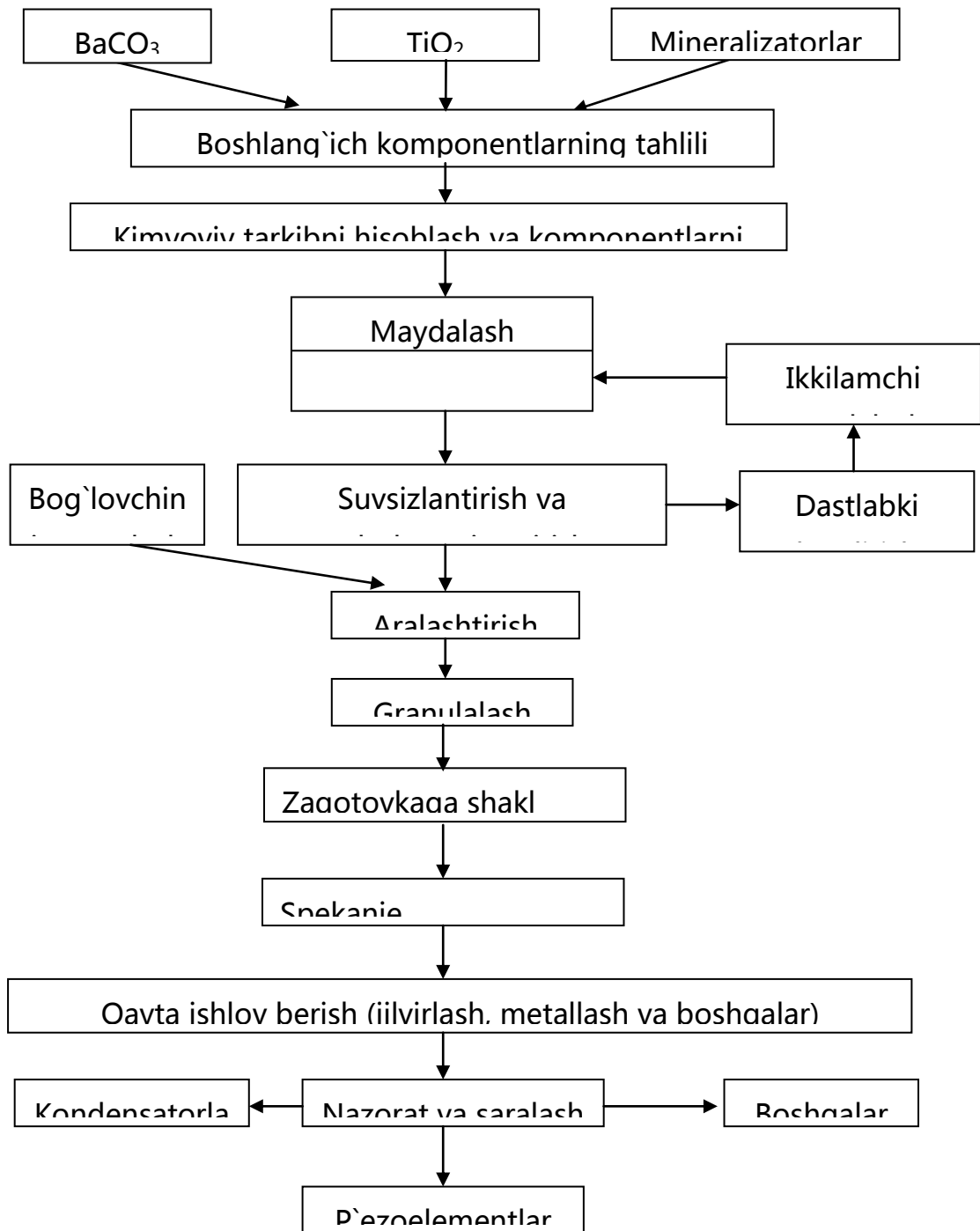
1. Shixta tayyorlash. Shixtani tayyorlash boshlang'ich materiallarni tayyorlashdan boshlanadi. Boshlang'ich komponentlarning sifatiga qarab keramikaning xossalarini nazorat qilish va boshqarish mumkin. Elektron texnikada qo'llaniladigan eng arzon keramik materiallar tayyorlash uchun xomashyo sifatida tuproq, dala shpati, kremnezem, kaolin va boshqalar ishlatiladi. Bularni maydalash jarayonida temir aralashmalar xlor kislotasi yordamida yoki elektr magnit yordamida olib tashlanadi. Yuqori sifatli keramika olishda zarrachalarni o'lchami 0,5-5 mikrometrdan oshmasligi kerak.

2. Shixta tarkibini tayyorlash va boshlang'ich komponentlarni aralashtirish. Keramika texnologiyasida asosiy operatsiya hisoblanadi. Bunda berilgan tarkibli keramika olish uchun boshlang'ich komponentlar kerakli nisbatda o'lchab olinadi. Masalan: $(\text{Ba}_{0,85}, \text{Sr}_{0,15})\text{TiO}_3 \Rightarrow \text{BaSrTiO}_3$ tarkibli keramikani hosil qilish uchun boshlang'ich komponentlar: BaCO_3 , SrCO_3 va TiO_3 qanday miqdorda o'lchab olish kerakligini topamiz. Buning uchun avval 3ta komponentning molekulyar massasi hisoblanadi. Undan keyin $\text{BaCO}_3:\text{SrCO}_3:\text{TiO}_3$ larning molyar nisbatlari: 0,85:0,15:1,0 ga teng bo'lgan massa nisbatlari va ularning foizlari hisoblanadi (3.5 - jadval).

3.5-jadval

Boshlang'ich komponent	Molyar xissasi, X_i	Molekulyar massasi m_i , kg	Massa $X_i \cdot m_i$, kg	$\omega = \frac{X_i m_i}{\sum X_i m_i} 100\%$
BaCO_3	0,85	197,35	167,75	62,174
SrCO_3	0,15	147,63	22,15	8,208
TiO_3	1,0	79,90	79,90	29,615

$$\sum X_i m_i = 269,80 \quad \sum \omega_i = 99,997\%$$



3.13-rasm. BaTiO₃ keramikasi asosida maxsulotlar ishlab chiqarish

Bundan keyin boshlang'ich komponentalar bir jinsli massa bo'lgunga qadar mexanik va kimyoviy usullar yordamida aralashtiriladi.

3. Qo'shilmalar. Keramikaning xossalarini va ishlab chiqarish jarayonlarini boshqarish uchun quyidagi qo'shilmalar qo'shiladi:

- 1) minerallovchilar 5% gacha, kuydirish jarayonini tezlashtirish uchun;
- 2) plastifikatorlar, maxsulotga shakl berish jarayonni osonlashtirish uchun;
- 3) modifikasiyalovchi qo'shilmalar, elektrofizikaviy xossalarini boshqarish uchun.

4. Shixtani granulalash. Bunda kukun xolatdagi shixta bir xil o'lchamda va shaklda granulalanadi, asosan granulalash presslab shakl berishdagina qo'llaniladi.

5. Maxsulot zagotovkasiga shakl berish. Shakl berishning quyidagi usullari ko'proq qo'llaniladi:

- A) press-shakllashda sovuq presslash;
- B) qaynoq presslash;
- V) qaynoq quyish;
- G) mudshtukli presslash;
- D) izostatik presslash;
- E) vibrasiyali zichlash.

6. Zagatovkalarga termik ishlov berish jarayonlari. Termik ishlov berishdan maqsad kukun zarrachalarini monolit polikristall qattiq jism holatigacha birlashtirish bo'lib, bunda uning hossalari kompakt qattiq material xossaloriga yaqinlashadi.

Termik ishlov berish jarayoni ikki bosqichdan tashkil topadi:

- 1). Texnologik bog'lovchini chiqarib yuborish;
- 2). Yopib pishirish (Spekanie).

Birinchi bosqich erish va bog'lovchining bug'lanish temperaturalarida olib boriladi va kukun zarrachalarining yopib pishirish temperaturasi boshlanishida tamomlanadi. Ikkinchi etap yopib pishirish temperaturasi boshlanishidan to zarrachalarning zich monolit material holiga kelgungacha bo'lgan temperaturalarda o'tkaziladi.

3.8.2. Eng asosiy keramik materiallar texnologiyasi

**O`rnatiluvchi keramika.** O`rnatiluvchi keramika texnologiyasining xususiyatlarini mikrosxemalar tagliklarini tayyorlashda ishlatiladigan eng asosiy o`rnatiluvchi materiallar misolida ko`rib chiqamiz. Bularga birinchi navbatda alyuminiy oksidi va berilliy oksidi asosidagi keramikalar kiradi.

Quvvatli mikrosxemalarning ko`pchiligida taglik sifatida yuqori soh tuproqli keramika 22XS (96% Al_2O_3) va polikor (99,7% Al_2O_3) asosidagi alyuminiy oksidli keramika ishlatiladi.

Alyuminiy oksidining bir nechta polimorfli modifikasiyalari mavjud bo`lib, ular  $\alpha$  - ,  $\beta$  - va  $\gamma$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  laridir.  $\alpha$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - korund, alyuminiy oksidi asosidagi keramikali mahsulotlarning bosh kristall fazasi bo`lib, trigonal singoniyalga taalluqlidir. U 2050 °C temperaturada eriydi. β - Al_2O_3 geksagonalli kristall panjaraga ega bo`lib, alyuminiy oksidining toza modifikasiyasi hisoblanmaydi. U bilan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ning miqdori yuqoriligi bilan farqlanadigan ma`lum bir alyumi-natlar guruhi shartli ravishda belgilanadi. γ - Al_2O_3 kub kristall panjaraga (shpinel turi) ega va korunddan kimyoviy aktivligining yuqoriligi bilan ajralib turadi. γ - Al_2O_3 1100 °C temperaturadan yuqoriroqqa qizdirilganda qaytmaydigan bo`lib α - Al_2O_3 ga aylanadi va bunda uning hajmi 14% gacha kichrayadi.

22XC va polikor keramikalarini ishlab chiqarishda xomashyo sifatida texnik soh tuproqdan foydalaniladi. Unda kirishmalarning, asosan natriy oksidining miqdori 0,2% dan kam bo`lishi kerak. Uning tarkibida ko`p miqdorda γ - Al_2O_3 fazasi mavjud bo`lib, keramikani yopib pishirishda hajmining sezilarli kamayishiga (29% gacha) sabab bo`ladi. Butunlay termik turg`un bo`lgan α - Al_2O_3 dan iborat mineralogik bir jinsli material olish uchun boshlang`ich texnikaviy soh tuproq 1450 °C gacha qizdiriladi va bunda γ - Al_2O_3 α - Al_2O_3 ga

aylanadi. Bu operatsiya natijasida soh tuproq kerakli texnologik xususiyatlarga ham ega bo`lib qoladi. Masalan, nozik maydalashda uning intensivligi oshadi.

Ommaviy ishlab chiqarishda hosil qiliniyotgan α - Al_2O_3 korund sharli tegirmonlarida maydalanadi.

Al_2O_3 ning miqdori 96-98% ni tashkil qilgan keramik materiallarda yopib pishirishni intensivlashtirish uchun mineralizatorlar - SiO_2 asosidagi shishalardan foydalaniladi. Bu mineralizatorlarning boshqa komponentlari bo`lib metallarning oksidlari MgO , CaO , BaO , MnO , Cr_2O_3 hisoblanadi. 22XC keramikasini hosil qilishda 5 – 6 % massaviy miqdordagi shisha tizimli – MnO - SiO_2 - Cr_2O_3 mineralizatoridan foydalaniladi.

Al_2O_3 ning miqdori 99 %dan ko`p bo`lgan alyumoksidli keramikada, masalan, polikorda, shisha hosil qiluvchilar bo`lmagan mineralizatorlar ishlatiladi. Eng ko`p tarqalgan bunday qo`shimchaga  $\text{MgO}$  (mas. 0,3 % gacha) misol bo`ladi. U yopib pishirilgan keramikaning dielektrik va vakuum hossalriga ta`sir o`tkazmaydi.

Zagotovka massasining quyugligiga, shakliga va o`lchamlariga bog`liq holda ularni shakllantirish uchun quyidagi usullardan foydalaniladi: yarim quruq, qaynoq yoki izostatik presslash, quyish va ekstruziya. Organik bog`lovchi sifatida olein kislota va vosk qo`shilgan parafin, gliserinli polivinil spirti, metilsellyulozaning gliserin bilan aralashmasi ishlatiladi.

Berilliyli keramika – brokerit (98 %-BeO) yuqori quvvatli mikroxejalarning tagliklarini tayyorlashda ishlatiladi, chunki BeO ning issiqlik o`tkazuvchanligi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ga qaraganda olti marta yuqoridir. BeO hosil qilish uchun asosiy hom ashyo beril minerali ( $3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) hisoblanadi. Toza mineralda 15 % gacha BeO bo`ladi. BeO olish uchun berill berilliy gidroksidiga aylantiriladi va u 900-1800 °C temperaturada

kuydiriladi. BeO asosidagi buyumlar keramika texnologiyasining hamma usullari yordamida tayyorlanishi mumkin.

Berilliy va uning birikmalari zaharli bo'lganligi ularning elektron texnikada kengroq qo'llanilishiga to'siq bo'lmoqda. Shu sababli keyingi yillarda karbid kremniy asosidagi keramika (SiC ga 1-3 % miqdorda pishiruvchi qo'shilmalar – BeO, B₄C, C va boshqalar – qo'shilgan) ishlab chiqildi. SiC asosidagi kerami-kaning asosiy xarakteristikalar: issiqlik o'tkazuvchanlik jihatdan [293 Vt/(m·K)] metalli alyuminiy, alyuminiy va berilliy oksidlari asosidagi keramikalardan ustun bo'lib, misga nisbatan salgina kamdir; issiqlikdan kengayish koeffisienti kremniy monokristalinikiga yaqin; solishtirma hajmiy qarshiligi yuqori $\rho \approx 10^{13}$ Om·sm; past va yuqori temperaturalarda yuqori mexanik mustahkamlikka ega.

Kondensator keramikasi. Kondensator keramikasiga qo'yiladigan ta'lablar umumiy holda quyidagicha:

temperatura, chastota, elektr maydoni va shu kabilar o'zgarganda berilgan qiymatda stabillikni saqlagan holdagi eng katta dielektrik kirituvchanlik;

dielektrik yo'qotishlarning minimalligi;

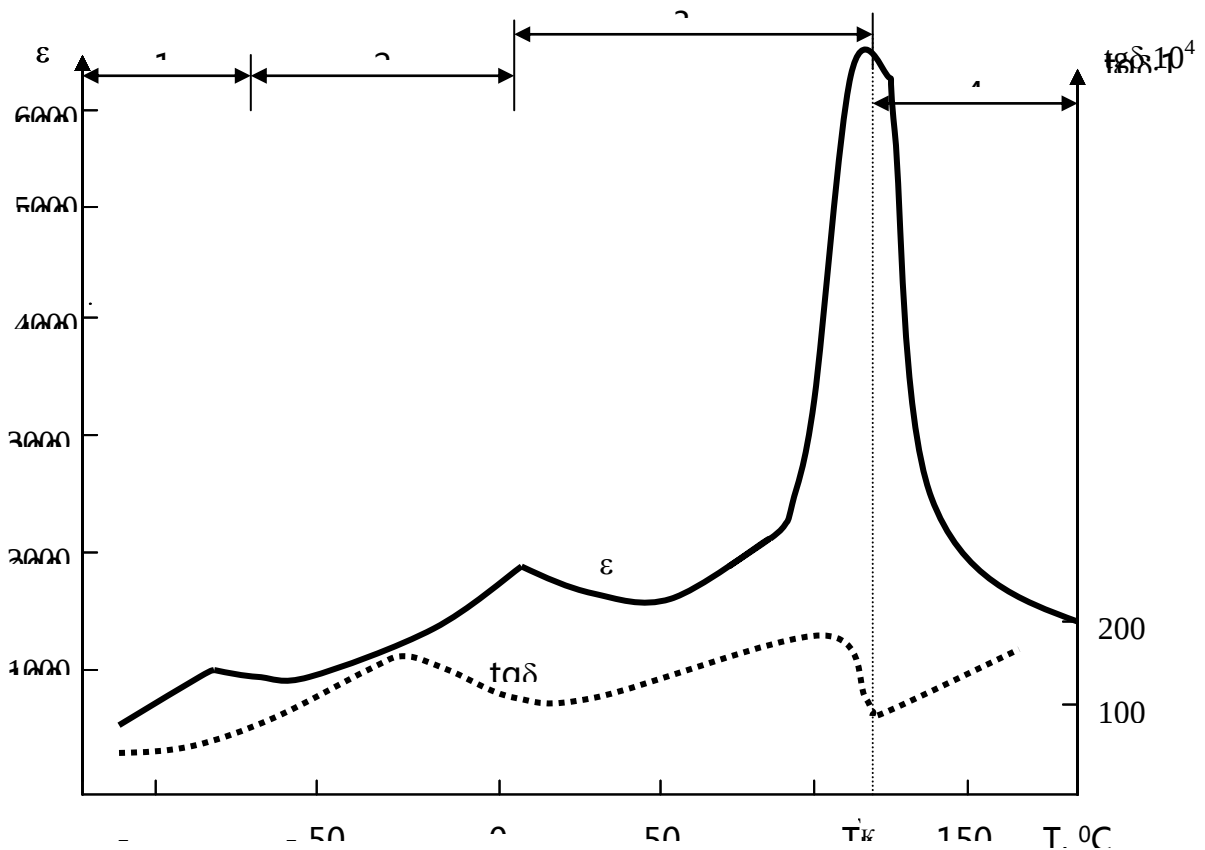
elektr mustahkamlik va solishtirma hajmiy qarshilikning maksimalligi;

elektrokimyoviy eskilishga yuqori chidamlilik;

materialning bir jinsliligi va xossalarining qaytariluvchanligi;

tannarxining kamligi va boshlang'ich xomashyoning bimalolliigi.

Kondensator dielektrigi sifatida ishlatiladigan keramik materi-allar olish texnologiyasining xususiyatlarini segnetokeramika misolida ko'rib chiqamiz.



3.14-rasm. BaTiO₃ asosidagi keramikada dielektrik kirituvchanlik ϵ va dielektrik yʻqotishlarning tangens burchagi $\text{tg}\delta$ larning temperaturaviy bogʻlanishlari:

Kondensatorlar uchun ishlatiladigan segnetokeramik materiallar uchta guruhga boʻlinishi mumkin: maksimal dielektrik kirituvchanlikli materiallar (N-90 guruhi), temperaturaviy turgʻunligi yuqori boʻlgan dielektrik kirituvchanlikli materiallar (N-50, N-30 va boshqalar) va dielektrik yoʻqotishlari kichik boʻlgan materiallar (T-900 materiali).

Bu guruhlardagi segnetoelektrikli kondensator keramikasining asosini, asosan BaTiO₃ va uning asosidagi qattiq qorishmalar hosil qiladi. Baʼzi hollarda SrTiO₃ va PbNb₂O₆ asosidagi qattiq qorishmalar ham qoʻllaniladi. Toza titanat bariy asosidagi keramika fazaviy oʻtishlarning uchta nuqtasi: -80 ; 0 ; 120 °C temperaturalar bilan xarakterlanadi. Kristallar -80 °C dan past temperaturada romboedrik strukturaga ega boʻladi; temperaturaning -80 dan 0 °C gacha boʻlgan oraligʻida rombli struktura; 0 dan 120 °C gacha - tetragonal, Kyuri

nuqtasidan (120°C) yuqori temperaturalarda BaTiO_3 da kub struktura hosil bo'ladi va spontan qutblanish yo'qoladi. Bunda kristall segnetoelektrikdan paraelektrikka aylanadi. Qayd qilingan hamma fazaviy o'zgarishlar qutblanish jarayonidagi o'zgarishlar bilan xarakterlanadi. Bu o'zgarishlar ε va $\text{tg}\delta$ ning temperaturaga bog'lanishlarida o'z aksini topgan (3.14-rasm).

3.14-rasmdan ko'rinib turibdiki, ε xona temperaturasida taxminan 1500 ga teng bo'lib, Kyuri temperaturasi yaqinida esa o'tkir maksimumga ega bo'lib, uning qiymati 6000-10000 ga etadi. ε ning temperaturaga bog'lanishining bunday xarakteri BaTiO_3 asosidagi keramikadan -55 dan $+85^{\circ}\text{C}$ gacha bo'lgan temperatura oralig'ida $\varepsilon \approx 1500$ qiymat bilan foydalanish imkoniyatini beradi. ε ning ishchi qiymati va temperatura o'zgarishida uning stabilligini oshirish uchun quyidagicha ish qilinadi: titanat bariy asosidagi keramikaga Kyuri temperaturasini kamaytiradigan va fazaviy o'tishlardagi dielektrik kirituvchanlikning maksimumini tekislaydigan qo'shimchalar qo'shish (bundan bir fazali qattiq qorishma asosidagi kera-mika hosil qilishda foydalaniladi); keramikada ε ning temperaturaviy bog'lanishini tekislaydigan, xossalari bir biridan farqlanadigan ikki va undan ortiq faza hosil qilinadi. 3.6 - jadvalda BaTiO_3 asosida birinchi usul yordamida hosil qilingan materiallarning xossalari keltirilgan.

3.6-jadval

Materi- alning markasi	ε ning 20°C dagi qiymati	Ishchi tempera- - tura interva- li, $^{\circ}\text{C}$	Reversiv ε ning o'zgarishi ($E.=0,5$ kV/mm gacha), %	Elektr mustah- -kamlik, kV/mm	Asosiy kristall fazasi	Kyuri tempe- raturasi, $^{\circ}\text{C}$
------------------------------	---	---	---	---	---------------------------	--

T-8000	8000-10000	-60÷+85	±30	4-5	Qattiq qotishma BaTiO ₃ - BaZrO ₃	20-40
BC-1	12000-14000	-60÷+85	±30	4-5	Qattiq qotishma BaTiO ₃ - SaZrO ₃	10-20
OKC	10000-11000	-60÷+85	±50	5-6	Qattiq qotishma BaTiO ₃ - SaSnO ₃	0-10
T-10000	12000-15000	-40÷+85	±50	3-4	Qattiq qotishma BaTiO ₃ - CaSnO ₃	20-30

Bu materiallar yuqori hajmiy qarshilik (10^{11} Om·sm dan kam emas) va tangens yo`qotish burchagining 1 KGs chastotadagi qiymati  $\text{tg}\delta \approx 0,01 - 0,02$  ekanligi bilan xarakterlanadi. Lekin bu usul bilan dielektrik kirituvchanlikning temperatura o`zgarishi bilan kam o`zgaradigan segnetokeramik materiallar hosil qilish mumkin emas ekan.

Shu sababli dielektrik kirituvchanligining temperaturaviy stabiligi yuqori bo`lgan keramik materiallar hosil qilish uchun ikkinchi usuldan – keramikada xossalari bilan farq qiladigan ikkita va undan ortiq faza yaratishdan foydalaniladi. Bunday usul bilan yaratilgan materiallarning hossalari 3.7-jadvalda keltirilgan.

Bu materiallarda $\text{tg}\delta \approx 0,01 - 0,2$ va hajmiy solishtirma qarshilik yuqori bo`lib, 10^{11} Om·sm dan kam emas.

3.7-jadval

Mate- rialnin g rusum	ε ning 20 °C dagi qiymati	ε ning – 60 dan +125 °C gacha bo`lgan temperatura	Reversiv ε ning o`zgarishi (E.=0,5	Elektr mustah -kamlik, kV/mm	Asosiy kristall fazasi
--------------------------------	--	--	---	---------------------------------------	---------------------------

i		intervalidagi nisbiy o'zgarishi	kV/mm gacha), %		
T- 1000	1600- 1800	± 20	± 10	6	BaTiO ₃ +qattiq qorishma (Ba,Bi, TiO ₃)
T- 2000	2000- 2200	± 30	± 10	6	BaTiO ₃ +qatti q qorishma (Ba,Bi, TiO ₃)
TNS- 2500	2500- 2700	± 30	± 10	5	BaTiO ₃ +qattiq qorishma BaTiO ₃ – Sm ₂ O ₃ – Nb ₂ O ₃)

Segnetokeramik kondensatorli materiallar olish texnologiyasining xususiyatlaridan biri shundaki, bunda segnetokeramikaning dielektrik singdiruvchanligi va uning temperaturaga bog'lanishi faqat materialning tarkibigagina bog'liq bo'lib qolmasdan, balki keramik massani tayyorlash va zagotovkani kuydirish texnologiyasiga ham bog'liq bo'ladi.

3.9. Sitallar texnologiyasi

Sitallar shishakristall mahsulotlar bo'lib, mahsus tarkibli shishani majburiy kristallash yo'li bilan olinadi. Sitallar struktura jihatidan shisha va keramika oralig'ida joylashgan. Uning shishadan farqi – kristall tuzilishga egaligi bo'lsa, keramika va boshqa kristall materiallardan farqi – juda kichik bir jinsli, mikrokristall strukturaga egaligidir. Shu sababli, ular yuqori fizik-kimyoviy xossalarga ega: mexanik mustahkamligi katta (taxminan prokatli shishaga nisbatan 10 marta mutahkamroq), yuqori qattqlik va ishqalanib emirilishga turqunlik, yumshash temperaturasining yuqoriligi (1350 °C gacha), issiqlikka

chidamliligi ($300 - 700^{\circ}\text{C}$), zichligining kichikligi $2,3 - 2,8 \text{ mg/mm}^3$ va elektr izolyasiyalovchi xarakteristikalarining yaxshiligi kabilar.

Oddiy shishalarni kristallash bilan sitallar hosil qilish qiyin jarayondir. Shu sababli bu jarayonni osonlashtirish uchun mahsus tarkibli shisha massa tayyorlanadi va uni hamma hajmi bo'yicha birdaniga kris-tallash kerak bo'ladi. Buning uchun shisha massada juda ko'p sonli kristal-lanish markazlari hosil qilinadi. Buning uchun shixtaga kristallanish katalizatorlari vazifasini bajaruvchi moddalar qo'shiladi va maxsus rejimda termik qayta ishlov berilib, shakllangan mahsulot olinadi.

Kristallash katalizatorlari vazafasini bajaruvchi birikmalar yoki elementlar quyidaga talablarga javob bera bilishlari kerak:

katalizator shishada yuqori temperaturalarda (pishirish temperaturasi atrofi) cheksiz eruvchanlikka va past temeraturalarda (yumshash tempe-raturasi va undan pastroq) cheklangan eruvchanlikka ega bo'lishi kerak;

katalizator past temperatura sohalarida shishada kristallash markazlari hosil qilish aktivlash energiyasini kamaytirishi kerak;

katalizator ion va atomlarining diffuziya tezligining qiymati past temperaturalarda shishaning asosiy komponentlariga qaraganda yuqori bo'lishi kerak;

kristallning shisha bilan qo'llanishini ta'minlash uchun kristall o'simta-shisha chegarasi kichik sirt energiyasiga ega bo'lishi kerak;

katalizatorning kristall panjarasi va ajralayotgan kristall faza parametrlari bir biriga yaqin bo'lib, 10-15% dan ko'pga farq qilmasligi kerak.

Kristallanish markazlarini hosil qilishda ikki xil usuldan foydalaniladi. Birinchi usulda ularning tarkibiga yorug'liq sezuvchi metall kationlari Cu^+ , Ag^+ , Au^+ bo'lgan birikmalar qo'shiladi. Ma'lum bir to'lg'in uzunlikdagi nurlar bilan nurlantirilgandan so'ng ular

kristallanish markazlari bo`lib qoladi. Bunday sitallar – fotositallar deyiladi. Ikkinchi usulda kristallanish markazlari nurlantirilmasdan qayta termik ishlov berish bilan xosil qilinadi. Bunday usul bilan hosil qilingan sitallar termositallar deyiladi.

Sitallar hosil qilishning texnologik bosqichlari. Sitallar hosil qilish texnologik bosqichlari o`zgartirilgan va to`ldirilgan shisha texnologiyasi va keramika texnologiyasi asosida olib boriladi.

Sital olishda shishali buyumlar ishlab chiqarish texnologiyasidan foydalanilganda (shixta hosil qilish → shisha qaynatish → buyumlarni shakllantirish → maxsulotni qizdirish) u yana bitta texnologik bosqich: buyumlarni kristallash bilan to`ldiriladi. Bu bosqich qizdirishsiz yoki undan keyin amalga oshiriladi.

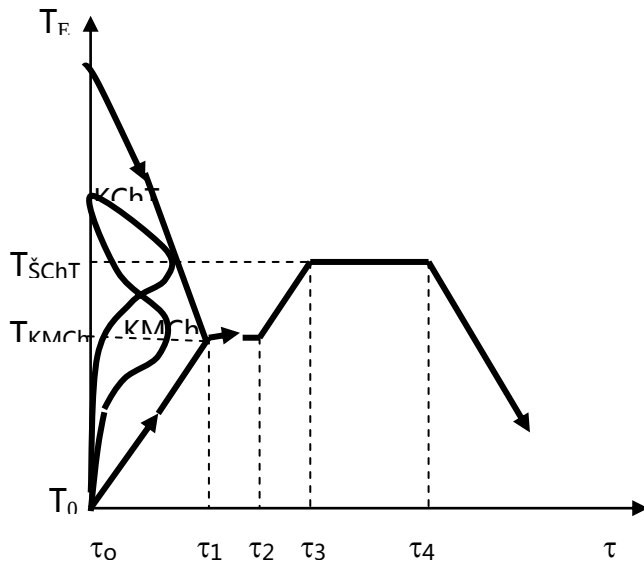
Ba`zi bir hollarda, masalan murakkab konfigurasiyalı detallarni ishlab chiqarishda, sitallar hosil qilishda keramikali texnologiyadan quyidagi sxema bo`yicha qo`llaniladi: shixta olish → shisha qaynatish → granulalash → shishani kukun holigacha maydalash → shliker hosil qilish → buyumlarni shakllantirish → yopib pishirish (spekanie) → kristallash.

Sital shixtasi shisha shixtadan kristallash katalizatorlari borligi bilan farqlanadi. Shu bilan birga qo`llanilayotgan xomashyo komponentlarining tozaligiga bo`lgan talab o`ta yuqoriligicha qoladi.

Shisha massa tarkibiga bog`liq holda 1300 dan 1700 °C gacha bo`lgan oraliqda qaynatib pishiriladi. Bunda oson uchuvchan katalizatorlardan foydalanilgan bo`lsa, unda ularning uchib chiqib ketmasliklari uchun maxsus choralar qo`llaniladi.

Sitalli shishalarga shakl berishda asosan quyish va presslash usullaridan foydalaniladi, chunki sitalli shishalarning ko`p tarkiblari qisqa temperatura oralig`ida shakllanadi. Shu sababli shakllanishning boshqa usullaridan foydalanish maqsadga muvofiq emas.

Shakllantirish natijasida hosil boʻladigan ichki mexanik kuchlanishlarni olib tashlash uchun buyumlar qizdiriladi (otjig). Bu jarayon



3.15-rasm. Shishani sitallga aylantirish uchun qayta termik ishlov berish rejimi sxemasi

qovushqoqlikning $1 \cdot 10^{12}$ - $4 \cdot 10^{13}$ Pa·s qiymatlariga mos keladigan temperaturalarda oʻtkaziladi. Budan keyingi texnologik bosqich shishani kristal-lashdir. Baʼzi bir buyumlar tayyorlashda kristallash shakllantirishdan keyin oʻtkaziladi. Bunda shakllangan buyum kristallanish markazlari maksimal ajralib hosil

boʻladigan temperaturagacha qizdiriladi.

Shishani kristallash bosqichi buyumlarga maxsus termik ishlov berish jarayoni davomida amalga oshirilvadi.

3.15 - rasmda shishini sitallga aylantirishda termik qayta ishlov berish rejimining sxemasi keltirilgan.

Keltirilgan termik ishlov berish rejimining asosiy xususiyatlaridan biri bunda ikkita oʻziga xos temperaturaning borligidir. Bu temperaturaning birinchisi kristallanish markazlarining maksimal hosil boʻlishini taʼminlashi kerak boʻlsa, ikkinchisi ularning chiziqli oʻsishining maksimaligani taʼminlashi kerak. 3.15-rasmda kristallanish markazlari hosil boʻlishi va oʻsishining kinetik bogʻlanishlari temperatura-vaqt bogʻlanishlari bilan birgalikda keltirilgan. Bu esa kristallanish markazlari hosil boʻlish chastotasi (KMCh) va kristallashning chiziqli tezliklari (KChT) bilan termik ishlov berish rejimi orasidagi bogʻlanishni yaqqol koʻrsatish imkonini beradi. Bu bogʻlanishlardan koʻrinib turibdiki, kristallash jarayonini eritmani sovutish yoki qotib qolgan shishani

qizidirish bilan amalga oshirish mumkin ekan. Bunda asosiysi termik ishlov berishdagi birinchi va ikkinchi to'xtashlarning optimal temperaturasi va bu to'xtash davrini topishdir.

Ishlov berishning birinchi bosqichi shishalanish temperaturasi yaqinida o'tkaziladi va u kristallanish markazlarininig hosil bo'lish sharoitini ta'minlaydi. Agar ushlab turilgan temperatura KMCh egri chizig'ining maksimumiga mos kelsa, ishlov berish vaqti qisqa bo'ladi va bu optimal temperatura hisoblanadi. Ishlov berishning optimal temperaturasi tajriba yo'li bilan topiladi.

Ishlov berishning ikkinchi bosqichi kristallanish markazlari o'sishi chiziqli tezligining(KChT) maksimumiga mos keladigan temperaturalarda o'tkaziladi (3.15-rasm). Bu temperaturada ushlab turish vaqti shishaning hamma hajm bo'yicha kristallanishi uchun kerak bo'ladigan vaqtiga mos keladi.

Misol tariqasida elektron texnikada qo'llaniladigan ba'zi bir sitallar uchun termik ishlov berish rejimlarini ko'rib chiqamiz.

Kordierit tarkibli sitallar $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ tizimi asosida hosil qilinadi. Kristallanish katalizatorlari sifatida 9-11% TiO_2 qo'shilmasi hizmat qiladi. Ishlov berish rejimi bir bosqichli bo'lib 1250-1300 °C temperaturada 1-16 soat davomida ushlab turiladi.

Qo'rg'oshinli sitallar $PbO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$ tizimda hosil qilinadi. Katalizatorlar sifatida P_2O_3 , WO_3 , MoO_3 va boshqa birikmalar qo'llaniladi. Kristallanishdagi termik ishlov berish rejimlari tarkibga bog'liq bo'lib, misol tariqasida quyidagicha bo'lishi mumkin: Birinchi bosqich 500 °C temperaturada 2 soat davomida, ikkinchi bosqich – 700 °C temperaturada 1 soat vaqt davomida amalga oshiriladi.

3.10. Yarim o'tkazgichli va dielektrik materiallar monokristallarini legirlashning fizik-kimyoviy asoslari

3.10.1. Kristallarni qattiq fazada legirlash

O`stirilgan yarim o`tkazgichli va dielektrik kristallarni qattiq fazada legirlash uchun kirishmalarni gazsimon, suyuq va qattiq tashqi fazalardan diffuziyalash usuli, hamda radiasiyali legirlash usullaridan foydalaniladi. Diffuziyali legirlash asboblari texnologiyasi usuli bo`lib materiallar hosil qilish texnologiyasida amalda qo`llanilmaydi. Shu sababli o`stirilgan kristallarni radiasiya usuli bilan legirlashni ko`rib chiqamiz. Radiasiya usulida kristallar yadroviy zarrachalar (neytronlar, protonlar, gamma nurlar) bilan nurlantiriladi. Bunda kechadigan yadroviy reaksiyalar natijasida asosiy moddaning atomlari boshqa kimyoviy elementlarning atomlariga aylanadi. Buni transmutasiyali legirlash deyiladi.

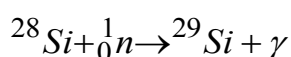
Radiasion legirlashda asosan issiqlik neytronlaridan foydalaniladi va bunday nurlantirilgandan keyin hosil bo`ladigan legirlovchi kirishmaning konsentratsiyasi

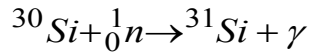
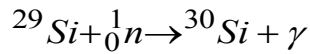
$$C_{kir} = F \sigma C_{as.k} a \tau \quad (3.12)$$

formula bilan hisoblanadi, bu erda: F -issiqlik neytronlari oqimining zichligi; τ - nurlantirish vaqti; $C_{as.k}$ - asosiy komponent atomlarining konsentratsiyasi; a – asosiy komponentning keng tarqalgan yadroviy o`zgaradigan izotopi.

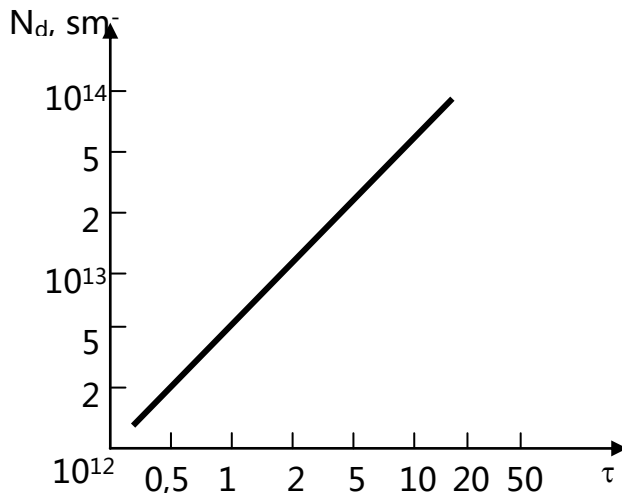
Misol tariqasida kremniyni issiqlik neytronlari bilan nurlantirib radiasiyali legirlashda kechadigan yadroviy reaksiyalarni ko`rib chiqamiz.

Tabiiy kremniy uchta o`zining stabil izotoplarining aralashmasidan tashkil topgan: $^{28}\text{Si}(92,28\%)$, $^{29}\text{Si}(4,67\%)$, $^{30}\text{Si}(3,05\%)$. Bu izotoplar sekin neytronlar bilan nurlantirilganda ularning yadrolari neytronlarni yutib, γ -kvantlarini chiqarib boshqa izotoplarga aylanadi:





^{31}Si izotopi barqaror emas va yarim parchalanish davri 2,6 soat davomida parchalanib, fosforning ^{31}P barqaror izotopiga aylanadi.



3.16-rasm. Kremniyga kiritilayotgan fosfor atomlari konsentratsiyasining issiqlik neytronlari bilan kristallni

Bunday usul bilan kiritilgan fosforning konsentratsiyasi yuqoridagi (3.12) formula bilan hisoblanadi. Bu formuladagi σ , $S_{as.k}$ va a – boshlang'ich materialning fizik xarakteristikalarini bo'lganligi uchun va legirlash jarayonining har bir seriyasida sekin neytronlar oqimining zichligini o'zgarmas deb xisoblash mumkin-ligi

sababli kiritilayotgan fosforning konsentratsiyasi faqat yuqori darajadagi aniqlik bilan (~1% va undan ham yaxshiroq) nazorat qilish mumkin bo'lgan nurlantirish vaqtiga bog'liq bo'ladi (3.16-rasm).

Radiatsiyali legirlash usulining birinchi kamchiligi nurlantiriladigan kristallda kristall panjaraning radiatsiyali buzilishlarining ro'y berishidir. Shu sababli bunday kristallarga nurlangandan so'ng termik ishlov beriladi, ya'ni hosil bo'lgan radiatsiyali nuqsonlarni yo'q qilib yuborish uchun 800 °C temperaturada 1 soat davomida qizdiriladi.

Bu usulning ikkinchi kamchiligi nurlantirish tannarxining yuqoriligi va radiatsiya havfsizligini ta'minlash zarurligidir.

Neytron transmutatsiya usuli bilan legirlangan kremniy sanoatda 1975 yildan boshlab keng ishlab chiqarilmoqda. Bu material kuch asboblari ishlab chiqarishda asosiy material bo'lib qoldi, chunki bunday asboblari ishlab chiqarishda kristalldagi kirishmalar taqsimotining yuqori

darajadagi bir jinsligi talab qilinadi. Bunday kremniyning bir yillik ishlatilishi 100 tonnadan oshib ketadi.

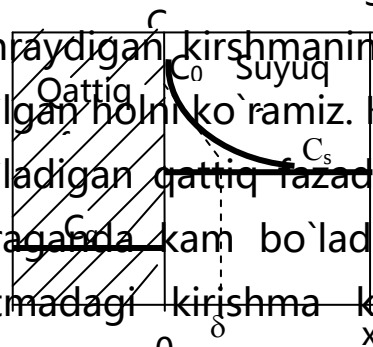
3.10.2. Kristallarni suyuq fazadan o`stirish jarayonida legirlash

Tarkibida legirlovchi kirishma bo`lgan eritmaning kristallanishi. Kristallarni suyuq fazadan o`stirishda unga ma`lum miqdorda legirlovchi kirishmalar qo`shiladi. Legirlangan eritmalaridan kristallarni o`stirish sharoiti va kristall o`sishini kuzatib boradigan kristallanish frontidagi jarayonlarning xarakteri toza eritmalarining kristallanishidan farq qiladi. Eritmaga qo`shilgan kirishma kristallanishda sirt jarayonlari kinetikasiga ta`sir qilishdan tashqari toza moddaning erish temperaturasi o`zgartiradi. Bunda modda va kirishma atomlarining o`zaro ta`sir xarakteriga bog`liq holda erish temperaturasi yoki kamayishi mumkin, yoki ko`payishi mumkin.

Ko`pincha kremniyga qo`shilgan kirishmalar uning erish temperaturasi kamaytiradi. Bu jarayon fazali diagrammalar asosida tushuntiriladi.

Endi tarkibida legirlovchi kirishma bo`lgan eritmalaridan kristallar o`sish sharoitining suyuq va qattiq fazalar orasida kirishmalarning qayta taqsimlanish xarakteriga ta`sirini ko`rib chiqamiz. Amalda ko`p

uchraydigan kirishmaning muvozanatli taqsimlanish koeffisienti $K_0 < 1$ bo`lgan holni ko`ramiz. Kristallning v tezlik bilan o`sishi mobaynida hosil bo`ladigan qattiq fazada kirishmaning miqdori boshlang`ich eritmaga qaraganda kam bo`ladi va shu sababli bo`linish chegarasi yaqinida eritmada kirishma konsentratsiyasi oshib boradi. Shunday qilib, harakatlanayotgan kristallanish frontida ajralayotgan ortiqcha kirishmalarining yig`ilish natijasida uning oldida δ diffuzion qatlam hosil bo`ladi (3.17-rasm). Bu qatlamdan kirishma diffuziya yo`li bilan eritmaning hajmiga o`tadi. Diffuzion qatlam δ ning qalinligi eritmani aralashtirish intensivligiga, uning qovushqoqligiga, kirishmaning



3.17-rasm. Eritma bilan o`sayotgan

eritmadagi diffuziya koeffisienti D ga va shu kabi faktorlarga bogʻliq boʻladi. Shu sababli kristallanish fronti chekli v tezlik bilan xarakatlanayotgan kristall oʻsishidagi real taqsimot koeffisienti holat diagrammasidan aniqlanadigan muvozanatli taqsimot koeffisienti K_0 dan farq qiladi va uni effektiv taqsimot koeffisienti K deyiladi. Kirishmaning effektiv (K) va muvozanatli (K_0) taqsimot koeffisientlari orasidagi bogʻlanishni topamiz. Buning uchun eritmadagi harakatlanayotgan kristallanish fronti oldidagi kirishma taqsimotini ifodalaydigan bogʻlanishni topish kerak (3.17-rasm).

Ikki fazali kristall-eritma tizimida kirishmaning taqsimoti harakatlanayotgan muhitdagi massa almashishning differensial tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -\bar{\omega} \text{grad} C + D \nabla^2 C, \quad (3.13)$$

bu erda C – kirishma konsentratsiyasi; $\bar{\omega}$ - suyuqlikning harakat tezligi; D – diffuziya koeffitsienti.

Bir oʻlchamli hol uchun (3.12) quyidagi koʻrinishga ega boʻladi:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -\omega_x \frac{dC}{dx} + D \frac{d^2 C}{dx^2} \quad (3.14)$$

(3.13) tenglama quyidagi qabul qilingan taxminlar asosida echiladi. Diffuzion qatlamdagi kirishmaning diffuziya koeffitsienti oʻzgarmas: $D = \text{const}$; kristall oʻsishining rejimi oʻzgarmas holatga kelgan, yaʼni

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = 0, \text{ unda } -\omega_x \frac{dC}{dx} + D \frac{d^2 C}{dx^2} = 0. \quad (3.15)$$

Yana, δ qatlam chegarasida eritma harakatining tezligi ω_x kristallning oʻsish tezligi v ga teng ($x < \delta$ da $\omega_x = v$); qattiq fazadagi kirishma konsentratsiyasi C_q ga teng, suyuq fazaning $x > \delta$ chuqurligida $C = C_s$ – eritmadagi kirishmaning oʻrtacha konsentratsiyasi (3.17-rasm). Suyuq fazada massa uzatish jarayonidan kelib chiqib (3.14) tenglamani echish uchun chegaraviy shartlar fazalarning boʻlinish chegarasiga

qattiq fazadagi massa o'tkazuvchanlik natijasida kelgan kirishma oqimi bilan undan massa uzatish natijasida olib ketilayotgan kirishma oqimining tengligidan aniqlanadi. Shunday qilib,

$$\left. \begin{aligned} v(C_0 - C_q) + D \frac{dC}{dx} &= 0 \\ C &= C_s \end{aligned} \right\} \begin{aligned} x &= 0 \\ x &= \delta \end{aligned} \quad (3.16)$$

Mana shu chegaraviy shartlarda (3.14)ning echimi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\frac{dC}{dx} = \frac{v}{D}(C_q - C_0) - \frac{v_x}{D}, \quad (3.17)$$

bundan quyidagini hosil qilamiz:

$$\frac{C - C_q}{C_s - C_q} = \exp\left(\frac{v\delta}{D} - \frac{v_x}{D}\right) \quad (3.18)$$

Quyidagicha belgilash kiritamiz:

$$v\delta / D = \Delta, \quad (3.19)$$

hamda eritmadagi kirishma konsentraciyasi bo'linish chegarasining o'zida ($x=0$ da) C_0 ga tengligini e'tiborga olib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\frac{C - C_q}{C_s - C_q} = e^{\Delta} \quad (3.20)$$

(3.19) ifoda tajribada kuzatiladigan xodisalarni to'liq tavsiflashi shundoq ko'rinishga ega bo'ladi. Haqiqatan ham, kristallning o'sish tezligi juda kichik bo'lganda, ya'ni $v \rightarrow 0$ da eritmadagi kirishma konsentraciyasi tekislanib, $C_0 = C_s$ bo'lib qoladi. O'sish tezligi kattalashganda bo'linish chegarasida ($x=0$) kirishma konsentraciyasi C_0 ko'payadi. Bu kristalldagi kirishma konsentraciyasining ko'payishiga olib keladi va bunda C_q / S_0 nisbat o'sish tezligiga bog'liq bo'lmaydi deb hisoblanadi. Shu sababli bu nisbatdan kristall-kirishma tizimining xarakteristikasi sifatida foydalanish mumkin. Bundan tashqari C_q / C_s nisbat ishchi parametr bo'lib C_0 ga ta'sir qiladigan hamma omillar, xususiyl holda o'sish tezligi va aralashtirish intensivligi o'zgarganda u ham o'zgaradi. (3.19) tenglikka muvozanatli ($K_0 = C_q / C_0$) va camarali ($K = C_q / C_s$) taqsimlash

koeffitsientlarini kiritib, ularni bir-biri bilan bog'laydigan tenglamani hosil qilamiz:

$$K = \frac{C_q}{C_s} = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0)e^{-\Delta}} \quad (3.21)$$

Har xil turlardagi kristall – kirishma tizimi uchun effektiv taqsimlash koeffisientining Δ ga bog'lanishlari 2.14 – rasmda keltirilgan.

Tajriba asosida qurilgan $K = f(\Delta)$ bog'lanishlar o'stirilayotgan kristalda C_q ning kerakli qiymatini ta'minlash va legirlashning aniq sharoitlari uchun berilgan eritma massasiga qo'shiladigan kirishmaning (ma'lum va o'zgarmas K_0 qiymat bilan xarakterlanadigan) miqdorini aniqlash imkoniyatini beradi. Shuni ta'kidlash kerakki, (3.20) ga binoan K kristall o'sishining tezligigagina bog'liq bo'lib qolmasdan, balki δ ga va eritmadagi kirishma diffuziyasi koeffisientiga ham bog'liq bo'lib, qiymati ko'pchilik eritma-kirishma tizimlari uchun $10^{-5} - 10^{-4} \text{ sm}^2/\text{s}$ oralig'ida bo'ladi. δ ning qiymati esa asosan eritmada kechadigan gidrodinamik jarayonlarga bog'liq bo'lib, ular kristallning o'sish tezligi, kristall diametrining tigel diametriga bo'lgan nisbati, eritmada temperaturaning taqsimlanishi kabilar bilan aniqlanadi. δ ning qiymati 1 dan 10^{-3} sm gacha o'zgarishi mumkin. Shunday qilib, legirlangan kristallni o'stirish uchun optimal sharoitlarni tanlab olib (tigel va kristallning geometrik o'lchamlari, qizdirgich, tigel va kristallning o'zaro joylashishi, tigel va kristallning aylanish tezliklari, issiqlik sharoiti kabilar) δ ning qiymatini o'zgarmas holda ushlab turishi mumkin. Mana shu holatda qurilgan $K = f(\Delta)$ bog'lanishlar berilgan legirlovchi kirishma tizimi uchun effektiv taqsimlash koeffitsientining kristallning o'sish tezligi v ga bog'lanish grafigini beradi.

Ba'zi bir hollarda agar eritmani aralashtirish xarakteri berilgan bo'lsa, unda δ ning kattaligini analitik usul bilan aniqlash mumkin. Masalan, Choxral'skiy usuli bilan legirlangan kristallar olishda eritma

kristall va tigelni o'z o'qlari atrofida qarama - qarshi tomonlarga aylantirish bilan aralashtirilayotgan bo'lsa va bunda ularning burchak tezliklari mos ravishda ω_k va ω_t bo'lsa, unda o'sish tezligining uncha katta bo'lmagan qiymatlari uchun δ Barton, Prim va Slixterlar taklif qilgan ifoda bilan aniqlanadi:

$$\delta = AD^{1/3} v^{1/6} \omega^{-1/2}, \quad (3.22)$$

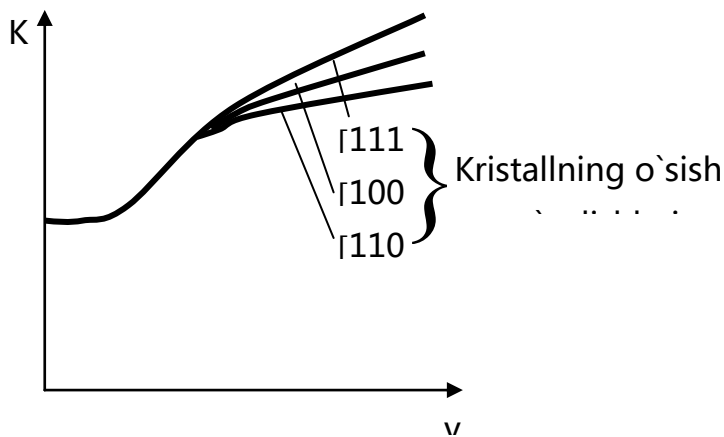
bu erda A 1,3 dan 1,6 gacha qiymatga ega bo'lgan o'zgarmas son; v - eritmaning kinematik qovushqoqligi; $\omega = \omega_k + \omega_t$.

(3.20) formulani keltirib chiqarishda kristalldagi legirlovchi kirishmaning konsentrasiyasi eritmaning sirtiga yaqin qatlamidagi konsentrasiya bilan muvozanatda deb qabul qilindi. Bunday kristallga kirishmaning muvozanatli kirib borishi uchun quyidagi shart bajarilishi kerak:

$$v \ll D_q / a^* = v_D, \quad (3.23)$$

ya'ni kristallning o'sish tezligi undagi kirishmaning diffuziya tezligi v_D dan ko'p marta kichik bo'lishi kerak. Bu erda D_q – kirishmaning qattiq fazadagi diffuziya koeffisienti, a^* - o'sishning elementar zina balandligi.

O'sishning katta tezliklarida (3.22) tengsizlik va unga mos ravishda bo'linish chegarasi sirtidagi muvozanat sharti o'rinli bo'lmas ekan. Bunday sharoitda legirlangan kristallar o'stirishda yoqlarning ta'siri (yoqlar effekti) yuz beradi (3.18-rasm). Bunday holda effektiv taqsimlash koef-fisientining tezlikka bog'lanishi va uning muvozanatli taqsimlash koef-fisientiga bog'liqligi kirishmalarni qamrab olish-ning adsorbsiyali mexaniz-midan kelib chiqib hosil qilinadi.



3.18-rasm. Har xil orientatsiyali o'sayotgan kristall uchun taqsimlash koefitsientining o'sish

Adsorbsiya to'g'risidagi qarashlardan sirt qatlamdagi kirishma konsentratsiyasi fazalardagi (kristallda va eritmada) mos konsentratsiya-lardan yuqori bo'lishi mumkinligi kelib chiqadi. Bunda sirt qatlamining qalinligi bir

necha atom tekisligiga ega bo'ladi deb hisobdanadi. Kristallning o'sishi mobaynida bu tekisliklar qattiq fazaning ichkarisiga o'tib boradi va ulardagi kirishma konsentratsiyasi nomuvozanatli bo'lib qoladi. Buning natijasida kirishmaning oshiqcha yoki kamchil atomlarining eritma ichkarisiga yoki undan tashqariga diffuziyali relaksasiya jarayoni boshlanadi. Shu sababli, agar yangi qatlamlarning hosil bo'lish tezligi katta bo'lsa, unda adsorbsiyalangan kirishmaning oshiqcha atomlari kristallning ichki qismida qolib ketadi. Mana shunga binoan, undagi konsentrasiya muvozanatli holdagidan farq qiladi. Sirt qatlamiga nisbatan aniqlanadigan taqsimlash koefitsienti K_0 dan katta bo'ladi. Bu taqsimlash koefitsientini haqiqiy taqsimlash koefitsienti deyishadi va K^* bilan belgilanadi. Haqiqiy taqsimlash koefitsienti-ning formulasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$K^* = K_0 + (K_s - K_0)e^{-V_D/V}, \quad (3.24)$$

bu erda K_s – adsorbsiyalangan kirishma atomlari konsentratsiyasining ularning eritmada yaqin joylashgan qatlamlardagi konsentratsiyasiga nisbati; V_D – birlik vaqt ichida kirishma konsentratsiyasi e marta o'zgaradigan holdagi o'sish tezligi. Bu shunday tezlikki, bunda qo'shni qatlamlar hosil bo'lish oralig'idagi vaqt intervali adsorbsiyalangan kirishmaning «diffuziyali relaksatsiyasi» vaqtiga teng bo'ladi.

Kristalldagi kirishma konsentrasiyasi S_K bilan eritmaning ichki qatlamlaridagi kirishma konsentrasiyasi S_s orasidagi bogʻlanish effektiv taqsimlash koeffisienti yordamida amalga oshiriladi:

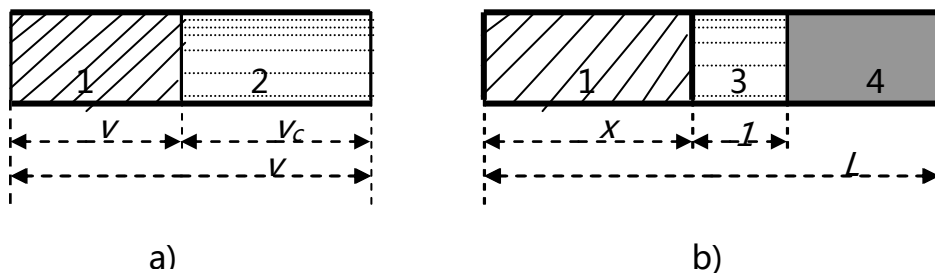
$$K = \frac{K^*}{K^* + (1 - K^*)e^{-\Delta}}, \quad (3.25)$$

bu erda K^* (3.23) boʻyicha aniqlanadi.

(3.24) formula tajriba yoʻli bilan aniqlanadigan bir nechta: δ , K_0 , K_s va v_D parametrlarni oʻz ichiga oladi. Oʻsish tezligi nisbatan katta boʻlmagan sohalarda ishlanganda bu parametrlarning sonini qisqartirish mumkin. Bunda K^* ni v ga bogʻliq emas, faqat kristallografik orientatsiyaga bogʻliq holda oʻzgaradi deb hisoblanadi.

Oʻstiralayotgan kristallarda kirishmaning taqsimoti. Eritmadan legirlangan kristallarni oʻstirishning mumkin boʻlgan hamma usullarini ikkita ideallashtgan sxemaga keltirish mumkin. Birinchi sxema normal yoʻnalishli kristallash yoki normal sovutish deyiladi. Bu holatda materialning hamma qismi

eritilgandan keyin eritmani bitta yoʻnalishda sekin asta kristallash boshlanadi (3.19-rasm, a). Ikkinchi sxema zonali eritish deyiladi. Bunda



3.19-rasm. Asosiy kristallanish jarayonlarining sxemasi:

a–normal yoʻnalishli kristallanish; b–zonali eritish (1–
kristallangan qism; 2 – eritma; 3 – suyuq faza zonasi;

materialning hamma qismi eritilmasdan faqat bir qismi – zonasi eritiladi (3.19-rasm, b).

Binar tizimlarni yoʻnalishli kristallash va zonali eritish metallurgiya jarayonlarida komponentlarning taqsimotini faqat baʼzi bir taxminlar

qabul qilingandagina aniq va ishonchli matematik tasvirlash mumkin. Bu taxminlarning asosiylarini Pfann kiritgan va ular quyidagicha:

1. Qattiq fazadagi komponentlarning diffuziyali qayta taqsimot jarayoni hisobga olinmaydi, ya'ni qattiq fazada komponentlarning diffuziya koeffisienti:

$$D_q = 0. \quad (3.26)$$

2. Suyuq fazada komponentlarning qayta taqsimoti va tarkibning bir xilda bo'lib tekislanishi bir lahzada yuz beradi, ya'ni suyuq fazada diffuziyaning effektiv koeffisienti:

$$D_s = \infty, \quad (3.27)$$

bu shart odatda suyuq fazaning to'la aralashuvi ham deyiladi.

3. Taqsimotning effektiv koeffisientining kattaligi o'zgarmas deb qabul qilinadi, ya'ni

$$K = \text{const}. \quad (3.28)$$

Bu taxmin kirishma konsentrasiyasining kichik sohalari uchun to'g'ri bo'lib, undan tashqari jarayon davomida o'sish tezligining ham o'zgarmas ekanligini nazarda tutadi: $v = \text{const}.$

4. Erish va qotish jarayonlarida kristallanayotgan materialning xajmi o'zgarmaydi, ya'ni suyuq va qattiq fazalarning zichliklari bir biriga teng:

$$\rho_q = \rho_s = \rho \quad (3.29)$$

5. Kondensirlangan (suyuq yoki qattiq) va gaz fazalari orasida materiallar almashuvi yo'q, tizimda uchuvchan va dissosiyali komponentlar yo'q.

Pfann kiritgan taxminlar asosida ikki xil ideallashtirilgan sxema bo'yicha o'stirilayotgan kristallda kirishmalarning taqsimotini ko'rib chiqamiz.

Normal yo'nalishli kristallashda kirishmaning taqsimoti. Bu sxema bilan amaliyotda eng ko'p qo'llaniladigan Brijmen, Choxral'skiy,

Kiropulos kabi usullarda o'sish jarayonida kristallarni legirlash tavsiflanadi.

Normal yo'nalishli kristallash jarayonida kristalldagi kirishma taqsimotini ifodalaydigan tenglamani kiritamiz. Ma'lum bir vaqtda eritmaning miqdori V_s bo'lsin (3.19 -rasm, a). Mana shu lahzadagi eritma va kristalldagi kirishma komponentining konsentratsiyalarini mos holda C_s va C_q bilan belgilaymiz. Aniqlik uchun kirishma komponentining erish temperaturasini asosiy komponentga qaraganda kichik deb qabul qilamiz, ya'ni $K < 1$ bo'lgan holni ko'rib chiqamiz. Kristallanish fronti temperaturasi kamaytirilganda eritmaning dV_s qismi kristallangan bo'lsin. Bunda eritmadan kristallga o'tgan kirishma komponentining miqdori $C_q dV_s$ ga teng bo'ladi. Suyuq fazada esa kirishma komponentining boshlang'ich miqdoriga nisbatan ortiqcha $(C_s - C_q) dV_s$ qismi qoladi. Bu eritmadagi kirishma konsentratsiyasining o'zgarishiga olib keladi:

$$dC_s = -\frac{C_s - C_q}{V_c} dV_s \quad (3.30)$$

yoki (3.27) ni hisobga olsak:

$$dC_s = -\frac{C_s - C_s K}{V_s} dV_s = -\frac{(1-K)C_s}{V_s} dV_s. \quad (3.31)$$

Kasr oldidagi minus eritmaning hajmi kamayganda undagi kirishma konsentratsiyasining oshishini belgilaydi. (3.30) ni integrallash quyidagi boshlang'ich shartlar asosida o'tkaziladi:

$$C_{s|V_c=V_0} = KC_{s|V_s=V_0} = KC^0, \quad (3.32)$$

bu erda V_0 – materialning umumiy hajmi; C^0 – suyuq fazadagi kirishmaning boshlang'ich konsentratsiyasi.

Integrallash natijasida quyidagi ifodani hosil qilamiz:

$$C_q = KC^0 (V_s / V_0)^{K-1} \quad (3.33)$$

(3.32) ifodadagi $S_q(V_c)$ tarkibli qatlam kristallangan lahzada suyuq holatda qoladigan eritma xissasidan tahlil uchun qulay bo'lgan mana

shu lahzada kristallangan modda xissasi g ga o'tamiz. 3.19-rasm, a ga binoan,

$$g = 1 - \left(\frac{V_s}{V_0} \right). \quad (3.34)$$

(3.33) ifodani (3.32) ga qo'yib, quyidagini hosil qilamiz:

$$C_q(g)/C^0 = K(1-g)^{K-1}. \quad (3.35)$$

Pfann taxminlari asosida hosil qilingan (3.34) ifodadan qattiq fazadagi kirishma konsentrasiyasining uning eritmadagi boshlang'ich konsentrasiyasiga nisbati kirishmaning taqsimlanish koeffisienti va kristallning mos qismida qotayotgan lahzadagi kristallanadigan eritmaning xissasiga bog'liq bo'lishligi kelib chiqadi.

Zonali eritishda kirishmaning taqsimoti. Zonali eritish sxemasi bo'yicha o'stirilayotgan kristallarni legirlash jarayonini ham Pfann taxminlari asosida ko'rib chiqamiz. Jarayon davomida eritilgan zona xajmi o'zgarmas bo'lib qoladi, degan qo'shimcha taxmin kiritamiz. Bunda tigel va ko'ndalang kesimi o'zgarmas bo'lgan boshlang'ich zagotovkadan foydalanishimizni hisobga olsak, unda erigan zonaning xajmi o'zgarmas degan taxmindan zonaning uzunligi / jarayon davomida o'zgarmas degan taxminga kelimiz:

$$l = \text{const}. \quad (3.36)$$

Uzunligi L va ko'ndalang kesim yuzasi o'zgarmas s bo'lgan, C^0 konsentratsiya bilan bir xil legirlangan quymadan erigan zona bir marta o'tib bo'lgandan so'ng kristalldagi kirishma taqsimotini ko'rib chiqamiz. Quymaning boshidan x masofada uzunligi / bo'lgan erigan zona joylashgan bo'lsin (3.19-rasm, b). Ergan zonadagi kirishma konsentrasiyasini $C_s(x)$ bilan belgilaymiz. Zonadagi kirishma balansini uning harakati jarayonida ko'rib chiqamiz.

Agar zona dx masofaga siljisa, unda kristallning o'sish frontidan eritmaga quyidagi miqdordagi kirishma siqib chiqariladi:

$$dM_s = (1-K)C_s s dx \quad (3.37)$$

Zonaning ikkinchi chekkasida, boshlang'ich quymaning qatlami erigan joyda, zonaga quyidagi miqdordagi kirishma kirib boradi:

$$dM'_s = C^0 s dx. \quad (3.38)$$

Kristallanish frontida eritmaga faqat kirishma siqib chiqariladi, shu vaqtning o'zida esa erish frontidan eritmaga kirishma bilan bir qatorda $s dx$ xajmli toza material ham kirib keladi. Zonadagi kirishma miqdorining umumiy o'zgarishi quyidagiga teng bo'ladi:

$$dM''_s = [C^0 - C_s(x)] s dx. \quad (3.39)$$

Erigan zonada kirishma konsentrasiyasining zona dx masofaga siljigandagi o'zgarishi quyidagicha bo'ladi:

$$dC_s = \frac{dM_s + dM''_s}{ls} = \frac{(1-K)C_s s + (C^0 - C_s)s dx}{ls} = -\frac{KC_s + C^0}{l} dx. \quad (3.40)$$

(3.40) ni echish uchun boshlang'ich shartni aniqlaymiz. Boshlang'ich quymada kirishmaning bir xil taqsimlanganligidan va to'liq aralashuv sharti (3.26) dan kelib chiqib, boshlang'ich zonadagi kirishma konsentrasiyasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$C_s = (0) = \frac{1}{l} \int_0^l C^0(x) dx = C^0. \quad (3.41)$$

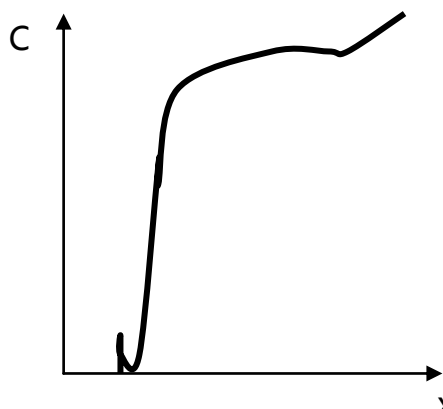
(3.41)ni hisobga olgan holda (3.39) ni integrallaymiz:

$$C_q(x) = C^0 [1 - (1-K)e^{-Kx/l}]. \quad (3.42)$$

(3.42) formula kristallning $x = 0$ dan $x = L-l$ qismigacha to'g'ridir.

Haqiqatan ham, zonaning kristallanish chegarasi $x=L-l$ nuqtaga etib kelgandan so'ng erish chegarasidan har qanday materialning kirib kelishi to'xtaydi va zonaning bundan keyingi harakati natijasida eritmaning xajmi kamayib boradi. Shunday qilib, $x=L-l$ nuqtadan boshlab eritmaning kristallanishi normal yo'nalishli kristallash sxemasi bo'yicha bo'ladi va oxirgi uchastkada kirishmaning taqsimlanishi (3.35) ifoda bilan aniqlanadi. Bu erda C^0 sifatida (3.42) dan aniqlanadigan $C_q(L-l)$ kattalik olinadi.

Bir jinsli legirlangan monokristallar olish usullari. Ma'lumki, yarim o'tkazgichli va dielektrik materiallar kristallarining elektrofizik



3.20-rasm. O'stirilgan kristalldagi kirishma konsentrasiyasining uzunlik bo'yicha makronotekislarning mikronotekislar

xossalari ular tarkibidagi kirishmalarning konsentrasiyalari bilan aniqlanadi. Ayniqsa, legirlangan monokristallar asosida tayyorlanadigan asboblarning parametrlari stabil va qaytariluvchan bo'lishi uchun ulardagi legirlovchi kirishmalarning taqsimoti bir jinsli bo'lishi

katta ahamiyatga ega.

O'sayotgan kristallarda kirishmalarning uzunlik va ko'ndalang kesim bo'yicha notekis taqsimlanishining hosil bo'lishiga ko'p omillar sabab bo'ladi. Notekis taqsimotlar ularning hosil bo'lish sabablariga ko'ra ikkiga bo'linadi: fundamental va texnologik. Fundamental notekis taqsimotlar ko'p komponentli tizimlarda faza o'zgarishlarining asosiy qonunlaridan kelib chiqqan holda o'sayotgan kristall tarkibining qonuniy o'zgarishlari bilan bog'liqdir. Bunday qonuniy notekis taqsimot o'stirilgan kristallning hamma xajmini egallaydi va ko'pincha uni o'zgarmas tarkibning segregasiyalı buzilishi ham deyiladi. Kristallning o'sishi jarayonida tarkib taqsimotining bunday qonuniy buzilishiga noqonuniy xarakterga ega bo'lgan texnologik notekis taqsimot ham qo'shiladi (3.20 - rasm). Bunday notekis taqsimotlar amalda qo'llanilayotgan texnologik jarayon va apparaturalarning mukammal emasligi va kristall o'sish sharoiti barqarorligining buzilishi natijasida yuz beradi. Bunday nojinsliliklar kristallning uncha katta bo'lmagan xajmini egallaydi va shu sababli ularni lokal nojinsliliklar ham deyishadi. Yarim o'tkazgich va dielektriklarning monokristallarini o'stirish uchun

texnologik apparatlarning konstruksiyasi va ishlab chiqarilishining zamonaviy bosqichi kristallar tarkibida texnologik sabablar natijasida hosil bo'ladigan nojinsliliklarni minimumga keltirish imkoniyatini beradi. Lekin kristallarning o'sish jarayonida fundamental sabablar natijasida nojinsliliklar juda ko'p hosil bo'ladi. Shuning uchun tarkibi va hossalari bir jinsli bo'lgan kristallar olishda asosiy vazifa fundamental nojinsliliklarga qarshi kurash usullarini yaratishdir, chunki texnologik nojinsliliklarga qarshi o'laroq ularni apparat va jarayonlarni mukammallashtirish yo'llari bilan kamaytirib bo'lmaydi, shu sababli ular bilan kurashish uchun maxsus usullar ishlab chiqishga to'g'ri keladi.

Endi mana shu usullarning asosiylari bilan tanishamiz.

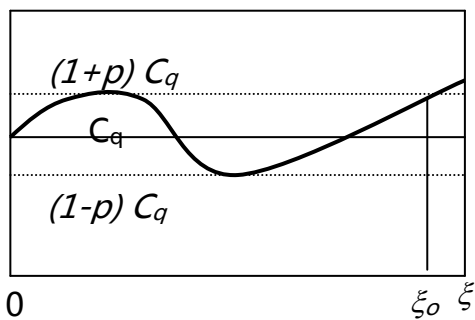
Kristallar tarkibini tekislashning segregasiyali usullari. Hosil qilinayotgan kristallar tarkibini tekislashning segregasiyali usullari ikkiga: passiv va aktiv usullarga bo'linadi. Passiv usulda kirishmalar taqsimotining berilgan bir jinsligi asosidagi monokristallar kristallash jarayoniga birorta o'zgarish kiritilmasdan olinadi, ya'ni eritmadan oddiy yo'nalishli kristallash usuli bilan o'stirilgan monokristallning bir jinsli qismidan foydalaniladi. Aktiv usullarga o'sish vaqtida legirlash jarayoniga aktiv ta'sir ko'rsatadigan va tarkib o'zgarish jarayonini programmalash imkoniyatini beradigan usullar kiradi. Bu usullarning effektivligini qiyosiy baholash uchun o'lchov (kriteriy) kiritiladi. Bunday o'lchov bo'lib jarayon chiqishi yoki yaroqli materialning chiqishi deb ataladigan kattalik hisoblanadi. Bunda chiqish deb, xossalari keyinchalik foydalanish imkoniyatini beradigan modda miqdori qismining texnologik qayta ishlov berilgan umumiy qismiga nisbati tushuniladi. Jarayon chiqishi mikdoriy jihatdan xajmiy yoki massali birliklarda ifodalanadi. Jarayon chiqishining kattaligi kristalldan foydalanish shartlari belgilaydigan talablarga bog'liq bo'ladi. Talablar kristalldagi legirlovchi kirishmaning konsentratsiyasi C_q talab qilingan $\bar{C}_q$ qiymatdan tarkibning mumkin bo'lgan og'ishi deb ataladigan va nisbiy

birlikda ifodalanadigan p kattalikka farq qilinishi bilan belgilanadi. Kristallanishning biror bir jarayoni natijasida olingan kristalldagi tarkib taqsimotini $C_q = f(\xi)$ ko'rinishdagi bog'lanish bilan ifodalash mumkin. Bunda ξ jarayonni xarakterlaydigan umumlashgan koordinatani belgilaydi. Beriladigan kattalik p kristall bo'ylab $C_q = f(\xi)$ ning mumkin bo'lgan tebranishining chegaralarini aniqlaydi va bu chegaralarda $C_q = f(\xi)$ C_q dan katta ham, kichik ham bo'lishi mumkin (3.21-rasm).

ξ_0 nuqtada kristallning foydalanishga yaroqli bo'lishi uchun uning bu nuqtadagi tarkibi quyidagi tengsizlikni qanoatlantirishi zarur:

$$\left| \frac{C_q(\xi_0) - \bar{C}_q}{\bar{C}_q} \right| \leq p. \quad (3.43)$$

Konsentratsiya grafigida (3.21-rasm) (3.43) tengsizlikni



3.21-rasm. Mumkin bo'lgan chetga og'ish qiymati bo'yicha yaroqli

qanoatlantiruvchi $C_q(\xi_0)$ ning kattaligi mumkin bo'lgan chetga og'ish sohasini chegaralovchi chiziqlar oralig'ida yotadi, ya'ni foydalanishga yaroqli monokristalldagi kirishma konsentratsiyasi

$$(1+p)C_q \geq (1-p)C_q \quad (3.44)$$

intervalda joylashadi.

Agar (3.43) tengsizlik bajariladigan kristallning xajmi V_p ni jarayonda qatnashayotgan materialning barcha xajmi V ga bo'lsak, monokristallning qancha qismi yaroqli ekanligini yoki mumkin bo'lgan berilgan chetga og'ish p uchun jarayon chiqishining kattaligini topamiz:

$$r_p = V_p / V \quad (3.45)$$

Tarkibni tekislashning passiv usullari. Yarim o'tkazgich va dielektriklarning bir jinsli kristallarini olishning oson usuli bu xech qanday o'zgarishsiz oddiy kristallash jarayonlari: normal yo'nalishli sovutish (Brijmen, Choxral'skiy va boshqa usullar) va zonali eritishlardan

foydalanishdir. Bunda yuqorida aytilgandek kristallning kirishmalar taxminan bir tekis taqsimlangan qismidan foydalaniladi. Bu jarayonlardagi kirishmalar taqsimot egri chiziqlarining tahlili shuni ko'rsatdiki, bunday bir tekis qism o'stirilgan kristallning yo bosh qismida, yo oxirgi qismida hosil bo'lar ekan. Shu sababli mana shu qismlardan foydalanish maqsadga muvofiqdir.

Kristall tarkibini tekislashning aktiv usullari. Bu usullar kirishmalar taqsimotining bir xilligini uzunlik bo'yicha oshirish uchun xizmat qiladi va passiv usullardan farqli o'laroq kristallanish jarayoni davomida ma'lum dastur asosida unga o'zgarishlar kiritilib turiladi. Tarkib tekislashning aktiv usullarini ikki asosiy guruhga bo'lish mumkin.

Birinchi guruhga monokristall o'stirish jarayoni davomidp eritmadagi kirishma konsentrasiyasini bir xil ushlab turish maqsadida eritmani (agar $K < 1$ bo'lsa) toza holdagi, yoki (agar $K > 1$ bo'lsa) legirlovchi kirishmali holdagi qattiq, suyuq yoki bug'li faza bilan oziqlantirib turadigan usullar kiradi. Ikkinchi guruhga monokristallar o'sish sharoitini o'zgartirib turadigan usullar kiradi. Bunda kristallanish jarayonini o'zgartirish dasturi, monokristallar o'stirish jarayoni davomida kirishmalarni egallab olish tezligining o'zgarmasligini ta'minlaydi.

Kristallar tarkibining texnologik nojinsliliklari va ularni kamaytirish usullari. O'stirilayotgan kristallar tarkibining bu turdagi nojinsliliklarining hosil bo'lishiga foydalanayotgan texnologik jarayonlarning va qurilmalarning mukammal emasligi sabab bo'ladi. Bularga vaqt bo'yicha pech` temperaturasining nazoratsiz tebranishlari, eritma aralashishi sharoitining bir xil bo'lmasligini yuzaga keltiruvchi qurilma mexanik qismlarining harakat tezligining nobarqarorligi va boshqalar kiradi.

Jarayon va qurilmalarning bu nomukammalliklari kristallning uzunligi va ko'ndalang kesimi bo'yicha tarkibning xaotik lokal

tebranishlarini hosil qiladi. Quyida kristallardagi nojinsliliklarga sabab bo'ladigan asosiy omillarni ko'rib chiqamiz.

Bu omillarning asosiylaridan bittasi kristallanish frontiga tegib turadigan eritmadagi suyuqlik oqimining notekis taqsimlanishidir. Buning natijasida eritmadagi diffuzion δ qatlamning qalinligi kristallanish fronti sirtining har xil nuqtalarida har xil bo'lib qoladi. Bu esa o'sayotgan kristallning kesim yuzasida kirishmaning notekis taqsimlanishiga olib keladi.

Amalda δ - qatlam qalinligining notekisligini kamaytirish maqsadida bir vaqtning o'zida tigel va kristallni qarama-qarshi tomonlarga aylantiriladi. Tajribalarning ko'rsatishicha, kristallning bir jinsligini oshirish uchun kristall maksimal, tigel minimal tezlik bilan aylantirilishi kerak ekan.

Elektr o'tkazuvchan eritmada suyuqlik oqimini kuchsizlantirish va mos holda o'sayotgan kristalldagi kirishmaning nojinsli taqsimotini yo'qotish maqsadida eritmali tigel magnit maydoniga joylashtiriladi. Bu esa o'tkazuvchan eritma harakatini sekinlashtiradi.

3.10.3. Gaz fazasidan o'stirish jarayoni davomida kristallarni legirlash

Kristallarni legirlashda qo'llaniladigan usul ularni gaz fazasidan qanday usul bilan o'stirilayotganligi bilan aniqlanadi. Gaz fazasidan kimyoviy o'tqazish bilan kristallar o'stirishda berilgan tarkibli legirlovchi bug'li gaz aralashmasini hosil qilish usuliga mos holda legirlashning quyidagi asosiy usullari farq qilinadi:

1. Suyuq legirlash usuli (yoki suyuq ligatur).
2. Individual legirlovchi birikmalar usuli.
3. Gazrazryadli usul.

Suyuq legirlash usulida legirlovchi kirishmaning manbai bo'lib o'tqazilayotgan asosiy elementning suyuq manbaidagi shu kirishmaning suyuq birikmasining suyultirilgan eritmasi hisoblanadi. Masalan, kremniyni $SiCl_4$ bug'laridan o'tqazishda kristallni fosfor bilan legirlashda toza suyuq $SiCl_4$ ga aniq nisbatda ishchi holatda suyuq bo'lgan fosfor galogenidi PCl_3 qo'shiladi. Bu usulda asosan 250S da bug'larining elastikligi 600-27000 Pa bo'lgan suyuq ligaturlardan foydalaniladi. Odatda kristallardagi talab qilingan kirishmalarning konsentrasiyalari nisbatan katta bo'lmaganligi sababli ko'p marta suyultirilgan va kirishmalarning nisbiy miqdori 10^{-9} dan 10^{-2} gacha bo'lgan eritmalaridan foydalaniladi. Bular legirlash sathini 10^{20} dan 10^{25} at/ m³ gacha bo'lishini ta'minlaydi. Suyuq fazadagi kirishma komponentining konsentrasiyasini aniq hisoblash qiyinligi sababli berilgan solishtirma qarshilikli kristall olish uchun amalda tajriba yo'li bilan topilgan quyidagi nisbatdan foydalaniladi:

$$C_q = A R_{kir} / R_{asos} , \quad (3.46)$$

bu erda C_q – kristalldagi berilgan kirishma konsentrasiyasi; A – o'zgarmas son; R_{kir} / R_{asos} – kirishma (R_{kir}) va asos (R_{asos}) komponenti bug'larining parsial bosimlari nisbati. Fosfor bilan legirlangan kremniyning epitaksial qatlamlarini o'stirishda bu nisbat quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi (m⁻³):

$$C_q = 2,6 \cdot 10^8 (P_{PCl} / P_{SiCl}) . \quad (3.47)$$

Kirishma birikmasi va uning asoslari uchuvchanligining har xilligi tufayli vaqt o'tishi bilan ularning nisbati o'zgarishi mumkin. Shu sababli gaz fazali kirishma tarkibini saqlash maqsadida uni asosiy komponent bilan qo'shimcha ta'minlab turish uchun asosiy bug'lantirgich oldiga suyuq ligaturali bug'lantirgich o'rnatiladi. Agar asosiy komponentning uchuvchanligi kirishmaning uchuvchanligidan katta bo'lsa, unda kompensasiyalovchi bug'lantirgichning temperaturasi asosiy

bug`lantirgichning temperaturasidan past bo`lishi kerak. Mana shunday sharoitda asosiy legirlovchi komponentning sarflanishi bilan kristallning solishtirma qarshiligi o`zgarmaydi.

Suyuq legirlash usuli kremniyning fosfor, mish`yak yoki borning konsentrasiyalari  $10^{20} - 10^{25}$  at/m<sup>3</sup> bo`lgan bir jinsli epitaksial qatlamlarini; sur`ma bilan legirlaganda esa legirlash sathi $5 \cdot 10^{24}$ at/m³ dan oshmaydigan epitaksial qatlamlarini olish imkoniyatini beradi.

Bu usulga qaraganda individual uchuvchi birikmalar usulida legirlash jarayonini ancha yaxshiroq boshqarish mumkin. Bunda kirishmali birikma oqimi alohida olinib, u kristall o`sadigan zona oldida ta`sirlanuvchi gazlarning asosiy oqimi bilan aralashadi. Berilgan konsentrasiyali kirishma birikmasi suyuq kirishmali birikma yoki gazsimon birikmalar (ishchi sharoitda) fosfin PN_3 , arsin AsH_3 , diboran B_2N_6 , uchxloridli bor BCl_3 , stibin SbH_3 kabilar bo`lgan alohida bug`lantirgich orqali transportlovchi gaz o`tkazish bilan shakllantiriladi. Ko`pincha kristallarni legirlash uchun gazsimon kirishmali birikma sifatida kirishmalarning gidridlaridan foydalaniladi. Bu birikmalar apparaturalarni kamroq ifloslantiradi. Legirlash qulayroq bo`lishi va zaharlanish xavfini kamaytirish uchun amalda bu birikmalarning vodorod yoki inert gazlari bilan kuchli suyultirilgan, 10^{-4} - 10^{-3} % gidridli tayyor aralashmasidan foydalaniladi.

Bu usulning kamchiligi shundaki, bunda juda kichik miqdordagi gazsimon moddalarni aniq o`lchash kerakligidadir. Masalan kichik konsentrasiyali kristallarni olish uchun ko`pincha ikki va uch boqichli suyultirish talab qilinadi. Bundan tashqari po`lat ballonlarda saqlangan kirishmalarning gidridlari vaqt o`tishi bilan sekin asta parchalanadi. Bu esa legirlash jarayonini boshqarishni qiyinlashtiradi. Bunday kamchilikni kristall o`stiriladigan qurilma oldidagi legirlovchi gazli aralashma hosil qiladigan kamerasi bo`lgan legirlash usullarida yo`qotish mumkin. Yarim o`tkazgichlar texnologiyasida qo`llanilayotgan bunday usullardan biri

gazorazryadli legirlash usulidir. Bu usulning mohiyatini kremniyning legirlangan epitaksial qatlamlarini hosil qilish misolida ko'rib chiqamiz.

Kremniyning epitaksial qatlamlari o'stiriladigan reaktorga gaz magistrallarining bittasidan vodorod va tetraxlorid kremniy beriladi, boshqasidan esa gazorazryadli kameradan o'tgan vodorod beriladi. Kameraga III va V guruh elementlari materiallaridan tayyorlangan elektrodlar joylashtirilgan bo'ladi. Elektrod materiallari elektr o'tkazuvchan, yuqori darajada bir jinsli hamda ishchi temperaturada yuqori bo'lmagan bug' bosimiga ega bo'lishi kerak. Kremniyning kovakli elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan epitaksial qatlamlarini hosil qilish uchun LaB_6 , B_4C , AlB_{12} birikmalaridan tayyorlangan elektrodlardan foydalaniladi; elektronli epitaksial qatlamlarni hosil qilish uchun esa surma, 0,1% fosforli kremniy qotishmasi yoki 1%li mish'yakli surma qotishmasi kabi elektrodlardan foydalaniladi. Elektrodlar oralig'iga yuqori kuchlanish berilganda gazli razryad hosil bo'ladi. Natijada elektrodlardagi birikma asosida uchuvchan legirlovchi birikma hosil bo'ladi. Legirlash jarayoni quyidagi parametrlar yordamida boshqariladi: 1) razryad kamerasidan oqib o'tayotgan gazning tezligi; 2) razryadni qo'llab turuvchi kuchlanish kattaligini aniqlaydigan elektrodlar oralig'i masofasi; 3) razryad turini (biqsima, uchqunli, yoy) belgilovchi elektrodarga beriladigan quvvat; 4) impulsli kuchlanishdan foydalanilganda impulsar ketma ketligi chastotasi; 5) elektrodlar materiali.

Odatda elektrodlar oralig'i $L \approx 10$ mm gacha tanlab olinadi; bunda gaz razryadini uyg'otish uchun kerak bo'ladigan kuchlanish 2-15 kV ni tashkil qiladi; kuchlanish generatorining quvvati bir necha vattgacha bo'ladi.

Ilovalar

1. Asosiy yarim o'tkazgichlarning elektr xossalari

Xossalari	Kremniy	Germani y	Galliy arsenidi	Galliy fosfidi
Taqiqlangan zona kengligi, eV: 0 K da. 300 K da.	1,21 1,10	0,756 0,66	1,52 1,43	2,34 2,26
Taqiqlangan zona kengligining temperaturaviy koeffitsienti, 10^{-4} , eV/K	- 4,1	- 4,4	- 5,0	- 3,67
Xususiy solishtirma qarshiligi, Om·sm, 300 K da.	$2,5 \cdot 10^5$	47	$3,7 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{16}$
Zaryad tashuvchilarning xususiy konsentratsiyasi, 300 K da.	$1,45 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{18}$	10^7	10^5
Kirishmalarsiz yarim o'tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi, 300 K da, $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{c}$: elektronlar uchun.	1450 480	3900 1900	10500 425	300 100

kovaklar uchun				
Kirishmalarsiz yarim o'tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning harakatchanligining temperaturaga bog' lanishi, cm ² ·K/V·c:	1300· (T/300) ⁻²	4500· (T/300) ^{-1,6}	8500· (T/300) ⁻¹	110· (T/300) ^{-1,5}
elektronlar uchun	500·	1,6	420·	75·
kovaklar uchun	(T/300) ^{-2,7}	3500· (T/300) ^{-2,33}	(T/300) ^{-2,1}	(T/300) ^{-1,5}

2. Eng ko'p tarqalgan kirishmalarning asosiy yarim o'tkazgichlardagi elektr

xususiyatlari

Yarim o'tkazgich	Neytral kirishmalar	Donorlar	Akseptorlar	Chuqur sathlar hosil qiladigan kirishmalar
Kremniy	H, N, C, Ge, Sn, Pb, Ar	P, As, Sb, Li	B, Al, Ga, In	Cu, Au, Zn, Mn, Fe, S, Ni
Germaniy	H, N, C, Ge, Sn, Pb, Ar	P, As, Sb, Li	B, Al, Ga, In	Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Mn, Ni, Fe, S, Se, Te
Galliy arsenidi	H, N, B, Al, In, P, Sb	Si, Sn, Te, S, Se	Zn, Cd, Be, Li	Cr, Fe, V, Ni, Mg, Au, Ge, Mn, Ag
Galliy fosfidi	H, N, B, Al, In, As, Sb	Si, Sn, Te, S, Se	Be, Zn, Cd, Mg, C	Cu, O, Ge, Co, Fe, Cr, Mn

3. O'n va uning bo'laklariga karrali bo'lgan kattaliklarni hosil qilish uchun old qo'shimchalar va ularning nomlanishi

Ko'paytma	Old qo'shimcha	
	Nomlanishi	Belgilanishi
		T
$1\,000\,000\,000\,000=10^{12}$	tera	Г
$1\,000\,000\,000=10^9$	giga	М
$1\,000\,000=10^6$	mega	к
$1\,000=10^3$	kilo	г
$100=10^2$	gekto	да
$10=10^1$	deka	Д
$0,1=10^{-1}$	desi	с
$0,01=10^{-2}$	santi	м
$0,001=10^{-3}$	milli	
$0,000\,001=10^{-6}$	mikro	
$0,000\,000\,001=10^{-9}$	nano	
$0,000\,000\,000\,001=10^{-12}$	piko	
$0,000\,000\,000\,000\,001=10^{-15}$	femto	
$0,000\,000\,000\,000\,000\,000$	atto	
$001=10^{-18}$		

4. SI birliklar tizimidagi ingliz-amerika o'lchov birliklari

Chiziqli o'lchovlar

Naimenovanie velichini	Znachenie v edinix SI
------------------------	-----------------------

LIGA morskaya	5,56 km
LIGA (ustavnaya, statutnaya)	4,83 km
MILYa morskaya	1,852 km
MILYa (ustavnaya, statutnaya)	1,609 km
KABEL`TOV (British)	183 m
KABEL`TOV (U.S.)	219,5 m
YaRD	914,4 mm
FUT	304,8 mm
DYuYM	25,4 mm
LINIYa	2,1 mm
TOChKA (point)	0,351 mm
KALIBR	0,25 mm
MIL	0,025 mm

Yuza o`lchovlari

Naimenovanie velichini	<i>Znachenie v edinisax SI</i>
AKR	0,405 gektara
AR	100 kv.m
Kv. YaRD	0,836 kv.m
Kv. FUT	929 kv.sm
Kv. DYUYM	6,45 kv.sm
Kv. LINIYa	4,4 kv.sm

Og`irlik o`lchovlari

<i>Naimenovanie velichini</i>	<i>Znachenie v edinisax SI</i>
FUNT	453,59 g
UNSIYa	28,35 g
DRAXMA	1,772 g
GRAN	64,8 mg

Yuvelir o'lvovlari

Naimenovanie velichini	Znachenie v edinisax SI
FUNT	373,2 g
UNSIYa	31,1 g
KARAT	200 mg
GRAN	64,8 mg

Suyuqliklar uchun o'lvovlar

Naimenovanie velichini	Znachenie v edinisax SI
BARREL` (for liquids) British	163,6 l
BARREL` (for liquids) U.S.	119,2 l
BARREL` (for crude oil) British	158,988 l
BARREL` (for crude oil) U.S.	138,97 l
GALLON British	4,546 l
GALLON U.S.	3,785 l
PINTA British	0,57 l
PINTA U.S.	0,47 l
RYuMKA	56,8 ml
STOLOVAYa LOJKA	14,2 ml
ChAYNAYa LOJKA	4,4 ml

5. Sharq o'lchovlari

Og'irlik o'lchovlari

Kattaliklarning nomlanishi	SI birliklaridagi qiymati
Pud	16 kg
Botmon	20 kg
Min	3 kg
Man	680 gr
Misqol	4,1-4,4 gr
Moshsha	1,98 gr
Nimcha	2 kg
Osor	17 gr
Paysa	50 gr
Sir	74,24 gr
To'la	11,232 gr
Harvar	30-100 kg
Qadoq	400 gr
Sari	2,5 kg
Uqya	33,4 gr
Qiyrat	0,236 gr
Chaksa	5,3 kg
Daxsar	30-32 kg

Uzunlik, yo'l va yuza o'lchovlari

Kattaliklarning nomlanishi	SI birliklaridagi qiymati
Arshin	71,1 sm
Gaz	70-90 sm

Qarich	20 sm
Qari	55 sm
Tutam	8 sm
Tosh	7-8 km yo`l
Farsax	8,5-9,5 km yo`l
Chaqirim	1,5 km yo`l
Tanob	0,25-0,5 ga

Adabiyotlar

1. Таиров Ю. М. , Цветков В. Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. М. Высшая школа 1986.

2. Крапухин В. В. , Соколов А. М. , Кузнецов Г. Д. Физико-химические основы технологии полупроводниковых материалов. М. Металлургия. 1982.

3. Электрон техника материаллари ва мақсулотлари технологияси. Услубий кўрсатма. Пармонёулов И.П, Умирзаёов Б.Е. ва бошқалар. Тошкент. 1999

4. Нормуродов М.Т., Умирзаёов Б.Е., Пармонёулов И.П. Электрон техника материаллари ва ўурилмалари технологияси. Дарслик. Тошкент. Меќнат. 2004.

5. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника – под ред. Н. Д. Федорова. М.; Радио и связь, 1998.

6. Барыбин А. А. , Сидоров В. Г. «Физико-технологические основы электроники». Санкт-Петербург. 2001.

7. Черняев В. Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. М. Высшая школа. 1987.

8. Поляков А.А. – «Технология керамических радиоэлектронных материалов» – М., Радио и связь, 1989.

Mundarija