

A. Teshaboyev, S. Zaynobidinov, E. A. Musayev

**YARIMO‘TKAZGICHLAR
VA YARIMO‘TKAZGICHLI ASBOBLAR
TEXNOLOGIYASI**

*O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta’lim vazirligi tegishli
oliy o‘quv yurtlari uchun o‘quv qo‘llanma sifatida tavsiya etgan*

Toshkent – 2006

Teshaboyev A.

Yarimo'tkazgichlar va yarimo'tkazgichli asboblarning texnologiyasi. A.Teshaboyev, S.Zaynobidinov, E.A.Musayev. — T.: Talqin, 2006.-336 b.

I.1.2. Muallifdosh.

ББК 32.843.2я73+32.852я73

O'quv qo'llanmada yarimo'tkazgichlar haqida umumiy ma'lumotlar, yarimo'tkazgichli moddalar olish va yarimo'tkazgichli asboblarning tayyorlash texnologiyasi bayon qilingan. Bundan tashqari, ma'vzularni chuqurroq o'zlashtirishga yordam beruvchi rasmlar, jadvallar ilova qilingan.

Qo'llanma universitetlarning « Yarimo'tkazgichlar va dielektriklar fizikasi» va texnika OO'Ylarining «Yarimo'tkazgichli asboblarning» va «Mikroelektronika» yo'nalishi bo'yicha ta'lim olayotgan bakalavr va magistrlik uchun mo'ljallangan. Undan aspirantlar va ilmiy-texnik xodimlar ham foydalanishlari mumkin.

Taqrizchi:

akademik R. Mo'minov.

SO'ZBOSHI

Yarimo'tkazgichlar fizikasi va yarimo'tkazgichlar elektronikasi hozirgi zamon kishilik jamiyati hayotining deyarli hamma asosiy sohalariga kirib kelgan, faqat u bajarishi mumkin bo'lgan xilma-xil murakkab ilmiy-texnik vazifalarni ado etmoqda. Bu fan va texnika sohasi bo'yicha ishlayotgan ilmiy, injener-texnik xodimlar, malakali ishchilar ancha ko'p. Ushbu yo'nalishda turli oliy o'quv yurtlarida ko'plab yosh mutaxassislar yetishtirilmoqda.

Ularning aksariyatini o'zbek tilida ta'lim olayotgan yoshlar tashkil qiladi. Shuni e'tiborga olib, keyingi yillarda yarimo'tkazgichlar fizikasi, yarimo'tkazgichli asboblار fizikasi, yarimo'tkazgichlar parametrlarini o'lchash usullari va boshqa o'quv fanlari bo'yicha o'zbek tilida o'quv qo'llanmalari nashr qilindi, bu esa, shubhasiz, mazkur fanlarni o'zlashtirishda talabalarga katta yordam ko'rsatganligini aytib o'tilgan qo'llanmalarining tanlovlarda taqdirlanishi ham tasdiqlab turibdi.

Biz, mualliflar, yaratilgan o'quv qo'llanmalari to'plamini yana bir o'quv qo'llanma — "Yarimo'tkazgichlar va yarimo'tkazgichli asboblار texnologiyasi" kitobi bilan to'ldirilsa, maqsadga muvofiq bo'lar degan niyat bilan ushbu qo'llanmani yozdik.

Yarimo'tkazgichlarning ajoyib xossalari namoyon bo'ladigan sifatli moddalar olish texnologiyasi hozirgi zamon sanoati tizimida katta va muhim o'rin tutadi.

Yarimo'tkazgichlar va ular bilan birga ishlatiladigan boshqa moddalar yetarli darajada toza bo'lishi zarur. Bu maqsadda bir necha bosqichli toza moddalar sanoati barpo qilingan, tuzilishi mukammal bo'lgan

kristallar o'stirish usullari ishlab chiqilgan. Shunday toza, mukammal moddalar asosida turli xizmatlarni bajaradigan elektron asboblari, qurilmalar, mikrosxemalar tayyorlanadi va ular amalda juda keng miqyosda qo'llanadi.

Yuqorida aytilganlardan ko'rinib turibdiki, yarimo'tkazgich moddalar xossalarini tadqiqlovchilar, ulardan asboblari tayyorlaydigan va ishlatadigan mutaxassislar qat'iy talablarni qanoatlantiradigan yarimo'tkazgich moddalar va asboblari ishlab chiqarish texnologiyasi asoslarini bilishlari kerak.

O'quv qo'llanma uch qismdan (yarimo'tkazgichlar haqida umumiy ma'lumot, yarimo'tkazgichli moddalar olish texnologiyasi, yarimo'tkazgichli asboblari tayyorlash texnologiyasi qismlaridan) iborat bo'lib, bu jabhalarning asosiy tushunchalari fizik, kimyoviy, fizik-kimyoviy jarayonlari, ularning qonuniyatlari bayon qilingan, keng qo'llaniladigan asosiy texnologik usullarning mundarijasi, ularning afzallik va kamchiliklari yetarlicha batafsil tahlil qilingan. Har bir bob oxirida nazorat uchun kerakli savollar kiritilgan.

O'quv qo'llanma oxirida o'quvchiga tavsiya qilinadigan adabiyot ro'yxati, moddalarning kerakli fizik va kimyoviy xossalarini mujassamlantirgan jadvallari joylangan.

Ushbu o'quv qo'llanma yarimo'tkazgichlar va dielektriklar fizikasi bo'yicha magistraturada ta'lim olayotgan yoshlarga mo'ljallangan, ammo, o'ylaymizki malaka oshirishda undan aspirantlar, ilmiy xodimlar, yosh o'qituvchilar ham foydalanishi mumkin.

Kitobning 1-5-boblarini prof. A.Teshaboyev, 6-12-boblarini prof. S.Zaynobidinov, 13-19-boblarini dots. E.A.Musayev yozgan.

Ushbu qo'llanmani tayyorlashda katta yordam bergan Sh.E.Musayevga mualliflar o'z minatdorchiliklarini bildiradi.

O'quv qo'llanma ayrim kamchiliklardan xoli emas, albatta. Shu bois o'z fikr-mulohazalarini nashriyot orqali bizga bildirgan mutaxassislarga oldindan minatdorchilik bildiramiz.

Mualliflar

BIRINCHI QISM

YARIMO'TKAZGICHLAR HAQIDA UMUMIY MA'LUMOT

1-BOB. QATTIQ JISMLAR FIZIKASINING ASOSIY TUSHUNCHALARI

1.1. Kirish

Qattiq jismlarning jamiyat faoliyatida tutgan o'rni hammaga ma'lum. Ular bilan kundalik faoliyatimizda to'qnashib turamiz, ularni qo'llaymiz, ulardan bevosita foydalanamiz. Odamlar ko'p zamonlardan beri qattiq jismlar tuzilishi, ularning turli xossalari bilishga qiziqqan, olimlar shu sohada uzluksiz ravishda tadqiqot olib borgan, ishbilarmon muhandislar, ixtirochilar har xil vazifalarni bajaradigan ish qurollari, asboblari, qurilmalar barpo qilishgan. Klassik fizika tarkibida Qattiq jismlar klassik fizikasi shakllanib, bunday jismlarning mexanik, elektrik, magnitik, issiqlik xossalari o'rganish sohasida olib borilgan ilmiy tadqiqotlar natijasida bir qator zaminiiy muhim qonuniyatlar topilgan edikim, bu asosda texnika sohasida katta taraqqiyot amalga oshgan edi.

Ammo, 20-asrning birinchi choragida Kvantlar nazariyasining maydonga kelishi va uzil-kesil shakllanishi shu asrning 30-yillari boshlanishiga qadar qattiq jismlar kvant fizikasi asoslari ishlab chiqilishiga olib keldi. Bu atom kvant fizikasining davomiy rivoji bo'lib, qattiq jismlar klassik fizikasining qo'llanish chegaralarini aniqlab berdigina emas, balki qattiq jismlar haqida tasavvurlarni muhim darajada isloh qildi, kvant fizika zaminida qattiq jismlarning barcha xossalari qaytadan ko'rib chiqildi va asosiy qonuniyatlar tizimi aniqlandi.

Xususan, qattiq jismlar tuzilishi, elektrik xossalari va h.k. sifatлари bo'yicha turlarga ajratildi, ular ayrim batafsil o'rganib chiqildi.

Qattiq jismlarning muhim xossalari tushunish uchun ularning tuzilishi haqida muayyan tasavvurga ega bo'lish zarur.

1.2. Kristall va amorf qattiq jismlar

Qattiq jismlar, albatta, juda ko'p atomlar (ionlar, molekullar)dan tashkil topgan bo'ladi. Qattiq jismlarda atomlarning joylashishi tartibiga qarab, ular kristall va amorf jismlar guruhlariga ajraladi.

Kristallarda atomlar butun jism hajmida davriy ravishda qat'iy tartibda (uzoq tartibda) joylashgan bo'ladi. Amorf qattiq jismlarda atomlar butun jism hajmida qat'iy tartibda joylashgan bo'lmaydi, ammo yaqin qo'shnilar joylashishida muayyan tartib (yaqin tartib) bor.

Kristall qattiq jismlarda qat'iy kritik nuqtalar (suyulish va qotish temperaturasi) mavjud, amorf jismlar esa muayyan temperaturalar oralig'ida suyulib yoki qotib boradi.

Ushbu qo'llanmada biz asosan kristallarni o'stirish texnologiyasi masalalarini bayon qilamiz, shuning uchun kristallarning tuzilishi va unga tegishli tushunchalar bilan qisqacha tanishib chiqaylik.

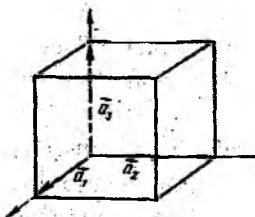
Kristallda uchta bosh yo'nalish bo'ladi, ular uchta vektor orqali ifodalanadi. Kristallda davriy joylashgan atomlar markazlari joylashgan nuqtalar *tugunlar* deyiladi, tugunlar orasidagi hajmi esa *tugunlararo fazo* deyiladi.

Agar, fikran, tugunlarni to'g'ri chiziqlar bilan tutashtirsak, kristallning fazoviy panjarasi (I.1-rasm) hosil bo'ladi.

Fazoviy kristall panjaraning eng kichik katagi elementar yacheyka (elementar katak) deyiladi, u sodda holda uch bosh yo'nalishda qo'shni atomlarni tutashtiruvchi $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ vektorlar asosiga qurilgan parallelepiped shaklida bo'ladi. (I.2-rasm).



I.1– rasm. Kristall panjarasi.



I.2–rasm. Elementar katak.

Uning hajmi: $V_0 = \vec{a}_1 [\vec{a}_2 \vec{a}_3]$. $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ vektorlarni asosiy mashtab vektorlar yoki translyatsion davrlar deyiladi.

Umumiy holda (kubik elementar yacheykalardan boshqa holda) $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ vektorlar qiymati teng emas, ular orasidagi burchaklar (kubdagidek) 90° bo'lmaydi.

Eng sodda geometrik panjaralar soni 14 ta (Brave panjaralari), boshqa barcha panjaralar shu soddalarining muayyan birlashmalaridan hosil bo'ladi.

Kristallar (aniqrog'i, yaxlit monokristallar) **anizotrop** xossalarga ega. Ammo, ko'pchilik yaxlit monokristallchalardan tashkil topgan polikristallar **izotrop** xossalarga ega bo'lishi mumkin.

Har qanday kristall panjarada tugunlar turli kristallografik tekisliklarda joylashgan. Monokristallarning tashqi **yoqlari** kristallografik tekisliklar kesishishidek **qirralar** hosil qiladi.

1.3. Miller indekslari

Fazoviy panjaradagi tekisliklar va yo'nalishlarni belgilash uchun *Miller indekslari* deb atalgan belgilar qo'llaniladi. Ularni quyidagicha aniqlanadi: kristalldagi muayyan tekislik uning uchta bosh o'qida, a_1 , a_2 , a_3 , birliklarda S_1, S_2, S_3 kesmalar kesgan bo'lsin (I.3-rasm). Shu kesmalar

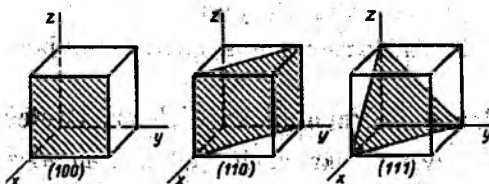
teskari qiymatlari nisbati tuziladi, ya'ni $\frac{1}{S_1} : \frac{1}{S_2} : \frac{1}{S_3}$ va uni umumiy

mahrajga keltirib, umumiy bo'luvchiga bo'lib, uchta bir-biriga bo'linmaydigan sonlar h:k:l nisbatini olamiz. Ana shu sonlar *kristallografik tekislikning Miller indekslari* deyiladi.

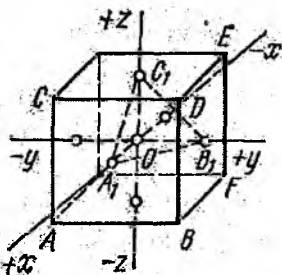
Kristalldagi tekislik (hkl) shaklda belgilanadi, ularning (ekivalent tekisliklarning) oilasi {hkl} ko'rinishda ifodalanadi. Kubik elementar yacheyka yoqlari (tekisliklar) belgilanishi I.4-rasmda ko'rsatilgan.

Kristalldagi yo'nalish belgilarini aniqlash uchun uni ko'rsatuvchi $\vec{A}$ vektorning uchta bosh o'qqa proyeksiyalari A_1, A_2, A_3 olinadi, ularning umumiy ko'paytiruvchilari bo'lsa, qisqartirish qilinadi, natijada

$$A_1 A_2 A_3 = u:v:w \quad (1.1)$$



I.3-rasm. Miller indekslariga doir.



1.4-rasm. Kub panjara – ning kristallografik bel – gilari.

uchta u , v , w bir-biriga bo'linmas sonlar nisbatiga kefinadi. Bu sonlar **kristallografik yo'nalishning Miller indekslari** deyiladi.

O'quvchi qattiq jismlar fizikasiga bag'ishlangan kitoblardan kristallarning turlari, kristallni tashkil etgan zarralar orasidagi o'zaro ta'sir kuchlari haqidagi ma'lumotlarni bilib olar deb o'ylaymiz va hozircha shu qisqa axborot bilan cheklanamiz, ammo o'z joyida kristallarga tegishli zaruriy qo'shimcha ma'lumot ham berib boramiz.

1.4. Olmos va sfalerit tuzilmalari

Kremniy (Si) va germaniy (Ge) kristallari olmos panjarasiga ega bo'ladi, olmos panjarasi esa, katta (fazoviy) diagonali bo'yicha uning $1/4$ qismi qadar bir-biriga nisbatan siljigan ikkita oddiy, yoqlama markazlangan kub panjara yig'masidan iborat.

Ko'pchilik yarimo'tkazgich birikmalar (masalan, GaAs va GaP) sfalerit tuzilishiga ega bo'ladi. Uning olmos tuzilishidan yagona farqi shundaki, olmos panjarasi ikkita oddiy panjaradan tuzilgan, ularning tugunlariga bir element atomlari joylashgan, sfalerit tuzilishida esa uni tashkil etgan ikki oddiy panjaradan birida bir elementning, ikkinchisida boshqa elementning atomlari joylashgan bo'ladi. Tugunlarda olmos panjarasida bir xil atomlar joylashadi, sfalerit panjarasida esa bir tugunlarida bir xil atomlar, ikkinchi tugunlarida esa boshqa xil atomlar joylashadi.

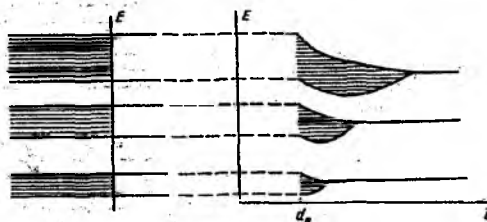
Atomlarning bunday joylashishi yarimo'tkazgichlarning kristallanishi, yedirilishi jarayonlarida bir qator xususiyatlarni keltirib chiqaradi.

1.5. Metallar. Yarimo'tkazgichlar. Dielektriklar

Qattiq jismlar kvant fizikasida hal qilinadigan asosiy masalalardan eng muhimi kristallarda zaryad tashuvchilar energiyalari spektrini aniqlashdir. Uni kristallning davriy elektrik maydonida harakatlanayotgan elektron uchun Shryodinger tenglamasini yechish yo'li bilan hal qilinadi.

Turli davriy maydonlar uchun mazkur tenglamani yechish quyidagi umumiy xulosalarga olib keladi.

1. Yakka atomdagi ayrim ruxsatlangan sathlardan iborat elektronlar energiyalari spektri o'rniga kristall qattiq jismda elektronning energiyalari spektri ruxsatlangan va taqiqlangan energiya zonalariga ajralgan bo'ladi. I.5-rasmda atomlar bir-biriga yaqinlashib kristall hosil qilganida ayrim energiya sathlari parchalanib energiya zonalarini paydo bo'lishi ko'rsatilgan.



I.5-rasm. Atomdagi energiya sathlaridan kristalda energiya zonalarini paydo bo'lishi.

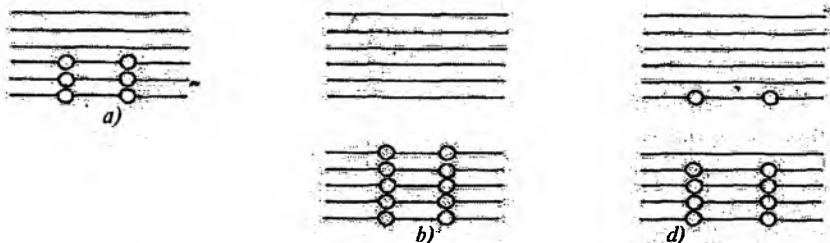
Ruxsatlangan energiyalar zonasi ichida elektronning energiyasi uzluksiz o'zgaradi deb hisoblash bo'ladi, chunki, har bir zona ichida sathlar soni kristaldagi juda ko'p atomlar soniga yaqin (taxminan, 1 sm^3 da 10^{22} atom bo'ladi). Ba'zi hollarda zonalaridan ikkitasi bir-biri ustiga tushadi.

2. Bir ruxsatlangan zonadan ikkinchisiga o'tish uchun ular orasidagi ta'qiqlangan zonadan sakrab o'tish zarur, buning uchun pastki zonadagi elektron ta'qiqlangan zona energetik kengligiga teng energiya olishi kerak.

3. Qattiq jismlarning elektr o'tkazuvchanlik bo'yicha metallar, yarim-o'tkazgichlar va dielektriklarga ajralishi zonalarining elektronlar bilan to'ldirilishiga bog'liq. Zonalarining to'ldirilishining uch holi bo'lishi (I.6-rasm) mumkin. 1) To'la to'ldirilgan zona — undagi elektronlar bog'langan elektronlar bo'lib, tok o'tkazishda qatnasha olmaydi, hamma zonalar to'la to'ldirilgan moddalar dielektrik (izolator) bo'ladi. 2) Qisman (chala) to'ldirilgan zona — bunday zonadagi elektronlarga elektr maydon ta'sir etsa (namunaga kuchlanish berilsa), elektronlar yuqorigi bo'sh sathlarga chiqib olib, o'z tezligi yo'nalishini o'zgartiradi, bu esa zonadagi elektronlarning yo'nalgan harakatini (tokni) paydo qiladi. Bunday zonali moddalar o'tkazgich bo'ladi.

Metallarda yuqorigi energiya zonasi yarimisigacha to'ldirilgan (undagi elektronlar soni atomlar soni chamasida), bundagi elektronlar tokda qatnasha oladi, ular ko'p miqdorda bo'lganligi uchun metallarning o'tkazuvchanligi katta bo'ladi. Uning ifodasi:

$$\sigma = en\mu \quad (1.2)$$



1.6—*rasm.* Energiya zonalarining elektronlar bilan to'ldiriliqlari hollari.

3) Bo'm-bo'sh zona, albatta, elektrik o'tkazuvchanlikka hech qanaqa hissa qo'shmaydi.

4. Mutlaq nol (0K) temperaturada yarimo'tkazgichlarning bir necha zonalar elektronlar bilan to'la to'ldirilgan bo'ladi, yuqoriroqdagi zona bo'sh bo'ladi. Demak, bunda yarimo'tkazgich kristalli tok o'tkazmaydigan izolator bo'lishi kerak. Eng yuqorigi to'ldirilgan energiya zonasi atomdagi valent sathdan hosil bo'lgani uchun uni *valent zona* deyiladi. Undan yuqoridagi 0K da butunlay to'latilmagan zonani *o'tkazuvchanlik zonasi* deyiladi. Ammo mutlaq nol (0K) dan yuqori har qanday temperaturada valent zona yuqori chegarasidagi elektronlarning bir qismi issiqlik harakati energiyasi hisobiga o'tkazuvchanlik zonasiga o'tib oladi va elektr maydon ta'sirida tokda qatnashadigan bo'ladi. Ularni o'tkazuvchanlik elektronlari yoki erkin elektronlar deyiladi. Valent zonada elektronlar tashlab ketgan holatlar o'zini $+e$ zaryadli va muayyan m_p massali zarralar sifatida tutadi. Ularni *kovaklar* deyiladi. Kovaklar tokda qatnasha oladigan harakatchan zarralardir.

Yarimo'tkazgichning o'tkazuvchanligi

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \quad (1.3)$$

5. Yarimo'tkazgichlar va dielektriklar orasidagi farq valent zona bilan o'tkazuvchanlik zonasi orasidagi taqiqlangan zona E_g kengligiga bog'liq. Yarimo'tkazgichlarda taqriban $E_g < 3eV$ bo'lsa, dielektriklarda $E_g > 3eV$ bo'lib, dielektrikning valent zonasidan yuqorigi zonaga elektronlarning chiqib olish ehtimolligi juda kam, binobarin, dielektriklarda tok o'tkazishda qatnashadigan zaryad tashuvchilar deyarli yo'q darajada oz bo'ladi. Dielektrik — izolator.

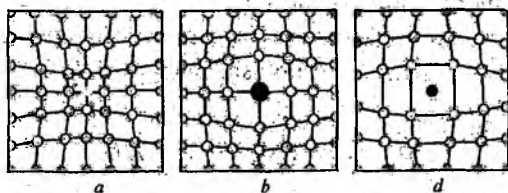
6. Energiya zonalari nazariyasi metallar va yarimo'tkazgichlarning elektr xossalari farqlarini quyidagicha tushuntiradi: 1) metallarda o'tkazuvchanlik elektronlari (erkin elektronlar) atomlar soni tartibida, binobarin, $\approx 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ zichlikka ega. Toza yarimo'tkazgichlarda bunday elektronlar zichligi (masalan, toza kremniyda 300 K da $\approx 10^{10} \text{ sm}^{-3}$) metalldagiga nisbatan milliardlarcha marta kam, binobarin, yarimo'tkazgichlarning o'tkazuvchanligi shu tartibda kichik bo'ladi. 2) Ma'lumki, temperatura oshgan sayin metallning qarshiligi ortib boradi. Buning sababi, bu holda atomlar tebranishlari kuchayib, o'tkazuvchanlik elektronlari harakatiga qarshiligi ortib boradi, ya'ni ularning tok yo'nalishida harakatchanligi μ kamayadi, ammo o'tkazuvchanlik elektronlari zichligi o'zgarmay qoladi. [(1.2) ifodaga q.]. Yarimo'tkazgichlarda temperatura ortib borganda valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tib olgan elektronlar soni, binobarin, valent zonada harakatchan kovaklar soni ham tez ortib boradi, ularning harakatchanligi nisbatan kam o'zgaradi. Oqibatda temperaturaning ortishi yarimo'tkazgichlar o'tkazuvchanligi tez ortishiga sabab bo'ladi.

Yuqorida bayon qilingan mulohazalar ideal kristallga tegishli edi. Ammo, haqiqiy kristallarda tuzilish va tarkibning ideal holdan chetlanishidan iborat nuqsonlar mavjud bo'ladi.

1.6. Kristall yarimo'tkazgichlarda nuqsonlar

Haqiqiy kristallarda tuzilish va tarkibga oid nuqsonlarning mavjud bo'lishi elektronlar energiya spektrining zonaviy tuzilishida o'zgarishlar paydo bo'lishiga sababchi bo'ladi. Nuqsonlar asosiy atomlar zichligidan ancha kam va ancha kichik hajmni egallaydi, binobarin, kristallning umumiy tuzilishi va mexanik xossalari saqlanib qoladi.

Agar kristalldagi nuqsonlar miqdori kichik bo'lsa, bu holda ular bir-biridan ancha uzoqda joylashgan va bir-biri bilan ta'sirlashmaydigan bo'ladi. Bunday nuqsonlarni ma-



1.7—rasm. Kristall panjarasining ayrim joylarda buzilishi:

a — panjara tugunidan atom ketib qolgan;
b — asosiy atom o'rnini kirishma atomi egallagan;
d — kirishma atom tugunlar orasida joylashgan.

halliy (lokal) nuqsonlar deyiladi. Nuqson yaqinida elektron (kovak) uchun mahalliy holat paydo bo'ladi. Mahalliy nuqsonlar hoida bunday holatlar bir xil bo'ladi. Nuqson yaqinidagi mahalliy holatlarda turgan elektronlar elektr o'tkazuvchanlikda qatnashmaydi. Demak, nuqsonlarning elektronlar uchun hosil qilgan mahalliy energiya sathlari yarimo'tkazgich kristallining ta'qiqlangan zonasida joylashgan bo'lishi kerak. Nuqsonlar kristallarni o'stirish jarayonida ishtirok qiladi va ularning xossalariga ta'sir ko'rsatadi.

Geometrik nuqtayi nazardan nuqsonlar nuqtaviy, chizig'iy, yassi, hajmiy va sirti nuqsonlar guruhlariga ajratiladi.

Nuqtaviy nuqsonlarga geometrik o'lchamlari atom o'lchamlari tartibida bo'lgan kristall panjarasi nuqsonlari, jumladan, atomlar tashlab ketgan panjara tugunlari *vakansiyalar* (bo'sh o'rinlar) va tugunlar orasiga joylashib olgan atomlar, kristall sirtiga yopishib olgan (adsorbsiyalangan) yot atomlar, alohida joylashgan va 2-4 atomdan tashkil topgan birikmalar misol bo'la oladi. Kirishmalar atomlari ham shu tur nuqsonlardandir.

Termodinamik muvozanat sharoitida hamma vaqt kristallda vakansiyalar mavjud bo'ladi. Atom o'z tugunidan ketib tugunlar orasiga joylashib olgan holda vakansiya bilan tugunlar orasidagi atom jufti vujudga keladi. Uni *Frenkel nuqsoni* yoki *Frenkel jufti* deyiladi. Atomlar panjara tugunlarini tashlab ketgach, kristall sirtiga chiqib olishi va yangi qatlam tashkil qilishi mumkin. Bu holda panjaraning bo'sh qolgan tuguni (vakansiya) *Shotki nuqsoni* deyiladi. Ionlardan tashkil topgan kristallarda anion va kation vakansiyalari teng miqdorda hosil bo'ladi. Ularni ham *Shotki nuqsonlari* deyiladi.

Vakansiyalarning paydo bo'lishi temperaturaga, ularning hosil bo'lishi energiyasiga bog'liq bo'ladi.

Agar tugunlarda turgan atomlar zichligi N bo'lsa, Shotki nuqsoni (vakansiya) hosil bo'lishi energiyasi E_v bo'lsa, u holda bunday nuqsonlar zichligi

$$n_v = N \exp(-E_v / kT) \quad (1.4.)$$

bo'ladi.

Frenkel juftlari zichligi esa

$$n_f = \sqrt{NN'} \exp(-E_f / 2kT) \quad (1.5)$$

bo'lad, bunda N -birlik hajmdagi tugunlar soni, N' - tugunlararo imkoniy vaziyatlar soni, E_f - Frenkel jufti hosil bo'lish energiyasi.

Shotki nuqsonlari (vakansiyalar) kovalent bog'lanishli kristallarda (masalan, germaniy va kremniy kristallarida) ko'proq uchraydi. Ular zichligining temperaturaga kuchli bog'langanligi (1.4) ifodadan ko'rinib turibdi. Past (jumladan, xonadagi) temperaturalarda vakansiyalar zichligi kam, ammo temperatura ortishi bilan u tez orta boradi. Agar $E_v = 1 \text{ eV}$, $N = 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan holda vakansiyalar zichligi N_v ushbu jadvalda keltirilgan.

1.1-jadval

T, K	100	300	500	700	900	1100
$N_v, \text{ sm}^{-3}$	$2 \cdot 10^{-32}$	$2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{17}$

Jadvaldan, yuqori temperaturalarda vakansiyalar zichligi ancha ko'p bo'lishligi yaqqol ko'rinadi. Kristallning temperaturasi pasaytirilsa, vakansiyalar zichligi kamayib ketishi kerak. Shu sababdan, agar kristall tez sovitilsa (bu jarayonni "chiniqtirish" deyiladi), vakansiyalar zichligi o'sha yuqori temperaturadagidek qoladi. Shu sababdan mazkur zichlik kristallga berilgan oldingi termo ishlovga ham bog'liq bo'ladi. Ammo, kristallni yuqori temperaturada muayyan vaqt davomida qizdirib turilsha ("kuydirish"), vakansiyalar hajmdan sirtga diffuziyalanib ketadi. Nuqtaviy nuqsonlarning, jumladan vakansiyalarning hosil bo'lishi bosimga ham bog'liq. Uncha katta bo'lmagan bosimlar sohasida

$$N_v = N \exp[(-E_v + p\nu)/kT] \quad (1.6)$$

ifodadan foydalanish mumkin, bundagi p -bosim, ν -bitta vakansiya hosil bo'lishida kristall hajmining o'zgarishi.

Kristall hajmida vakansiyalarning uyumlari (to'plamlari) hosil bo'lishi va ular o'z navbatida boshqa nuqsonlarning, masalan, chiziqliy nuqsonlarning paydo bo'lishiga olib kelishi mumkin. Vakansiyalar boshqa nuqsonlar bilan masalan, kirishmalar bilan birlashishi mumkin. Kremniy va germaniy monokristallarida vakansiya — kislorod birikmasi (A-mar-kaz) boshqa vakansiyalar yoki kirishmalar o'tirib oladigan markazlar vazifasini o'taydi. Bunday nuqtaviy nuqsonlar o'lchami 60-80 nm.

A^{III} B^V birikmali yarimo'tkazgichlar kabi murakkab yarimo'tkazgichlarda u yo bu tarkiblovchi atomlarning ba'zi tugunlarda yo'q bo'lishligidan vakansiyalar hosil bo'ladi.

Vakansiyalar haqida yuqorida keltirilgan ma'lumot bilan cheklanamiz va o'quvchiga bu haqda batafsil ma'lumot uchun ro'yxati keltirilgan adabiyotni tavsiya qilamiz [7].

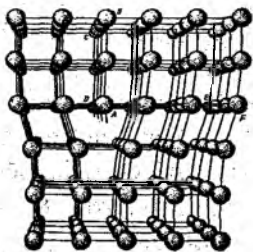
Nuqtaviy nuqsonlar asosan muvozanatli nuqsonlar guruhiga kiradi. Kristall bilan issiqlik muvozanatida bo'lmagan nomuvozanatli nuqsonlar ham mavjud bo'ladi.

Dislokatsiyalar deb nomlangan chiziqli nuqsonlar eng muhim nomuvozanatli nuqsonlardir. Bu nuqsonlarning o'lchamlari ikki yo'nalishda juda kichik, ammo uchinchi yo'nalishda har qancha uzun bo'lishi mumkin.

Dislokatsiyalarning ikki asosiy turi mavjud. Birinchi turi-*chegaraviy dislokatsiyalar* kristall panjarasida qo'shimcha *ADCB* vertikal atomlar yarim tekisligining vujudga kelishi oqibatida hosil bo'ladi (1.8-rasm). *ADEF* tekislik ustida atomlar vertikal qatorlari soni bittaga ortiq bo'ladi. *ADEF* tekislik *sirpanish tekisligi* deyiladi. Yarim tekislikning pastki chegarasi *AD dislokatsiya chizig'ini* tashkil qiladi.

Agar chegaraviy dislokatsiyaning bir uchi mahkamlangan bo'lsa, uning harakatlanishi oqibatida murakkab shakldagi chiziqli nuqsonlar, masalan, yarim halqa shaklli dislokatsiya sirtmog'i vujudga keladi. Ular dislokatsiyasiz kremniy va germaniy mono kristallarida ko'pincha uchrab turadi, ularning o'lchami 10 nm gacha bo'lib, monokristallarning dislokatsiyasiz o'sishini buzuvchi dislokatsiyalar paydo bo'lishi va ko'payishiga sabab bo'ladi.

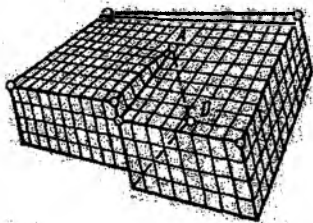
Ikkinchi turdagi dislokatsiyalar — *vintsimon dislokatsiyalardir*. Ular panjara bir qismining ikkinchisiga nisbatan bir davr qadar siljishi oqibatida hosil bo'ladi.



1.8-rasm. Kristaldagi chegaraviy dislokatsiya

Bu holda panjara buzilishi shundan iboratki, vintsimon dislokatsiya *AD* o'qi yaqinida atomlar qatorlari egiladi va pastki atomlar qatoriga tenglashadi, ya'ni ular spiral yoki vint bo'yicha joylashadi. Kristallarda chegaraviy va vintsimon dislokatsiyalar bir vaqtda mavjud bo'lishi mumkin, ular dislokatsiyalarning aralash shakllarini hosil qila oladi.

Dislokatsiyalar dastlab xamirturush kristalldan o'sib chiqadi. So'ngra, uning o'sishiga mexanik va termik kuchlanishlar, zichlik gradientlari, vakansiyalar to'planishi va yot kirishmalar ta'sir qiladi.



Asosiy o'rin tutadigan termik kuchlanishlar kristallning *plastik deformatsiyasini* paydo qiladi (1.9-rasm).

1.9-rasm. Kristalldagi vintsimon dislokatsiya tasviri.

Monokristallar yuqori temperaturalarda bunday deformatsiyaga duchor bo'lishi oson. Masalan, kremniy kristalli 800°C dan yuqorida oson buralishi va egilishi mumkin.

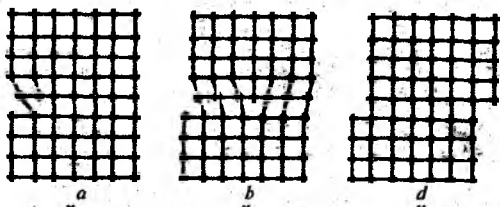
Kristallning plastik deformatsiyalanish jarayoni atomlar tekisliklarining bir-biriga nisbatan siljishi yoki sirpanishi yo'li bilan boradi.

Agar kristalda dislokatsiyalar bo'lmasa, bu jarayon yuz berishi uchun atomlar qatorlarini bir-biriga nisbatan siljitishga ancha energiya kerak bo'ladi. Dislokatsiyalar bo'lgan holda esa siljish eng bo'sh joyda — dislokatsiya sohasida osonroq sodir bo'ladi. Bunda ortiqcha atomlar yarim tekisligi qo'shni tekislikni uzib, o'sha joyga o'rinishadi. Oqibatda dislokatsiya o'z sirpanish tekisligida chapdan o'ngga «Estafeta bo'yicha» ko'chadi (1.10-rasm).

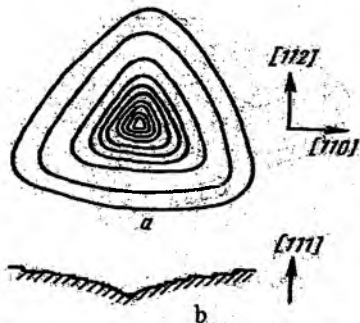
Dislokatsiya kristall sirtiga chiqib, pog'ona hosil qiladi. Bunday plastik deformatsiyada massa ko'chmaydi.

Dislokatsiyalar temperatura gradienti ta'sirida pastroq temperaturali sohaga tomon ko'chishi mumkin. Turli ishorali ikki dislokatsiya uchrashganda ular bir-birini yo'q qiladi. Demak, dislokatsiya harakatlanishi oqibatida yo kristall sirtiga chiqadi, yo boshqa dislokatsiyada to'xtaydi.

Sirpanish tekisligida ko'chishdan tashqari yana dislokatsiyalar tik yo'nalishda, ya'ni o'zining yarimtekisligida harakat qilishi mumkin. Bu diffuzion harakat bo'lib, u kristallning turli temperaturali qismlarida



1.10-rasm. Chegaraviy dislokatsiya ko'chish oqibatida kristallning plastik deformatsiyalanishi.

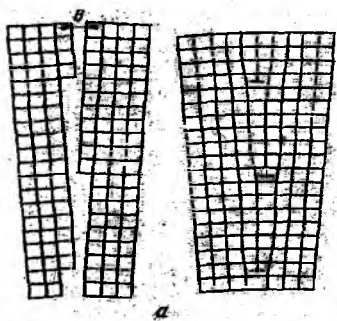


I.11—rasm. $\{111\}$ tekislikda yedirilish chuqurlari tasviri:
a — tekislik sirtida kurinishi;
b — kesimda ko'rinishi;

nishiga sabab bo'lishi mumkin.

Dislokatsiyalar yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi yashash vaqti va boshqa kattaliklariga ancha ta'sir qiladi. Dislokatsiyalar tashqi ta'sirga sust qarshilik ko'rsatadi. Shuning uchun edirish, diffuziya, kristall murtaklari hosil bo'lishi va h.k. jarayonlari kristall sirtiga dislokatsiyalar chiqqan joylarda tezroq boradi.

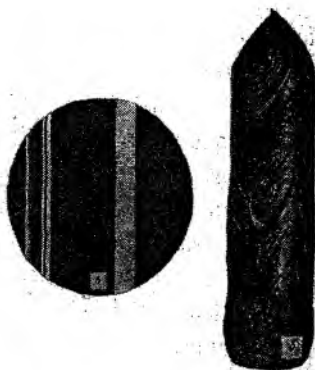
Dislokatsiyalar nisbiy miqdorini aniqlash uchun yarimo'tkazgich sirtini kimyoviy ediriladi. Dislokatsiyalar chiqqan joylar boshqa joylarga nisbatan kuchliroq emirilib, edirish chuqurlari vujudga keladi (I.11-rasm).



I.12—rasm. Yarimo'tkazgich kristallarida kichik burchakli chegaralar.

dislokatsiyalar zichligi har hil bo'lishi oqibatidir.

Kirishma atomlari dislokatsiyalarga tortiladi, ular atrofida kirishmalar uyumini (kirishma atmosferasini) tashkil qiladi. Yuqori temperaturada kirishma atmosferasi hajm bo'yicha so'riladi, past temperaturada esa yana hosil bo'ladi. Bu hodisa kristall hajmida kirishmalarning (jumladan, legirovchi kirishmalarning ham) notekis taqsimla-



I.13—rasm. Yarimo'tkazgich monokristallarida egizaklar.

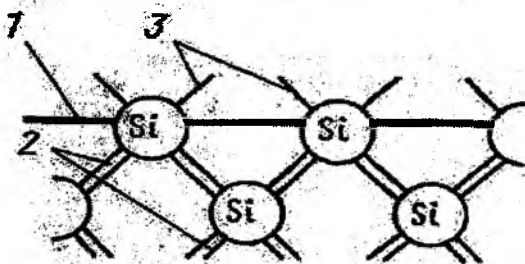
Yedirilgan sirtni mikroskop orqali kuzatib hisoblash yarimo'tkazgichdagi N_{LD} dislokatsiyalar zichligini aniqlash imkonini beradi. N_d ni 1 sm^2 sirt yuziga to'g'ri kelgan yedirish chuqurlari soni sifatida ifodalanadi.

Kristallarda sirtiy nuqsonlar. Ular jumlasiga kichik burchakli chegaralar, donalar va egizaklar chegaralari, fazalararo chegaralar va kristallning o'z sirti kiradi.

Kichik burchakli chegaralar yo'nalishi kam farq qiladigan kristallarning ikki bo'lagi bloki orasida hosil bo'ladi (I.12-rasm). Buning oqibatida bunday bloklar orasida chegaraviy dislokatsiyalar vujudga keladi. Bloklar orasidagi burchak qancha katta bo'lsa, chegarada dislokatsiyalar shuncha ko'p joylashadi. Bloklar yo'nalishlari farqi juda katta bo'lganda kichik burchakli chegaralar donalar orasida oddiy chegaralarning o'zi bo'lib qoladi.

Polikristall quymada donalar chegaralari bir necha kristall murtaklarning bir vaqtda kattalashib borishi oqibatida hosil bo'ladi. Ko'pincha kristallarning o'sayotgan donalari turli kristallografik yo'nalishlarga ega bo'ladi. Ammo, agar tegishgan kristall donalari muayyan yo'nalganlikka ega bo'lsa, ular orasidagi chegarani *egizak chegarasi* deyiladi. Masalan, *egizak kristalda* (I.13-rasm) uning bir qismi ikkinchi qismining ko'zgusimon aksi bo'ladi, akslanish tekisligini egizaklanish tekisligi deyiladi. Egizak kristall bir to'g'ri chiziq (egizaklanish o'qi) atrofida uning bir qismini aylantirish natijasida hosil bo'lishi mumkin. Egizaklar kristallar o'sishida, shuningdek, mexanik, deformatsion ta'sir oqibatida vujudga kelishi mumkin.

Yarimo'tkazgich kristallarning egizaklanishi juda ko'p tarqalgan tuzilish nuqsonidir. Ular dislokatsiyalar paydo bo'lishi sabablaridan vujudga keladi, ko'pincha dislokatsiyalar uyumidan tug'ilishi mumkin. Egizaklarning paydo bo'lishiga, shuningdek, kristallanish



I.14—rasm. Kremniy atomlarining kristal sirtida va uning hajmida joylashishi:

- 1 — kristal sirti;
- 2 — kovalent kimyoviy bog'lanishlar;
- 3 — uzilgan kimyoviy bog'lanishlar.

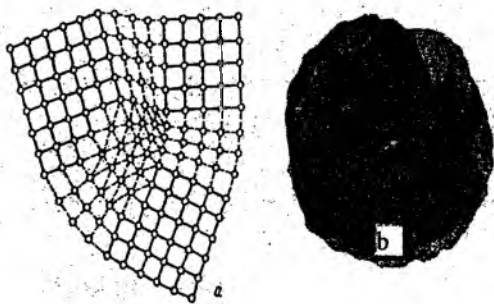
frontidagi kirishmalar yoki birlashmalar tarkiblovchilari uyumlari, o'sish yo'nalishining temperaturaning o'q bo'ylab gradientidan chetlanishi va kristalldagi mexanik kuchlanishlar sabab bo'lishi mumkin.

Kristall sirtining tuzilishi uning hajmi tuzilishidan farq qiladi, chunki tashqi atomlar ayrim bog'lanishlardan mahrum (I.14-rasm). Oqibatda kristall sirti kirishma va gazlarni yuqori yutish qobiliyatiga ega. Kristall sirti holati yarimo'tkazgichning ba'zi elektr xossalari muhim ta'sir qiladi.

Kristallardagi hajmiy nuqsonlarga undagi bo'shliqlar (kovaklar), ikkinchi faza kirmalari, kristall asosiy hajmiga nisbatan boshqacha yo'nalganlikli hajmlar mansubdir. Ular kristallning o'sishi jarayonida vujudga keladi. Hajmiy nuqsonlarning nozikrog'idan biri dislokatsiyalarning fazoviy to'rlari bo'lib, ular mozaik tuzilishni hosil qiladi. Ularda kichik hajmli bloklar geometrik muntazam tuzilishga ega va bir-biriga nisbatan yo'nalganligi ozroq farqli bo'ladi. Bunday bloklar (kristallchalar) birlashmasi mozaikani eslatadi. Bloklar chegaralari bo'yicha odatda dislokatsiyalar joylashgan bo'ladi (I.15-rasm).

Xulosa shuki, barcha nomuvozanatli nuqsonlar dislokatsiyalar bilan aloqador. Endi qattiq jismlarda, xususan yarimo'tkazgichlarda, mavjud bo'ladigan hajmiy nuqsonlarning makroskopik turlari haqida qisqacha to'xtalamiz. Ularga jismning butun hajmini, yo uning ayrim makroskopik qismini egallagan nuqsonlar kiradi. Hajmdagi darzlar va kovaklar, sirdagi tirnalar va hajmda to'plangan kirishma uyumlari ana shunday nuqsonlardir. Makronuqsonlar mikronuqsonlarning birlashishi natijasida hosil bo'lishi ravshan. Yarimo'tkazgichlarni o'stirishda

makrokuchlanishlar vujudga kelishiga temperaturaning jism hajmida birday bo'lmasligi katta hissa qo'shadi. Bu kuchlanishlar *termoelastik kuchlanishlar* deyiladi. Yarimo'tkazgichda uni tayyorlash yoki unga termoshlov berishdagi temperatura taqsimotini issiqlik o'tkazuvchanlik tenglamasini yechib topiladi (*k*-solishtirma issiqlik o'tkazuvchan-



I.15—rasm. Yarimo'tkazgichlarning mozaik tuzilishi.

a — mozaik tuzilish chizmasi; b — InP kristali kesimida mozaik tuzilish.

lik koeffitsiyenti, s -jismning solishtirma issiqlik sig'imi, ρ -namuna zichligi).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c\rho} \Delta T \quad (1.7)$$

Temperaturaning keskin o'zgarishi — issiqlik zarbasi kristalda kengayish-qisilish elastik to'liqlarini hosil qiladi. Agar temperatura tebranib tursa, bu holda davriy «isish-sovish» jarayoni yuz berib turadi, bu esa nuqsonlar jamg'arilishiga olib keladi (moddaning charchashi hodisasi yuz beradi).

Texnikada ko'p qatlamli qattiq jism tuzilmalari muhim o'rin tutadi. Bu hollarda taglik va unga o'tkazilgan qatlam panjaralari doimiylari farqi, issiqlikdan kengayish koeffitsiyentlarining tafovuti makrokuchlanishlar (makronuqsonlar) manbai bo'ladi.

Darzlar dislokatsiyalarning kristall ichida ko'chishi jarayonida tormozlanishi natijasi sifatida qaraladi. Darzning kengligi uni hosil qilishda qatnashgan dislokatsiyalar miqdoriga bog'liq. Dislokatsiyalar zichligi n_d bo'lsa, darzni $n_d b$. Byurgers vektorli bitta katta dislokatsiya deb qarasa ham bo'ladi. Darz hosil bo'lishining yana bir ehtimoliy yo'li turli ishorali dislokatsiyalar to'plangan ikki kesishuvchi tekislikning o'zaro ta'siridir.

Darz paydo bo'lgandan keyin uning taqdiri qanday bo'ladi? Darzning uzunligini L bilan, yon chegarasidagi kritik kuchlanishni σ orqali, Yung modulini E orqali, buzish solishtirma ishini orqali belgilasak, hisoblash

$$\sigma = \sqrt{2E\gamma/\pi L} \quad (1.8)$$

ifodaga olib keladi. Bu ifodadan namunani (buyumni) buzmaydigan darzning L uzunligini aniqlash mumkin.

Makrokovaklar kristalda atomlar egallagan va atomlar o'lchamidan ko'p marta katta o'lchamli joylardir. Ularning bir tomoni sirtga chiqqan bo'lsa, ularni ochiq kovaklar, agar kovak kristall hajmida to'la joylashgan bo'lsa, ularni yopiq kovaklar deyiladi.

Kristallarni o'stirishda kovaklar bir qancha yo'l bilan hosil bo'ladi.

1. Kovaklar hosil bo'lishining diffuzion mexanizmi mavjud. Kovak ko'p sonli vakansiyalar yig'ilishi natijasi sifatida qaraladi. Jism sirtining egrilangan joylarida vakansiyalar ko'p to'planadi. Tahlil ko'rsatishicha, qabariq sirt ustida vakansiyalar kamroq, botiq joyda esa ortiqroq bo'ladi. Demak, kovakning tashqi sirtida vakansiyalar kam, ichki sirtida ortiqcha

bo'ladi. Vakansiyalar kovak hosil bo'layotgan joyga diffuziya yo'li bilan ko'chib boradi.

2. Kovaklar termoshlov jarayonida hosil bo'ladi. Termoshlov jarayonida namunalar deformatsiyalanadi va shishadi, ularda kovaklar hosil bo'ladi, termoshlov ko'p marta takrorlansa, darzlar paydo bo'ladi.

Termoshlov soni ortishi bilan kovaklar miqdori va o'lchami ortib boradi: kovaklar namuna kesimi bo'yicha notekis taqsimlanadi. Aniqrog'i, ularning miqdori markazdan chetga tomon bir tekis kamayib boradi, 2-3 mm qalinlikdagi silindrik namunaning gardishida kovaklar bo'lmaydi.

3. Qattiq jismlar kontakti (masalan, metall va yarimo'tkazgich kontakti) sohasida kovaklar hosil bo'ladi. A va B jismlar kontaktini qaraylik. Qizdirilganda A jism atomlari B jismga, B jismniki A jismga diffuziyalanadi. Diffuziya koeffitsiyentlari teng bo'lmaganligi uchun kontakt chegarasidan o'ng va chap tomonda diffuziyalangan atomlar miqdori teng bo'lmaydi. Oqibatda, masalan, A jismda egallanmagan tugunlar (vakansiyalar), B jismda esa ortiqcha atomlar bo'ladi. Demak, A kristallda vakansiyalar manbayi, B kristallda ortiqcha atomlar manbayi ishlab turadi. Chegaraviy dislokatsiyalar A tomonda vakansiyalarni, B tomonda ortiqcha atomlarni yutib, qarama-qarshi yo'nalishlar harakat qiladi. A kristallda vakansiyalar asta-sekin kristalldan sirtga chiqadi, B kristallda esa ular asta sekin paydo bo'ladi. Demak, kontakt sohasida bo'shliq o'sadi (Frenkel effekti) va atomlar tekisliklari ko'chib o'tadi (Kirkendal effekti).

4. Uchuvchan tarkiblovchili kristallarda kovaklar bo'lishi mumkin. Bu holda uchuvchan tarkiblovchining bug'lanishi ortiqcha vakansiyalar manbayi bo'ladi. Galliy arsenidi GaAs kristallida arseniy As tarkiblovchi ancha uchuvchandir. Bu qattiq jism sirtidan bug'lanib ketgan atomlar o'rnida vakansiyalar paydo bo'ladi, ularni ichkaridan atomlar kelib to'ldiradi. Ular ham yana bug'lanadi, vakansiyalar yana to'ldiriladi va h.k. Natijada namuna hajmi ortiqcha miqdordagi vakansiyalar bilan to'yinadi. Ularning ba'zilar sirtga va dislokatsiyalarga ketadi, lekin, bir qismi yig'ilib kovaklar hosil qiladi.

Boshqa hajmiy nuqsonlardan kristallning mozaikaligi va gaz pufaklarini aytib o'tamiz.

Hajmiy nuqsonlar qattiq jismlar fizik xossalriga muhim ta'sir ko'rsatadi. Xususan, ular kristallarda diffuziya jarayonlariga, makronuqsonlar elastiklik modullariga muhim ta'sir ko'rsatadi. Masalan, kovaklarning nisbiy hajmi $KV_{kov}/(V_{kov}-V_c)$, bunda V_c -kovaksiz qatlam hajmi, V_{kov} -kovaklar hajmi bo'lsin. U kovakli va kovaksiz jismlar siljish moduli (G^* va G) va har taraflama qisilish moduli, mos ravishda, (H^* va H) ifodalariga kiradi:

$$G/G^*q1-5K(3H+4G)/(9H+8G), \quad (1.9)$$

$$\frac{1}{H^*} = \frac{1}{H(1-K)} + \frac{3}{4G} \frac{K}{(1-K)} \quad (1.10)$$

Bu ifodalar tajribalarda tasdiqlangan.

Kristallarda radiatsion nuqsonlar. Kristallni neytronlar, protonlar, deytronlar, zarralar, elektronlar va boshqa katta tezlikdagi zarralar bilan nurlantirganda nuqsonlarning bir necha xili vujudga keladi. Kristallni γ -kvantlar bilan nurlantirishda vujudga keladigan fotoelektronlar va kompton-elektronlar tuzilish nuqsonlari hosil qilishi mumkin. Radiatsion nuqsonlar nomuvozanatli nuqsonlardir.

Yuqori temperaturada kristallarni qizdirib turish tez zarralar hosil qilgan nuqsonlar diffuziyasini tezlashtiradi va ularning tez rekombinatsiyalanishiga olib keladi.

Kristallarda tez zarralar o'tayotganda, asosan, tez zarralarning atomlar yadrolari bilan elastik to'qnashishi, kristall atomlaridagi elektronlarning yuqori sathga ko'tarilish yoki ionlanishi, ba'zi kristall atomlari yadroviy avrilish oqibatida kirishma atomga aylanishi mumkin. Umuman, bu uchala jarayonlar bir vaqtda sodir bo'lishi mumkin.

Elastik to'qnashishlar ikki hodisani vujudga keltiradi: 1) kristallda elastik to'liqlar paydo bo'ladi, ularning energiyasi atomlarning issiqlik energiyasiga aylanadi: 2) tuzilish nuqsonlari sodir bo'ladi.

Elastik to'qnashishlarda tez zarraning tuzilish nuqsonlari va panjara atomlari tebranishlari hosil qilishga sarflangan energiyalari nisbati zarraning energiyasi va nurlantirilayotgan kristall xossalriga bog'liq.

Shuni ta'kidlash kerakki, nurlantirilganda kristallarda hosil bo'ladigan nuqsonlar mahalliy suyulish oqibatida vujudga kelishi mumkin. Shunday mahalliy suyulish joylarida 10^3 - 10^4 atomni o'z ichiga olgan nuqsonlar uyumlari hosil bo'ladi.

Nazorat savollari

1. Qattiq jismlar atomlar joylashishi bo'yicha qanday turlarga ajraladi?
2. Miller indekslari nimalarni belgilaydi?
3. Olmos va sfalerit tuzilishdagi kristallar qanday bo'ladi?
4. Qattiq jismda elektronlar energiyalari zonalar qanday tuzilgan?
5. Zonalar tuzilishi asosida metallarni tavsiflang.
6. Zonalar tuzilishi asosida yarimo'tkazgichlar va dielektriklarni tavsiflang.
7. Yarimo'tkazgichlarda qanday nuqsonlar bo'ladi?
8. Dislokatsiyalar to'g'risidagi ma'lumotlaringiz qanday?
9. Kristallda qanday hajmiy nuqsonlar bo'lishi mumkin?
10. Kuchli nurlanishlar ta'sirida qanday nuqsonlar hosil bo'ladi?

2-BOB. YARIMO‘TKAZGICHLARDA KIRISHMALAR

Kristall panjarasidagi yot atomlar (kirishmalar) panjara nuqsonlari jumlasiga kiradi. Kirishma atomlar kristallning asosiy atomlariga nisbatan juda oz miqdorda bo‘lishiga qaramasdan uning elektrofizik xossalariga muhim ta’sir ko‘rsatadi.

Kirishmalar o‘zining tutgan o‘rni va bajaradigan vazifalariga qarab bir necha turlarga bo‘linadi.

2.1. O‘rinbosar va suqilma qattiq eritmalar

Kirishma atomlar kristall panjarasida tugunlardagi asosiy atomlar o‘rniga o‘tirib oladi (bunday kirishmani *o‘rinbosar qattiq eritma* deyiladi) yoki ular panjara tugunlari orasiga joylashadi (bunday kirishmani *suqilma qattiq eritma* deyiladi). Bu ikki holni geometrik va elektrokimyoviy omillar aniqlaydi.

O‘rinbosar kirishmalar hosil bo‘lishi uchun kirishma atomi radiusining asosiy atom radiusidan farqi 15% dan oshmasligi, asosiy va kirishma atomlar elektrokimyoviy jihatidan o‘xshash bo‘lishi zarur (keyingi shartning ma’nosi: mazkur ikki xil atomlarning valent qobig‘idagi elektronlar soni teng yoki ± 1 qadar farqlanishi kerak).

Suqilish kirishmalar hosil bo‘lishi uchun kirishma atomi radiusining asosiy atom radiusiga nisbati 0,59 dan kichik bo‘lishi zarur. Miqdoriy shartlar tajriba yo‘li bilan topilgan. Har bir kirishma atom o‘zi turgan joy atrofida panjara davriyligini buzadi va elektron(kovak) uchun mahalliy sathlar hosil qiladi, bu sathlar kirishmalar zichligi uncha katta bo‘lmaganda, ta’qiqlangan zonada joylashgan bo‘ladi. Ko‘p bosqichli tozalashdan so‘ng yarimo‘tkazgich moddada qoldiq kirishmalar turlari va miqdorlarini aniqlab olish muhim, ammo eng muhimi- muayyan maqsadni nazarda tutib tegishli tanlangan boshqa elementlar atomlarini istalgan miqdorda va ma’qul usul bilan yarim o‘tkazgichga kiritishdir. Ana shu muammo hal qilingandan so‘ng yarimo‘tkazgichlar elektronikasi juda tez rivojlana boshlaganligini ta’kidlaymiz.

Yarimo‘tkazgichlarga kirishmalar kiritish legirlash yo‘li bilan ularning elektrik o‘tkazuvchanligini va boshqa xossalarini o‘zgartirish mumkin. Yarim o‘tkazgich monokristallini suyulmalardan hosil qilish jarayonida suyulmaga istalgan boshqa moddalar atomlari kiritiladi. Bunda monokristall hajmida kirishmalarning tekis taqsimlanishini ta’minlaydigan choralar qo‘llanadi.

Biz endi elektronika sanoatida keng qo'llanadigan usullar to'g'risida qisqacha ma'lumot beramiz.

2.2. Diffuziya usuli bilan kirishmalar kiritish

Yarimo'tkazgichlarda diffuziya jarayonlari haqida keyin batafsilroq to'xtalamiz. Bu joyda mazkur usulning qisqacha tavsifini keltiramiz, xolos.

Bu usulda maxsus idishlarga (tigellarga) yarim o'tkazgich kristalli, u bilan birga kiritiladigan moddaning tayinli miqdori ham joylanadi, so'ng diffuziya pechida (kristallning suyulish temperaturasidan past bo'lgan) yuqori temperaturagacha qizdiriladi, kirishma modda bug'lanadi va uning atomlari kristall ichiga diffuziyanib kira boradi. Bu atomlar yo asosiy atomlardan bo'shab qolgan tugunlarga, yoki tugunlar orasiga joylashib oladi. Masalan, kremniyga fosforni $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ temperaturada diffuziyanadi, chunki kremniyning suyulish temperaturasi taxminan 1410°C bo'lganligi uchun u o'zining qattiq holatini saqlaydi, ammo atomlar issiqlik harakati kuchayishidan vakansiyalar ko'payib ketadi, fosfor va kremniy atomlari radiuslari bir biriga yaqin bo'lganligi uchun fosfor atomlari kremniy kristalli tugunlariga joylashib, o'rinbosar kirishma hosil qiladi.

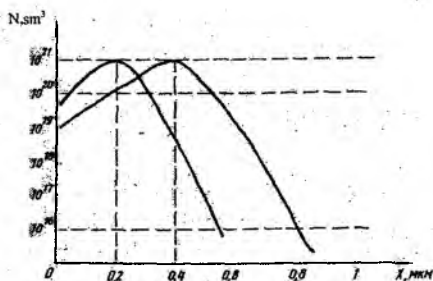
Diffuziya jarayonida kristall ichida kirishma atomlar taqsimoti Fik qonunlaridan kelib chiqadigan diffuziya tenglamasini yechish orqali aniqlanadi.

Agar $N(x, t)$ diffuziyanuvchi kirishma atomlari zichligi (x -o kristall sirti tekisligini belgilaydi), D ularning diffuziya koeffitsiyenti bo'lsa, x yo'lanishda

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2} \quad (I.11)$$

Diffuziya tenglamasining cheksiz (doimiy) manba holidagi (kristall sirtida kirishma zichligi N_0 deb olingandagi) yechimi quyidagi ko'rinishda bo'ladi.

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$



I.16—rasm. Kristalga kiritilgan ionlar zichligi taqsimoti.

Bu holda kristall sirti yaqinida kirishma bilan to'yingan yupqa qatlam hosil bo'ladi. Bu qatlamdagi kirishma zichligi imkoni boricha katta qilib olinadi. Bu bosqichni kirishma *kiritish bosqichi* deyiladi. So'ngra, tashqaridan kirishma kiritish bartaraf qilinib (manba uzoqlashtirilib), kristallga kirib bo'lgan kirishma yuqori temperaturada qayta taq-

simlanishga duchor qilinadi. Bu bosqichni *kirishmani (kristall ichiga) haydash* deyiladi. U chekli kirishma manбайдan diffuziyalanish holiga mos keladi. Bu holda (I.12)ning yechimi

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left[-\frac{x^2}{2Dt}\right], \quad (1.13)$$

bundagi Q -legirlash dozasi. Yarimo'tkazgichli asboblarda sanoatida planar texnologiyada xuddi shu ikki bosqichli diffuziya usuli qo'llanadi.

2.3. Ionlar kiritish usuli

Kiritiladigan kirishma atomlari dastavval ionlashtiriladi, so'ngra bu ionlarni katta(bir necha kilovolt chamasidagi) kuchlanishli elektrik maydonda tezlashtiriladi, shunda ular kristall plastinasiga kira oladigan bo'ladi, ularning taqsimoti I.16-rasmda keltirilgan.

Bu usul ionlar tokini va nurlash vaqtini nazorat qilish orqali kiritilayotgan kirishmani aniq hamda takrorlanuvchi miqdorda kiritish, ionlarning kirish chuqurligini tayinlash va boshqa bir qancha afzalliklar imkonini beradi.

Kirishmaning ionlari yarim o'tkazgich kristalli panjarasiga kira borib ikki ko'rinishda o'z energiyasini yo'qota boradi. Birinchi holda ion kristall atomiga urilib, uni tugundan tugunlar orasiga ko'chirib, Frenkel nuqsoni hosil qilishi, ko'chirilgan atom, agar iondan katta energiya olsa, yana boshqa atomlarni o'z tugunidan urib chiqarishi mumkin. Bu

to'qnashishlar ionning yo'lida tuzilishi buzilgan sohalar-klastlarlar (o'Ichami(15-10) $\cdot$ 10⁻⁷sm) vujudga keltiradi. Ionlar oqimi etarlicha katta bo'lganda klastlarlar qo'shilishib, makroskopik amorf sohalar hosil qilishi ham mumkin.

Ikkinchi holda ionlar kristall atomlari elektronlari bilan ta'sirlashadi va o'z energiyasini atomlarni ionlash yoki g'alayonlashga sarflaydi.

Ionlarni kiritish jarayonini q zaryadli ionning V kuchlanish ta'sirida olgan $E=qV$ energiyasi, ionlarning atomlarni ionlash karrasi, $Q=It$ nurlash dozasi (I -ionlar toki zichligi. t — vaqt) tavsiflaydi.

Tezlashtirilgan ionlarni kristallarga kiritish turli nuqsonlarni keltirib chiqarishi mumkin. Boz ustiga bu nuqsonlarning zichligi katta bo'lib ketganda sirtiy qatlamda kristall tuzilishining buzilishi(amorflanish) sodir bo'lishi mumkin. Kristallni muayyan vaqt davomida qizdirib, sirtiy nuqsonlarni yo'q qilish («kuydirish») mumkin. Masalan, germaniyda 400-500°C da, kremniyda 600-700°C da amorflangan sirtiy qatlam qayta kristallanadi, kirishma atomlari tekis taqsimlanadi, faollashadi.

2.4. Epitaksiya usuli

Yunoncha «epi»—ustiga, «taksis»—tartibli o'rnatish (taxlash) demakdir. Epitaksiya hodisasi monokristall taglik ustida monokristall modda qatlamini ma'lum kristallografik yo'nalishda o'stirish jarayonidir.

Epitaksiya jarayonining avtoepitaksiya (gomoeptitaksiya), geteroepitaksiya, xemoepitaksiya, reoepitaksiya deb ataladigan turlari bor.

Avtoepitaksiya taglik va o'stiriladigan qatlam aynan bir moddadan iborat holdagi jarayondir.

Geteroepitaksiya taglik va o'stiriladigan qatlam turli moddalardan iborat holdagi jarayondir.

Bu ikki jarayonda taglik va o'stiriladigan qatlam moddalari kimyoviy ta'sirlashmaydi.

Ammo, xemoepitaksiyada yangi kristall fazasi qatlami taglikning unga kelib tushayotgan modda bilan kimyoviy o'z aro ta'siri evaziga hosil bo'ladi.

Reoepitaksiya jarayonida taglikning tuzilishi o'sadigan kristall fazasi tuzilishidan farq qiladi.

Agar o'tqizilayotgan modda taglikka bevosita etib boradigan bo'lsa, buni to'g'ri jarayonlar deyiladi. Aks holda noto'g'ri jarayon amalda bo'ladi.

O'tqaziladigan moddaning dastlabki agregat (tub) holati bo'yicha **epitaksial jarayonlar 4 turga ajratiladi.**

Gaz-transport (bug' fazali) epitaksiya holida o'tqaziladigan modda dastlab gaz(bug') holatida bo'ladi va shu holatda u taglikka etib boradi. Masalan, kremniy taglik joylashgan sohaga silan SiCl_4 ni bug' holida vodorod gazi olib keladi. Shu sohada silan parchalanadi va undan Si ajralib, taglikka o'tiradi.

Suyuq fazadan epitaksiya qilish holida o'tqazilayotgan modda dastlab suyuq holatda bo'ladi.

Bug'-suyuqlik-kristall (taglik) tizimida epitaksiya qilish holida o'tqaziladigan modda o'zining dastlabki bug'(gaz) holatidan oraliqdagi suyuq holatning yupqa pardasi orqali o'tib, so'ng taglikka o'tiradi.

Yana qattiq fazadan epitaksiya usuli ham mavjud. Masalan, monokristall sirtida II tur fazaviy o'tish hisobiga shishasimon modda kristallanishi mumkin.

Epitaksiya usulida bir vaqtda kirishmalar, kiritib borilishi mumkin. Yarimo'tkazgichni legirlashda ionlar kiritish va diffuziya usullarini birgalikda qo'llash mumkin. Bu radiatsion rag'batlantirilgan diffuziya hodisasi kelib chiqishiga olib keladi.

2.5. Transmutatsion legirlash usuli

Yarimo'tkazgichlar kristallarini yadroviy zarralar (neytronlar, protonlar, γ -kvantlar va h.k). bilan nurlantirganda yadroviy reaksiyalar oqibatida asosiy modda atomlari unda nurlanishgacha bo'lmagan elementlar atomlariga aylanishi, bular esa kerakli kirishma atomlari bo'lishi mumkin. Mana shu usulni *transmutatsion legirlash* deyiladi. Bu hodisa o'stirilgan kristallni bir tekis legirlash maqsadida hozirgi vaqtda keng qo'llanila borayotir. Eng ko'p amaliy qo'llanishga ega bo'lgan yo'l issiqlik(sekin) neytronlari bilan nurlash usulidir.

Issiqlik sekin neytronlar hosil qilgan legirlovchi kirishmaning zichligi

$$C = \Phi \delta C_{as} \alpha \tau \quad (1.14)$$

ifoda asosida hisoblanadi. Φ -issiqlik neytronlar oqimi, δ -mazkur yadroviy avrilish reaksiyasining izotop effektiv kesimi, C_{as} - asosiy modda atomlari zichligi, τ - nurlash vaqti.

Issiqlik neytronlar bilan nurlab legirlash misoli kremniyning radiatsion legirlanishidir.

Tabiiy kremniy uch barqaror izotopning aralashmasidir:

$^{28}\text{Si}(92,28\%)$, $^{29}\text{Si}(4,67\%)$ va $^{30}\text{Si}(3,05\%)$

Kremniyni sekin neytronlar bilan nurlantirganda mazkur izotoplarining yadrolari neytronlarni yutadi, γ -kvantlar chiqarib, ^{20}Si , ^{30}Si , ^{31}Si izotoplarga aylanadi.

^{31}Si izotop barqarormas, u 2,6 soat yarimdavrda yemirilib, fosforning ^{31}P izotopiga aylanadi.

(I.14) ifodadagi δ, C_{as}, α kattaliklar dastlabki moddaga tegishli bo'lgani uchun o'zgarimas, agar neytronlar oqimi Φ ni doimiy deb hisoblansa, bu holda kremniyda hosil qilingan fosforning zichligi nurlash vaqtigagina bog'liq, bu esa fosfor miqdorini yetarlicha aniq nazorat qilish imkonini beradi. Kremniy kristalli o'stirilgandan keyin unda forforni kompensatsiyalovchi kirishmalar(bor (B)) qoladi. Binobarin, solishtirma elektrik qarshiligi birjins bo'lgan kremniy kristalli olish uchun fosforning zichligi bor (B) ning qoldiq zichligidan ancha katta bo'lishi zarur. Bu holda kristall quymasi bo'ylab solishtirma qarshilik nobirjinsligi (tafovuti) $\pm 3\%$ dan ortiq emasligini tajriba tasdiqlaydi. Bu aniqlik suyuqlardan o'stirilgan legirlangan kremniy hajmi bo'yicha solishtirma qarshilik taqsimoti birjinsligi darajasidan ancha yuqoridir.

Bu usulning kamchiligi shundan iboratki, nurlantirilayotgan kristallarda bir vaqtda kristall panjarasida radiatsion nuqsonlar hosil bo'ladi. Bundan tashqari, yadro reaktorida sekin neytronlardan boshqa yana tez neytronlar, quvvatdor -nurlanish ham bor bo'ladi. Oqibatda kremniyning elektrofizik xossalari sezilarli o'zgarishi mumkin. Shuning uchun nurlashdan so'ng namunalarga termoshloy berib, radiatsion nuqsonlarni kuydirib, kremniyning talab qilinadigan xossalari erishish zarur. Bu ishlov 800°C temperaturada 1 soat davomida amalga oshirilishi ma'qul hisoblanadi.

Bu usul nisbatan qimmatroq va radiatsion xavfsizlik choralarini ko'rish zaruriyatini qo'yadi.

Kristallarni neytronlar bilan transmutatsion legirlash yarimo'tkazgichlar texnologiyasining muhim va tez rivojlanayotgan sohasidir.

Shu usulda legirlangan kremniyning turli maqsadli asboblari tayyorlashdagi bir yillik sarfi 100 tonnadan ortiq

Hozir bu usulda germaniyni galliy va arseniy bilan, indiy antimonidini qalay bilan, galliy arsenidini germaniy va selen bilan legirlashda qo'llanilmoqda.

Bayon qilingan kirishma kiritish usullarining har biri o'zining afzalliklari va kamchiliklariga ega. Amaliy masalalarni yechishda bu jihatni albatta e'tiborga olinadi.

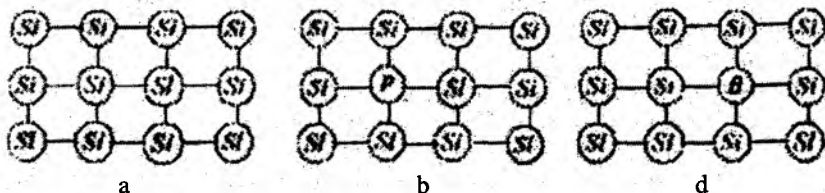
2.6. Kirishmalarning energiya sathlari

Kirishmalar haqidagi ma'lumotni ularning yarimo'tkazgichlar kristallarida elektronlar uchun hosil qiladigan energiya sathlari to'g'risidagi qisqacha axborot bilan yakunlaymiz.

Kristall panjarasiga kirib olgan kirishmalar ideal kristall panjarasi qat'iy davriyligini buzuvchi nuqsonlardir va ular elektronlar uchun o'ziga xos energetik holatlar paydo qiladi. Agar kirishmalar zichligi uncha katta bo'lmasa (aynimagan yarimo'tkazgich), mazkur holatlar kirishma atomlar yaqinida (mahalliy joylarda) o'rinishgan bo'lib, bu mahalliy holatlar sathlari yarimo'tkazgichning ta'qiqlangan zonasida joylashgan bo'ladi. Mahalliy sathdagi elektron bog'langan elektron bo'lib, uni erkin elektronga aylantirish uchun yoki valent zonadagi elektronni mahalliy sathga o'tkazish uchun muayyan energiya kerak bo'ladi. Agar madalliy sath o'tkazuvchanlik yoki valent zonasiga yaqin joylashgan bo'lsa, uni *sayoz sath* deyiladi. Sayoz sathdagi elektronni faollash energiyasi (kirishmani ionlash energiyasi) ta'qiqlangan zona kengligi E_g dan ancha marta kichik bo'ladi.

Ta'qiqlangan zonaning o'rta qismidagi mahalliy sathlar *chuqur sathlar* deb ataladi. Ba'zi kirishmalar sayoz sathlar hosil qilsa, ba'zilar chuqur sathlar paydo qiladi.

Eng ko'p qo'llaniladigan kremniy kristallini olaylik. Ma'lumki, kremniy panjarasida har bir atomning 4 ta eng yaqin qo'shnisi bo'lib, ular bilan 4 ta valent elektroni vositasida kovalent bog'langan (1.17, a-rasm). Agar shu panjaraga 5 valentli element atomi (masalan, forfor) kiritilsa kirishma atom kremniy atomi o'rniga joylashadi (1.17, b-rasm). Uning 4 ta valent elektroni 4 ta qo'shni kremniy (Si) atomlari bilan kovalent bog'lanishni ta'minlaydi, 5-valent elektron esa o'z atomi bilan kuchsiz bog'lanishda bo'ladi. Unga E_g ga nisbatan ancha kam E_d



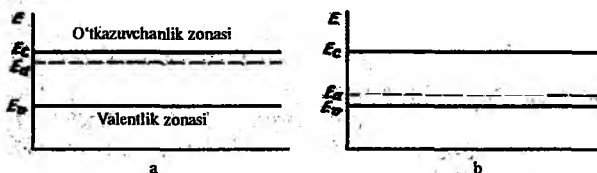
1.17—rasm. Kremniy kristaliga kiritilgan kirishmalar joylashishi:

a—kirishmasiz kremniy kristali; b—fosfor kiritilgan kremniy kristali; d—bor (B) kiritilgan kremniy kristali.

energiya (u xona temperaturasi kT tartibida) berilsa, u o'z atomidan ajralib, o'tkazuvchanlik elektroni bo'lib qoladi, ya'ni o'tkazuvchanlik zonasiga o'tib oladi. Bu elektronning kremniy energetik zonaviy diagrammasidagi sathi o'tkazuvchanlik zonasidan E_d energiya qadar pastda, ta'qiqlangan xonada tasvirlanadi (1.18.b-rasm). O'tkazuvchanlik zonasiga elektron bera oladigan kirishmani *donor kirishma*, u hosil qilgan sathni *donor sath* deyiladi. Yetarlicha donor kirishma kiritilgan va o'tkazuvchanlik elektronlari toza kristalldagidan ko'p bo'lgan yarimo'tkazgichni *n-tur yarimo'tkazgich* deyiladi. Agar kremniyga Davriy sistemaning V guruh elementlari (P, As, Sb) atomlari kiritilsa, kremniy xona temperaturasi asosan elektron o'tkazuvchanlikli (*n-tur*) yarimo'tkazgich bo'ladi. Agar kremniy (Si) kristalliga 3 valentli bor (B) atomlari kiritilsa, ular ham kremniy atomlari o'rniga joylashib oladi (1.17,d-rasm).

Bor (B) atomida 3 ta valent elektron bor. Uning 4 ta qo'shni kremniy (Si) atomlari bilan kovalent bog'lanish hosil qilishi uchun bir elektron etishmaydi. Bu elektronni bor (B) atomi kremniy (Si) atomlari orasidagi bog'lanishdan (valent xonadan) tortib olishi mumkin. Buning uchun uncha katta bo'lmagan E_a energiya kerak bo'ladi.

E_a ham xona temperaturasi kT tartibidadir. Bu sath ham taqiqlangan zonada. Ammo valent zona yaqinida joylashgan. (1.18, b-rasm)



1.18—rasm. Yarimo'tkazgichning energetik diagrammasi:

a) donor kirishmali yarimo'tkazgich; b) akseptor kirishmali yarimo'tkazgich.

Valent zonadagi elektronni o'ziga biriktirib oladigan (kovak hosil qiladigan) kirishmani *akseptor kirishma*, E_a energiyali sathni *akseptor sath* deyiladi.

Akseptor kirishma kiritib, kovaklari ko'paytirilgan yarimo'tkazgichni *p-tur yarimo'tkazgich* deyiladi.

Kremniyga III guruh elementlari (In, Al, Ga, B,...) atomlari kiritilsa, u xona temperaturasi yoq *p-tur yarimo'tkazgich* bo'ladi.

Agar yarimo'tkazgichga ham donor kirishma, ham akseptor kirishma kiritilsa, donor sathdagi elektronlar akseptor sathlarga o'tadi. Bunday yarimo'tkazgichlarni *kompensirlangan yarimo'tkazgichlar* deyiladi.

Kompensirlanish sayoz va chuqur sathlar mavjud bo'lganida ham sodir bo'ladi.

Agar kirishma atomlar zichligi yetarlicha katta bo'lsa, qo'shni kirishma atomlar elektronlari o'zaro ta'sirlashadi, kirishma hosil qiladigan sathlar parchalanib, elektronlar (kovaklar) energiyasining kirishmaviy zonasini vujudga keltiradi.

Kirishmaviy energiya zonolari o'tkazuvchanlik yoki valent zonasi bilan tutashib ketishi mumkin. Bu hoi kuchli legirlangan yarimo'tkazgichlarga xosdir.

Yarimo'tkazgichdagi kirishmalarning ko'pchiligi ta'qiqlangan zonaning o'rta qismida, o'tkazuvchanlik va valent zonalaridan uzoqda elektronlar uchun energiya sathlari hosil qiladi. Bu sathlarni chuqur sathlar deyiladideb aytgandik. Chuqur sathlar yo donorlik, yo akseptorlik xossalriga ega bo'ladi. Ba'zi kirishmalar bir necha chuqur sathlar hosil qila oladi. Ularning ba'zilari donor bo'lsa, ba'zilari akseptor bo'ladi (amfoter kirishmalar). Masalan, kremniyga bir necha o'n element atomlari kiritilib, ularning elektrofizik xossalari batafsil o'rganilgan, ulardan ba'zilari: oltin (Au), kumush (Ag), nikel (Ni), temir (Fe), kobalt (Co), oltingugurt (S), qo'rg'oshin (Pb), platina (Pt), palladiy (Pd).

Chuqur sathlar yarimo'tkazgichlarda elektronlarning holatlar aro o'tishlari bilan bog'liq juda ko'p va xilma-xil jarayonlarda muhim o'rin tutadi. Chuqur va sayoz sathlar hosil qiladigan kirishmalarning o'zaro munosabati masalalari, kirishmalarning nuqsonlar bilan o'zaro ta'siri muammolari fan va texnikada dolzarb muammolar hisoblanadi.

Nazorat qilinmaydigan kislorod, azot, uglerod va boshqa kirishmalar va ularning nuqsonlar bilan birikmalari ham kremniyda chuqur sathlar paydo qiladi. Masalan, kremniyda kislorod bilan vakansiya birlashuvi $O+V$ (yoki A-markaz) elektron uchun ta'qiqlangan zonada $E_g-0,16$ eV chuqur sath hosil qiladi. Chuqur sathlarning elektron va kovakni ushlab olish kesimlarini ham bilish kerak.

Chuqur sathlar optik va fotoelektrik hodisalarda muhim vazifalarni bajaradi. Hozir chuqur sathlarni aniqlashning bir necha usullari bor.

Nazorat savollari

1. Kirishmaning aralashmadan farqi nimadan iborat?
2. Kirishmalar kiritishning diffuziya usulini tavsiflang.
3. Ionlar kiritish usuli bilan legirlash qanday?
4. Epitaksiya usuli bilan legirlashni tavsiflang.
5. Transmutatsion legirlash usulini tavsiflang.
6. Kirishmalar elektronlar uchun qayerda va qanday sathlar hosil qiladi?
7. Kuchsiz va kuchli legirlanish hollarini tavsiflang.

IKKINCHI QISM

YARIMO‘TKAZGICH MODDALAR OLISH TEXNOLOGIYASI

Kirish

Elektron texnikasining hozirgi zamon jamiyat hayotida tobora keng va salmoqli o‘rin olib borayotgani ko‘pchilikka ma’lum. Qattiq va suyuq yarimo‘tkazgichlar va dielektriklar asosida tayyorlangan asboblardan, qurilmalar, integral sxemalar avtomatikada, telemexanikada, radioelektronikada, hisoblash va boshqaruv texnikasida, tibbiyotda, transportda, energetikada, Quyosh energiyasini elektr energiyaga va boshqa energiya turlariga aylantirishda va jamiyat xo‘jaligining boshqa ko‘p sohalarida samarali xizmat qilmoqda.

Elektron texnikasining yanada rivojlanib borishi uchun elektron sanoatini yuqori sifatli materiallar bilan ta’minlaydigan kelajagi bor, arzon, ekologik toza, chiqindisiz texnologik jarayonlarni joriy qilish zaruriy shartdir.

3-BOB. ELEKTRON TEXNIKASI MODDALARI TEXNOLOGIYASI ASOSIY JARAYONLARINING UMUMIY TAVSIFI

3.1. Texnologik jarayon. Asosiy tushunchalar

Texnologik jarayon tarkibiga xomashyodan o‘tkazgich, yarimo‘tkazgich, dielektrik va magnetik moddalar hosil qilinadigan usullar va jarayonlar kiradi.

Xomashyoni qayta ishlash (ishlab chiqarish) usuli ketma-ketligi tavsifini **texnologik sxema** deyiladi.

Elektron texnika materiallarini bir qator oddiy fizik, fizik-kimyoviy va kimyoviy jarayonlar (amallar) yordamida hosil qilinadi:

- 1) xomashyoni tayyorlash va reaksiyaga kirishuvchi (reagent) tarkiblovchilarni reaksiya zonasiga keltirish;
- 2) kimyoviy reaksiyalar;
- 3) reaksiya zonasidan mahsulotlarni olib ketish va kerakli mahsulotni ajratib olish.

1-bosqichda fizik jarayonlar yuz beradi, 2-bosqichda moddaning faqat fizik xossalarini emas, balki uning tub holatini va kimyoviy tarkibini o‘zgartiruvchi jarayonlar sodir bo‘ladi, 3-bosqichda kimyoviy

o'zgarishlar yo'q, bunda asosiy mahsulot, yo'lakay mahsulotlar va qoldiq reagentlar (ular yana takroriy jarayon boshlanishiga qaytarilishi mumkin) ajratiladi.

Texnologik jarayonni tashkillash va optimallashtirish uchun texnologik rejim (marom) katta ahamiyatlidir.

Texnologik rejim deb, jarayon sur'atiga, mahsulotning miqdori va sifatiga ta'sir ko'rsatadigan asosiy omillar (parametrlar) to'plamiga (majmuiga) aytiladi. Ko'p holda elektron texnika materiallarini olish jarayonlarida asosiy parametrlar temperatura, bosim, reagentlarni keltirish va ko'chirish usuli va boshqalar bo'ladi.

Texnologik jarayonlarni uning vaqt o'tishi bilan kechishi bo'yicha davriy, uzluksiz va qo'shma (kombinatsion) jarayonlarga bo'linadi.

Davriy jarayonda uning hamma bosqichlarining kechimi bir joyda bo'ladi, ammo u holda barqaror holat bo'lmaydi.

Uzluksiz jarayonda uning barcha bosqichlari vaqti birday, barqaror holat bo'ladi, natijaviy mahsulot uzluksiz ajratib olinadi.

Qo'shma (kombinatsion) jarayonda ayrim bosqichlar davriy ravishda, boshqalari uzluksiz yo'sunda kechadi.

Jarayonning kechishini aniqlovchi parametrlar asosiy guruhi quyidagi:

1. **Kirish parametrlariga** tajribada aniqlanishi mumkin, ammo jarayon mobaynida o'zgartirib bo'lmaydigan kattaliklar mansub bo'ladi.

2. **Natijaviy mahsulotning chiqish parametrlariga** kirish, boshqarish va nazorat qilinmaydigan omillar ta'sir qiladigan tizimda o'rganilayotgan jarayon rejimi bilan aniqlanadigan tizim xarakteristikalarini mansub bo'ladi.

3. **Boshqaruvchi parametrlar** qo'yilgan talablarga ko'ra, ta'sir ko'rsatish mumkin bo'lgan jarayon parametrlaridir.

4. **Nazorat qilinmaydigan parametrlar** qiymati tasodifan o'zgaradigan va o'lchab bo'lmaydigan parametrlardir.

Elektron texnika materiallari (moddalarini) texnologiyasida quyidagi asosiy modellar tizimi ishlab chiqilgan:

Jarayonlarni tadqiqlash, texnologiya hisob-kitobi va optimallashtirish, jarayonning vaqt bo'yicha yuz berish optimal (ma'qul) yo'lini oldindan aniqlash, barqarorlashtirish yoki kuzatib boshqarish, o'rgatish va mashqlantirish majmualari asosida malakani oshirish avtomatik tizimlari modellari mavjud.

EHM yordamida texnologik jarayonlarni o'rganiladi, turli sharoitda ularning xulq-atvorini modellanadi, optimal texnologik parametrlar va rejimlar aniqlanadi.

3.2. Geterogen kimyoviy-texnologik tizimlarning asosiy jarayonlari

Elektron texnika materiallarini olishning haqiqiy jarayonlari sarlavha nomidagi jarayonlardir. Asosiy kimyoviy jarayonga qo'shiladigan eng muhim fizik jarayonlar dastlabki reagentlarni reaksiya zonasiga keltirilishi va bu zonadan reaksiya mahsulotlarini olib ketilishidan iborat massa-ko'chish va reaksiya zonasi bilan atrof-muhit orasida issiqlik uzatish jarayonlaridir.

Massa-ko'chish moddaning bir fazadan ikkinchi fazaga ko'chishidan iborat bo'lib, ham geterogen, ham gomogen tizimlarda (gazlar aralashmasi, suyuq yoki qattiq eritmalar va b) ajratish va hosil qilish mumkin.

Massa-ko'chish jarayonlarining harakatlantiruvchi kuchi turli joylarda kimyoviy potensiallarning farqli bo'lishidir. Sodda hollarda bir faza ichida diffuziyalanuvchi modda zichligi (konsentratsiyasi) katta joydan u kichik bo'lgan joyga tomon ko'chadi, jarayonning harakatlantiruvchi kuchi taqriban zichliklar farqi (gradienti) orqali ifodalanadi. Haqiqiy hollarda massa-ko'chish jarayoni yo'nalishini aniqlashda temperatura gradienti va tashqi kuchlar bosimlari gradienti ham hisobga olinishi kerak. Massa-ko'chish jarayoni nihoyasi tizimning muvozanat holatga erishishidir.

Massa-ko'chish tezligi orasida bu jarayon yuz berayotgan fazalarda taqsimlangan modda ko'chishi mexanizmi bilan bog'liq.

Qattiq faza va harakatlanayotgan suyuq (gaz yoki bug') faza orasida massa-ko'chish ikki jarayondan iborat: 1) qattiq jism ichida taqsimlangan moddaning ichki massa berish yoki massa o'tkazuvchanlik tufayli fazalar chegarasi sirtiga tomon ko'chishi; 2) o'sha moddaning suyuqlikda (gazda yoki bug'da) tashqi massa berish yo'li bilan ko'chishi. Demak, massani uzatish ichki va tashqi diffuziyadan iborat.

Qattiq jismda modda ko'chishi jarayoni molekular diffuziya holi uchun Fik qonunlariga bo'ysunadi va quyidagi differensial tenglamalar orqali tavsiflanadi:

$$\vec{I} = -D\nabla C,$$
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right); \quad \frac{\partial C}{\partial t} = -\operatorname{div}\vec{I}$$

Bunda D —diffuziya koeffitsienti, C —diffuziyalanuvchi modda zichligi (konsentratsiyasi), $\bar{I}$ —massa diffuzion oqimi. Bu tenglamalar tizimini yechib, vaqt va koordinata funksiyasi sifatida C zichlik (konsentratsiya) ifodasi olinadi, tabiiy, u orqali diffuzion massa oqimi aniqlanadi.

Massa uzatishning nazariy modellari quyidagi farazlarga asoslanadi.

1. Moddaning fazadan fazaga massa-ko'chishiga umumiy qarshiligi ikki fazaning va chegara sirtining qarshiliklari yig'indisidan iborat. Ko'pincha, chegara sirti qarshiligi yo'q deb hisoblanadi. Har bir faza ichidagi jarayonlar bir biridan mustaqil kechadi.

2. Fazalar chegarasi sirtida ular muvozanatda bo'ladi. Bunda fazaning asosiy massasi o'rtacha zichligi o'zgarishiga nisbatan mazkur muvozanat ancha tez o'rnashadi.

Issiqlik uzatish jarayonlarining harakatlantiruvchi kuchi temperaturalar farqidir. Issiqlik uzatishning, ma'lumki, uch soddada usuli — issiqlik o'tkazuvchanlik, nurlanish va konveksiya usullari mavjud. Texnologik jarayonlarda bu uch usul ham qatnashishi mumkin. Bizni qiziqtirayotgan materiallar olish jarayonlarida issiqlikning uzatilishi fazalarning chegarasi qo'zg'aluvchan yoki erkin bo'lgan hollar uchun tuzilgan differensial tenglamalar asosidagi masalalar muhim ahamiyatga ega. Bu masalalarni umumlashtirib *Stefan masalalari* deyiladi.

Bu masalalarda fazalar chegarasida issiqlik oqimi uzluksiz bo'ladi degan shart qo'yiladi. Bu shart suyulma kristallanayotgan hol uchun quyidagicha:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} = \rho L \frac{\partial \xi}{\partial \tau},$$

bunda λ —solishtirma issiqlik o'tkazuvchanlik, L —suyulish yashirin issiqligi, ξ —kristallanish fronti koordinatasi, n —normal, ρ —kristallanishda suyulma zichligi, uning o'zgarishi bu shartda e'tiborga olinmaydi.

Issiqlik va massa uzatishning fazalar o'tishi ishtirokidagi masalasi murakkab matematik masala. Ko'pchilik texnologik masalalarni yechishda asosan soniy usullardan foydalaniladi.

Yana bir necha muhim tushunchalar bilan tanishaylik.

Chegaraviy qatlam — jismning sirtidagi yupqa soha, bunda inersiya va ichki ishqalanish kuchlari bir tartibdagi kattaliklar deb hisoblanadi.

Tashqi oqim — bu oqimning qolgan sohasi. Unda ishqalanish kuchlari e'tiborga olinmaydi.

Chegaraviy qatlamlarning uch xili farqlanadi.

Dinamik chegaraviy qatlam — suyuqlikning qattiq jism devori yaqinidagi δ_0 qalinlikdagi qatlami. Bu qatlamda suyuqlik harakati tezligi nuldin (jism sirtida) to asosiy oqim tezligi w_0 gacha o'zgaradi.

Issiqlik (termik) chegaraviy qatlam — suyuqlikning devor yaqinidagi δ_t qalinlikdagi qatlami. Unda temperatura jism sirtidagi T_{ch} dan asosiy suyuqlik oqimining T_0 temperaturasigacha o'zgaradi.

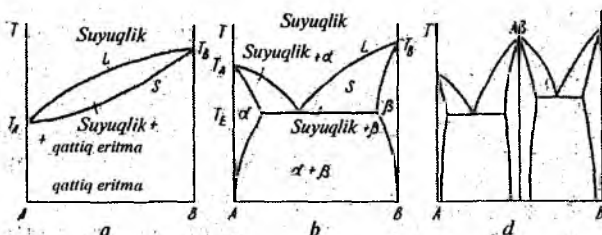
Diffuzion chegaraviy qatlam tushunchasini qattiq jism sirti yaqinida konvensiya yo'li bilan massa berish jarayonlarini tahlil qilishda kiritiladi, bu sirtida tegishayotgan suyuqlik oqimi bilan o'zaro ta'sir reaksiyasi yuz berib turadi.

3.3. Holatlar (fazalar) diagrammalari

Hozirgi vaqtda suyuq moddalardan kristallanish usulidan yarimo'tkazgich va dielektrik materiallarni tozalash uchun foydalaniladi. Bu usul moddalarni tozalash texnologik jarayonining oxirgi bosqichida qo'llaniladi. Bunda materialni yuqori tozalikdagi monokristall ko'rinishida olinadi.

Moddani kristallash yo'li bilan tozalash jarayonlarini amalga oshirishdan oldin moddaning (undagi kirishmalar bilan birgalikdagi) **fazalari diagrammasini** bilish zarur.

Ba'zi mulohazalar moddalarni tozalashning kristallash usullari asosiy qoidalarini tahlil qilishda ikki tarkiblovchili tizimlarni ko'rib chiqish bilan kifoyalanish mumkinligini tasdiqlaydi.

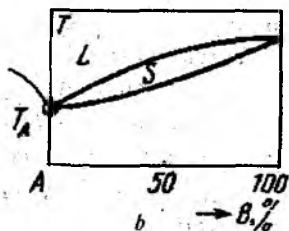
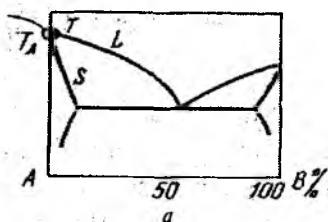


II.1 — rasn. Fazalar diagrammalarining eng muhim hollari:

a — uzluksiz qattiq va suyuq eritmalarining holat diagramasi;

b — qattiq eritmalarining α va β sohalari bilan holat evtektiv diagrammasi;

d — qattiq eritmalar soohalari bilan holat distektiv diagrammasi.



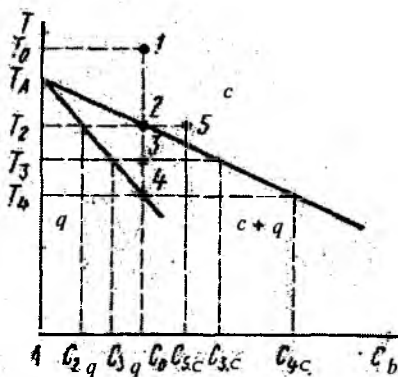
II.2-rasm. Asosiy tashkillovchining suyuqlash nuqtasi T_A yaqinida ikki tur fazalar diagrammasi qismlari S solidus va L likvidus chiziqlariga urinma va to'g'ri chiziqlar ikki kesmalar bilan tasvirlangan:

a- suyuqlash temperaturasi pasaytiradigan kirishma; b- suyuqlash temperaturasi oshiradigan kirishma.

II.1-rasmida fazalar diagrammalarining bir necha holi tisvirlangan kristallash usuli bilan tozalashning asosiy qoidasi quyidagidan iborat. Ikki tashkillovchili (binar) tizimdagi aralash eritmaning kristallanishida yuz beradigan jarayonlarni qaraylik, bunda kirishma eritmaning suyuqlash temperaturasi pasaytiradigan bo'lsin (II.2-rasm).

Kirishma zichliklari kichik bo'lganida fazalar diagrammasi qismlari to'g'ri chiziq ko'rinishida bo'ladi. Bizda C_0 zichlikli B kirishmali A tashkillovchining T_0 temperaturadagi suyuqlashi bo'lsin (II.3-rasm).

Tizimning dastlabki holatini C_0 va T_0 koordinatali 1 nuqta tasvirlaydi. Temperatura pasayganda 1 figurativ nuqta tizimning ketma-ket holatlarini tavsiflovchi tik(verikal) chiziq chizadi. Vertikal chiziq



bilan likvidus chizig'i kesishadigan 2 nuqta qattiq eritma kristallana boshlashi temperaturasi T_2 ni aniqlaydi, bunda bu temperaturaning solidus chizig'i bilan kesishishi joyi aniqlaydigan C_{2q} zichlikli qattiq faza hosil bo'ladi. Temperatura yana pasaya borsa (to kristallanish oxirigacha) tizim holati ikkita nuqta bilan aniqlanadi.

II.3-rasm.

B tashkillovchining A da suyultirilgan eritmasi kristallanishida suyuq va qattiq fazalar orasida kirishma taqsimoti.

Bu bir vaqtda tizimda o'zaro muvozanatdagi ikki faza borligini bildiradi. Bu nuqtalardan biri solidus chizig'i ustida bo'lib qattiq faza tarkibini beradi,

ikkinchi nuqta likvidus chizig'i ustida bo'lib suyuq faza tarkibini beradi.

Suyulish oralig'ini C_0 vertikalning solidus va likvidus chiziqlari bilan kesishish nuqtalari (4-va 2) aniqlaydi. 4 nuqtaga mos T_4 temperaturaga erishilganda suyuq faza butunlay yo'q bo'ladi, tizim bir fazali bo'lib qoladi, qattiq faza tarkibi esa suyuqlikning C_0 tarkibi bilan birday bo'ladi. Temperatura yana ham pasaya borsa, qattiq faza tarkibi o'zgarmaydi. temperatura orta borganda tizim o'sha holatlar ketma-ketligidan teskari tartibda o'tadi.

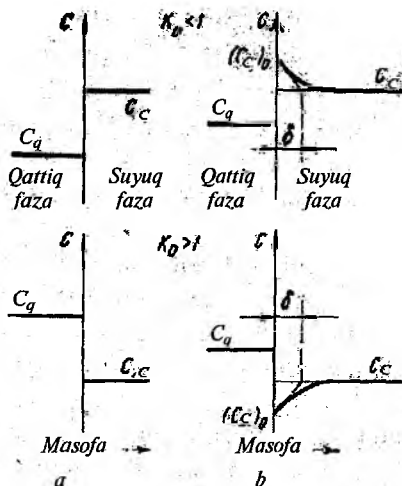
Demak, kristallangan quyma tarkibi suyulma tarkibidan hech farq qilmasligi kerak. Yuqoridagi mulohazalar har bir muayyan paytda tizim muvozanatiy holatda bo'ladi degan farazga asoslanadi. Ammo, bu faraz temperaturani juda sekin o'zgartirganda (kvazistatik jarayonda) haqiqatga yaqin bo'ladi.

Suyuq fazada diffuziya koeffitsienti qattiq fazadagidan bir necha tartib qadar katta (800°C da qattiq germaniyda indiyning diffuziya koeffitsienti $2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ bo'lgani holda suyuq germaniyda u $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$). Shuning uchun kristalldagiga nisbatan suyulmada muvozanat o'mashishi tezligi ancha katta. Fazalar chegarasida esa mazkur tezlik suyuqlikdagidan kichik emas, ammo qattiq fazadagidan ancha katta bo'lishi mumkin.

Faraz qilaylik, kristallanish jarayoni tezligi shunaqaki, bunda suyulmada va fazalar chegarasida muvozanat uzluksiz tiklanib turadi. Ammo qattiq fazada diffuziya juda sekin va diffuziya tufayli qattiq faza tarkibi o'zgarmaydi.

Temperatura kristallanish boshlanishidagigacha pasayganda (II.3-rasmda 2 nuqta) C_2 tarkibli qattiq faza vujudga keladi, unda A asosiy tarkiblovchi suyuq fazadagidan ancha ko'p. Suyulma esa, B kirishma tarkiblovchi bilan boyigan bo'ladi. Shu sababli figurativ nuqta o'ngga (5 nuqta) siljiydi. 5 nuqta aniqlaydigan suyulmaning kristallanishi boshlanishi temperaturasi T_2 birmuncha yuqori bo'ladi. Temperaturani yana pasaytirib borilsa, 5 nuqta likvidus chizig'lga yetadi, endi qattiq fazaning ajralayotgan qatlamlari, birinchi navbatda kristallangan qatlamlarga qaraganda, B tashkillovchiga boy bo'ladi. Suyulmaning keyingi ulushlari pastroq temperaturada kristallanadi, o'sayotgan qatlamlar B tashkillovchi bilan boyiydi.

Shunday qilib, haqiqiy sharoitdagi kristallanish jarayoni ko'rsatishicha, qattiq faza o'z tarkibi bo'yicha nobirjins (notekis) kristallanadi, hosil bo'lgan kristall zichligi uzluksiz o'zgarib boruvchi qattiq



11.4 – rasm.

Kristallanishning turli sharoitida qattiq va suyuq fazalar chegarasida krishmalar taqsimoti (s-kirishma zichligi): a-muvozanat sharoitida; b- muvozanatsiz sharoitda.

tozalash ishi samaradorligini pasaytiradi.

Kristallash orqali samarali tozalash uchun jarayonni monokristall hosil bo'ladigan sharoitda amalga oshirish lozim.

Tozalash samaradorligini baholash uchun K taqsimlanish koeffitsienti xizmat qiladi. U qattiq fazada erigan modda zichligining shu moddaning suyuq fazadagi zichligiga nisbatini ifodalaydi. K keng oraliqdagi (10^{-5} – 10) qiymatlarga ega bo'ladi. Muvozanat va samarali taqsimlanish koeffitsientlari farqlanadi.

Muvozanat taqsimlanish koeffitsienti K_0 (segregatsiya koeffitsienti) kristall va suyuqlar orasida muvozanat bo'lgan sharoitda tarkiblovchilarni ajratish effektini tasvirlaydi:

$$K_0 = C_q / C_c,$$

Bunda C_q , C_c - qattiq va suyuq fazadagi tarkiblovchi modda zichliklari. Agar kirishma tozalanayotgan modda kristallanishi temperaturasi pasaytirilsa, $K_0 < 1$ yoki $C_q < C_c$. Aksincha, $K_0 > 1$ yoki $C_q > C_c$.

eritma qatlamlardan iborat bo'ladi. Bu hodisani *segregatsiya* deyiladi, tarkibning doimiyligi buzilishini *segregatsion buzilishlar* deyiladi.

Haqiqiy sharoitda fazalar chegarasi muayyan tezlik bilan siljiydi. Bu siljish qattiq fazada tarkiblovchilar diffuziyasidan katta. Kristallarni o'stirishda shunday temperatura gradientlari hosil qilinadiki, diffuzion jarayonlar sekinlashgan, pasaygan temperaturalar sohasiga o'sayotgan qatlamlar tez tushib qoladi.

Agar suyuq fazada diffuziya qiyin bo'lsa, bu holda qattiq faza kristallanishi suyuq fazaning asosiy massasidan emas, balki kristallanish frontiga yaqin qatlamlardan yuz beradi, bu ajratish yoki

K koeffitsientni aniq hisoblash ko'pincha qiyin bo'ladi. Fazalar diagrammalaridan olingan K qiymatlari qattiq va suyuq fazalar muvozanati sharoitiga taalluqli.

Haqiqiy hollarda kristallanish fronti tezligi suyulmadagi diffuziya tezligidan katta, oqibatda kristallanish fronti oldida δ qalinlikli suyulma qatlami hosil bo'ladi, agar $K_0 < 1$ bo'lsa, mazkur qatlam kirishma bilan boyigan. Agar $K_0 > 1$ bo'lsa, u kirishmadan kambag'allashgan.

Samarali taqsimlanish segregatsiya koeffitsienti

$$K_{eff} = C_q / C_c. \quad (II.1)$$

Massa diffuziya orqali δ qatlamda ko'chirilganda

$$K_{eff} = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \exp[-v\delta / D]}, \quad (II.2)$$

bunda v -kristallanish tezligi, D -kirishmaning suyulmadagi diffuziya koeffitsienti. K_{eff} koeffitsient kristallanishning keltirilgan tezligiga bog'liq bo'ladi.

Kristalllash yo'li bilan tozalashning asosiy usullari mazmuni shundan iboratki, ular tozalash texnologik jarayoni oxirgi bosqichida qo'llanadi. Olinayotgan materialning eng katta fizik va kimyoviy tozaligiga erishish maqsadiga yo'naltirilgan.

Yo'nalgan kristallash usullarini asosan uchga ajratiladi: kristallarni suyulmadan tortib olish usuli (Choxralskiy usuli), normal yo'nalgan kristallash usuli (Brijmen usuli) va zonaviy suyultirish usuli (Pfann usuli). Mazkur usullar haqida alohida to'xtalamiz.

Kristallni suyulmadan tortib olish usulida suyulmaga kichik monokristall shaklidagi xamirturush botiriladi, so'ng uni uzluksiz ravishda yuqoriga ko'tara boriladi. Xamirturush monokristalcha suyulmaning suyuq ustunchasini ergashtiradi, bu esa past temperatura zonasiga kirib qolib uzluksiz kristallanadi.

Normal yo'nalgan kristallash usulida modda muayyan shaklli tigelda suyultiriladi, u keyin bir uchidan asta-sekin sovitiladi. Yo'nalgan kristallash shunday amalga oshiriladi.

Zonaviy suyultirishda modda qo'ymasida kichkina qatlamni suyultirib, uni namuna bo'ylab ko'chirib boriladi. Shu qatlam (zona) ko'chib borgan sari uning oldida modda suyuladi, uning orqasida kristallanish yuz beradi. Bu usul hozir ko'p materiallarni chuqur tozalashda eng ko'p qo'llanilayotgan usuldir.

3.4. Gaz fazasi orqali haydash jarayonlari

Bu jarayonlar bug'lari yuqori elastiklikka ega bo'lgan sodda moddalar (elementlar)ni va kimyoviy birikmalarni tozalash asosida yotadi. Bunday moddalar misollari fosfor, surma, oltingugurt, magniy, kalsiy, rux elementlarning suyuq xloridlari (GeCl_4 , TiCl_4 , SiCl_4 va boshqalar), uchib ketuvchi birikmalar (galogenidlar) va h.k.

Moddalar *sublimatsiya* va *distillash* usullari bilan ajratilishi va tozalanishi mumkin.

Sublimatsiya (haydash) moddaning qattiq holatdan to'g'ridan – to'g'ri bug'simon holatga o'tishi jarayonidir. Suyulish temperaturasidan pastdagi temperaturagacha qizdirilganda hosil bo'ladigan bug'ining bosimi yetarlicha yuqori bo'ladigan moddalarni ajratish va tozalashda ma'qul usul sublimatsiya usulidir. Uchuvchanroq kirishmalar past temperaturada chiqarib yuboriladi (haydaladi), kamroq uchuvchanlari haydashdan keyingi qoldiqda qoladi.

Distillash – bug'lari bosimlari har xil bo'lgan suyuq eritmani tarkibiy qismlarga ajratish jarayoni bo'lib, bunda ularni bug'lantirib, keyin bug'lar o'tirg'iziladi (kondensatsiyalanadi).

A va *B* tarkiblovchilardan iborat qo'shaloq tizim misolini ko'raylik.

Agar *A* va *B* tarkiblovchilar tarkibi, miqdori, molekullari tuzilishi bo'yicha, binobarin, xossalari bo'yicha bir-biriga juda yaqin bo'lsa, o'zaro birikmalar hosil qilmasa va birga to'planmasa, u holda doimiy temperaturada har bir tarkiblovchining eritma ustida to'yingan bug'ining ulushiy (parsial) bosimi uning eritmadagi grammollarda ifodalangan ulushiga mutanosib bo'ladi, ya'ni

$$P_A = N_A P_A^0 \quad (\text{II.3})$$

$$P_B = N_B P_B^0 \quad (\text{II.4})$$

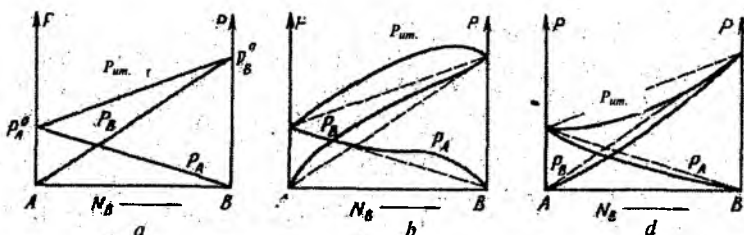
bunda P_A va P_B tarkiblovchilar bug'lari umumiy bosimi, N_A va N_B – ularning eritmadagi mollarda ifodalangan ulushi, P_A^0 va P_B^0 toza *A* va *B* tarkiblovchilar bug'lari bosimi. Eritma bilan muvozanatdagi bug'ning umumiy bosimi

$$P_{AB} = N_A P_A^0 + N_B P_B^0$$

$N_A = 1 - N_B$ bo'lganligidan (II.3) va (II.4.) lardan quyidalarni olamiz:

$$(P_A^0 - P_A) / P_A^0 = N_B,$$

$$P_{AB} = P_A^0 + N_B (P_B^0 - P_A^0) \quad (\text{II.5})$$



II.5-rasm. Umumiy va parsial bug' bosimlarining ikki tarkibli tizimlarida bog'lanishi grafiklari:

a-ideal tizimda: *b*-Raul qonunidan musbat chetlangan tizimda: *d*-Raul qonunidan manfiy chetlangan tizimda (temperatura doimiy).

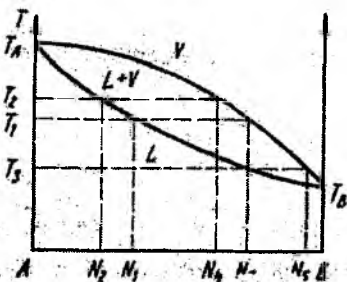
(II.5) ifoda ideal tizimlar uchun Raul qonunini ta'riflaydi: *A* erituvchining to'yingan bug'i bosimining nisbiy pasayishi erituvchida erigan *B* moddaning mollarda ifodalangan ulushiga miqdoran tengdir, va aksincha.

Amalda siyrak uchraydigan ideal eritmalarining hosil bo'lishida issiqlik effekti yoki hajm o'zgarishi sodir bo'lmaydi. Haqiqiy eritmalarda eritma bug'i va uning tarkibi orasidagi chiziqliy bog'lanishdan chetlanish kuzatiladi.

Musbat chetlanishlarda eritma ustida har ikki tarkiblovchi bug'lari bosimi va ularning yig'indisi Raul qonunidan kelib chiqadigan qiymatlardan katta. Bunday eritmalar hosil bo'lishida issiqlik yutiladi va hajm kattalashadi. Manfiy chetlanishlarda bug'larning bosimi Raul qonuni bo'yicha hisoblanganidan kichik (II.5, *d*-rasm) bunday eritmalar hosil bo'lishida issiqlik ajraladi va hajm kichrayadi.

Eritma ustidagi bug'ning tarkibi eritmaning o'z tarkibiga bog'liq.

Sodda tizimda bu bog'lanish II.6-rasmdagi ko'rinishda bo'ladi. *B* pastroq qaynash temperaturali tarkiblovchi deylik. Agar N_1 tarkibli eritmani qizdirsak, bu holda T_1 temperaturaga yetganda u qaynay boshlaydi. Bu eritma bilan muvozanatdagi bug' N_3 tarkibga ega va eritmaga nisbatan *B* tarkiblovchiga boyroq. Eritmaning qandaydir miqdori bug'lanib bo'lganda uning qolgan qismi *A* tarkiblovchiga



II.6-rasm. Distillashda eritma va bug' tarkiblari o'zgarishi: *L*—suyuqlik, *V*—bug', *L+V*—suyuqlik va bug' aralashmasi.

boy bo'lib, N tarkibga ega bo'ladi, bug' esa eritmaga nisbatan B tarkiblovchiga boy. Bug'lanish davom etgan sari eritmaning qolgani A tarkiblovchiga boyib boradi, qaynash temperaturasi, mos ravishda, ko'tariladi. Oqibatda eritma qoldig'ida amalda toza A tarkiblovchi qoladi va qaynash temperaturasi T_A ga yetadi.

Agar T_1 temperaturada eritmadan ajralib chiqqan N_3 tarkibli bug' o'tkazilsa (cho'ktirilsa) va hosil bo'lgan cho'kma (kondensat) distillansa, bu holda u T_3 temperaturada qaynaydi va hosil bo'lgan bug' N_5 tarkibga ega bo'ladi, ya'ni B tarkiblovchiga boy bo'lib qoladi. Kondensatsiya (o'tkazish) va distillash jarayonini qayta-qayta bajarib, bug'ning o'zi amalda toza B tarkiblovchidan iborat bo'lib qolishiga erishiladi. Shunday qilib, qaralgan tizimda har qanday ikki tarkibli aralashmani distillash usuli bilan toza tarkiblovchilarga ajratib olish mumkin.

Distillash usuli bilan ajratib olish yoki tozalash jarayonlarini miqdoriy baholash uchun

$$K=N'/N$$

taqsimot koeffitsienti kattaligi kiritiladi, bunda N' va N -tarkiblovchilarning bug'da va eritmada grammol ulushlari, mos ravishda.

Biz qaragan ikki tarkiblovchili tizim uchun $K_A = N'_A / N_A$;

$$K_B = N'_B / N_B$$

Ajratish koeffitsienti

$$K_P = \frac{N'_A}{N_A} / \frac{N'_B}{N_B} = \frac{K_A}{K_B}$$

kattaligi yuqorida ko'rilgan distillash usulining samaradorligini baholaydi.

Ideal eritmalar uchun K_P tarkibga bog'liq emas va uni **nisbiy uchuvchanlik koeffitsienti** deyiladi:

$$K_{P,u9} = P_A^0 / P_B^0.$$

Haqiqiy eritmalar holida

$$K_P = (P_A^0 / P_B^0)(\gamma_A / \gamma_B),$$

bunda γ_A va γ_B -tegishli tarkiblovchilarning faollik koeffitsientlari.

Kirishma tarkiblovchi oz miqdorda bo'lganda asosiysi uchun $\gamma \rightarrow 1$.

Masalan, A ni B yuqidan tozalashda $\gamma_A \rightarrow 1$. Bunda

$$K_P = (P_A^0 / P_B^0)(1 / \gamma_B) = K_{P,u9} \cdot (1 / \gamma_B).$$

II.1-jadvalda ba'zi binar tizimlar uchun kirishma oz bo'lganda ajratish (nisbiy uchunchanlik) koeffitsienti qiymatlari keltirilgan.

Bug‘lanish va haydash jarayonlari sirtidan yuz berganligi tufayli, jarayonlar tezligi katta bo‘lishi uchun ajratilayotgan modda sirti yaxshi tayyorlangan bo‘lishi kerak.

Ajratish va tozalashda moddada va gaz fazada yuz beradigan almashinish jarayonlari katta o‘rin tutadi.

II.1-jadval

Tizim (asosiy tarkiblovchi – normal)	K_p qiymati
$\text{SiHCl}_3\text{-PCl}_3$	4,47
$\text{SiHCl}_3\text{-CCl}_4$	2,65
$\text{SiCl}_4\text{-PCl}_3$	1,64
$\text{SiHCl}_3\text{-PCl}_3$	4,72
$\text{CH}_3\text{SiCl}_3\text{-PCl}_3$	1,14

Neytral gazlar asosan bug‘lanishni sekinlatadi, yig‘uvchi tomonga bug‘lar diffuziyasi tezligini kamaytiradi. Kimyoviy faol gazlar eritmadagi tarkiblovchilarning faollik koeffitsientiga ta’sir ko‘rsatadi. Masalan, CH_3SiCl_3 ni PCl_3 dan tozalashda PCl_3 ni ozon bilan oksidlab (POCl_3 ga yetkazib) PCl_3 ning uchuvchanligini kamaytirish yo‘li bilan CH_3SiCl_3 ni distillab tozalash samaradorligini muhim darajada oshirish mumkin. Odatda tozalash samaradorligini oshirish uchun vodorod ishlatiladi, u ko‘p oksidlarni, sulfidlarni, selenidlarni, galogenidlarni tiklaydi. Namli vodorod kremniy suyulmasidan (uchuvchan BH_3 hosil qilib) borni (B) chiqarib yuborish uchun qo‘llaniladi.

Distillash, sublimatsiya jarayonlarini ko‘p marta takrorlash natijasida yuqori darajada toza moddalar olish mumkin. Distillash va kondensirlash (o‘tkazish, cho‘ktirish) amallari ko‘p marta uzluksiz takrorlanadigan jarayonni **rektifikatsiya** (tozalash) jarayoni, u amalga oshirilayotgan qurilmani **rektifikatsion ustun** (kolonna) deyiladi.

II.7-rasmda rektifikatsion qurilma tasvirlangan. Uning asosiy qismlari 1 kub (qozon), rektifikatsion kolonna 3, isitgich 2 va 4 kondensator.

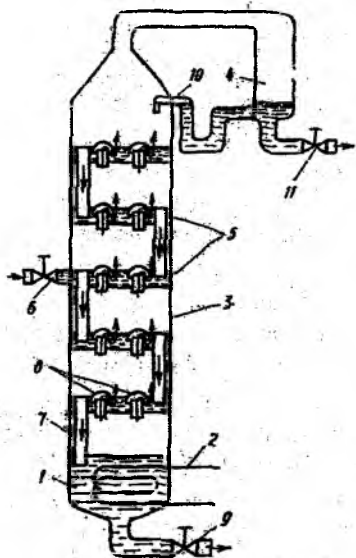
Rektifikatsion kolonka (ustun) 5 bir qator gorizontal tarelkachalar (likoplar)ga ega. Tozalashga (rektifikatsiyaga) mo‘ljallangan va oldindan isitilgan eritma 6 jo‘mrak orqali o‘rta tarelkalardan biriga kiritiladi, uni to‘ldiradi va 7 naycha orqali pastroqdagi tarelkachaga oqib tushadi. 8 naycha orqali pastdan yuqoriga ko‘tarilayotgan bug‘larning bilqillashi yuz beradi. 8 naylardagi qalpoqchalar tarelkachadagi eritma bilan bug‘ni yaxshi tutashtiradi. Qo‘shimcha isitgichlar yordamida kolonna (ustun) bo‘ylab temperatura gradienti hosil qilinadi, bunda kubda temperatura eng yuqori, kondensatorda eng past bo‘lib, bu bug‘ va eritmaning teskari

issiqlik almashinishini amalga oshiradi. Buning oqibatida kolonnaning yuqori qismidan toza, uchuvchanroq tarkiblovchi bug'lar chiqadi, kubga esa toza, kamroq uchuvchanlik tarkiblovchidan iborat suyuqlik oqib tushadi. 4 kondensatorga kelayotgan toza, uchuvchanroq tarkiblovchi cho'kadi, bunda cho'kmaning (kondensatning) **flegma** deyiluvchi qismi 10 nay orqali kolonnaning yuqorigi tarelkchasiga beriladi, u kolonnaning yuqorigi qismining bir maromda ishlashini ta'minlaydi. Kondensator va kubdan mahsulot, mos ravishda, 11 va 9 jo'mraklar orqali olinadi.

Ajratish kolonnasi qancha uzun va massa, issiqlik almashinish jadal bo'lsa, ajratish yoki tozalash effekti shuncha katta bo'ladi.

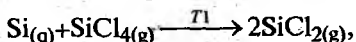
Kimyoviy ko'chirish reaksiyalari yordamida ham moddani tozalash mumkin.

Kimyoviy ko'chirish reaksiyalari gazsimon faza ishtirok qiluvchi qaytar geterogen reaksiyalar bo'lib, ular hosil qiladigan mahsulotlar oraliq gazsimon birikma yordamida turli bosimli va temperaturali ikki reaksiyon zonalar orasida moddani ko'chirish mumkin. Odatda turli temperaturali tizimlardan foydalaniladi.



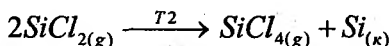
Bir qator hollarda sublimatsiya va distillash usullari jarayonlari samaradorligini ko'tarish uchun asosiy moddani kirishmadan yoki boshqa tarkiblovchilardan ko'ra uchuvchanroq kimyoviy birikmaga aylantiriladi. Oson uchuvchan bu birikmani keyingi parchalashda toza mahsulot olish mumkin, bunda odatda oldingi aytilgan usullardagidan tozaroq mahsulot olinadi. Misol sifatida kremniyning digalogenid ko'rinishida ko'chirilishini qaraymiz.

$T_f = 1300^\circ\text{C}$ da kremniy bilan tetraxlorid reaksiyasi oraliq gazsimon SiCl_2 birikma hosil qiladi:

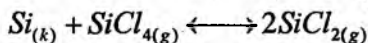


bu mahsulot reaktorning sovuqroq chetiga ko'chiriladi, bunda $T_2 = 1100^\circ\text{C}$ da kremniy ajraladi:

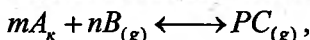
II.7—rasm. Rektifikatsion qurilma chizmasi.



Bu reaksiyalar qaytar bo'ladi:



Ko'chirish reaksiyasi tenglamasi umumiy holda:



bunda A- tozalangan modda (u qattiq yoki suyuq holda bo'lishi mumkin); B – A tarkiblovchi bilan gazsimon oraliq C birikma hosil qiluvchi gazsimon reagent.

Reaksiyalar yuz beradigan hajmdagi zonalar orasida temperatura farqi hosil qilib, ko'chirish reaksiyasi borishi yo'naltiriladi, natijada tozalanuvchi modda qurilmaning bir qismidan boshqa qismiga kimyoviy reaksiya yordamida haydaladi yoki ko'chiriladi. Ekzotermik (issiqlik ajraladigan) reaksiyalar sodir bo'lgan holda past temperaturali joydan yuqori temperaturali joyga, endotermik (issiqlik yutiladigan) reaksiyalar holida esa yuqori temperaturali joydan past temperaturali joyga modda ko'chiriladi.

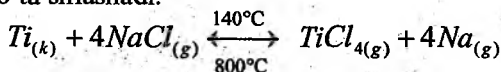
Kimyoviy transport (ko'chirish) reaksiyalarini uch asosiy turga ajratiladi.

1. Ko'chiriluvchi elementni uning bug'simon holatidan faolroq element bilan siqib chiqarish (tiklash) yo'sinida boradigan endotermik qaytar reaksiyalar;

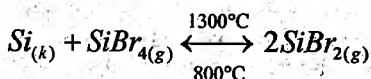
2. Past valentli birikmalar hosil qiluvchi reaksiyalar;

3. Uchuvchan birikmalarni sintez qilish va termik dissotsialash (parchalanish) reaksiyalari.

1-tur reaksiyalarda ko'pincha vodorod, natriy, magniy, uglerod oksidi va boshqalar qo'llanadi. Masalan, Ti titanni tozalash usulida u NaCl bug'i bilan o'zaro ta'sirlashadi:



2-tur reaksiyalar misoli—kremniy tozalash reaksiyasi:



3-tur reaksiyalar misoli – kremniyni tozalash jarayoni:





Bunday reaksiyalarni Ge, CdS, Zr, GaAs, GaP va boshqalar uchun yozish mumkin.

Moddaning tozalanishi darajasini baholash uchun muvozanatiy ajratish koeffitsienti K_p kiritilgan:

$$K_p = \frac{N^*}{1 - N^*} / \frac{N}{1 - N},$$

bunda N^* - reaksiya mahsulotida kirishmaning ulushi, N - dastlabki moddaning reaksiya mahsuloti bilan muvozanatda bo'lganida kirishmaning ulushi. Ajratish samaradorligi qancha yuqori bo'lsa, K_p birdan shuncha farq qiladi. K_{p1} bo'lsa, ajratish yo'q. Chuqur tozalashda $N \ll 1$ va $N^* \ll 1$ va $K_p \cong N^*/N$ sodda ko'rinishda, uni C konsentratsiyalar (zichliklar) orqali ifodalasa bo'ladi:

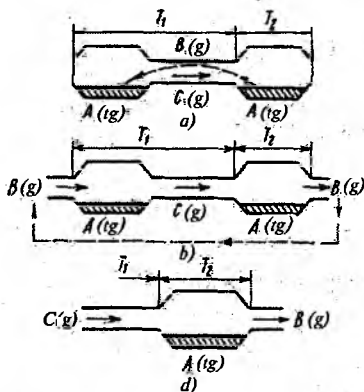
$$K_p \cong \frac{C_{c'} \cdot C_A}{C_{A'} \cdot C_c}.$$

Kimyoviy transport (ko'chirish) reaksiyalarni amalga oshirilishi xarakteri bo'yicha, yo'nalishi bo'yicha, haydaluvchi elementning ajralishi bo'yicha, ko'chirish usuli bo'yicha, jarayon shakli bo'yicha farq qilinadi.

Bayon qilingan jarayonlar yordamida moddalarni tozalash sxemalari II.8-rasmda tasvirlangan.

Ko'pchilik hollarda jarayonlar reaktorlari eng toza kvarts shishadan, shaffof Al_2O_3 korunddan, uglerodli shishadan, kremniy karbididan tayyorlanadi.

Agar modda tozalash jarayonida qattiq holatda bo'lsa, bu holda uni reaktorga maydalangan holatda joylanadi, bunda iflosliklar qo'shilib qolmasligiga alohida e'tibor berish kerak.



II.8-rasm.

$mA_{(qs)} + nB_{(g)} \leftrightarrow pC_{(g)}$ kimyoviy transport reaksiyalar yordamida moddalarni tozalash jarayoni chizmasi:

a - jarayon yopiq, uni molekular yoki konvektiv diffuziya amalga oshiradi; b - jarayon yopiq, uni gaz-reagent yoki gaz-tashuvchi oqimi amalga oshiradi; c - jarayon ochiq, unda uchuvchan tashkillovchini, sintez qilish va tozalash reaktordan tashqarida o'tkaziladi, tashish oldindagidek.

Transport (ko'chirish) tezligi ko'chirish mexanizmiga bog'liq.

Yarimo'tkazgichlar va dielektriklar texnologiyasida ochiq jarayonlar (II.8, *d*-rasm) keng qo'llanadi, bunda ko'chiriluvchi elementning oson uchuvchi birikmasini sintezlash reaksiya hajmidan tashqarida bajariladi.

Yuqorida tahlillangan moddani tozalash usuli bir pog'onali jarayondir, shuning uchun o'z fizik-kimyoviy xossalari bo'yicha asosiy moddadan ancha farq qiladigan kirishmalardan moddani tozalashda bu usul samara beradi.

Kimyoviy transport (ko'chirish) reaksiyalar usuli toza modda olishdan tashqari yana yarimo'tkazgich va dielektrik birikmalarni sintezlash shuningdek u monokristallar va yupqa monokristallar olish imkonini beradi.

3.5. Moddalarni ajratish va tozalashning boshqa jarayonlari

Ajratish va tozalashning elektrokimyoviy jarayonlari. Bu usullardan yarimo'tkazgichlarni tozalash uchun asosiylari elektroliz, anod erituvchi va elektrodializdir.

Barcha elektrokimyoviy tozalash usullari oksidlash-tiklash jarayonlari orqali amalga oshiriladi.

Elektroliz yordamida moddani tozalashda dastlabki materialni anodlar qilib, elektrolitga botiriladi, ular elektroliz vaqtida erib ketadi va tozalangan materiallar katodlarga yig'iladi. Anodning sirtidan $A \rightarrow A^{n+} + ne$ oksidlanish reaksiyasi yuz berib, bunda moddaning A^{n+} ioni eritmaga va elektron katodga o'tadi, katodda esa $A^{n+} + ne \rightarrow A$ tiklanish reaksiyasi ketadi, oqibatda katoddan toza A modda ajraladi. Bu reaksiyalar muvaffaqiyatli ketishi uchun ayniqsa kirishmalar ishtirok etadigan zararli jarayonlar ta'sirini juda kam qilish zarur.

Anod erituvchi (anodda rafmirlash-tozalash) usuli ba'zi hollarda katta samara beradi. Bu holda ham tozalanuvchi modda anod sifatida foydalaniladi, elektroliz esa kirishmalarni anoddan elektrolitga o'tkazadi, so'ngra toza modda katodda yig'iladi. Misollar: galliyni ruxdan, aluminiy va magniyni kremniydan, temirdan, misdan va ruxdan tozalash, qalayi, qo'rg'oshin, berilliy, titan, sirkoniy, niobiy va boshqalardan rafinirlash (tozalash) ana shu usulda amalga oshiriladi.

Elektrolitdan kationlarni tanlab chiqarib olish samaradorligini **simob katod**dan foydalanib oshirish mumkin. Masalan, indiyini simob katod usulidan foydalanib ko'p kirishmalardan tozalanadi va uning tozaroq birikmalarini (InSb, InP va h.k) olish imkoni bo'ladi.

Elektrolizdan chuqur tozalashda foydalanganda anod va katod sohaları elektrolitik vannaning o'rta bo'lmasidan sinchiklab ajratiladi, uni yarimo'tkazuvchan devorlar (membranalar) yordamida bajariladi, ular anodga va katodga muayyan turdagi ionlarni o'tkazadi. Elektr maydon hosil qilinganda membranalar orqali ionlar diffuziyasi tezlashadi, bu esa o'rta bo'lmadagi tozalanish tezligi va darajasini orttiradi. Elektroliz usullarining bu xilini **elektrodializ** deyiladi. Bu usul qo'llanganda elektrolitik vannaning o'rta bo'lmasiga tozalanuvchi moddaning suvdagi suspenziyasi solinadi, yon tomondagi bo'lmalarga toza suv va elektrodlar joydalanadi.

Potensiallar ayirmasi (kuchlanish) qo'yilganda musbat elektrodga o'rta bo'lmadan membrana orqali kirishmalarning anionlari, manfiy elektrodga — kirishmalarning kationlari o'tib boradi. Elektrodlar joylashgan yor bo'lmalarda kirishmalar ionlari to'planib borgan sari eritmalar to'kib yuboriladi va yana bu bo'lmalarga toza suv to'ldiriladi. Bu choralar o'rta bo'lmadan kirishmalarni tez ketkazishga imkon beradi, shuningdek, yori bo'lmalarda to'planib qolgan kirishmalarning yana o'rta bo'lma tomon teskari diffuziyasiga imkon bermaydi.

Elektrodializ yordamida SiO_2 , TiO_2 , MgO , ZnS va boshqa birikmalarni kirishmalardan tozalanadi.

Markazdan qochirma maydonda ajratish va tozalash

Agar modda suyulmasi markazdan qochirma qurilmada (aylantirgichda) harakat qilayotgan bo'lsa, bu holda markazdan qochirma kuch ta'sirida kirishmalar qayta taqsimlanadi. Asosiy modda atomlaridan (molekulalaridan) og'irroq kirishma atomlari (molekulalari) suyulmaning chetida, yengilroqlari esa aylanish markaziga yaqin qismida yig'iladi. Masalan, litiy suyulmasini 50 s^{-1} tezlikda aylanuvchi sentrifugada (aylantirgich qurilmada) kristallansa, litiy quymasi (kristalli)ning asosiy qismi kirishmalardan ikki tartib qadar tozalanadi.

Kesishgan elektrik va magnitik maydonlarda ajratish. Zamonaviy massa-separatorlar izotoplarni ajratish imkonini beradi. Shu usulni qo'llab eng katta tozalik darajasiga erishish mumkin. Bu qurilmalar

yarimo'tkazgichlar va dielektriklar toza yupqa qatlamlarini olishda keng qo'llanilmoqda.

Diffuziya va termodiffuziya yo'li bilan ajratish. Gazsimon moddalarni ajratish va tozalash uchun ularning yarimo'tkazuvchan (g'ovak) devorlardan diffuziyalanib o'tishi tezliklari har xil bo'lishligidan foydalaniladi, bunda bir xil gazlar devorning bir tomonida, boshqalari ikkinchi tomonida yig'iladi. Bu jarayonni ko'p devorli kamerada ko'p marta takrorlansa, gazlarni yuqori darajada ajratib yuborish mumkin.

Gazlar aralashmalarini ajratish termik diffuziya yordamida ham samarali amalga oshiriladi. Agar gazlar aralashmasi egallagan idish bo'ylab temperaturalar o'zgarib borsa, bu holda idishning issiq va sovuq qismlaridagi aralashmalar tarkibi farqli bo'ladi: issiq qismida kichik molekular massali tarkiblovchi miqdori katta bo'ladi. Tabiiyki, temperaturalar farqi qancha katta bo'lsa, idishning issiq va sovuq qismlarida aralashmalar tarkibi farqi shuncha katta bo'ladi.

Yarimo'tkazuvchan (g'ovak) devorlar orqali diffuziya va termodiffuziya jarayonlari gazlar aralashmasidagi molekular massalari farqiga juda sezgir, shuning uchun bu jarayonlardan izotoplarni ajratib olishda qo'llaniladi.

Nazorat savollari

1. Texnologik jarayon va unga tegishli asosiy tushunchalarni tavsiflang.
2. Geterojen kimyoviy tizim nima?
3. Holatlar diagrammasi qanday tuziladi va uning fazalar muvozanati o'zgarishidagi ahamiyati qanday?
4. Xomashyoni texnologik jarayonga dastlabki tayyorlash amallari haqida so'zlab bering.
5. Gaz fazasi orqali haydash jarayonlari qanday kechadi?
6. Moddalarni ajratish va tozalashning qanday usullari qo'llaniladi?

4-BOB. KRISTALLAR O'SISHI KINETIKASI

4.1. Kristallanish markazlari hosil bo'lishi

Kristallanish jarayonlari birinchi tur fazaviy o'tishlar bo'lib, ularning oqibatida modda atomlari joylashishi to'la yoki qisman tartiblanmagan holatdan (bug', suyuqlik) qat'iy tartiblangan holatga (kristall) o'tadi. Kristallanish faqat o'ta to'yingan, ya'ni metastabil (barqarormas oraliq) holatdagi tuzilmalarda yuz beradi, bu jarayon butun metastabil faza hajmida bir tekis bormaydi, balki jarayon boshlanishida dastlabki moddaning (tizimning) turli joylarida **kristallanish markazlari** hosil bo'ladi, keyin ular o'sa (kattalasha) boradi. Yangi faza (kristall) markazlarining hosil bo'lish mexanizmi **gomogen** yoki **geterogen** bo'lishi mumkin. Gomogen mexanizm amalda bo'lganda markazlar paydo bo'lishini rag'batlantiruvchi hech qanay qattiq zarralar yoki sirtlar bo'lmaydi, geterogen mexanizm holida esa ular mavjud bo'ladi.

Kristallanish markazlari hosil bo'lishining **termodinamik yoki kapillyar nazariyasi** haqida to'xtalamiz. O'ta to'yingan bug'dan suyuq tomchilar paydo bo'lishini qaraylik, bunda juda kichik tomchilarga nisbatan termodinamik tahlil qo'llanishi mumkin deb hisoblaymiz.

r radiusli kichkina tomchining paydo bo'lishi tizimning erkin energiyasi (G)ni ΔG qadar o'zgartiradi, u

$$\Delta G = \Delta G_1 + \Delta G_2 \quad (\text{II.6})$$

ko'rinishida bo'lib, ΔG_1 — bug' tomchiga aylanganda (kondensatsiyalanganda) erkin energiyaning o'zgarishi, ΔG_2 — suyuqlik va bug' chegarasi sirti shakllanishida erkin energiyaning o'zgarishi.

Uncha murakkab bo'lmagan hisobning natijasi:

$$\Delta G = -\frac{4}{3} \frac{\pi r^3}{v} RT \ln \frac{P}{P_0} + 4\pi r^2 \gamma_{c\delta}, \quad (\text{II.7})$$

bunda v — suyuqlik hajmi; P_0 — bug'ning T temperaturadagi muvozanat bosimi, P — tomchi hosil bo'lishidagi o'ta to'yingan bug'ning bosimi, $\gamma_{c\delta}$ — suyuqlik va bug' chegarasining solishtirma erkin energiyasi.

(II.7) ifodadan ko'rinishicha, r kichkina bo'lganda ikkinchi had kattaroq, r katta bo'lganda birinchi had kattaroq bo'ladi. $\frac{d\Delta G}{dr} = 0$ shartdan kritik r_{kr} ni va ΔG_{kr} ni topish qiyin emas:

$$r_{kr} = \frac{2\gamma_{c\delta}v}{RT\ln P/P_0}, \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta G_{kr} = \frac{16\pi v^2 \gamma_{c\delta}^3}{3[RT\ln P/P_0]}. \quad (\text{II.9})$$

$r < r_{kr}$ o'lchamli tomchilar bug'lanishga moyil, ularni murtak (zarodish) deyiladi, $r > r_{kr}$ o'lchamli tomchilarni esa yangi faza markazlari (kristallanish holida kristallanish markazlari) deyiladi.

Agar $P/P_0 \leq 1$ bo'lsa, ΔG o'zgarish r ortishi bilan ortib boradi, har qanday o'lchamli tomchilar bug'lanishga moyil bo'ladi.

Xulosa shuki, yangi faza markazlari paydo bo'lishi va o'sishi uchun yangi fazadagi moddaning erkin energiyasi o'sha moddaning dastlabki fazadagisidan kichik bo'lishi zarur. Erkin energiyani bevosita o'lchab bo'lmaydi, shuning uchun yangi faza markazlari hosil bo'lishi va ularning o'sishi shartlarini aniqlashda o'ta to'yinish va o'ta sovish tushunchalaridan foydalaniladi.

Kristallanish markazlarining paydo bo'lishi va o'sib borishi uchun dastlabki faza (bug' yoki suyuqlik) vujudga kelayotgan qattiq fazaga nisbatan o'ta to'yingan yoki o'ta sovigan bo'lishi zarur.

Agar T temperaturada gaz fazasining P bosimi suyuq yoki qattiq fazalar to'yingan bug'larning P_0 bosimidan katta bo'lsa, mazkur gaz fazasini o'ta to'yingan deyiladi. Ushbu kattaliklar qo'llaniladi:

$$\Delta P = P - P_0 - \text{mutlaq o'ta to'yinish,}$$

$$\sigma = \Delta P / P_0 - \text{nisbiy o'ta to'yinish,}$$

$$\alpha = P / P_0 - \text{o'ta to'yinish koeffitsienti:}$$

$$\delta = \ln P / P_0.$$

Suyuq va qattiq eritmalar uchun quyidagi kattaliklar qo'llaniladi:

$$\Delta C = C - C_0 - \text{mutlaq o'ta to'yinish,}$$

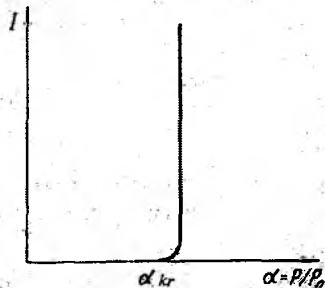
$$\sigma = \Delta C / C_0 - \text{nisbiy o'ta to'yinish,}$$

$$\alpha = C / C_0 - \text{o'ta to'yinish koeffitsienti.}$$

Suyulmalarning o'ta sovish kattaligi

$$\Delta T^s = T_s - T$$

orqali tavsiflanadi, T_s - moddaning suyulish temperaturasi, T - o'ta sovigan suyulma temperaturasi.



II.9—rasm.

O'ta to'yingan bug'da suyuq tomchilar hosil bo'lish I tezligining o'ta to'yinish koeffitsienti α ga bog'lanishi.

Kritik o'lchamli markazlarning hosil bo'lishi faollash energiyasi uchun olingan (II.9) ifoda gaz fazasida yangi faza markazlari (tomchilar) hosil bo'lishi tezligining o'ta to'yinish darajasiga bog'lanishini hisob qilish imkonini beradi.

Yangi faza markazlari paydo bo'lish tezligi kritik o'lchamli markazlarning o'z o'lchamini orttirish o'rtacha tezligiga teng. Agar ω_{kr} orqali kritik markazning atom yoki molekulalarni vaqt birligida tutib (birlashtirib) olish sonini (chastotasini) belgilasak, n_{kr} orqali birlik hajmdagi markazlar sonini belgilasak, u holda gaz fazasining bir hajmida yangi faza markazlari hosil bo'lishi tezligi

$$I = \omega_{kr} n_{kr} \quad (\text{II.10})$$

bo'ladi. Kritik markaz sirti $S_{kr} = 4\pi r_{kr}^2$, bug' fazasidan mazkur sirtga zarralar oqimi $q = P/(2\pi mkT)^{1/2}$ kondensatsiya koeffitsienti a_c ekanligi e'tiborga olinsa, (II.10) ifoda quyidagicha shakl oladi:

$$I = a_c q S_{kr} n_{kr} \quad (\text{II.11})$$

Bolsman statistikasiga asosan,

$$n_{kr} \approx n_1 \exp(-\Delta G_{kr} / kT),$$

bunda $n_1 = P / kT$ - gaz fazada zarralar soni. Demak,

$$I = \frac{a_c P}{\sqrt{2\pi mkT}} 4\pi r_{kr}^2 n_1 \exp(-\Delta G_{kr} / kT) \quad (\text{II.12})$$

yana ham aniq hisoblar natijasi:

$$I = 4\pi r_{kr}^2 \frac{a_c P}{\sqrt{2\pi mkT}} \left(\frac{\Delta G_{kr}}{3\pi kT i_{kr}^2} \right)^{1/2} n_1 \exp(-\Delta G_{kr} / kT), \quad (\text{II.13})$$

bunda i_{kr} - kritik o'lchamli markazdagi zarralar soni.

(II.13) ifoda tahlili ko'rsatishicha, biror o'ta to'yinishdan boshlab yangicha faza markazlari paydo bo'lish tezligi keskin ortib ketadi. Bu o'ta to'yinishni **kritik** o'ta to'yinish deyiladi.

Endi suyuq fazada qattiq faza markazlari paydo bo'lishi jarayonini qaraymiz. Bu hol uchun bajarilgan hisoblashlar erkin energiya o'zgarishining kritik kattaligi uchun

$$\Delta G_{kr} = \frac{4}{27} \frac{\eta^2 \gamma_{ck}^3 V^2}{(G'_c - G'_k)^2} \quad (\text{II.14})$$

ifodani beradi, bunda η - markaz shaklini hisobga oluvchi koeffitsient, γ_{ck} - suyuqlik va qattiq faza chegara sirtida solishtirma erkin energiya, V_L - suyuq faza hajmi, G'_c va G'_k - suyuq va qattiq fazadagi molar erkin energiya. ΔG_{kp} o'zgarish o'ta sovish ΔT kattaligiga bog'liq.

$$\Delta G_{kr} = \frac{4}{27} \frac{\gamma_{ck}^3 \eta^2 I}{L^2 \Delta T^2} T_s^2 \quad (\text{II.15})$$

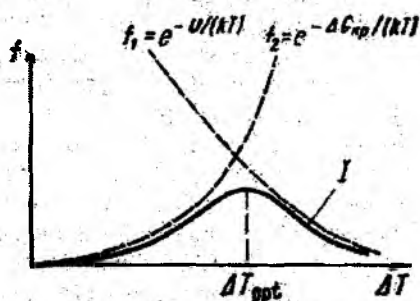
T_s - suyuqlik temperaturasi, L - kristallanish yashirin molar issiqligi.

Gaz fazada tomchilar hosil bo'lishi jarayoni tahlilida qilingan farazlardan foydalanib, suyuqlikda kristall fazasi markazlari hosil bo'lishi tezligi uchun quyidagi ifodani olamiz:

$$I = k \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \exp\left(-\frac{\Delta G_{kr}}{kT}\right), \quad (\text{II.16})$$

bunda k - temperaturaga sust bog'langan doimiy, U - atom (yoki molekula) uchun suyuq faza va kristallanish markazi orasidagi chegaradagi potensial to'siq.

(II.16) ifodaning ko'rsatishi-cha, kristall faza markazining paydo bo'lish ehtimolligi ΔG_{kr} orqali aniqlanadi va u suyuqlarning o'ta sovush darajasi ΔT ortishi bilan ortib boradi, ammo T ning kamayishi atomlar harakatchanligini biroz kamaytiradi. Shuning uchun har qanday suyuqlik optimal o'ta sovish darajasiga ega bo'ladi (II.10-rasm), bunda I maksimal bo'ladi. Demak, markazlar paydo bo'lish tezligiga di-



II.10—rasm. Suyuq fazada gomogen murtaklar hosil bo'lishi tezligining suyuqlar o'ta to'yinishiga bog'lanishi.

namik omildan boshqa yana kinetik omil (harakatchanlik) ham ta'sir ko'rsatishi mumkin.

Qovushoqmas suyuqliklar (masalan, kremniy va germaniy suyulmalari) kristallanishida kinetik omil muhim emas, bu holda yuqorida aytilgan I maksimumi kuzatilmaydi.

Suyulmalardan kristall va amorf qattiq jismlar olish shartlari quyidagilardir.

Qovushoq (masalan, kremniy oksidi asosidagi) suyulmalarni, haqiqatda foydalaniladigan o'ta to'yinganlik ko'rinishida qotib qoladi. Bu jarayon kristallanishdan farq qiladi va **shishalanish** deyiladi, mo'rt holatga tegishli o'tish temperaturasi **shishalanish T_d temperaturasi** deyiladi. Bunday **amorf** qattiq jismda (uni **shisha** deyiladi) zarralar joylashishida uzoq tartib yo'q, ammo bir necha panjara doimiysi chamasidagi masofada zarralar joylashishida yaqin tartib mavjud bo'ladi.

II.3-jadval

Modda	Suyulish temperaturasi, °C	Qovushoqlik Pa s	Modda	Suyulish temperaturasi, °C	Qovushoqlik Pa s
Ge	937	$0,8 \cdot 10^{-3}$	SiO ₂	1722	10^4
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

Suyulmalarning qovushoqligi ularning shishasimon holatga o'tishi qobiliyatining bosh sababi bo'ladi. Qovushoqligi past moddalar suyulmalarini shishasimon holatga o'tkazish ancha qiyin, buning uchun bu suyulmalarni (10^5 - 10^6) grad./s tezlikda sovitish talab qilinadi. Shunday qilib, temperatura pasayganda moddaning suyulgan holatdan qattiq holatga o'tishi ikki yo'l bilan yuz beradi: modda yo kristallanadi, yoki shisha shaklida qotadi. Kristallanish **bir tayinli temperaturada** (qotish nuqtasi) sodir bo'ladi, moddaning xossalari bu holda **sakrashsimon** o'zgaradi. Suyulmaning shishalanishi muayyan temperaturalar oralig'ida sodir bo'ladi, bunda modda xossalari silliq o'zgaradi.

O'ta to'yingan suyuq eritmalarida qotish markazlari hosil bo'lishi jarayoni tahlili o'ta to'yingan bug'lar va o'ta sovigan suyulmalarda markazlar hosil bo'lishi tahliliga ko'p jihatdan o'xshashdir. Bunda gaz fazasi o'ta to'yinish koeffitsieti o'rniga eritmaning o'ta to'yinish koeffitsienti kiritiladi.

$$r_{kr} = \frac{2\gamma_{ck}v}{RT\ln C/C_0} \quad (\text{II.17})$$

Bayon qilingan nazariya yangi faza markazlari hosil bo'lishi boshlanishi uchun kerak kritik o'ta to'yinish va o'ta sovish kattaliklarini baholash imkonini beradi. Suyulmalardan kristallanish holida ΔT_{kr} oraliq $0.2T_{suyul}$ ni tashkil etadi. Gaz holatidan kondensirlanish (qo'yilish) holida kritik o'ta to'yinish $\alpha = P/P_0$ koeffitsienti 10 tartibidagi kattalik bo'ladi. Maxsus tajribalar bu baholashlarni tasdiqlaydi.

Endi yangi faza markazlarining geterogen hosil bo'lishi jarayonini o'ta to'yingan bug'ning silliq, tekis, toza taglikka o'tishi misolida ko'ramiz. Bunda ho'llanish muvozanatiy L^θ burchagi uchta sirt tarangliklari muvozanati shartiday aniqlanadi:

$$\gamma_{6k} = \gamma_{ck} + \gamma_{c6} \cos \theta \quad (\text{II.18})$$

γ_{6k} , γ_{ck} va γ_{c6} - bug'-qattiq jism, suyuqlik-qattiq jism va suyuqlik-bug' chegaralari sirtlarining solishirma erkin energiyalaridir.

Geterogen markazlar hosil bo'lishi hodisasida tizim erkin energiyasi o'zgarishi:

$$\Delta G = (4\pi r^2 \theta_{c6} - \frac{4\pi r^2}{3V} RT \ln P/P_0) \frac{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)}{4} \gamma_{c6} \quad (\text{II.19})$$

Gomogen holdagiga nisbatan ΔG da oxirgi kasr ko'paytiruvchi qo'shimcha paydo bo'ldi. Demak,

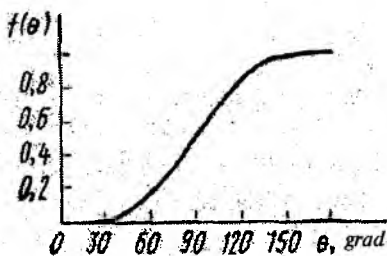
$$\Delta G_{kr}^{get} = \Delta G_{kr}^{gom} \frac{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)}{4} = \Delta G_{kr}^{gom} f(\theta) \quad (\text{II.20})$$

Ba'zi xususiy hollarni ko'raylik. $\theta = 180^\circ$ - suyuqlik taglikni to'la ho'llamaydi. Bu holda $\Delta G_{kr}^{get} = \Delta G_{kr}^{gom}$, suyuqlik va taglik zarralari deyarli o'zaro ta'sirlashmaydi. $\theta = 0^\circ$ - yangi faza taglikni to'la ho'llaydi, $\Delta G_{kr}^{gom} = 0$, markazlar va taglik zarralari kuchli o'zaro ta'sirlashadi.

$0^\circ < \theta < 180^\circ$ holda gomogen markaz hosil qilishdan ko'ra, energetik nuqtayi nazardan geterogen markaz hosil qilish ancha qulay (II.11-rasm).

Yana shuni aytish kerakki, kristall faza markazlarning gaz yoki suyuq fazalardan geterogen hosil bo'lishi holida markaz va taglikning anizotrop deformatsiyasini hisobga olish zarur bo'ladi.

Geterogen kristall faza markazlari hosil bo'lishida kirishmalar muhim ta'sir ko'rsatishi mumkin. Chegaraviy ho'llanish burchagi, markazning hosil bo'lishi faollash energiyasi va bu jarayonning tezligi kirishmalar zichligiga bog'liq bo'ladi.



II.11—rasm.

$$f(\theta) = \frac{(1 - \cos \theta)^{-2} (2 + \cos \theta)}{4}$$

funksiya muvozanatining
ho'llash θ burchagiga
boqlanishi grafiqi.

Taglikning nuqsonlari ham qaralayotgan jarayonlarga muhim ta'sir qiladi.

Endi yangi faza markazlari geterogen hosil bo'lishi tezligi to'g'risida to'xtalamiz.

Birlik yuzaga nisbatan bu tezlik

$$I^{get} = Z \omega_{kr}^{get} n_{kr}^{get}, \quad (II.21)$$

bunda Z - muvozanatsizlik omili, n_{kr}^{get} - kritik o'lchamli markazlar zichligi:

$$n_{kr}^{get} = n_1 \exp\left(-\frac{\Delta G_{kr}^{get}}{KT}\right). \quad (II.22)$$

Ba'zi boshqa omillarni hisobga olinganda shu keltirilgan (II.21) ifoda murakkabroq tus oladi.

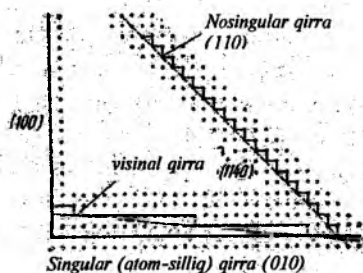
Bayon qilingan yangi faza hosil bo'lishining termodinamik nazariyasi hozirgacha olingan ko'pchilik tajriba natijalarini qoniqarli tushuntira oladi, u markazlar o'lchamlari va hosil bo'lishi tezligining o'ta to'yinish, taglik, temperaturasi va uning tabiatiga bog'liqligini to'g'ri bashorat qiladi. Ammo, uni katta o'ta to'yinish hollariga tatbiq qilib bo'lmaydi.

4.2. Kristallar o'sishi mexanizmlari va kinetikasi

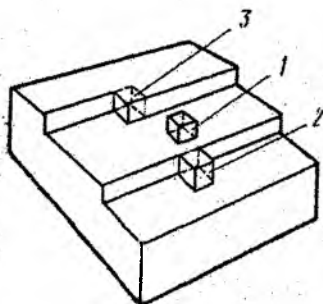
Kristallning o'sish tezligi uning sirtida atomlar joylashishi qandayligiga bog'liq. Ideal (mukammal) kristallar yoqlari sirlari atomlar joylashishi bo'yicha uch turga bo'linadi: **singulyar**, **vitsinal** va **singulyarmas (diffuz)** sirtlar bo'ladi. Ideal sharoitda hech qanday pog'onalarsiz bo'lgan silliq yoqlar **singulyar** sirtlar deyiladi. Singulyar yoqlar nisbatan kichik erkin sirtiy energiyaga ega va ularda atomlar zich taxlangan.

Vitsinal sirtlar singulyar sirtlarning bevosita yaqinida yo'nalgan sirtlar hisoblanadi.

Ular, singulyar yoqlar bilan kichik burchak hosil qilib, uzun singulyar yoqlarning pog'onali yassi qismlaridan iborat bo'ladi. Vitsinal yoqlar pog'onali bo'lgani tufayli singulyar yoqlarnikidan kattaroq sirtiy energiyaga ega.



II.12—rasm. Sodda kubik panjarada turlicha yoʻnalgan yoqlar sirtlari



II.13—rasm. Atom — silliq sirtning oʻsish modeli.

Singulyar yoqlar singulyar yoqlar bilan yetarlicha katta burchaklar hosil qiladi va koʻp pogʻonali boʻladi. Bu yoqlar eng katta sirti energiyaga ega.

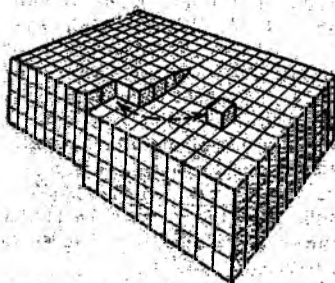
Aytilgan yoqlar sirtlari II.12-rasmda tasvirlangan.

Yuqori temperaturada singulyar yoqlar silliqdigi yoʻqolishi va ular singulyar boʻlib qolishi mumkin. Bu hodisa kristallning suyulish nuqtasidan pastda yuz berishi mumkin.

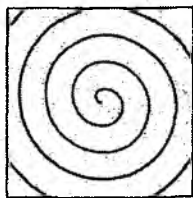
Qatlamli oʻsish singulyar va vitsinal sirtlarda amalga oshadi. Oʻsayotgan sirtga tushgan atomli pogʻona sinigʻida mustahkam bogʻlanadi. (II.13-rasm, 3).

Agar kubik panjara qaralsa, mazkur (3) holatda atom 6 qoʻshnidan uchta bilan bogʻlanadi. 2-holatda atom faqat ikkita, 1-holatda esa faqat bitta qoʻshni atom bilan bogʻlangan boʻladi.

Tashqi fazadan kristall sirtiga tushgan atom oʻz energiyasi qismini panjaraga beradi va kristall sirti atomlari bogʻlanish kuchlari taʼsirida bu sirtga yutiladi (yopishadi). Pogʻona sinigʻi toʻldirila boradi, u tamoman toʻlib boʻlganda yana kelgan atom boshqa pogʻonaga yopishib sinigʻi hosil qiladi, keyingi kelgan atomlar uning qatoriga joylasha boradi, bu qator toʻlgach, yangi qator toʻldirila boshlaydi va bu jarayon davom etib kristall oʻsa boradi. Bunday oʻsish mexanizmi uchun qandaydir kritik oʻta toʻyinib boʻlishi zarur. Tajriba



II.14—rasm. Vintsimon dislokatsiya asosida oʻsuvchi kristall yoqi.



II.15—rasm. Vintsimon dislokatsiya ta'sirida o'sayotgan sirt ko'rinishi.

haqiqiy hollarda ancha kichikroq to'yinishi bo'lganida ham kristallar tez o'sishini ko'rsatdi. Bundan kristall o'sishi sirtida pog'onalar hosil qiluvchi manba bor bo'ladi degan xulosa kelib chiqadi. Haqiqatan ham bunday manba vazifasini, masalan **vintsimon dislokatsiya** bajarishi mumkin, chunki u sirtga chiqib yo'qolmas pog'ona hosil qiladi (II.14-rasm).

Vintsimon dislokatsiyalar yordamida o'sish jarayoni ideal kristallda pog'onali o'sish mexanizmiga o'xshash bo'ladi: vintsimon dislokatsiya tufayli sirtida hosil bo'lgan pog'onalarda siniqlar bo'lib, u joylarga yutilgan atomlar tizila boshlaydi, pog'onalar vintsimon tarzda o'sa boradi — kristall o'sadi. (II.15-rasm).

Singulyar mas sirtlarda kristallarning **normal o'sishi** amalga oshadi. Bu sirtlar (atomlar o'lchamida) g'adir-budir bo'lganligi sababli ularda siniqlar bir tekis joylashgan, yangi zarralar sirtning har qanaqa joyida qo'shilib boradi. Bu hodisada kristall yoqlari o'ziga tik ravishda o'sadi. Shuning uchun bu o'sish mexanizmini **normal o'sish** deyiladi.

4.3. Kristallar o'sishining sirtiy kinetikasi

Suyulma (gaz, bug') va o'sayotgan kristall chegarasi **kristallanish fronti** deyiladi.

Oldin aytilganidek, vintsimon dislokatsiya hosil qilgan pog'onaga atomlar qo'shila borib, u spiralga aylanadi, o'sayotgan sirtida piramidalar vujudga keladi. (II.15-rasm.)

Gaz fazasidan kristallanish holidan bevosita bug'dan (gazdan) o'sayotgan sirt pog'onasiga kam zarra tushadi, chunki bug'ning zichligi kichik va sirt ham kattamas. Shuning uchun kristall o'sishiga sirtning turli qismlarida yutilgan zarralarning diffuzion oqimi asosiy hissa qo'shadi.

Bu qismlar yuzi katta, ularga o'tirib qolgan va keyin dislokatsion pog'ona tomonga diffuziyalanuvchi zarralar ko'p bo'ladi. Bu holda sirtning (qatlamdor-spiralsimon) o'sishi tezligi (kristallanish fronti siljishi tezligi):

$$\nu = k_1 \Omega n_0 \nu k_2 e^{-\frac{W}{KT}} \left(\frac{\sigma^2}{\sigma_1} \right) \ln \frac{\sigma_1}{\sigma}, \quad (\text{II.23})$$

bunda k_1 va k_2 - adsorbsion qatlam va siniqlar orasida zarralar almashinish koeffitsientlari, Ω - zarra hajmi; n_0 - kristall atomlari sirti yuzi zichligi, ν - zarra tebranishlari chastotasi, σ - o'ta to'yinish, $\sigma_1 = (2\pi r_{kr} / \lambda_s) \sigma$ - markaz (sho'rtak) ning kritik radiusi, r_{kr} - adsorblangan holatda zarraning o'rtacha ko'chishi, W - zarraning bug'lanish energiyasi.

Past o'ta to'yinishlar ($\sigma \ll \sigma_1$) holida o'sish (kristallanish fronti siljishi) tezligining o'ta to'yinishga bog'lanish qonuni kelib chiqadi:

$$\nu = k_1 \Omega n_0 k_2 \nu e^{-\frac{W}{KT}} \frac{\sigma^2}{\sigma_1} \quad (\text{II.24})$$

Katta o'ta to'yinishlar ($\sigma \gg \sigma_1$) holida

$$\nu = k_1 \Omega n_0 \nu k_2 \sigma e^{-\frac{W}{KT}} \quad (\text{II.25})$$

Bitta dislokatsiyaning o'zi butun kristall yoqining o'sishini ta'minlay oladi.

Kristallning suyulmadan o'sishining sirtiy kinetikasi faqat kristallanish sirti tuzilishiga emas. Balki suyulmaning qovushoqligiga ham bog'liq, chunki bu kristall o'sishiga halaqit beradigan sababdir.

Atom o'lchamlarida g'adir-budur sirtlar normal (tik) mexanizm bo'yicha o'sadi. Ularda o'sish markazlari sirt atomlari zichligi (10^{18} m^{-2}) tartibida bo'ladi. Bu holda sirtning o'sishi tezligi kristallanish fronti (sirti) dagi o'ta so'vishga proporsional:

$$\nu \sim \Delta T \quad (\text{II.26})$$

Atom o'lchamlarida silliq sirtlar qatlam-qatlam bo'lib o'sganida

$$\nu \approx \Delta T \exp(-B / T \Delta T), \quad (\text{II.27})$$

Qoplamli – spiral bo'lib o'sganida

$$\nu \sim \Delta T^2 \quad (\text{II.28})$$

4.4. Kristallar o'sishida ko'chish jarayonlari

O'sish sirtidagi kinetik hodisalar bilan bir qatorda kristallanishda issiqlik va massa ko'chish jarayonlari muhim o'rin tutadi. Bu jarayonlarni tegishli differensial tenglamalar tizimini yechib tahlil qilinadi. Ular kristallning shakllanishida, nuqsonlar hosil bo'lishida, kirishmalar kiritish jarayonlarida katta ahamiyatga egadir.

Kristallar o'sishiga kirishmalar ta'siri. Bu ta'sir turli ko'rinishda yuz beradi. Ba'zi hollarda kirishmalar kristallar o'sishini tezlaydi, ba'zi hollarda esa sekinlatadi.

Masalan, sirtiy faol kirishmalar o'sayotgan yoqda (sirtida) o'sish markazlari hosil qilinishiga muhim ta'sir qiladi. Agar kirishma molekulalarini yutib olgan pog'onalar siniqlari o'sishning faol nuqtalari bo'lmay qolsa, kristallning o'sishi sekinlaydi. Masalan, gaz fazasidan o'stirilayotgan germaniy kristallining o'sish tezligini kislorod kirishmasi bir-ikki tartibga kamaytirishi mumkin.

Kirishmalarning kristallar o'sishiga ta'sirining bir qancha boshqa ko'rinishlari ham bor.

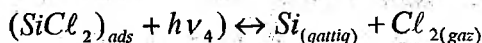
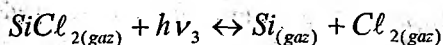
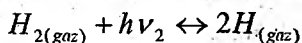
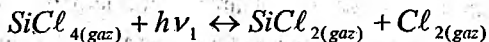
Kristallar o'sishini tezlashtiruvchi usullar ham bor. Ular yordamida kristallar o'sish tezligini oshirish, tuzilishini mukammalroq qilish, kristallanish temperaturasini pasaytirish, legirlash (kirishmalar kiritish) jarayonlarini boshqarish mumkin.

O'sayotgan kristallga elektromagnitik nurlanish, elektrik maydon yoki akustik to'lqinlar bilan ta'sir qilib, uning o'sishini tezlatish mumkin deb hisoblanadi.

Masalan, gaz fazasidan o'stirilayotgan kremniy kristalliga $\lambda = 230 \div 370 \text{ nm}$ diapazondagi ultrabinafsha nurlar ta'sir qilsa, jarayon temperaturasi pasayadi, kristall o'sishi ikki marta tezlashadi, tuzilish mukammallanadi.

Yorug'likning monoxromatik manbalarini (masalan lazerlarni) qo'llanish jarayon yoki reaksiyaning ayrim bosqiehlariga nisbatan muayyan nurlanishni tanlab ishlatish imkonini beradi.

Masalan, $SiCl_4 - H_2$ tizimda kremniy kristallini $h\nu$ energiyali fotonlar ta'sirida o'stirishda quyidagi reaksiyalar bo'lishi mumkin.



Dastlabki molekularning bog'lanish energiyalari turli bo'lganligi sababidan u yoki bu reaksiya yuz beradigan nurlanish to'liq uzunliklari turli bo'ladi.

Bundan tashqari, elektromagnitik nurlanish, ayniqsa yarimo'tkazgichlarning o'sish sirtini uyg'otadi, nurlanish tushgan joyda kristall o'sishiga erishish mumkin, bu esa mikroelektronika uchun katta ahamiyatga egadir.

Elektronlar nurlari ta'sirida ham o'stirish jarayonlarini tezlash, mahalliy o'sishni amalga oshirish mumkin.

Elektrik maydon ham massa ko'chishini tezlantirish va o'sish sirtida jarayonlarni faollash evaziga kristall o'stirishini jadallashtiradi. Gaz fazasidan kristallar o'stirishda elektrik maydon ta'sir qilsa, molekular qutblanishi yuz beradi, bu esa ko'chish jarayonlarini rag'batlantiradi. Elektrik maydon absorblangan (yutilgan) atomga (molekular) uyushmasini deformatsiyalab, ularning parchalanishi faollash energiyasini

o'zgartirib, o'sayotgan sirt qurilishini tezlatadi, ba'zi hollarda o'sish tezligi ikki tartibgacha ortadi.

Tashqi elektrik maydon molekulari katta dipol momentlarga ega bo'lgan tarkiblovchilar ko'chishiga kuchli ta'sir ko'rsatadi, u tarkiblovchilar taqsimoti koeffitsientlarini o'zgartirishi mumkin. Birjins bo'lmagan (har xil joyda kuchlanganligi har xil) elektrik maydonlarning katta kuchlanganligi mavjud joylarda qutblanish yuqori bo'ladi, kristallanishda qatnashuvchi molekularlar ionlanishi mumkin, bu esa kristallanishni jadallashtirishga olib keladi.

Gaz fazasini (biqsima yoki yuqori chastotali zaryadsizlanish orqali) ionlantirib, tashqi elektrik maydon ta'sirini yanada kuchaytirish mumkin. Masalan, kremniy bug'ini qisman (30%) ionlab va ionlarni o'suvchi kremniy kristalliga tezlatuvchi kuchlanish (-10 kV) ta'sirida yo'naltirib ancha past temperaturalarda kremniy monokristallini o'stirish mumkin. Tok zichligi bu holda 100 mA/sm^2 .

Nazorat savollari

1. Kristallanish markazlari qanday hosil bo'ladi yoki qanday hosil qilinadi?
2. Kristallar o'sishi jarayoni qanday kechadi?
3. Kristallar o'sishida sirtning ahamiyati qanaqa?
4. Kristallar o'sishida qanday ko'chish jarayonlari yuz berib turadi?
5. Kristallar o'sishini tezlashtiruvchi usullar qanday?

5. BOB. YARIMO'TKAZGICHLAR ISHLAB CHIQARISHDA FOYDALANILADIGAN MODDALAR

Hozirgi zamon elektronikasi talablarini qanoatlantiradigan yarim o'tkazgich moddalar ishlab chiqarish jarayonlari ko'p bosqichli va ko'p asosiy xomashyolar yordamchi moddalar ishtiroki bilan amalga oshiriladi. Bu ishlab chiqarishda fizik va kimyoviy jarayonlar muayyan ketma-ketlik va birgalikda boradi.

Yarim o'tkazgich moddalar juda toza bo'lishlari zarur. Shundagina ularning ajoyib xossalari namoyon bo'ladi, bundani ravshanki, yarimo'tkazgich moddalar olish sanoatida foydalaniladigan moddalar ham yetarli darajada tozalangan bo'lishi kerak. Yarimo'tkazgichlar elektronikasining tez sur'atlar bilan rivojlanishi toza moddalar texnologiyasining o'sishi bilan chambarchas bog'langan.

5.1. Toza modda tushunchasi. Toza moddalar bilan muomala qilish qoidalari

II bo'limning 5-bobida moddalarni bir-biridan ajratish va tozalash usullari to'g'risida ma'lumotlar bayon qilingan edi. Biz bu yerda toza modda tushunchasiga yana to'xtalib o'tamiz. Yarimo'tkazgichlarni olishda xomashyoni tozalashdan tashqari yordamchi moddalar ham, texnologik jarayonlar olib boriladigan idishlar, qurilmalar moddalari erib yoki bug'lanib kerakli mahsulotni ifloslamasligi choralari ko'rishga to'g'ri keladi.

Ideal toza modda nuqsonsiz bo'lib, bir vaqtda kimyoviy (kirishma atomlar yo'q!) va fizik (tuzilish nuqsonlari yo'q!) tozalikka ega bo'lishi kerak. Ideal toza modda olish mumkin emas, ammo keraksiz kirishmalar juda kam miqdorda bo'lgan yuqori darajada toza modda olish mumkin. Buning uchun nazorat qilinmaydigan kirishmalar zichligi muayyan chegaradan past bo'lishi kerak. Masalan, ideal toza xususiy kremniyda elektronlar va kovaklar soni xona temperaturasida 10^{10} sm^{-3} chamasida, nazorat qilinmaydigan kirishmalar soni bu miqdordan kam bo'lmasa, xususiy kremniy xossalari namoyon bo'lmaydi.

Odatda kremniy donor va akseptor kirishmalar bilan legirlanadi (legirlash - kirishma kiritish demakdir), bu holda haqiqiy kremniy kristallidagi nazoratsiz kirishmalar miqdori kiritilgan kirishmalar

miqdoridan kamida bir tartib oz bo'lishi kerak. Misol uchun, solishtirma qarshiligi 8 Om sm ($n \approx 1 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$) bo'lishi talab qilinadigan n -tur o'tkazuvchanlikli kremniy olish uchun 120 Om-sm li dastlabki modda (ya'ni akseptor kirishmasi $1 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ dan kichik zichlikli modda) talab qiniladi. Agar kremniyda atomlar zichligi $\approx 10^{22} \text{ at/sm}^3$ ekanini esga olsak, bu holda kremniyning 10^8 (yuz million!) atomiga 1 tagina akseptor atomi to'g'ri keladi.

O'ta toza moddalar tarkibida nazoratlanadigan kirishmalar miqdori (massa bo'yicha) $10^{-4} \%$ dan oshmasligi, keraksiz kirishmalar miqdori esa $10^{-6} \%$ dan ortiq bo'lmasligi kerak. Keyingilardan mutlaqo qutilish mumkin emas, odatda o'ta toza moddalarda ham 15-20 element mavjud bo'lishligi nazorat qilinadi. Aslida juda toza moddalarda davriy tizim elementlaridan ko'pi mavjud bo'ladi. Maslan, galliy fosfidi (GaP) da 72 xil kirishma aniqlangan.

Dastlabki va yordamchi moddalar tozaligini saqlash uchun alohida sharoit talab qilinadi (taxlash, saqlash uchun alohida joy va uni toza tutish va h.k)

5.2. Asosiy va yordamchi moddalar

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida ko'p sondagi elementlar ishlatiladi. Ularning ba'zilar faqat legirlovchi kirishmalar bo'lsa, boshqalari bir vaqtda yarimo'tkazgich birikmalar tarkiblovchilari va elementar (sodda) yarimo'tkazgichlarda legirlovchi kirishmalar vazifasini o'taydi.

Aluminiydan (Al) asosan kremniy texnologiyasida akseptor tipidagi legirlovchi kirishma sifatida foydalaniladi. Yuqori darajada toza alyuminiy (99,999%) suvga nisbatan barqaror. Suyultirilgan nitrat kislotada, sulfat kislotasida sustroq eriydi, xlorid kislotasi (HCl) unga ta'sir qilmaydi. Yemiruvchi ishqorlar aluminiy bilan faol o'zaro ta'sirlashadi.

Namli havoda saqlanganda yoki qizdirilganda aluminiy oksidlanadi. Uning sirtida hosil bo'ladigan yupqa (Al_2O_3) pardasi juda mustahkam va metallni yanada oksidlanishdan saqlaydi.

Suyulgan aluminiy juda faol – havodagi kislorod bilan, shuningdek, oksid birikmalar (CO_2 , CO va b.) dan oksidlanadi. Ko'p metallar va moddalar bilan (1000°C dan yuqori) reaksiyaga kirisha oladi.

Aluminiyni oksidlardan tozalash ancha qiyin.

Bor (B) ham asosan kremniy texnologiyasida qo'llanib, ko'p ishlatiladigan akseptor kirishmadir.

Bor (B) amorf va kristall shakllarda mavjud bo'ladi.

Oddiy temperaturalarda bor (B) inert modda. U suv bilan ta'sirlashmaydi, havoda oksidlanmaydi va boshqa elementlar bilan reaksiyaga kirishmaydi. Ba'zi bir kislotalarda erimaydi, ba'zilarida oksidlanishi mumkin. Kristall bor (B) suyuq ishqorlar, karbonatlar va nitratlar bilan yaxshi o'zaro ta'sirlashadi.

Yuqori temperaturalarda bor (B) kimyoviy faol. Ko'p elementlar va birikmalar bilan o'zaro ta'sirlashadi. 1000°C chamasidagi temperaturada kristall bor (B) oksidlanib, bor (B) angidridi B_2O_3 ni hosil qiladi.

Galliy metali yarimo'tkazgich moddalar texnologiyasida keng qo'llanadi. Germaniyga akseptor kirishma sifatida kiritiladi, GaAs, GaP kabi birikmalar tarkibiga kiradi.

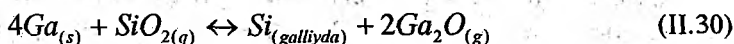
Yuqori darajada toza galliy suvda barqaror va kislotalarda, ayniqsa shoh arog'ida ($H_2NO_3:HCl=1:3$) yaxshi eriydi. Yemiruvchi ishqorlarda u sekin eriydi va vodorod ajraladi.

Quruq atmosferada (muhitda) zona temperaturasida galliy oksidlanmaydi. Qizdirilganda metall tez oksidlanadi.

Galliy suyulmasini oksiddan tozalash uchun suyulgan va ozgina qizdirilgan metalni vakuumda g'ovak kvarts filtrlardan o'tkaziladi. Kislotalar aralashmasi bilan yuviladi va 650-800°C da 5-6 soat davomida termoshlov beriladi, natijada uchuvchan galliy oksidi (Ga_2O) hosil bo'ladi:



Suyulgan galliy 865°C dan yuqorida kvarts bilan reaksiyaga kirisha oladi:



Grafit suyulgan galliy tomonidan kam ho'llanadi. 1000-1200°C gacha galliyda uglerod oz eriydi, ammo yuqoriroq temperaturalarda sezilarli eriydi.

Temir yarimo'tkazgichlarda chuqur sath hosil qiluvchi kirishma bo'ladi. Quruq havoda temir kumushsimon oq rangli, nam havoda zanglaydi, Fe_2O_3 oksid va b. qatlami bilan qoplanadi. Havoda qizdirilganda temir 150°C dan yuqorida oksidlanadi.

Temir ho'l xlor bilan, qizdirilganda esa brom, yod va oltingugurt bilan ta'sirlashadi, suyultirilgan kislotalarda oson eriydi, quyuq kislotalarda himoyalovchi oksidlar bilan qoplanadi (passivlashadi), yediruvchi ishqorlar eritmalarida sekin, suyulmalarda tez eriydi. Temirni oksidlardan tozalash uchun 800-900°C da vodorod oqimida qizdiriladi.

Oltin elementar yarimo'tkazgichlarda (Ge, Si, Se va x.k.) legirlovchi kirishma bo'lib, ularga zaruriy fotoelektrik xossalar baxsh etadi.

Oltin katta kimyoviy bardoshli metall. Havoda deyarli hech qanday modda bilan ta'sirlashmaydi. Hatto suyulish temperaturasiga qadar yuqori temperaturalarda kislorod, azot, uglerod va ko'p boshqa elementlar bilan ta'sirlashmaydi, ko'p kislotalarga nisbatan barqaror, faqat shoh arog'ida, xlorli suvda ($\text{HCl} + \text{HClO}$) eriydi. Yana u natriy sianidi NaCN da oksidlovchilar ishtirokida eriydi.

Indiy elementar yarimo'tkazgichlarda akseptor kirishma sifatida qo'llanishi mumkin. Indiy InSb , InAs , InP kabi yarimo'tkazgi birikmalar tarkibiga kiradi.

Kimyoviy xossalari bo'yicha indiy (In) galliy (Ga) ga yaqin, ammo undan farqli ravishda, ishqorlarda erimaydi. Sovuq suyultirilgan kislotalarda indiy sust eriydi, ammo, qizdirilganda, uning kislotalarda eruvchanligi ortib ketadi.

Eriganida indiyning sirtida indiy oksidi In_2O_3 hosil bo'ladi, u esa kvars yoki grafit idishning devorlariga yopishadi, bu xossa indiy oksidini indiydan ajratib olish imkonini beradi. Uni past temperaturada suyultirilganda ftoroplast idishda saqlash ma'qul. Yuqori temperaturada kvars idishda indiy suyultiriladi.

Arsenik (As) elementar yarimo'tkazgichlarda legirlovchi donor kirishma vazifasini o'taydi, yarimo'tkazgich birikmalar (GaAs , InAs) tarkibida qatnashadi.

Arsenik metall va amorf shakllarda mavjud bo'ladi. Amorf arsenik 300°C dan yuqori temperaturadagi sirtida arsenik bug'lari o'tirishidan hosil bo'ladi. Metall arseniy xona temperaturasida suvda erimaydi, ayrim kislota va ishqorlarda oksidlanib arsenik kislotasi H_3AsO_3 hosil bo'ladi.

Xlorid kislota As ga sust ta'sir qiladi (u ham bo'lsa, oksidlovchilar va havo kislorodi ishtirok qilganida).

Arsenik havoda As_2O_3 oksid pardasi bilan qoplanadi. As ning to'yingan bug'dagi bosimi temperatura bilan birga oshib boradi, shu sababdan uni oksidlardan ajratish mumkin.

Arsenikning barcha birikmalari kuchli zaharli! Eng zaharlisi arsin AsH_3 .

Qalay (Sn) — ko'p yarimo'tkazgichlarning, ayniqsa yarimo'tkazgich birikmalarning asosiy donor kirishmalaridan biri.

Qalay oddiy temperaturalarda juda barqaror element, suv bilan u ta'sirlashmaydi, suyulgan kislotalarda sust, katta zichlikli xlorid va nitrat kislotalarida eriydi.

Xona temperaturasida qalay amalda oksidlanmaydi. $300^{\circ}C$ dan yuqorida oksidlanib, SnO_2 hosil qiladi, bu esa metallardan yaxshi ajraladi va $500^{\circ}C$ dan yuqorida vodorod bilan oson tiklanadi. Azot bilan qalay hech qanday temperaturada ta'sirlashmaydi.

Qalay uchun idishlar — kvarts, alund, grafitdan, past temperaturada zanglamas po'lat idish ham bo'laveradi.

Oltinugurt (S) — faol modda. Qizdirilganda u ko'pehilik metallar bilan ta'sirlashib, sulfidlar hosil qiladi (masalan Cu_2S). Xlorid kislota oltinugurt erimaydi, unga nitrat HNO_3 va quyuq sulfat kislota (H_2SO_4) $300^{\circ}C$ da ta'sir qilib, SO_2 angidrid birikma paydo qiladi. Barqaror oltinugurt shakli organik eritmalarda yaxshi eriydi.

Havoda yonganda (kuyganda), shuningdek, sulfidlar oksidlanganda ham SO_2 angidrid hosil bo'ladi. Xona temperaturasida u gazsimon holatda bo'ladi. Vodorod atmosferasida $300^{\circ}C$ da oltinugurt H_2S birikma hosil qiladi. Bu uneha mustahkam bo'lmagan birikma $400^{\circ}C$ dan yuqorida parchalanib ketadi. Havoda H_2S kuyib, suv va SO_2 paydo bo'ladi.

Surma (Sb) — yarimo'tkazgichlar texnologiyasida donor kirishma va shuningdek, birikmalar tarkiblovchisi sifatida ishlatiladi.

Surmaning kimyoviy xossalari arsenik (As) nikiga o'xshaydi. U oddiy temperaturalarda suvga va havoga nisbatan barqaror. Havoda qizdirilganda oksidlanib, Sb_2O_3 oksid hosil qiladi. Suyultirilgan kislotalar Sb ga ta'sir qilmaydi, ammo u shoh arog'ida va quyuq nitrat kislota oson eriydi. Xlorid kislotasida surma sekin erib, undan vodorod ajraladi.

Surma bilan vodorod **stibin** deb atalgan SbH_3 gidrid hosil qiladi. U surma ishtirok etgan yarimo'tkazgich birikmalarga kislotalar ta'sir etganida ham hosil bo'ladi. *Stibin kuchli zaharli.*

Surmani grafit idishlarda (konteynerlarda) eritiladi, chunki u grafit bilan ta'sirlashmaydi. $700^{\circ}C$ da vodorod surma oksidini metall sirtidan uzoqlashtiradi.

Tellur (Te) – yarimo'tkazgich birikmalarni legirlash uchun ishlatiladigan asosiy donor kirishmalardandir. Uning kadmiy bilan birikmasi CdTe yarimo'tkazgichdir. Tellurning o'zi elementar yarimo'tkazgich.

Tellur ishqorlarda eriydi, unga nitrat va sulfat kislotasi ta'sir qiladi, ammo u suyultirilgan xlorid kislotasida sust eriydi. Qattiq tellur suv bilan 100°C dan yuqorida ta'sirlashadi, u kukun ko'rinishida (havoda, xona temperaturasida) oksidlanib, TeO_2 oksid hosil qiladi. Bu mustahkam birikma tellurga nisbatan kam uchuvchan. Shuning uchun tellurni oksidlardan tozalashda 500-600°C da vodorod oqimi bilan tiklash usuli qo'llanadi.

Suyuq tellur uncha ta'sirchan emas, shuning uchun suyultirishda grafit va kvars idishlardan foydalaniladi.

Fosfor (P) elementar yarimo'tkazgichlarda, asosan kremniyda, donor kirishma sifatida ishlatiladi. U ba'zi yarimo'tkazgich birikmalar (GaP, InP) tarkibiga kiradi. Qizil fosfor oq va qora fosfor aralashmasi bo'ladi. Bug' fazasidan fosfor oq fosfor ko'rinishidan zich shaklga o'tadi, 250°C dan yuqorida qizil fosfor hosil bo'ladi. Qizil fosfor – faol modda: 260°C gacha qizdirilganda oson yonib ketadi, Piroforen – ishqalanish va zarbadan yonib ketadi. Havoda yonishda P_2O_5 oksid hosil bo'ladi, u uchuvchan va namlikni yutuvchan modda, u namni havodan yutib, fosfor kislotalar (asosan H_3PO_4) hosil qiladi. Buni hisobga olib, uni jips yopiladigan (germetik) idishlarda saqlanadi. Uni ishlashtirishdan oldin oksidlardan va namdan tozalash uchun vakuumda (ma'lum bosimda va vaqtda, 150-200°C da) quritiladi.

Xrom (Cr) – galliy arsenidi va galliy fosfidida kirishma sifatida qo'llanib, chuqur sathlar hosil qiladi, u mazkur birikmalarga yarimizolatsiyalovchi xossalarga ega bo'ladi.

Oddiy sharoitda xrom suvga va havoga nisbatan barqaror. 2000°C ga yaqin temperaturalarda qizdirilsa xrom kuyib, Cr_2O_3 oksid hosil qiladi. Shu temperaturalarda xrom galogenlar – xlor, fluor, brom, iod bilan, azot, uglerod, kremniy, bor va boshqa elementlar bilan ta'sirlashadi. Suyultirilgan sulfat va xlorid kislotalari bilan faol ta'sirlashadi, ammo sovuq nitrat kislotada erimaydi.

Rux (Zn) – ko'p yarimo'tkazgich birikmalarining asosiy akseptor kirishmasi vazifasini bajaradi, ularning tashkillovchisi bo'ladi (ZnS va b.).

Rux yetarlicha faol, kislota va ishqorlarda yaxshi eriydi. U xona temperaturasida tuzlarning suvdagi eritmalaridan mis (Cu), kumush

(Ag), simob (Hg), surma (Sb), qalay (Sn) va boshqa metallarni siqib chiqaradi.

Rux ko'p birikmalarni, masalan oksidlar, xloridlarni oson tiklaydi.

Quruq havoda 150°C dan yuqorida rux (Zn) oksidlanib, ZnO oksid pardasi bilan qoplanadi. Nam havoda va suvda ham shu oksid pardasi hosil bo'ladi. Rux oksidi metallda erimaydi, uning sirtidan oson uzoqlashtirilishi mumkin.

Rux amalda uglerodni eritmaydi, shuning uchun rux uchun konteyner (idish) grafitdan, alunddan yasaladi.

Konteyner moddolari

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida qo'llanadigan konteyner (idishlar, hajmlar) materiallarini ikki guruhga ajratiladi: past temperaturadagi amallarda — yedirish, yuvish va h.k. larda qo'llanadigan materiallar birinchi guruhni tashkil etadi. Ulardan taxlash, tashish va saqlash uchun ham foydalaniladi. Ikkinchi guruh materiallar yuqori temperaturada ishlashi kerak bo'lgan buyumlar: issiqlik tugunlari, reaktorlar tanasi, ampulalar, tigellar va qayiqchalar tayyorlashda ishlatiladi (issiqlik tugunlari).

Organik shisha (pleksiglas) — shaffof, rangsiz plastik modda; suv, ishqorlar, spirt va moylar ta'sir qilmaydi, hidli (benzol) va xlorlangan (dixloreten) uglevodorodlarda eriysi. Bu shishadan yarimo'tkazgichlarni yedirish va yuvish uchun shaffof idishlar, yarimo'tkazgichlarni saqlash uchun konteynerlar, bokslar qismlari va so'rg'ich shkaflar tayyorlanadi. Eng yuqori ishlash temperaturasi 75°C .

Organik shishani sanoat turli qalinlikdagi varaqlar (tasmalar) va plitalar (blokklar) ko'rinishida chiqaradi. U mexanik usullar bilan $100-110^{\circ}\text{C}$ da issiq siqish bilan yaxshi ishlanadi, oson yelimlanadi. U elimlovchi moddalar tarkibiga kiritiladi.

Viniplast — polixlorvinil plastmassa, sariq, qo'ng'ir yoki kulrang rangli; kimyoviy jihatdan orgshishaga nisbatan bardoshliroq; kislotalar, ishqorlar va turli tuzlar eritmalariga nisbatan barqaror. Orgshisha qo'llangan maqsadlarda ishlatiladi. Eng yuqori ishlash temperaturasi 80°C .

Sanoat viniplastni varaqlar (tasmalar), quvurlar va sterjenlar ko'rinishida ishlab chiqaradi. U $120-140^{\circ}\text{C}$ da issiq qisish bilan va mexanik usullar bilan yaxshi ishlanadi. $120-140^{\circ}\text{C}$ da kavsharlash joyi qizdirib turilsa, viniplastni issiq havo oqimi yaxshi kavsharlaydi.

Polietilen (etilen polimeri) — sirtining rangi va xarakteri bo'yicha yuqori molekular parafinga o'xshaydi. Polietilen turli kislotalarga (quyuq nitrat kislotasidan boshqa), ishqorlarga, tuzlar eritmalariga va turli organik suyuqliklarga nisbatan barqaror. Polietilen foydalanish vaqtida turli ta'sirlar ostida eskiradi — sariq tus oladi va mexanik xossalarini yo'qotadi.

Polietilendan asosan eng toza reagentlarni va suvni saqlash, tashish va tarqatishda foydalaniladi. U kanistrlar, bankalar, ampulalar va h.k. tayyorlashda ishlatiladi. Eng yuqori ishchi temperaturasi 100°C . U mexanik ravishda yaxshi ishlanadi, 250°C gacha kavsharlash joyini qizdirganda bosim ostida kavsharlanadi.

Ftoroplast — oq rangli polimer modda. «Ftoroplast — 4» eng ko'p qo'llaniladi, kimyoviy barqaror. Viniplast ishlatilgan maqsadlarda ishlatiladi. Galliy, indiy, qalay, oltingugurt kabi oson suyuladigan moddalarni suyultirish va quyish uchun tigellar va qayiqchalar tayyorlashda qo'llaniladi. Ftoroplast vakuum qurilmalar va avtoklavlar, ventillar toza reagentlar va gazlar dozalovchilari qismlarini tayyorlashda ham ishlatiladi. Ftoroplastning eng yuqori ishchi temperaturasi 250°C .

«Ftoroplast — 4» sanoatda varaqlar (tasmalar), plitalar, quvurlar, sterjenlar va pardalar ko'rinishida tayyorlanadi. Boshqa plastmassalardan farqli ravishda ftoroplast qiziganda yumshab ketmaydi. Ftoroplast qoplama qatlami metall, shisha yoki keramik buyumlarni tashqi ta'sirdan saqlaydi.

Kvars shisha (kvars) — suyultirib qotirilgan kremniy (IV) oksidi SiO_2 dir. Tashqi ko'rinishidan oddiy shishadan farq qilmaydi. Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida kvars shisha qayiqchalar, tigellar va boshqalar uchun asosiy moddalardan biri. Undan yarimo'tkazgich moddalarni tozalash va sintez qilish uchun xizmat qiladigan apparatlarning qismlarini tayyorlanadi. Kvars shisha yarimo'tkazgichlarni yedirish va yuvish uchun kerak bo'lgan idishlarni tayyorlash uchun, shuningdek, yuqori darajada toza kislotalarni saqlaydigan idishlarni tayyorlash uchun ishlatiladi. Kvars buyumlarning ishchi temperaturasi 1250°C gacha, tigellar 1500°C gacha chiday oladi.

Kvars ko'p kislotalarga nisbatan yuqori kimyoviy bardoshlikka ega. Faqat bundan suyultiruvchi kislota istisno, u kvars bilan ta'sirlashib $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ silikagel hosil qiladi. Lekin, kvars ishqorlarda va ularning eritmalarida yaxshi eriydi.

Kvars ko'p elementlarga nisbatan befarq. Ammo, ishqoriy va ishqoriy-yer elementlari (Li, Na, K, Ca, Sr va h.k.), aluminiy, kremniy va b.bilan kvars ta'sirlashadi. U ba'zi oksidlar bilan ham ta'sirlashib, silikatlar hosil qiladi.

Kvarsning issiqlikdan kengayish koeffitsienti juda kichik, shuning uchun temperaturaning keskin o'zgarishlariga chidaydi. Masalan, muz ustida turgan kvars tigella suyulgan po'latni quyilsa, u yorilib ketmaydi. Kvarsning issiqlik o'tkazuvchanligi ham juda kichik.

Shaffof kvars shishadan quvurlar va tigellar yasaladi. Quvurlardan shisha puflash usullari yordamida yarimo'tkazgichlar texnologiyasida ishlatiladigan deyarli barcha buyumlar tayyorlanadi. Noshaffof kvarsdan ham ayrim kerakli buyumlar yasaladi.

Shaffof kvarsqa yuqori temperaturada (1800°C atrofida) kislorod-vodorod alangasi ta'sir qildirib ishlov beriladi. Kvarsni olmos diskli stanoklarda (dastgohlarda) kesiladi.

Kvars buyumlarni (qayiqchalar, tigellar, ampulalar, reaktorlar va h.k.larni) bevosita ishlatishdan oldin kimyoviy—issiqlik ishloviga duchor qilinadi. Yarimo'tkazgichlar suylmalarining kvars qayiqchalar sirtiga yopishib qolmasligi uchun ularga qo'shimcha ishlov beriladi. Buning uchun qayiqchanning ichki sirtiga amorf kvars (oq qurum) qatlami o'tkaziladi. Uni ishlangandan keyin kvars sirtiga yarimo'tkazgich suylmasi yopishishi juda kamayib ketadi.

Grafit uglerodning shakllaridan biri ekanligi ma'lum. Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida ishlatiladigan grafit qora rangdagi zich modda, kristall tuzilishiga ega, ko'p kislotalar, ishqorlar, organik erituvchilar va metallar bilan ta'sirlashmaydi. Ammo, u quyuq nitrat kislota bilan, yuqori temperaturada ba'zi metallar (temir, bor, kremniy va volfram va b.) bilan ta'sirlashib karbidlar (SiC va b.) hosil qiladi. $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$ gacha temperaturalarda grafit havoda oksidlanib, yonib ketadi.

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida monokristallarni (asosan, Choxralskiy usulida) o'stiradigan qurilmalar qismlari tayyorlanadigan modda sifatida grafit keng qo'llaniladi. Bu qismlar — isitgichlar, ekranlar, tigellar tagliklari va h.k. Grafitning vakuumda yoki inert gazlar atmosferasida (muhitida) ishchi temperaturasi 2500°C gacha.

Grafit buyumlar mexanik kesish usullari bilan tokarlik va frezerlik dastgohlarida oson tayyorlanadi.

Ishlatishdan oldin grafit buyumlar vakuum—termik ishlovga duchor qilinadi.

Grafit g'ovak tuzilishga ega. Kislorodli gazlar grafit ichiga kirib, uni butun hajmda oksidlaydi va buyumlarni ishdan chiqarishi mumkin. Gazlar kirishini kamaytirish maqsadida grafitni 1300°C da metan, toluol bug'lari muhitida bir necha soat tutib turiladi, bu gazlar (pirouglerodlar) grafit g'ovaklarini to'ldiradi.

Grafitning bir ko'rinishi shisha-uglerod bo'lib, undan tayyorlangan buyumlar yaltiroq qora sirtli, shishasimon ko'rinish va chig'anoqsimon siniqqa ega.

Shisha uglerod grafitdan ancha kam kimyoviy faollikka ega. U barcha kislotalar va ularning aralashmalariga nisbatan bardoshli. Uning havoda oksidlanish tezligi ancha past. Uni yarimo'tkazgichlar suyulmalari ho'llamaydi. Ammo shisha-uglerod buyumlar tozaligi grafit yoki kvarsnikidan pastroq. Bu uning qo'llanishini cheklaydi.

Konteyner moddalari sifatida nitridlar ham qo'llanishi mumkin.

Reagentlar

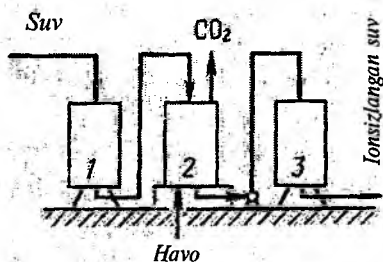
Yarimo'tkazgich moddalar texnologiyasida **suv**dan gidrokimyoviy tayyorgarlik amallarida keng foydalaniladi. Distillangan (tozalangan) suvdan konteynerlarni va yarim o'tkazgichlarni dastlabki yuvish, ionsizlangan suvdan oxirgi yuvish uchun foydalaniladi.

Distillangan suvni haydovchi qurilmalarda (apparatlarda) olinadi, bunda suv ko'p kirishmalardan tozalanadi. Bir necha marta tozalangan suv (distillyat)ning solishtirma qarshiligi 20°C da 0,1 dan 0,3 MOM gacha bo'ladi.

Deionlangan (ionsizlangan) suvni ionalmashinuvchi **smolalar** bilan to'ldirilgan **kolonka** (nay) orqali distillangan suvni o'tkazib olinadi. Bu smolalar kislota va ishqor guruhlariga ega bo'lgan katta polimer organik molekularlar uyumidan iborat bo'ladi, ular ionlarni tutib qola oladi.

Quruq havoli smolalarning 1 kilogrammi distillangan suvning 1200-1500 litr hajmini, oddiy suv quvuri suvining 200 litr hajmini ionlardan tozalay oladi.

Xlorid kislota - HCl ning suvdagi



II.16—rasm. Ionsizlangan suv olinadigan qurilma:

- 1 — kationitli;
- 2 — gazzizlantiruvchi;
- 3 — anionitli ustun.

eritmasi — rangsiz, havoda tutovchi shaffof suyuqlik; metallar, oksidlar, gidroksidlar va tuzlar bilan oson reaksiyaga kirishadi. Uning zichligi 1,17-1,19 g/sm³, qaynash temperaturasi 84°C, suvda 20°C da eruvchanligi 720 g/l.

Ftorli vodorod (HF)ning suvdagi eritmasi—rangsiz, shaffof suyuqlik bo'lib, o'tkir hidli, havoda tutaydi, metallar bilan ta'sirlashib, ftoridlar hosil qiladi. Bu eritma bilan oson ta'sirlashadi, shisha va boshqa silikatlarni buzadi. Zichligi 0,94 g/sm³, qaynash temperaturasi 19°C.

Nitrat kislota (HNO₃) — rangsiz yoki ozgina sariqroq shaffof suyuqlik, o'tkir hidli; yorug'da yoki qizdirilganda H₂O, O₂, NO₂ larga parchalanadi.

Nitrat kislota eng kuchli oksidlovchilardan biri bo'lib, oltin, platina, iridiy va rodiydan boshqa deyarli barcha metallar bilan reaksiyalarga kirishadi. Aluminiy, temir va xrom suyultirilgan nitrat kislota bilan o'zaro ta'sirlashadi, ammo quyuq nitrat kislota bilan ta'sirlashmaydi — metall sirtida yupqa oksid qatlami hosil bo'ladi. U suvda yaxshi eriydi, 84°C da qaynaydi.

Sirka kislota (CH₃ COOH) — o'ziga xos o'tkir hidli rangsiz shaffof suyuqlik; suvda yaxshi eriydi; kuchsiz kislota. Suvsiz sirka kislota — qattiq modda, muzga o'xshaydi, 16°C da suyuladi, 118,1°C da qaynaydi; havoda yonadi — chaqnash temperaturasi 38°C. Sirka kislotasining to'yingan bug'i bilan havo aralashmasining portlash xavfi bor. Portlashning pastki chegarasi 35°C, yuqorigisi 76°C; zichligi 82-550 mg/l oralig'ida.

Bor kislota (H₂BO₃) — hidi yo'q, rangsiz. Zichligi 1,44 g/sm³, 70°C da B₂O₃ anhidrid va suvga parchalanadi.

Pergidrol — vodorod peroksid (H₂O₂)ning 30%li suvli eritmasi. U oson parchalanadigan birikma, kuchsiz kislota xossasiga ega, ammo kuchli oksidlash xususiyatiga ega.

Kaliy gidroksidi — yemiruvchi kaliy (KON) — rangsiz juda nam yutuvchi kristalldir, kislotalarni neytrallab tuzlar hosil qiladi; suvda yaxshi eriydi—20°C da uning eruvchanligi 1100 g/l, zichligi 2,04 g/sm³, suyulish temperaturasi 360°C, qaynashi 1324°C da.

Natriy gidroksid —yemiruvchi natriy, kaustik soda (NaOH) - qattiq oq modda; kislotalarni neytrallab tuzlar hosil qiladi, suv bug'larini va CO₂ ni tez yutadi, suvda yaxshi eriydi — 20°Cda uning eruvchanligi 1000 g/l, zichligi 2,13 g/sm³, suyulish temperaturasi 328°C, qaynashi 1388°C da.

Gazlar

Xlor (Cl_2) – o'tkir hidli yashil-sariq gaz; xona temperaturasida 6,62 at. bosim ostida suyuladi. Gazsimon xlorning zichligi $3,16 \cdot 10^{-3} \text{ g/sm}^3$, suyug'iniki $-1,45 \text{ g/sm}^3$.

Xlor uglerod, kislorod va azotdan boshqa ko'p elementlar bilan oson o'zaro ta'sirlashadi. Yorug'da va qizdirishda vodorod bilan portlab birikadi. Xlorsilanlar va germaniy tetraxloridini sintez qilishda xomashyo sifatida ishlatiladi.

Gazni suvdan tozalash uchun uni silikagel to'ldirilgan tuzoqlar orqali o'tkaziladi.

Azot (N_2) – rangsiz, hidsiz gaz; zichligi gazsimon holatda $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ g/sm}^3$, suyuq holatda $0,891 \text{ g/sm}^3$. Suyuq azotning qaynash temperaturasi 77,2 K.

Azotdan inert muhit sifatida keng foydalaniladi, yonuvchi va zaharlovchi gazlar bo'lgan apparatlarni shamollatish uchun, yong'inni o'chirish va boshqa maqsadlarda qo'llaniladi. Suyuq azot qurilmalarni sovitish uchun ishlatiladi.

Toza holdagi vodorod, argon va geliy kabi gazlar yarimo'tkazgichlar texnologiyasida eng kerakli moddalar vazifasini o'taydi.

Vodorod (H_2) – rangsiz, yonuvchi gaz, hidi yo'q, yeng engil gaz – zichligi $9 \cdot 10^{-5} \text{ g/sm}^3$; ko'p elementlar bilan o'zaro ta'sirlashadi, ko'p suyuq metallarda eriydi, kislorod bilan faol ta'sirlashadi.

0,1 % (hajm bo'yicha)dan kam suvli bo'lgan vodoroddan xlorli vodorodni sintez qilishda foydalaniladi. Toza vodorod xlorsilan va germaniy tetraxloridlarni tiklashda ishlatiladi, ba'zan esa elementar yarimo'tkazgich monokristallarni o'stirishda himoyalovchi muhit vazifasini bajaradi.

Ko'p miqdorda vodorodni suvni elektroliz qilish yo'li bilan olinganda, unda ancha suv bug'i bo'ladi. Uni maxsus usullar bilan quritiladi.

Vodorodni kislorod kirishmasidan yaxshi tozalashni $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ reaksiyasiga asoslangan katalitik usulda amalga oshiriladi. Katalitik tozalashdan o'tgan vodorodni yana ham tozalash uchun uni past temperaturali adsorbsiyaga duchor qilinadi.

Yuqori darajada toza vodorod oz miqdorda ba'zi metallarning qizdirilgan yupqa varaqlari (qatlamlari) orqali diffuziyalash usulida olinadi, chunki vodorodning diffuziya tezligi bu holda kislorodnikidan (masalan yupqa nikel qatlamidan o'tganda) 10^8 marta ortiqdir. Binobarin, bu usul vodoroddagi kislorodni shuncha marta kamaytiradi.

Inert gazlar — argon va geliy — yarimo'tkazgichlar monokristallarini o'stirishda himoyalovchi muhit sifatida qo'llaniladi.

Inert gazlarni kislorod kirishmasidan tozalash kislorodni vodorod bilan $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ reaksiya bo'yicha bog'lab (suv hosil qilib) amalga oshiriladi. Buning uchun tozalanadigan gazga 3-4 % (hajmiy) vodorod qo'shiladi.

Tozalangan gazlar iste'mol qilinadigan joyga zanglamaydigan po'lat yoki qizil misdan yasalgan quvurlar bo'ylab yuboriladi. Ishda tanaffus bo'lib qolganda bu yo'lni (quvurni) toza quruq inert gaz bilan to'ldirib qo'yiladi.

Nazorat savollari

1. Toza modda tushunchasi qanday?
2. Toza moddalar bilan qanday muomala qilish kerak?
3. Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida qanday asosiy moddalar ishlatiladi?
4. Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida qanday yordamchi moddalardan foydalaniladi?
5. Konteynerlar qanday moddalardan tayyorlanadi?
6. Distillangan va deionlangan suv qanday vazifalarni bajaradi?
7. Kislotalar va boshqa kimyoviy moddalar qanday ishlarda qo'llaniladi?
8. Gazlar qanday amallarni bajarishda ishlatiladi?

6-BOB. POLIKRISTALL VA AMORF YARIMO'TKAZGICHLAR TEXNOLOGIYASI

Polikristall (poli – ko'p) ko'p monokristall (mono – bir) donalardan tashkil topgan kristalldir. Toza polikristall bevosita yarimo'tkazgichli asboblarda, katta integral mikrosxemalar ishlab chiqarishda qo'llanadi yoki yarimo'tkazgich monokristallar olishda ishlatiladi.

Polikristall yarimo'tkazgichlarni o'stirib olish uchun jihatdan qiziqarliidir: 1) monokristallar va epitaksial tuzilmalarga nisbatan polikristall quyma yoki parda ko'rinishida yarimo'tkazgich olish ancha sodda va unumdor texnologik jarayondir, bu esa yarimo'tkazgich modda va uning asosida tayyorlanadigan asboblarni ancha arzonlashtiradi; 2) bunday yarimo'tkazgichlarda donalar chegaralari maxsus elektrik va rekombinatsion xossalargaga ega va ulardan bir qator asboblarda foydalanish mumkin; 3) kristall panjarasining tuzilishi jiddiy nuqsoni bo'lmish donalar chegarasi samarali ichki getter vazifani o'tab, moddaning asosiy hajmini qoldiq kirishmalar va xususiy nuqtaviy nuqsonlardan tozalashga yordamlashadi. Bu xossa elektron qurilmalarning temperatura o'zgarishiga barqarorligini va radiatsion bardoshligini oshiradi.

Amaliy qo'llanish uchun ko'proq quymalar emas, balki polikristall qatlamlar ma'qul hisoblanadi. Eng ko'p qo'llaniladigan kremniy polikristall qatlamlardan integral sxemalarning tarixiy qismlari – rezistorlar, diodlar, maydoniy va qo'shqutbli tranzistorlar tayyorlashda foydalaniladi.

Yerda ishlatiladigan arzon quyosh batareyalari yaratish uchun polikristall qatlamlardan foydalanilmoqda. Agar dona o'lchami zaryad tashuvchilar diffuzion uzunligidan ancha katta bo'lsa, bu holda hajmdagi rekombinatsion jarayonlarga va quyosh elementar batareyalari ishiga kam ta'sir ko'rsatadi. Masalan, kremniyning polikristall pardasida ayrim kristallchalar(donalar) o'lchami ~1 mm bo'lsa, unda Quyosh nurlarini yutuvchi qatlam qalinligi 50-100 mkm chamasida bo'ladi. Polikristall pardalar arzon tagliklar (kvars, shisha, grafit, alund, molibden va h.k.) asosida olinib, yetarlicha samarali quyosh batareyalari tayyorlash uchun ishlatiladi. Ularning foydali ish koeffitsienti 12%-15% atrofida.

Kremniyning polikristall qatlamlarini olish uchun tarkibida kremniy bo'lgan moddalar – monosilan, dioxsilan, trioxsilan va tetraoxsilan uchuvchan moddalar sifatida qo'llanib, gaz fazadan kristallash

usullaridan foydalaniladi. Eng past temperaturada monosilanni termik parchalash usuli bo'lib, bunda tashuvchi gaz sifatida geliy ishlatiladi. Bu usul 625-725°C da boshqariluvchi katta o'lchamli donalardan tuzilgan kristall pardalar olish imkonini beradi. Lazer nurlanishi ta'sirida SiH₄ ni parchalaganda ishchi temperaturani 120-150°C gacha pasaytirish mumkin, ammo bunda dona o'lchami 0,5-1 mkm dan oshmaydi. Kremniyning qalin polikristall qatlamlari xlorsilanlarni yuqori temperaturada vodorod bilan tiklash jarayonlarida hosil qilinadi.

Galliy arsenidi GaAs va boshqa A^{III}B^V birikmalar polikristall qatlamlari olishning eng ilg'or usuli mos gidrid jarayon bo'lib, u past temperaturada o'stirishni, dona o'lchamini qaytalab hosil qilishni va pardalarning yuqori darajada birjinsligini ta'minlaydi. Pardalarni metall, grafit, alund va kvarts shishadan tayyorlangan tagliklarda o'stirish mumkin. Bunday pardalarni vakuum va plazma changlatishi jarayonlari orqali hosil qilish usullari keng tarqalgan.

Polikristalldagi donalar o'lchami muhim kattalik. U o'tqazish temperaturasi, gaz faza tarkibi, kristallanish tezligi va taglik turiga bog'liq. Temperatura ortishi donalarning o'rta o'lchami kattayishiga olib keladi. Pardalar qalinligi ortishi ham donalar o'lchamini kattalashtiradi. Donalar o'lchami kiritilgan kirishma tabiatiga ham bog'liq bo'ladi. Kremniy polikristall qatlamlarning afzal o'sish yo'nalishlari <100> va <111>.

Polikristall pardalar donalari o'lchami va yo'nalganligini boshqarish uchun qayta kristallash jarayoni o'tkaziladi, bunda suyulish temperaturasidan pastda mazkur moddaga termosilov beriladi. Kremniy holda bu jarayon 1250-1400°C da o'tkaziladi. 1350°C dan yuqorida bir necha soat qizdirilsa, qatlamdagi donalar o'lchami 3-4 mkm dan 20-30 mkm gacha yetadi. Yupqa qatlamlar qayta kristallanishi uchun lazer yoki elektronlar nuri bilan qizdirish va boshqa usullar qo'llaniladi. Bu jarayonda donalar asosan <111> yo'nalishda o'sa boradi. Donor kirishmalarni katta zichlikda kiritish rekristallash boshlanishi temperaturasini pasaytiradi va donalar o'sishini tezlashtiradi, buning sababi — legirlangan moddada vakansiyalar ortib ketishi tufayli o'z diffuziya tezligining ortib ketishidir. Kerakli parametrlarga ega bo'lgan polikristall qatlamlarni amorf tagliklarga o'tkazilgan amorf va mayda kristall qatlamlarni qayta kristallash yo'li bilan olinishi ham mumkin, ularning sirtida kvadrat yoki uchburchak shaklli to'rlar ko'rinishida maxsus relyef hosil qilingan bo'ladi ("grafoepitaksiya"). Bu holda dastlab

o'tkazilgan pardada torgina suyuqlan zona hosil qilinadi, uni yuza bo'yicha siljitib boriladi. Taglik sirtiga o'tqazilgan relef qayta kristallash jarayonida muayyan yo'nalishli, birday o'lchamli donalar hosil bo'lishini ta'minlaydi.

Polikristall qatlamlardan asboblari tayyorlash uchun ularga kerakli kirishmalar kiritiladi. Eng ko'p tarqalgan usullar-qatlamlar olish jarayonida gaz fazadan legirlash va ionlar implantatsiyasi (kiritish) usullaridir. n -tur polikristall kremniy qatlami olishda legirlovchi kirishma sifatida arsin, fosfin, p -tur olishda — diboran ishlatiladi. P, As, Sb, va B ionlarini kiritishda ionlar energiyasi 30÷60 kEv va dozasi 10^{11} ÷ 10^{15} sm⁻² bo'ladi, keyin $\approx 1000^\circ\text{C}$ da qizdiriladi («kuydiriladi»). Yuqori omli, yarim izolatsiyalovchi kremniy polikristall qatlamlarni olish uchun kislorod kiritish usuli qo'llaniladi.

Qatlamlarning solishtirma qarshiligi kiritilgan kirishma zichligiga g'ayrioddiy bog'langan. Ko'p hollarda polikristall qatlamlardagi zaryad tashuvchilar zichligi kirishma zichligidan ancha marotaba kichik. Bu munosabat donalar o'lchamiga bog'liq va bu o'lcham katta bo'lganda monokristall qatlamlardagisiga yaqin bo'ladi. Zaryad tashuvchilar harakatchanligi va yashash vaqti ham dona o'lchamiga bog'liq. Chegaralar bo'ylab kirishmalar segregatsiya darajasi uning taqsimoti va diffuziya koeffitsiyentlariga bog'langan bo'ladi. Kirishmalar segregatsiyasi chegaradagi mahalliy nuqsonlar markazlari zaryad holatlariga muhim ta'sir ko'rsatadi. Zaryad holatlari o'zgarishi donalar orasidagi potensial to'siqlar balandligini o'zgartiradi, binobarin, polikristall qatlamda zaryad tashuvchilar qo'shimcha ta'sir qiladi. Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi va yashash vaqtining donalar o'lchamiga bog'lanishi sababi chegaralarning elektronlar va kovaklar sochilishi va rekombinatsiyasi jarayonlariga qo'shadigan hissasidir.

Polikristall qatlamlarda asosiy tuzilish nuqsonlari donalar chegaralaridir. Chegaralar tuzilishi masalasi ham oxirigacha aniqlangani yo'q. Agar ikki dona yo'nalganligi farqi 1° dan oshmasa, bu holda ularning chegarasini kichik burchakli chegara deyiladi. Chegaradagi dislokatsiyalar zichligi shu burchakka bog'liq bo'lib, burchakning oshishi bilan u ham oshib boradi. Yo'nalganlik farqi $3\div 5^\circ$ bo'lganda chegarada ayrim dislokatsiyalarni payqab bo'lmaydi.

Donalar chegaralarida holatlar zichligini va potensial to'siqlar balandligini kamaytirish uchun polikristall qatlamlarga (to'yinmagan kimyoviy bog'lanishlarni to'ydiradigan) tez diffuziyalanuvchi kirishmalar

kiritiladi. Pardalarga biqsimi razryad plazmasida vodorod muhitida $\approx 400^{\circ}\text{C}$ da ishlov berilganda vodorod atomlari polikristall qatlamga kiritiladi. Bunda vodorod asosan donalar chegaralari bo'ylab diffuziyalanadi va hajmda hech qanday o'zgarishga sababchi bo'lmaydi. Bunday polikristall kremniy qatlamlari $\approx 320^{\circ}\text{C}$ gacha qiziganda ham uzoq vaqt barqaror xossalarga ega bo'ladi. Mazkur ishlov berishda chegaralarning rekombinatsion faolligi keskin kamayadi va zaryad tashuvchilarning yashash vaqti ortadi. Bunday kremniy asosida tayyorlangan quyosh batareyalari FIK monokristall namunalarnikiga yaqinlashadi. Galliy arsenidi polikristall pardalarda donalararo chegaralar faolligi ularni anod oksidlantirish jarayonida pasaytiriladi.

Bir qator kirishmalar polikristall kremniy qatlamlariga kiritilganda chegaralarning potensial to'sig'i balandligi va elektrik qarshiligi oshadi. Bular: kislorod, flor, selen, azot. Donalar chegarasi qarshiligi flor bilan plazmaviy ishlov berilgandan so'ng ayniqsa keskin (250 marta) ortadi. Bunday ishlov berish integral sxemalarning (IS) varistorlari, kondensatorlari va boshqa elementlarini yaratishda qo'llaniladi.

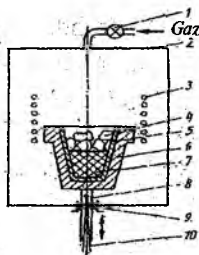
PbS, PbTe, PbSe polikristall pardalari IQ nurlanishni samarali qabullovchilar (detektorlar) sifatida anchadan beri muvaffaqiyat bilan foydalanilib kelinmoqda. $\text{Cu}_2\text{S}-\text{CdS}$, $\text{Cu}_2\text{S}-\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$, $\text{CuInSe}_2-\text{CdS}$ polikristall geterotuzilmalar asosida 8÷10% FIK ga ega bo'lgan quyoshiy elementlar (batareyalar) ishlab chiqarilmoqda. GaAs polikristalli asosidagi quyosh batareyalaridan yer sharoitida foydalanish kengaymoqda.

Polikristall qatlamlar fizikasi va texnologiyasining rivoji sari elektron texnikada bunday moddalarga talab oshib borayotir.

Yarimo'tkazgich moddalarni polikristall sterjenlar (tayoqchalar) yoki quymalar shaklida olish uchun **sintez**, **ajratish** va **tiklash** jarayonlari qo'llanadi.

6.1. Polikristallarni sintez qilish.

Kimyoviy reaksiyalar yo'li bilan oddiy moddalardan murakkab moddalarni olish jarayoni **sintez** deyiladi. Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida elementar yarimo'tkazgichlarning oraliq birikmalarini, shuningdek, yarimo'tkazgich birikmalarini olish uchun sintez qo'llanadi.



II.17—rasm. Indiy va galliy arsenidlarini flyus qatlami ostida tashkillovchilarni birga suyultirish usulida sintezlash qurilmasi.

1—ventil, 2—yuqori bosim kamerasi (avtoklav); 3—yuqori chastotali induktor; 4—flyus (bor angidridi); 5—kvars tigeli; 6—tigelning grafit tagligi; 7—birlashma tarkiblovchidan aradashmasi; 8—shtok; 9—jipslaqich; 10—termojuft.

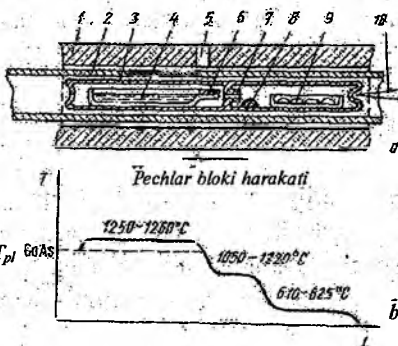
Yarimo'tkazgich birikmalarini sintez qilishning asosiy usuli to'g'ri sintez usuli bo'lib, unda birikmaning A va B tarkiblovchilari

$$xA^n + yB^m = A_x^n B_y^m \quad (II.30)$$

reaksiyalar bo'yicha ta'sirlashadi. Bunda x va y — tarkiblovchilar ulushlari, n va m — elementlar guruhi sanasi.

Parchalanmaydigan birikmalarni olishda sintezni birikma tarkiblovchilarini birga qotishtirish yo'li bilan amalga oshiriladi. Masalan, indiy antimonidi $InSb$ indiy va surma elementlaridan mazkur usulda olinadi. Parchalanadigan birikmalarni olishda tarkiblovchilarni birga qotishtirish suyuq flyus (qoplovchi) qatlami ostida bajarilishi mumkin, bunda flyus ustida bosimi uchuvchan tarkiblovchining bug'i bosimidan katta bo'lgan inert gaz muhiti bo'ladi. Shunday sharoitda parchalanadigan birikma dastlab suyulmasi, keyin esa kristalli olinganda uchuvchan tarkiblovchi isrof bo'lmaydi. Flyus sifatida bor angidridi (B_2O_3) faqat arsenidlarni sintezlashda qo'llanadi, bunda uchuvchan tarkiblovchi arsenik (As) bo'ladi, u $817^\circ C$ da suyuladi, bor angidridi esa, $600^\circ C$ da suyuladi, demak, arsenik bor angidridi suyuq qatlami ostida bo'lib, uchib keta olmaydi.

Uchuvchan tarkiblovchisi past suyulish temperaturasi ega bo'lsa,



II.18—rasm. Galliy arsenidi mono-kristalini sintezlash va brijmen usulida o'stirish chizmasi: a —kovsharlangan ampulada; b —pechlar bloki uzunligi bo'yicha temperatura taqsimoti:

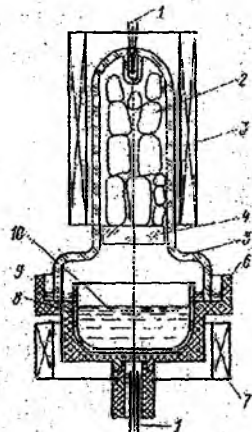
1—ko'p bo'lmali pechlar bloki; 2—kvars truba; 3—kvars ampula (reaktor); 4—galliy suyulmasi solingan kvars qayiqcha; 5—ko'rish derazasi; 6—monokristal; 7—kapilyar naycha (diffuzion zatvor); 8—uchuvchan Ga_2O ($Ga+Ga_2O_2$ aralashma); 9—arsenikli (As) kvars qayiqcha; 10—termojuft.

masalan qizil fosfor ($t_{\text{suyul}} \approx 590^{\circ}\text{C}$), bu birikmalarni yuqoridagi usul bilan sintezlab bo'lmaydi.

InAs va GaAs arsenidlarni dastlabki tarkiblovchilarni birga qotishtirish yo'li bilan sintezlashni avtoklavda yuqori chastotali qizdirish qo'llanib amalga oshiriladi (II.17-rasm).

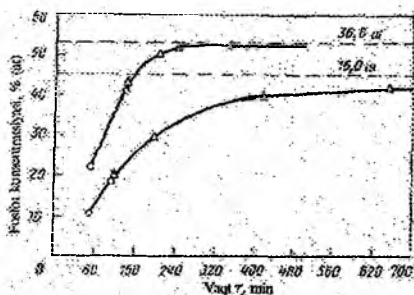
Buning uchun grafit taglikda turgan kvarts tigelga (atomlar soni bo'yicha) bir xil miqdorda turgan kvarts va metall (indiy va galliy), ular ustiga bor angidridi qatlami joylanadi. Zichlantirish va avtoklavni (yuqori bosim kamerasini vakuumlantirgandan so'ng tigelda inert gazning yuqori bosimi hosil qilinadi. Keyin tigel o'rnatilgan taglikni yuqori chastotali induktorga asta-sekin kiritib boriladi. Taglikning qizigan yuqori qismidan ajralgan issiqlik hisobiga flyus (B_2O_3) suyuladi va birikma tarkiblovchilari aralashmasini qoplaydi. Endi tigel o'rnatilgan taglikni induktorning o'rtasiga joylanadi va uni arsenik suyuladigan temperaturagacha qizdiriladi. Suyulgan arsenik suyulgan metall bilan ta'sirlashadi, reaksiyaga kirishadi, bunda ajralgan issiqlik sintezlanuvchi birikmaning temperaturasini suyulish nuqtasigacha ko'tarish uchun yetarli bo'lishi kerak. Natijada birikmaning suyulmasi hosil bo'ladi, uni sovitib birikmaning polikristall quymasi olinadi.

Biroq ko'pchilik hollarda, uchuvchan tarkiblovchi bug'larining uchmovchan tarkiblovchi suyulmasi bilan ta'sirlanishi yo'li bilan parchalanuvchi yarimo'tkazgich birikmalarni sintez qilinadi. Bu jarayonni jips yopiq apparatlarda amalga oshiriladi. Ular kavsharlangan kvarts ampulalardan uchuvchan tarkiblovchili reaktor bilan uchmovchan tarkiblovchi joylangan tigel birlashmasidan iborat bo'ladi (II.18 va II.19-rasm).



II.19-rasm.

Parchalanib ketadigan yarimo'tkazgich birikmalarni sintezlash qurilmasi: 1—termojuft; 2—uchuvchan tashkillovchi (P, As); 3—elektr isitgich; 4—kvarts plastinka; 5—kvarts reaktor; 6—tigelning grafit tagligi; 7—tigelni istuvchi; 8—kvarts tigel; 9—flyus to'ldirilgan gidravlik zatyor kanali; 10—uchmovchan tashkillovchi (indiy, galliy) suyulmasi.



II.20-rasm. Fosfor bug'ining
indiy suyulmasi bilan o'zaro
ta'siri jarayoni kinetikasi

Mazkur sintez usulida uchmovchan tarkiblovchi In, Ga suyulmasini sintezlanuvchi birikmaning suyulish temperaturasiigacha qizdirladi, so'ngra unga uchuvchan tarkiblovchi bug'lari beriladi. Uchuvchan tarkiblovchi bug'i kerakli bosimini o'rnatish uchun boshqariladigan temperatura tegishliicha tanlanadi. Muayyan vaqt o'tgach hosil bo'lgan birikma suyulmasini yo sovutib kristallanadi, yo undan monokristall o'stiriladi.

Sintez jarayoni vaqtini

$$\tau = -2,303V \cdot \lg \frac{C_p - C}{C_p - C_0} (F\alpha)^{-1} \quad (\text{II.31})$$

ifoda bo'yicha hisoblanadi. Bunda C_p, C_0 va C —mos ravishda, ishchi suyulmada muvozanatliy, boshlang'ich va hisoblangan kirishma zichliklari, F —suyulma bilan birinchi faza kontakti yuzi, sm^2 , α —bug'lanish (ta'sirlashish) koeffitsienti, sm/s .

Bug'lanish koeffitsienti suyulmadan bug'lanayotgan yoki suyulma yutayotgan uchuvchan moddaning suyulma-atmosfera chegarasidan o'tish tezligidir.

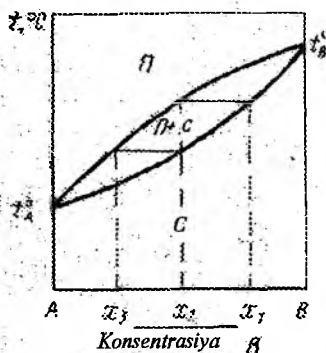
Parchalanadigan yarimo'tkazgich birikmaning uchmovchan tarkiblovchining uchuvchan tarkiblovchi bug'i bilan ta'sirlashishiga asoslangan sintez qilish kinetikasi II.20-rasmda tasvirlangan.

Uchuvchan tarkiblovchi bug'i bosimi oshgan sari sintez tezligi osha borib, o'zgaras qiymatga erishadi, bunda uchuvchan tarkiblovchining suyulmadagi zichligi C uning C_0 muvozanatliy zichligiga yaqin keladi. Bu tushunarli, chunki, jarayonning harakatlantiruvchi kuchi $C_p - C$ ayirma bo'ladi.

Sintezni tezlantirish uchun [(II.30)ga qarang] suyulmadagi kirishmaning C_p muvozanatliy zichligini oshirish kerak, F kontakt yuzini, α —bug'lanish koeffitsientini oshirish lozim.

Yuqorida bayonlangan ikki usulda sintez qilish kvazijips apparatlarda amalga oshirilganda katta unumga erishiladi, mahsulot narxi past bo'ladi.

Ammo, germetik (jips yopiladigan) apparatda sintez qilinsa kvazigermetik (kvazijips) apparatdagidan ko'ra tozaroq mahsulot olinadi. Bu holdagi amallar mukammal tuzilishli monokristall o'stirish uchun zarur (bir fazali) material olish bilan bir vaqtda uni ba'zi kirishmalardan tozalash imkonini beradi.



6.2. Ajratish jarayonlari

II.21-rasm.

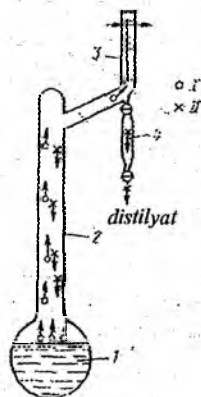
Ikki uchuvchan moddalar hosil qilgan tizimning holat diagrammasi (C – suyuqlik, B – bug')

Moddalarni tozalash, ya'ni ularni asosiy modda va kirishmaga ajratish uchun turli jarayonlar qo'llanadi.

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida foydalaniladigan fizik-kimyoviy ajratish usullari asosida muvozanatdagi ikki faza tarkibidagi farq yotadi. Masalan, muvozanatdagi suyuqlik va bug' tarkibidagi farq distillatsion jarayonlarga asos bo'ladi (sodda haydash va tozalash), muvozanatdagi kristall va suyuqlar tarkibidagi farq kristallanish jarayonlari asosi bo'ladi (yo'nalgan kristallanish), eritma va sorbentdagi kirishmalar farqi ionalmashinuv ajratish usullari asosida yotadi, ekstraksion usullarda esa, chegaradosh ikki aralashmaydigan suyuq fazalarda kirishma va tozalanuvchi modda eruvchanligi orasidagi farqdan foydalaniladi.

Bu usullardan elementar yarimo'tkazgichlar texnologiyasida ularni xlorid birikmalardan tozalash rektifikatsiya usuli eng ko'p qo'llanadi. Rektifikatsiya jarayoni uzluksiz boradi, yuqori unumli, moddalarni chuqur tozalaydi. Suyuq eritma holida ikki A va B tarkiblovchili tizim holatlar diagrammasining (II.21-rasm) yuqorisi bug' sohasi, pasti suyuqlik sohasi bo'ladi. Ular orasida ikki fazali soha joylashgan bo'lib, unda ikkala faza ham mavjud bo'ladi. Yuqoridagi egri chiziqni kondensatsiya (quyuqlashish) egri chizig'i deyiladi, pastkisi esa qaynash egri chizig'i deyiladi.

Rektifikatsion (tozalash) kolonnasi (ustuni) II.22-rasmda tasvirlangan. Rektifikatsiya jarayonida ajratiladigan suyuqliklarni aralashmasi bo'lgan, isitiladigan I idish – kubdan bug' ko'tariladi, 3



II.22—rasm.

Rektifikatsion kolonna

(ustun) chizmasi.

I—bugʻ; II—suyuqlik; 1 — kub, 2—ustunning ajratuvchi qismi; 3—sovitgichli kondensator, 4—distillat toʻplovchisi.

sovitiladigan kondensatorga yetib borib suyuladi va kolonnaning pastki 4 qismiga oqib tushadi.

Bu ikki qarama-qarshi yoʻnalgan oqimlar uchrashadi. Bunda issiqlik almashinuv natijasida bugʻ yengil qaynaydigan, suyuqlik esa qiyin qaynaydigan tarkiblovchilar bilan boyiydi, binobarin bu tarkiblovchilar rektifikatsion kolonnaning qarama-qarshi qismlarida toʻplanadi: yengil qaynaydigan yuqorigi qismda, qiyin qaynaydigan pastki qismida toʻplanadi.

Rektifikatsion kolonna uzluksiz ishlab turganida uning maʼlum joyiga dastlabki mahsulot beriladi, yuqorisidan yengil qaynovchi tarkiblovchi, pastidan esa qiyin qaynovchi tarkiblovchi olib turiladi.

Miqdoran eritmaning A va B tarkiblovchilarga ajratilish jarayonining samaradorligini ajratish koeffitsienti α_A - tavsiflaydi (A tarkiblovchi-kirishma zichligi

oz):

$$\alpha_A = x_2 / x_1, \quad (\text{II.32})$$

bunda x_1 , x_2 - A tarkiblovchining suyuqlik va bugʻdagi miqdori. α_A - ajratilayotgan moddalar xossalriga bogʻliq.

$$\alpha_A = P_A / P_B \quad (\text{II.33})$$

bunda P_A va P_B - A kirishma va B asosiy modda toʻyingan bugʻlari parsial bosimlari. α_A koeffitsient I dan qancha koʻp farq qilsa, tozalash jarayoni shuncha samarali boʻladi. α_A rektifikatsion kolonna tuzilishi xususiyatlariga ham bogʻliq, uni ajratish omili $F = X_A^0 / X_B^0$ koʻrinishida ifoda qilinadi. Haqiqiy sharoitda, bugʻ va suyuqlik oqimlari muvozanatda boʻlmaydi, shuning uchun tasvirlanayotgan qurilmaning samaradorligi unda borayotgan massalar va issiqlik almashinuv jarayonlariga birinchi navbatda bogʻliq boʻladi.

Rektifikatsion kolonnalarni yaxshilash uchun bir qancha takomillashtirishlar amalga oshirilgan (taretkali, qalpoqli, pardali rektifikatsion kolonnalar).

Rektifikatsiya moddalarni chuqur tozalashning eng ko'p tarqalgan usullaridan biridir. Uning qo'llanish temperaturalari sohasi 4,2 K dan to 1300 K gacha. Uning yordamida birikmalarnigina emas, balki elementlarni (vodorod, inert gazlar, oltingugurt, selen, tellur, fosfor, rux, kadmiy, simob va b.ni) tozalash mumkin.

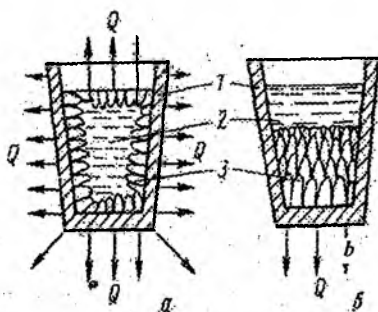
Kristallizatsion tozalash.

Yo'nalgan kristallanish usullarida kristall suyulma chegarasida ajraladigan yashirin suyulish issiqligi Q bir yo'nalishda — kristallanish fronti tekisligiga tik yo'nalishda olib ketiladi. (II.23, -rasm). Normal (oddiy) kristallanishda issiqlik suyulmadan hamma tarafga tarqaladi. (II.23, a-rasm). Kristallarni o'stirishda ularda kirishmalar eruvchanligi kichik bo'lganligi tufayli kirishmalarning ko'p qismi suyulmada qoladi, kristallga kam o'tadi.

Tozalash hodisasi shundan iborat. Bunday tozalashni ko'p marta takrorlab, kerakli tozalik hosil qilish mumkin.

C_0 zichlikli B kirishmasi bo'lgan A toza modda suyulmasi kristallanish jarayonini qaraylik (II.24, a-rasm). Temperatura biror kattalikdan to likvidus chizig'idagi 1 nuqttagacha pasayganda T_{1-2} temperaturada suyuq fazadan N_{1-2} tarkibli birinchi kristall hosil bo'ladi, bu solidus chizig'idagi 2 nuqtaga mos keladi. Suyulma tarkibi bu paytda dastlabkisiga, ya'ni C_0 ga to'g'ri keladi.

Kristallanish jarayoni davom etgan sari, ya'ni temperatura 1 nuqtadan 3 nuqttagacha pasayganda qattiq faza tarkibi solidus chizig'i bo'yicha 2 nuqtadan 3 nuqttagacha, suyuq faza tarkibi esa — likvidus chizig'i bo'yicha 1 nuqtadan 4 nuqttagacha o'zgaradi. T_{3-4} temperaturada kristallanish jarayoni tugallanishi paytida C_{3-4} tarkibli suyulmaning oxirgi tomchisi yo'qoladi.



II.23 — rasm. Tigeldagi suyul — maning normal (a) va yo'naltirilgan (b) kristallanishi chizmasi (Q — olib ketilayotgan issiqlik):
1 — tigel; 2 — suyulma; 3 — kristall.

suyulmaning kristallanishi mobaynida K_0 muvozanatliy koeffitsientdan boshqacha bo'ladi, uni *effektiv taqsimot* (effektiv segregatsiya) *koeffitsienti* deyiladi va

$$K_{eff} = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \exp(-\nu \delta / Ds)} \quad (II.34)$$

ko'rinishda ifodalanadi, bunda ν – kristallanish tezligi. Kichik tezliklar oralig'ida $K_{eff} = K_{eff}(\nu)$ chiziqli funksiya bo'ladi, ya'ni $K_{eff} = K_0(1 + \nu \delta / Ds)$.

K_{eff} yana kirishmaning suyulmadagi zichligi C_s ga ham bog'liq. Bu bog'lanish $C_s > 10^{18} - 10^{19} \text{at/sm}^3$ yoki massa bo'yicha $10^{-3} - 10^{-4}\%$ bo'lganida vujudga keldi.

K_{eff} koeffitsientga o'sayotgan kristallning kristallografik yo'nalishi ta'sir ko'rsatadi.

Suyulmaning jarayon mobaynida tashqi muhit – atmosfera va konteyner bilan ta'sirlashishi e'tiborga olinishi kerak. Masalan, suyulmadan bug'langan uchuvchan kirishma suyulma va atmosfera orasida qayta taqsimlanib turishi mumkin. Bu holda taqsimot koeffitsienti

$$K_a = \alpha F / (\nu S) \quad (II.35)$$

bunda F – kristallning ko'ndalang kesimi yuzi.

Umumlashgan taqsimot koeffitsienti

$$K = k + K_a \quad (II.36)$$

Uchmaydigan kirishma ishlatilganda $\alpha = 0$, $K_a = 0$, $K = k$.

Yarimo'tkazgichlarni kristallizatsion tozalashni ko'proq zonaviy suyultirish usuli bilan amalga oshiriladi: olovga bardoshli uzun qayiqchaga tozalanadigan moddani kichkina bo'lakchalar yoki oldindan tayyorlangan polikristall quyma shaklida joylanadi. So'ngra, qayiqchani bir uchi bilan halqasimon isitgich ichiga kiritiladi, isitgich qayiqchada quymaga nisbatan qisqa uzunlikdagi qismida (belbog'ida) suyulma hosil qiladi. Kristallanish frontining orqa chegarasida suyulma kristallanadi. Bunda kirishma kristall va suyulma orasida qayta taqsimlanadi, aniqrog'i, kristallangan qismdan ancha kirishma suyulmaga o'tib ketadi.

Masalan, agar uchmovchan kirishma $K=0,5$ ga ega bo'lsa, ya'ni suyulmani to'ydiradigan materialda $C_s=1$ bo'lsa, suyulmadan hosil bo'lgan birinchi kristallchada $C_q=K$, $C_s=0,5$ C_c ichlikli kirishma bor

bo'ladi. Shunday qilib, kristall kirishmaning dastlabki miqdorining faqat 50% ini o'ziga oladi, qolgan 50% suyulmaga surib chiqariladi. Suyulmadagi kirishma zichligi suyulgan zona quyma uzunligi qadar siljiganda $G_{x_1} = C_s + 0,5C_s = 1,5C_s$ bo'lib qoladi. Bu holda kristallda kirishma zichligi $C_{q_1} = 0,5 \cdot 1,5C_s = 0,75C_s$ bo'ladi. Nihoyat, suyulmadagi kirishma zichligi o'zining chegaraviy qiymati $C_{kir} = C_s \cdot 1/x = 2C_s$ ga erishganda kirishma butun kristall uzunligi bo'yicha tekis taqsimlanadi va $C_q = 2C_s \cdot 0,5 = C_s$ bo'ladi.

Uchuvchan kirishma bilan legirlangan suyulma kristallanganda uning suyulmadagi zichligi bug'lanish tezligiga bog'liq bo'ladi. Agar bu tezlik kam bo'lsa, kirishma suyulmada to'plana boradi. Agar bug'lanish tezligi ortsa, ko'proq kirishma atmosferaga bug'lanib ketadi. Nihoyat, bug'lanayotgan va suyulmaga surilayotgan kirishma miqdorlari tenglashganda suyulmadagi kirishma zichligi doimiy C_s qiymatga erishadi. Bunday suyulmadan o'stirilayotgan kristallning butun uzunligi bo'yicha kirishma doimiy zichlikka ega bo'ladi.

Zonaviy suyultirish usulining xarakterli xususiyati kristallizatsion jarayon mobaynida suyulma hajmining o'zgarish qolishidir. Bu jihatdan unga garpissaj suyultirish, monokristallni «taglikdan» yoki suzuvchi tigldan o'stirish usullari o'xshashib ketadi.

Suyulma hajmi kristallanishda o'zgarib turadigan usullar (Brijmen va Choxralskiy usullari) ham ishlab chiqilgan. Ular haqida alohida to'xtalamiz.

Suyulmaning qoldig'iga unda g kristall ulushi o'stirilgan paytda kirishma zichligi

$$C = C_0 (1 - g)^{K-1} \quad (\text{II.37})$$

ifoda bo'yicha hisoblanishi mumkin, bundagi C_0 - kirishmaning dastlabki zichligi, K - umumlashgan taqsimot koeffitsienti, $g = V_g / V_0$ - suyulmaning dastlabki V_0 hajmining kristallangan ulushi.

Uchuvchan kirishma uchun ($\alpha = 0$) $C = C_0 (1 - g)^{K-1}$.

Zonaviy suyultirish usuli tozalanayotgan kristallning bir o'zida suyulgan zonani ko'p marta o'tkazish imkonini beradi. Bu o'tishlar soni ortishi bilan kirishmalar taqsimoti chiziqlari tikroq bo'lib boradi (II.25, b-

rasm), oxirgi qismlar to'g'ri chiziq ustiga tushadi (chegaraviy yoki oxirgi taqsimot chizig'i). Bunga erishilganda kirishma quymaning oxirgi qismiga surila olmaydi.

Ko'p marta o'tishlar bilan amalga oshirilgan gorizontal zonaviy suyultirish holda tozalanayotgan modda massasining qayiqchaning bir uchidan ikkinchi uchiga ko'chishini hisobga olish lozim. Massa ko'chishining oldini olish choralari ishlab chiqilgan.

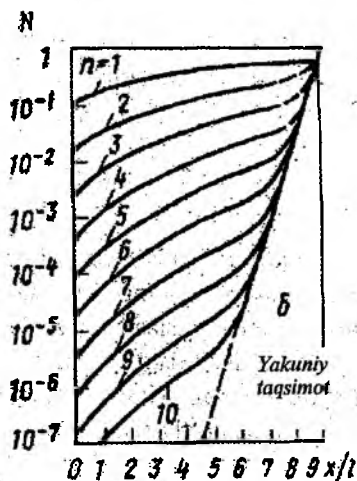
Erigan kirishmalardan tashqari, yarimo'tkazgichlarning, kristallanuvchi suyulmalarida gazlar (yodod, azot va b.) va metallmas kirishmalar bo'lishi mumkin.

Suyulmada hosil bo'lgan gaz pufagi gaz bilan o'ta to'yingan suyulmadan diffuziyanuvchi bug' yoki gaz hisobiga o'sa boradi. Kristallanish fronti uni suyulma ichiga suradi, bu pufak $K < 1$ holga to'g'ri kelgan kirishmadek bo'ladi. Kristallanish fronti tezligi katta bo'lsa, pufak kattalashib ulgurmasdan qattiq fazaga yutiladi.

Kichikroq shu tezliklarda pufak kristall o'sishi yo'nalishida cho'ziladi, silindr ko'rinishini oladi.

Suyulmada yana oksidlar, karbidlar, nitridlar va boshqalar mavjud bo'lishi mumkin. Ularni qattiq kirindilar ham deyiladi.

Qattiq qirindilarni kristallanish fronti tomonidan faqat kristall o'sishi tezligi kichik bo'lganda (0,5 mm/min) siqib surib chiqarilishi mumkin. Bu holda kristallanish fronti oldida to'planadigan qattiq qirindilar kristallanish markazi bo'ladi, ammo monokristall o'sishiga to'sinlik qiladi. Natijada kristallangan modda quymasi polikristall tuzilishga ega bo'lib, undagi qattiq kirindilar donalar chegaralari bo'yicha joylashgan bo'ladi.



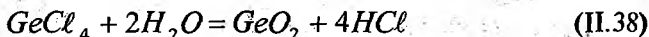
II.25—rasm. Ko'p qaytalangan zonaviy suyultirish usulida o'stirilgan kristall bo'yicha uchmuvchan kirishma nazariy taqsimoti.

Katta tezliklarda kristallanish fronti siljiganda qattiq kirindilarni o'sayotgan monokristall o'z ichiga oladi, ular endi hajmda tekis taqsimlanadi va monokristall o'sishiga to'sqinlik qilmaydi.

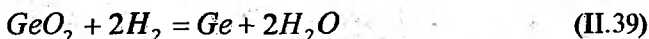
6.3. Tiklash jarayonlari

Yuqori darajada toza polikristall elementar yarimo'tkazgichlarni olish uchun ularni tozalangan xlorid birikmalardan ajratib olish zarur. Bu ishni bajarish uchun tiklash jarayonlari qo'llanadi.

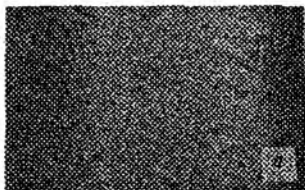
Qattiq holatdagi yarimo'tkazgichlar birikmalarini tiklash eng sodda jarayon bo'ladi. Masalan, tozalangan germaniy xloridi suvda germaniy (IV) oksidiga o'tkaziladi:



Quruq germaniy (IV) oksidni grafit qayiqchaga to'ldirib, uni naysimon elektropechga joylanadi. 1000°C atrofidagi temperaturagacha qizdirilgandan so'ng qayiqcha ustidan yuqori darajada toza vodorod oqimi o'tkaziladi. Yuz beradigan

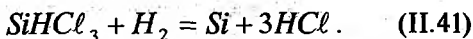
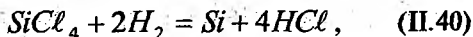


reaksiya oqibatida germaniy tiklanadi va uning tomchilari qayiqcha tubiga oqib tushadi.



II.26 —rasm. Vodorod bilan tiklash jarayonida olingan sterjenlar sirtining ko'rishi: a—optimalga yaqin; b—undan uzoq.

Kremniy (IV) oksidi SiO_2 ga nisbatan bunday jarayon 2000°C dan ham yuqori temperaturalarni talab qiladi. Shuning uchun tozalashdan so'ng bevosita olinadigan xlorosilanlar vodorod bilan tiklashga duchor qilinadi:



Yarimo'tkazgich kremniyni ishlab chiqarishda (II.40) reaksiya bo'yicha trixlorosilanni vodorod bilan tiklash jarayoni eng ko'p qo'llaniladi.

Bu jarayon reaktorlarda amalga oshiriladi. Reaktorga vodorod va trixlorosilan aralashmasi keltiriladi. Ularda (II.40) reaksiya oqibatida ajraladigan

kremniyni elektrik tok o'tkazib qizdirilayotgan kremniy sterjenlari sirtiga o'tqaziladi. Mazkur jarayon eng yaxshi samara beradigan temperatura oralig'i 1100-1200°C. Reaktordan o'tayotgan bug'-gaz aralashmasining tezligi oshgan sayin kremniy o'tirishi solishtirma tezligi $[g/(sm^2 \cdot soat)]$ ham ortadi.

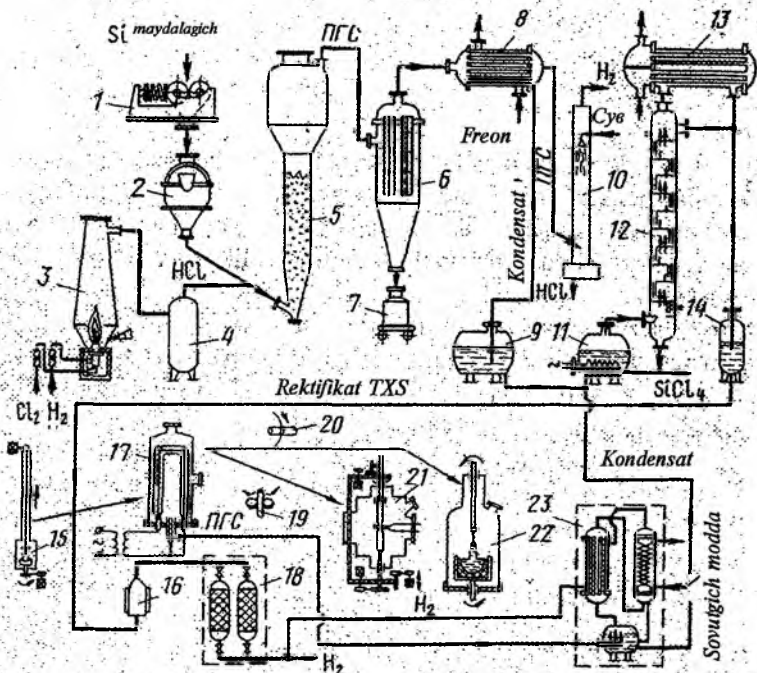
U qizigan kremniy sterjenlari sirtida turli shakldagi kristallchalar ko'rinishida kristallanadi. Bunda dastlabki kremniy sterjenlardan radial (radius bo'yicha) tarqalayotgan ustunsimon kristallchalar o'sa boradi. Bunday o'sishda silliq sirtli zich kremniy polikristall sterjeni olinadi (II.26, a-rasm).

Agar o'tqazilayotgan sirt yaqinida gaz almashinuv yomon bo'lsa, bu holda kremniy kristallari dendrit shakliga (shoxchalik tuzilishga) ega bo'ladi, sterjen sirti juda notekis bo'ladi (II.26, b-rasm). Bunday sterjenlar sifati oldingi sterjenlarnikidan ancha past, chunki ularning sirti ko'p miqdorda kirishmalarni yutib olib, yarimo'tkazgich tozaligini pasaytiradi. Sterjen hajmidagi gazlar kremniyni eritish jarayonida uning qaynab va shachrab ketishiga sabab bo'ladi. Buni sterjenlar ko'rinishidagi tayyorlamalardan monokristallar o'stirishda e'tiborga olish kerak.

Vodorod va trixlorosilanning $M = H_2 / SiHCl_3$ optimal nisbatini aniqlash murakkab. Nazariy [(II.38) ifoda] u 1 ga teng bo'lishi kerak. Biroq, reaktorga kelayotgan bug'-gaz aralashmasining butun miqdoridan faqat 1100-1200° C temperaturalar sohasiga tushgani (sterjenga bevosita yaqin, qizigan sohaga tushgani) kremniy hosil qiladi. Kremniy mahsuli ko'proq bo'lishi uchun reaktorda gaz almashinuvini jadallashtirish zarur. Bu reaksiya zonasidan xlorli vodorodni (HCl) olib ketish va shu zonaga yangi trixlorosilan ulushini olib kelishni tezlashtiradi.

Tabiiy, reaktorda gaz almashinuvini kuchaytirish uchun undan bug'-gaz aralashmasi o'tishi tezligi oshiriladi. Bunda trixlorosilanni tejash maqsadida vodorodni ko'paytirish hisobiga bug'-gaz aralashmasi hajmi oshiriladi: HCl miqdori juda sekin oshadi, kremniyning chiqishi (hatto $M=15$ bo'lganda ham) 60% atrofida.

Kremniy olinishi samaradorligini oshirishning eng yaxshi chorasi — «yopiq sikl» usuluni qo'llashdir. Bu holda reaktordan ketayotgan bug'-gaz aralashmasi ishlovga duchor qilinib, undan eng foydali tarkiblovchilar — trixlorosilan va vodorod — ajratib olinadi va tozalashdan so'ng yana ishlab chiqarishga qaytariladi.



II.27—rasm. Kremniy monokristalini hosil qilish qurilmasi.

1—maydalagich; 2—sharsimon tegirmon; 3—HCl ni sintezlash pechi; 4—resiver; 5— SiHCl_3 ni sintezlash reaktori; 6—xaltasimon filtr; 7—chiqit yig'uvchi idish; 8—kondensator; 9,14—oraliq hajmlar; 10—skrubber; 11—rektifikatsion; 12—tarelkasimon ustun (kolonna) kubi; 13—deflegmator; 15—kremniy polikristalik tayoqchalari (asoslari) o'stiriladigan qurilma; 16—bug'lantirgich; 17—vodorod bilan tiklash reaktori; 18—vodorodni tozalash bloki; 19—kremniy sterjenlarini shilish dastgohi; 20—o'lchamli tayyorlamalarni kremniy sterjenlaridan kesish dastgohi; 21—tigelsiz zonaviy suyultirish usuli bilan kremniy monokristallarini o'stirish qurilmasi; 22—o'sha ishni Choxralskiy usulida bajarish; 23—vodorodli tiklash reaktoridan chiqayotgan gazsimon mahsulotni quyultirish bloki; BGA—bug'—gaz aralashmasi; TXS—trixlorsilan.

6.4. Polikristall yarimo'tkazgichlar olish

6.4.1. Trixlorsilanni tiklash usulida polikristall kremniy olish

Dastlabki ish xlorli vodoroddan trixlorsilanni va kremniyni tayyorlashdir. Vodorodni xlor oqimida kuydirib xlorli vodorod olinadi:



Sintez pechida olingan xlorli vodorodni namdan tozalanadi – muzlatish usuli bilan quritiladi. So'ng (II.27-rasm.) tarkibida 96-99% asosiy modda bo'lgan texnik kremniyni (ba'zan ferrosilitsiyni) yanchigichda va sharsimon tegirmonda (1,2) 0,5 mm bo'laklarga maydalanadi. Hosil bo'lgan kukunni 200°C da quritiladi va «qaynash qatlami» deyiladigan 5 reaktorga trixlor-silanni sintez qilish uchun kiritiladi. Reaktor po'lat devorlari suv bilan sovutiladigan vertikal silindrdan iborat. Uning pastki qismida xlorli vodorod kiritiladigan furmalar (jo'mraklar) bor. Bir necha atmosferaga teng bosim ostidagi gaz oqimi kukunsimon kremniyni tez-tez aralashtiradi, bunda issiqlik ta'sirlashuvchi massaning butun hajmi bo'yicha tekis taqsimlanadi.

(II.41) reaksiyada katta miqdorda issiqlik ajraladi, shuning uchun sintezning ma'qul (optimal) temperaturasini 300°C atrofida doimiy tutib turish uchun reaktorga kiritiladigan xlorli vodorodga trixlorsilan bug'lari aralashtiriladi.

Optimal nisbat $HCl:SiHCl=1:1$. Bu sharoitda trixlorsilanning chiqishi HCl bo'yicha 60%, Si bo'yicha 70%. Bug'-gazlar aralashmasi 6 filtrga o'tadi, unda mexanik ravishda qo'shib qolgan kremniy changi tutib qolinadi.

Filtrlarda tutilgan changda reaksiyaning yondosh mahsuli – polixlorsilanlar ham bor bo'ladi. Ularning kimyoviy ifodalari: $Si_nCl_{2n+2}(mas; Si_2Cl_6)$ va $H_nSi_mCl_{2m+2}(mas; H_2SiCl_2)$. Polixlorsilanlarning hosil bo'lishi metall kirishmalar (Al , Fe , Ca va b.) bilan ifloslangan dastlabki kremniydan foydalanishga, uning bo'laklari o'lchamini kattalashtirishga va bug'-gaz aralashmaning tez sovishiga imkon beradi.

Polixlorsilanlar juda faol moddalar. Ular sovuqda ham oksidlanib, katta miqdorda issiqlik ajraladi, bu esa ularning yonib ketishi va hatto portlashiga olib keladi. Shuning uchun filtrlardan changni chiqarib yuborish, uni tashishni va saqlashni alohida ehtiyot choralariga rioya qilib amalga oshiriladi.

Filtrlardan o'tgan (changsizlangan) bug'-gaz aralashmasini $(-50) \div (-70)^{\circ}\text{C}$ da suyuq holatga o'tkaziladi. Bu ish mobaynida kremniyning xlorlanish mahsulotlari ajraladi. Mos ravishda $31,8^{\circ}\text{C}$ va $57,2^{\circ}\text{C}$ qaynash temperaturalariga ega bo'lgan trixlorosilan va kremniy tetraxloridi suyuladi, vodorod va xlorli vodorod (qaynash temperaturasi -84°C) uchib ketadi. Suyultirish amalini naylardan tashkil topgan 8 issiqlik almashgichlarda (kondensatorlarda) o'tkaziladi. Naylar bo'yicha bug'-gaz aralashma o'tadi, ular orasidan sovituvchi — suv, kalsiy xloridi, freon va b. o'tib turadi. Bir necha kondensatorlar ketma-ket ulangan bo'lib, ulardan o'tayotgan aralashma ketma-ket sovib boradi.

Suyulish (kondensatsiya) jarayonida bug'-gaz aralashma hajmi keskin kamayadi. Agar apparat yomon jipslangan (germetizatsiyalangan) bo'lsa, unga havo so'rilib, aralashmadagi polixlorosilan yonib ketishi mumkin. Shuning uchun qurilmaning barcha qismlari yaxshi jipslangan bo'lishi kerak.

Kondensatsiyadan o'tib ketgan bug'-gaz aralashmada 90% dan ortiq vodorod, qolgani-xlorli vodorod bo'ladi. Bu aralashmani 10 skrubberga (ajratuvchiga) yuboriladi, u joyda xlorli vodorod ajratiladi.

Bug'-gaz aralashmadan shu yo'sinda ajratilgan vodorodni tegishli yo'l bilan 18 qurilmaga yo'naltiriladi, bunda uni quritiladi va tozalanadi. Bunday vodorodni yana xlorli vodorod sintez qilishga ishlatiladi.

Olingan kondensat 90% trixlorosilanga va 10% tetraxlorosilanga ega bo'ladi. Bu kondensatda quyidagi kirishmalar bor (massa bo'yicha % da): B— $3 \cdot 10^{-3}$; Al— $1 \cdot 10^{-6}$; Fe— $4 \cdot 10^{-6}$; P— $1 \cdot 10^{-6}$; Ti— $8 \cdot 10^{-7}$; Cu— $5 \cdot 10^{-7}$.

Keyin kondensatni ($\text{SiHCl}_3 + \text{SiCl}_4$) ketma-ket ravishda ikkita 12 kolonnadan o'tkaziladi. Birinchisida engil uchuvchan tarkiblovchi (1-fraksiya), ikkinchi kolonnada tozalangan trixlorosilan (rektifikat) ajratib olinadi.

Odatda bunday rektifikatsion kolonnalar bir necha bo'ladi. Rektifikatsion kolonna vertikal o'rnatilgan zanglamaydigan po'latdan qilingan silindrdan iborat.

Olingan rektifikatni (tozalangan trixlorosilanni) kimyoviy analizga duchor qilinadi va undagi kirishmalar aniqlanadi. Kirishmalar miqdori (massa bo'yicha % da) quyidagidan ko'p bo'lmazligi kerak: B- $3 \cdot 10^{-8}$; Al- $2 \cdot 10^{-7}$; Fe- $3 \cdot 10^{-7}$; Ca- $2 \cdot 10^{-6}$; Ti- $5 \cdot 10^{-8}$; Cu- $2 \cdot 10^{-8}$; Ni- $6 \cdot 10^{-8}$.

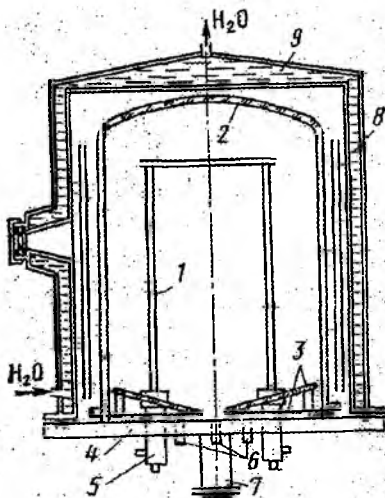
Keyingi vaqtda rektifikatning sifatini undan olingan monokristall parametrlari bo'yicha nazorat qilinayotir. Buning uchun kichik «kvarts-test» degan asbob qo'llanadi.

Rektifikatni (tozalangan SiHCl_3 trixlorosilanni) vodorod bilan tiklash reaktoriga (II.28-rasm) beriladi. U zanglamaydigan po'lat yoki po'latdan yasalgan qalpoq ko'rinishida bo'lib, suv bilan sovitiladigan zang-

lamas po'lat plita (taglik) ustiga germetik ravishda (jips) o'rnatilgan. Plita orqali izolatsiyalangan tok keltiruvchilar o'tgan, ularnig ustiga (tik) vertikal ravishda **kremniy sterjenlar** mahkamlanadi. Ustidan kremniy tayoqcha bilan kavsharlangan ikkita **kremniy tayoqcha** II-simon isitgichni tashkil qiladi.

Reaktorda tayoqchalar soni har xil bo'ladi, u qaysi usul bilan kristall o'stirilishiga bog'liq.

Kremniy tayoqchalari — asoslar taglikdan o'stirish usulida tayyorlanadi (15). Odatda bunday tayoqchalar diametri 4-6 mm, uzunligi 2 m gacha.



II.28 — rasm. trixlorosilanni vodorod bilan tiklash reaktori.

1 — kremniy tayoqcha (asos); 2 — ichki kvarts qalpoq; 3 — tubdagi kvarts ekranlar; 4 — metall tub; 5 — suv sovitadigan tok keltiruvchi; 6 — bug' — gaz aralashma (BGA) kiritadigan naycha; 7 — BGA chiqadigan naycha; 8 — boshlang'ich isitgich (12 dona); 9 — tashqi, suv sovitadigan metall qalpoq.

Elektrik tok o'tkazib tayoqchalar qizdiriladi. Trixlorosilanni vodorod bilan tiklashni 1100°C atrofida va $H_2/SiHCl_3$ molyar nisbat 6 ga teng bo'lganda amalga oshiriladi.

Polikristall kremniyning legirlangan sterjenlarini kuchli legirlangan tayoqchalar — asoslarga o'tqazish yo'li bilan olinadi. n -tur kremniy olish uchun sterjenlar fosfor (P) bilan, p -tur olish uchun — bor (B) bilan legirlanadi.

Reaktordan chiqarib olingan polikristall kremniy sterjenlarini monokristallar o'stirishga yuborishdan oldin qo'shimcha ishlov beriladi.

Choxralskiy usuli bilan monokristallar mo'ljallangan quymani tigelga joylantirish qulay bo'lgan bo'laklarga bo'linadi yoki olmos disklar (20) bilan kesiladi. Tigelsiz zonaviy suyultirish jarayoni uchun ishlatiladigan sterjenlarni shilish yo'li bilan tegishli o'lchamli qilinadi (19). Shunday mexanik ishlovdan so'ng polikristall moddani ediriladi, yuviladi, quritiladi va taxlanadi.

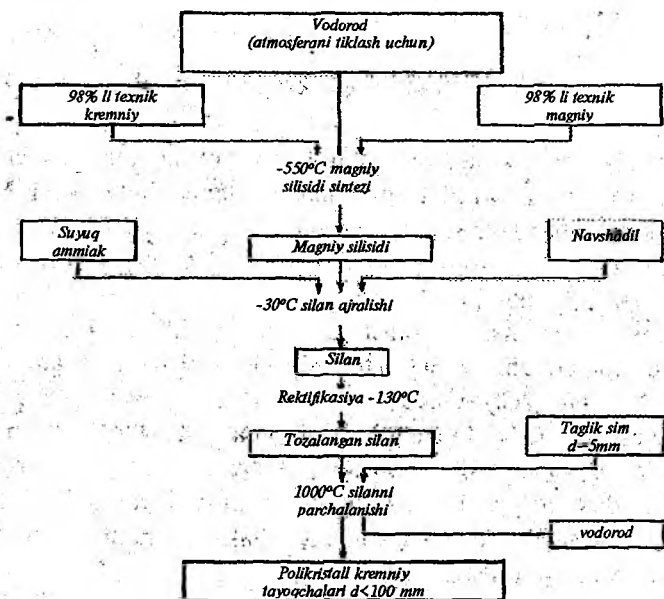
Polikristall kremniy sifatini vakuumda $1 \cdot 10^{-4}$ mm.sim.ust. tigelsiz zonaviy suyultirish usulida nazorat sterjenini tozalash yo'li bilan tekshiriladi. Suyulgan zonaning 3 mm/min tezlikda 15 marta takroran o'tishidan so'ng kremniydan bor (B) dan boshqa deyarli hamma donor va akseptor kirishmalar chiqarib tashlanadi, bor (B) qoladi. Bunday tozalashdan keyingi kremniy solishtirma qarshiligini *bor (B) bo'yicha solishtirma qarshilik* deyiladi.

Polikristall kremniy sterjenlarda donorlar miqdorini nazorat qilish vakuumda, suyulgan zonaning siljish tezligi 3 mm/min bo'lgan holda, bir martali zonaviy suyultirish usuli bilan amalga oshiriladi. Polikristall kremniy yuqori darajada toza bo'lishi uchun uning tozalik darajasi bor (B) bo'yicha 5000 Om-sm. dan kam va donorlar bo'yicha 250 Om-sm dan ortiq bo'lmasligi, sterjenlar sirtida xloridlar bo'lmasligi, sterjenning singan yoki kesilgan joyida oksidlangan halqalar bo'lmasligi kerak.

Polikristall kremniy sterjenlari bir xil massali bo'laklar ko'rinishida berilishi mumkin. U eng kichik massasi 50 g bo'lgan bo'laklar ko'rinishida ham berilishi mumkin.

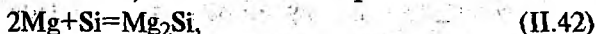
6.4.2. Monosilandan kremniy polikristallarini olish

Eng toza kristall kremniyni monosilan SiH_4 ni termik qizdirib parchalash usuli yordamida tayyorlash mumkin. Olingan mahsulot bor (B) bo'yicha 80000 Om-sm gacha va donorlar bo'yicha 5000 Om-sm gacha solishtirma qarshilikka ega bo'ladi. Bu usulning texnologik sxemasi II.29-rasmda tasvirlangan.



II.29—rasm. Silanni termik usul bilan parchalab kremniy olishning texnologik tartibi.

Gorizontal elektropechlarda texnik kremniyni (asosiy modda > 98%) va magniyni (asosiy modda > 98%) 550°C da sintez qilinadi:



so'ngra Mg_2Si ni xlorli ammoniy bilan parchalanadi:



Parchalanishni -30°C da suyuq ammiak NH_3 muhitda o'tkaziladi. Bu jarayonda kremniy undan eng qiyin chiqariladigan bor (B) dan tozalanadi. Bor (B) silandan oson ajraladigan bor-ammiak birikmasi tarkibida mahkam bog'lanib qoladi.

Silanni tozalash -130°C da o'tkaziladigan past temperaturali rektifikatsiya usulida davom ettiriladi. Olingan rektifikat (toza modda)da massa bo'yicha bor (B) $3 \cdot 10^{-6}$ va fosfor $1,1 \cdot 10^{-7}\%$ dan kam bo'ladi. Boshqa kirishmalar yana ham kam miqdorda bo'ladi, ular sezilmaydi.

Monosilan (SiH_4)ni reaktorlarda 1000°C da parchalanadi: $\text{SiH}_4 = \text{Si} + 2\text{H}_2$. Bunday reaktorlarning tuzilishi II.27-rasmdagidan asosan farq qilmaydi. Reaksiya natijasida ajralgan yuqori darajada toza vodoroddan yana foydalaniladi, toza polikristall kremniy esa monokristallar o'stirishda, bevosita uning o'zidan asboblari ishlab chiqarishda qo'llanadi.

6.4.3. Germaniy polikristallarini olish

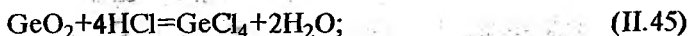
Germaniy xomashyoda oksidlangan yoki elementar shaklda bo'lishi mumkin. Turli konsentratlar tarkibida germaniy GeO_2 yoki MgGeO_3 xilidagi germanatlar ko'rinishida mavjud bo'ladi. Germaniyaning konsentratlardagi miqdori (massa bo'yicha) 5 dan 60% gacha, asosiy kirishma—arsenik 6,5% ni tashkil qiladi.

Polikristall germaniy olish texnologiyasining birinchi amali xomashyodagi germaniyni GeCl_4 tetraxloridga o'tkazish bo'ladi:

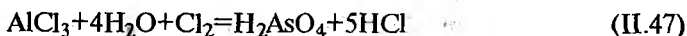


Bu jarayon grafit qoplangan reaktorda $300-400^{\circ}\text{C}$ da bajariladi. Tetroxlorid mahsuli 95% atrofida. Olingan germaniy tetraxloridini kondensatorda kondensirlanib, so'ng yig'uvchi idishga o'tadi.

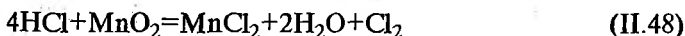
Xomashyodagi oksid va elementar shakldagi germaniyni eritmada xlorlab tetraxloridga o'tkaziladi:



Arsenikning germaniydan qiyin ajralib ketadigan uchuvchan trixloridi AsCl_3 asosiy kirishmasini ushbu reaksiya bilan uchmaydigan H_2AsO_4 arsenik kislotasiga aylantiriladi:

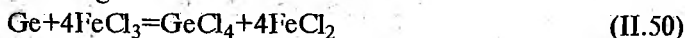


Ba'zan reaktorga xlor o'rniga pirolizit MnO_2 yoki vodorod peroksidi H_2O_2 kiritiladi:



Reaktorda xlorning bo'lishligi konsentratdagi elementar germaniy erishiga yordamlashadi.

Butun oksidlangan germaniyni tetraxloridga o'tkazgandan so'ng eritmadagi xlorid kislota zichligi 270 g/l gacha kamaytiriladi va ikkilamchi xomashyo solinadi. Uning miqdori massa bo'yicha ~15%. Shundan keyin reaktorga xlorli temir kiritiladi.



reaksiya bo'yicha (xomashyodagi!) elementar germaniy tetraxloridga o'tkaziladi. Bu jarayon tugagach, eritmadan tetraxlorid chiqarib olinadi. Buning uchun reaktorni 83°C dan (GeCl_4 qaynaydigan temperaturadan) yuqorigacha qizdiriladi. Eng yuqori temperatura 110°C. Tetraxlorid bug'lari suyultirilib idishga quyuladi.

Ushbu distillatsion jarayonda germaniy tetraxloridi ko'p kirishmalardan tozalanadi. Bunda arsenik trixloridi AsCl_3 ni tozalash muhim, chunki u o'z xossalari bo'yicha GeCl_4 ga yaqin va uni ajratib olish qiyin. Ekstraksiya usuli bilan tozalash GeCl_4 da arsenik miqdorini massa bo'yicha 5-10⁻⁴% gacha kamaytirish imkonini beradi.

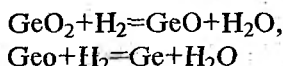
Tozalangan germaniy tetraxloridi GeCl_4 ni rektifikatsion kolonna kubiga kiritiladi. Odatda rektifikatsiya jarayonini bir necha kolonnalarda bajariladi. Bu yerda hosil bo'lgan germaniy tetraxloridi bug'lari sovitgichda kondensatsiyalanadi. Kondensatni dextratorda xlordan ajratiladi va gidroliz jarayoniga yuboriladi.

Germaniy tetraxloridi gidrolizini aralashtirgichli florooplast reaktorda o'tkaziladi. $\text{GeCl}_4:\text{H}_2\text{O}=1:7$ hajmiy nisbatda, bu GeO_2 ning eruvchanligi eng kichik bo'lishligini ta'minlaydi. Gidrolizda issiqlik ajraladi, shuning uchun reaktor devorlarini oqar suv bilan sovitib turiladi, GeO_2 mahsuloti ortadi.

Gidrolizdan keyin olinadigan GeO_2 sinchiklab aralashtiriladi va konteynerlarga joylanadi. Bu oksid tozaligiga kremniydagiga o'xshash talablar qo'yiladi.

Polikristall germaniy olish uchun GeO_2 ni grafit qayiqchalarga solinadi, qayiqchalarni naylar ko'rinishidagi elektropech orqali 3 mm/min tezlikda siljitiladi.

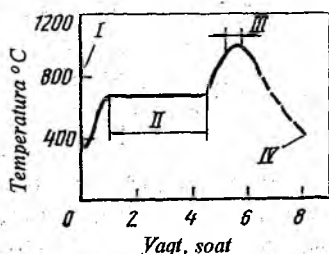
Pech bo'ylab ikkita temperatura zonasi bo'ladi. Birinchisida (650°C – 710°C) germaniyning tiklanish jarayoni kechadi, u ikki bosqichdan iborat:



Ikkinchi zonada (1000°C atrofida) tiklangan germaniy zarralari yopishishib germaniy suyulmasi hosil qiladi, u esa pechdan chiqayotib kristallanadi (II.30–rasm). Ba'zan tiklash pechiga yana bir zonani (temperaturasi 1000 dan 900 gacha) qo'shiladi. Bu zonadan o'tganda suyulma yo'nalishli kristallanadi.

Germaniyning polikristall quymalarini Brijmen gorizontal usuli bilan tozalashda yaxshi natijalarga erishiladi. Bunda germaniyli qayiqchani tiklash pechidan chiqarilgandan so'ng uni alohida maxsus pechga joylanadi va tozalash bajariladi.

Polikristall germaniyni tozalash gorizontal zonaviy suyultirish usulida davom ettiriladi, bunda zonada suyulmani yuqori chastotali toklar bilan qizdiriladigan ko'p nayli qurilmalar qo'llanadi.



II.30 – rasm. Germaniy (II) oksidini tiklash jarayonining temperaturaviy – vaqtiy maromi (rejimi):

I – tartib chiqarish boshlanishi; II – tiklash; III – suyultirish; IV – tartib chiqarish oxiri.

Yuqori darajada toza polikristall germaniy olishning asosiy sharti barcha bosqichlarda eng katta tozalikni ta'minlashdir.

Grafitdan yasalgan qayiqchalarning tozaligiga a'lohida e'tibor berish kerak. Ularni juda zich va juda toza grafitdan tayyorlanadi, so'ng 1000°C dan yuqorida xlor oqimida chiniqtiriladi. Ishga solishdan oldin qayiqchalarda bir necha yuvuvchi suyultirishlar o'tkaziladi. Shuning uchun uzoq foydalanishda bo'lgan qayiqchalar eng

katta tozalikka ega bo'ladi.

Gorizontaal zonaviy suyultirish usulida tozalangan polikristall germaniy 18°C da $52\text{ Om}\cdot\text{sm}$, 19°C da $51\text{ Om}\cdot\text{sm}$ va 20°C da $50\text{ Om}\cdot\text{sm}$ solishtirma qarshilikka ega bo'lishi kerak. Nazorat monokristallida harakatchanlik ham tekshiriladi, u 77 K da $25000\text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ dan kam bo'lmisligi kerak.

6.4.4. Galliy arsenidi kristallarini olish

Yarimo'tkazgich birikmalarni sintez qilishning eng sodda usuli tarkiblovchilarni birga suyultirishdir. Bunday sintezni o'tkazadigan apparatning sxemasi II.17-rasmda ko'rsatilgan.

Galliy arsenidini sintezlash jarayonini o'tkazish tartibi quyidagicha: kvarts tigeli tubiga dastlab maydalangan arsenik (bo'lak o'lchami 3 mm), uning ustiga galliy, keyin esa bor angidridi joylanadi. Arsenik va galliy $1:1$ nisbatda (atomlar soni bo'yicha) olinadi, flyus — bor angidridini 25 ml chamasida suyulma hosil qilish uchun zarur miqdorda olinadi.

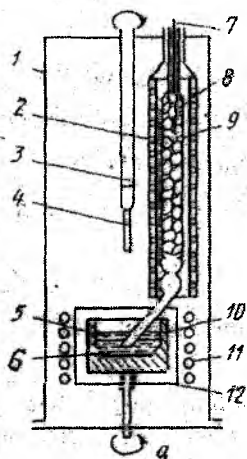
Tigelni grafit taglikka joylanadi. Taglik yuqori bosim kamerasida joylashgan, kamerani zichlantiriladi, unda vakuum hosil qilinadi, keyin inert gaz (azot, argon) bilan 60 at bosim ostida to'ldiriladi.

Bu amallar bajarilgandan keyin tigelni ko'taradigan mexanizm ishga tushiriladi va tigelni sekin (uning yuqorisi qismini 850°C gacha qizdira oladigan) induktor pechga kiritiladi. Oldin galliy, keyin flyus suyuladi. 817°C atrofida temperaturaga erishilganda arsenik ham suyuladi va sintez reaksiyasi boshlanadi. Bu reaksiyada ancha issiqlik ajraladi, bu tigeldagi suyulma temperaturasini galliy arsenidi suyulish temperaturasidan birmuncha yuqori qiladi.

Sintez jarayoni tugallangandan so'ng suyulma temperaturasi pasaya boshlaydi. Induktorning quvvatini oshirib, 1 soat davomida temperaturani 1240°C atrofida saqlab turiladi, bu suyulmaning bir jinslilikini oshirish uchun zarur. Keyin temperaturani sekin pasaytirib borib suyulmani kristallanadi.

Ravshanki, olingan bu birikma polikristallning tozaligi dastlabki tarkiblovchilar tozaligi bilan aniqlanadi.

Galliy va arsenikning mavjud namunalari (markalari) tozaligi uncha yuqori emas. Shuning uchun galliy arsenidi va indiy arsenidining toza



II.31-rasm. Parchalanib keta oladigan yarimo'tkazgich birikmalarni flyus orqali sintezlash qurilmasi chizmasi:

1-avtoklav; 2-uchuvchan tarkiblovchi (As, P) isitgichi; 3-shtok; 4-monokristal xamirturush; 5-flyus; 6,8-uchmovchan tarkiblovchi (In, Ga); 7-termojuftlar; 9-kvars reaktor; 10-tigelning grafit tagligi; 11-yuqori chastotali induktor; 12-grafit ekranlar; 13-tigelning g'ovak tubi; 14-pirouglerod bilan jipslangan grafitli reaktor; 15-suyulma isitgichi; 16-ko'rish shishasi.

polikristall quymlarini olish uchun ko'proq Brijmen gorizontall usuli qo'llanadi. Bu jarayonni vakuumli va kavsharlangan kvars ampulalarda o'tkaziladi. Ampulaning bir uchida galliy solingan kvars qayiqcha, ikkinchi uchida — arsenikli qayiqcha joylanadi. Tegishli bosim va temperatura sharoiti o'rnatiladi.

Ushbu usul qurilmasining pechlar qismi bir necha pechlardan iborat bo'lib, ampula bo'yicha kerakli temperatura taqsimotini hosil qilib beradi.

Galliy-arsenik suyulmali qayiqcha bo'yicha kristallanish fronti siljib borishi pechlar qismini harakatsiz ampulaga nisbatan ko'chirish yo'li bilan amalga oshiriladi.

Ko'rilgan usul bilan sintezlangan galliy arsenidi polikristalida erkin elektronlar zichligi $2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ dan katta emas, ularning harakatchanligi $4200 \text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ dan kam emas.

Keyingi davrda galliy arsenidini sintezlash jarayonini Choxralskiy usuli bilan birgalikda olib borish rivojlandi. Bu — oxirgi mahsulot — monokristallning tozaligini muhim darajada oshirdi va ishlab chiqarishni arzonlashtirdi.

Bunday qurilma sxemasi II.31-rasmida tasvirlangan. Jarayon quyidagicha amalga oshadi. Tigelga metall galliy va flyus — bor anhidrid joylanadi. Arsenikli ampula tubi sindiriladi va keyin uni 325°C gacha

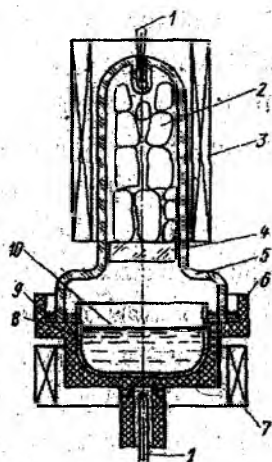
qizdiriladi. Bunda galliy suyuladi. Qurilma kamerasida 10^{-3} mm sim.ust.gacha vakuum hosil qilinadi va keyin uni 1 at bosimgacha azot bilan to'ldiriladi, so'ngra og'ma nayni tigeldagi galliy suyulmasiga tushuriladi.

Tigeldagi temperaturani 1240°C gacha yetkaziladi, bunda flyus suyuladi va tigeldagi suyulgan galliy sirtini qoplaydi. So'ngra, arsenikli ampula joylashgan pechning temperaturasini tadrijan $580^{\circ}\text{C} - 630^{\circ}\text{C}$ gacha oshirib boriladi. Kameradagi azotning issiqlik harakati evaziga bosimi 1,3-1,5 at. gacha ortadi va butun jarayon davomida shu sathda tutib turiladi. Sintez tugagach, ampula bilan birga nayni suyulmadan ko'tarib olinadi va chetlantiriladi. Keyin oddiy usullarda monokristall o'stiraverish mumkin bo'ladi. GaAs, InAs larni sintezlashning boshqa yo'llari ham bor.

6.4.5. Indiy va galliy fosfidlarini olish

Polikristall galliy fosfidini sintez qilishda ikki usul eng ko'p tarqalgan.

Birinchi usul — gorizontal (zonaviy suyultirish yo'li bilan sintezlash, u galliy va qizil fosfor solingan grafit konteyner joylashgan, vakuum hosil qilingan va kavsharlangan reaktorda o'tkaziladi. Reaktorni ikki fon elektropechidan va ular orasida joylashgan yuqori chastotali induktordan iborat pechlar blokiga joylanadi. Fon pechlari qizil fosforni uning reaktorda talab qilingan bug'lari bosimi hosil bo'ladigan temperaturagacha qizdiradi. Fosfor bug'i reaktor devorida o'tirib olmasin uchun devorlar



11.32-rasm. Fosfor bug'ining indiy suyulmasi bilan o'zaro ta'siri jarayoni kinetikasi (fosfor bug'ining tegishli bosimlari uchun suyulmada fosforning muvozanatiy C, konsentratsiyasi uzoq (punktir) chiziqlar bilan ko'rsatilgan).

temperaturasi yuqoriroq bo'lishi kerak.

Pechlar bloki (unda joylashgan reaktor bilan) avtoklavga o'rinishgan, unda inert gazning kerakli bosimi hosil qilinadi.

Jarayon rejimi: fosforning reaktordagi bosimi 10 at, suyulgan zona kengligi 30-40 mm, suyulgan zona ko'chish tezligi 1 mm/min gacha, undagi suyulma temperaturasi 1500°C gacha. Bu sharoitda zaryad tashuvchilar zichligi 10^{17} sm⁻³ dan kam bo'lgan polikristall galliy fosfidi quymalari olinadi (24 soatda 2 kg gacha).

Bunday materialda kislorod kam $-5 \cdot 10^{-4}$ % (massa bo'yicha), shuning uchun undan, kislorod zararli bo'lgan, epitaksial tizilma tagligi bo'ladigan monokristallarni o'stirish uchun foydalaniladi.

Shu usul bilan indiy fosfidi ham sintezlanadi, unda elektronlar zichligi 10^{15} sm⁻³.

Ikkinchi (unumliroq) usul — avtoklav qurilmalardagi kvazigermetik reaktorlarda sintez amalga oshiriladi.

Indiy fosfidining kristall quymalarini sintez qilish uchun qo'llanadigan II.32-rasmdagi qurilma ushbu usulga misol bo'ladi. Unda reaktorning qizil fosforli kvarts qismi va indiyli tigeli bor grafit qismining birlashuvi gidravlik zavtor yordamida amalga oshiriladi. Sintez quyidagi ravishda o'tkaziladi: tigelga kerakli miqdorda indiy joylanadi. Reaktorning kvarts qismiga mos stexiometrik miqdordagi qizil fosfor yana ortig'i bilan (bo'shliqni va isrofni kamytirish uchun) joylanadi. Gidrozatvor kanaliga uning 2/3 balandligigacha suyulgan indiy quyiladi va yaxlatiladi. Bundan keyin ushbu qismni ochiq tomoni bilan kanaldagi metallga o'rnatiladi, yuqori bosim kamerasini zichlantiriladi, unda vakuum hosil qilinadi, keyin ishchi bosim 60-70 at bo'ladigan bosim ostida inert gaz bilan to'ldiriladi.

Reaktorning qizil fosforli qismini kerakli temperaturagacha qizdiriladi (reaktorda fosfor bug'i bosimi 25 at ga yetishi kerak!). Shundan keyin indiy suyulmaligini birikmaning suyulish temperaturasidan (1060°C) yuqori temperaturagacha qizdiriladi va sintez jarayoni to'la amalga

oshishi uchun muayyan vaqt beriladi [uni (II.31) ifoda bo'yicha baholanadi]. Endi tigeldagi suyulma temperaturasini asta pasaytirib, uni kristallanadi, InP birikmaning polikristall quymasi hosil qilinadi. Bu material yetarlicha toza, unda $n \approx (1 \div 2) \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $\mu \approx 4500 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ (300K da).

Indiy va galliy fosfidlarini tavsiflangan tartibda sintez qilish jarayonini ularning monokristallarini o'stirish bilan birlashtiruvchi inert gazning bosimi 60-80 at bo'lishligi talab qiladi. Bu ancha qiyin masalalardan. Shuning uchun bu jarayon keng yoyilmagan.

Galliy va indiy fosfid monokristallarini yuqorida bayon qilingan usulda sintezlangan polikristallardan o'stiriladi.

6.5. Amorf yarimo'tkazgichlarni olish va qo'llash

Amorf yarimo'tkazgichlar anchadan beri ma'lum. Si, Ge, GaAs va boshqa yarimo'tkazgichlarning amorf pardalari (qatlamlari) ko'p yil ilgari sintez qilingan va katta amaliy qo'llanishga ega bo'lmadi. O'sha moddalarning kristallariga qaraganda, amorf holdagi moddalar taqiqlangan zonada katta zichlikdagi mahalliy holatlarga ega. Bu mahalliy holatlar mazkur yarimo'tkazgichlarda uzoq tartibning yo'qligidan hamda mikrokovaklar turidagi ko'p nuqsonlarning borligidan kelib chiqadi. Ular xona temperaturasida pardalar elektr o'tkazuvchanlikka asosiy hissa qo'shadilar. Mahalliy holatlar bo'ylab elektr o'tkazuvchanlikning asosiy mexanizmi termik faollanadigan sakrama o'tkazuvchanlik bo'lib, unda qatnashuvchi zaryad tashuvchilar juda past harakatchanlikka ega: elektronlar uchun $u \approx 0,01 - 0,1 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}^{-1}$, kovaklar uchun esa yana ham kichik. Mahalliy holatlar zichligi katta ($\geq 10^{20} \text{ sm}^{-3}$), ular rekombinatsion markazlar bo'lganligi uchun bunday yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar yashash vaqti juda kichik. Bunday amorf pardalar elektr o'tkazuvchanligini boshqarish amalda mumkin emas. Fermi sathi ularning taqiqlangan zonasi o'rtasida

joylashgan va pardalar juda katta solishtirma qarshilikka ega ($10^8 - 10^{10}$ Om·sm).

Agar amorf kremniy pardasiga vodorod kiritilsa, ahvol butunlay boshqacha bo'ladi. Ma'lum bo'lishicha, vodorodning amorf kremniyda eruvchanligi juda yuqori, u 40 – 45% ga yetadi. Amorf kremniyda erigan vodorod imkoniy bog'lanishlarning bo'sh joylarini to'ldiradi (to'yintiradi), oqibatda bunday vodorodlangan («gidridlangan») moddada taqiqlangan zonadagi holatlar zichligi keskin pasayadi ($10^{16} - 10^{17}$ sm⁻³ gacha). Bunday moddani α -Si:N deb qisqa belgilanadi. Shunday α -Si:N ni an'anaviy donor (P, As) va akseptor (B) kirishmalar bilan legirlab, elektron yoki kovak o'tkazuvchanlik hosil qilish mumkin. Bunda o'tkazuvchanlik kattaligini o'n tartib oraliqda takroran o'zgartirish mumkin. Bunday moddada *p-n* o'tish hosil qilish mumkin. Amorf kremniy pardasiga fluor kiritilganda ham vodorod kiritilgandagi effektga erishish mumkinligi aniqlandi. Bir vaqtda vodorod hamda fluor bo'lgan α -Si pardalarida mahalliy holatlar zichligi yana ham kichik bo'ladi ($\leq 10^{16}$ sm⁻³) va elektr xarakteristikalari yuqori termik barqarorlikka ega bo'ladi. Yana bir qator gidridlangan (vodorodlangan) amorf yarimo'tkazgichlar sintez qilingan. Ular orasida: α -Si_{1-x}C_x:H, α -Si_{1-x}Ge_x:H, α -Si_{1-x}N_x:H, α -Si_{1-x}Sn_x:H.

α -Si:H amorf yarimo'tkazgichlar arzon, ularni olish texnologiyasi nisbatan sodda: qalinligi bo'yicha bir jins yupqa pardalarni past temperaturalarda, katta yuzali turli va arzon tagliklarda o'stirish mumkin. α -Si:H pardalar o'stirishning eng tarqalgan usuli biqsima razryadning yuqori chastotali plazmasida monosilanni parchalashdir. Kremniy manbai sifatida yo toza SiH₄ monosilan, yoki SiH₄ ning argon bilan 10% li aralashmasi ishlatiladi. Jarayonni ishchi reaktorda past bosimda (1÷100 Pa) o'tkaziladi. Asosiy tagliklar zanglamaydigan po'lat va kvars shishadan yasalgan plastinalar va tasmalar shaklida bo'ladi. Qatlamlar o'sishi tezligi odatda 1,5 nm·s⁻¹, lekin u gazsimon fazadagi SiH₄ miqdori oshgan sayin oshib boradi. Pardalar tagliklarga 250-300°C temperaturada o'tkazilganda

taqiqlangan zonadagi mahalliy holatlar zichligi eng kam bo'ladi. p -tur o'tkazuvchanlikli pardalar olish uchun gaz fazasiga bor gidridlari (ko'pincha diboran) dozalangan miqdori kiritiladi, n -tur olish uchun fosfin yoki arsin kiritiladi.

Legirlanmagan α -Si:H pardalar solishtirma qarshiligi $10^7 - 10^{10}$ Om-sm, taqiqlan zonasi kengligi 1,5-1,8 eV. Mahalliy holatlar zichligi $10^{16} - 10^{17} \text{ sm}^{-3}$, spektrning ko'rinadigan sohasida yorug'likni yutish koeffitsienti $10^4 - 10^5 \text{ sm}^{-1}$. Krishmalar kiritib (legirlab) $10^{-2} \text{ Om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$ o'tkazuvchanlikli p -va n -tur qatlamlar olish mumkin. α -Si qatlamlarida vodorodning miqdori 5-8% (atom %)ni tashkil qiladi. Ammo, bo'sh holatlarni to'ldirishda $\approx 10^{20} \text{ sm}^{-3}$ vodorod ishtirok qiladi. α -Si pardalariga qo'shimcha ravishda fluor kiritilsa, ularning termobarqarorligi ortadi. Bunda qatlamlarni (pardalarni) $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$ aralashmani plazmaviy parchalash yo'li bilan o'tqaziladi. Qatlamlarni legirlashda BF_4 (p -tur) yoki PF_5 (n -tur) qo'shimchalar kiritiladi. Vodorod va fluor kiritilgan pardalarni uzoq vaqt quyosh yoritib turganda ham tuzilishi o'zgarmaydi.

α -Si pardalarini plazmaviy o'tqazish texnologiyasini takomillashtirish bo'yicha ko'p ishlar qilinmoqda.

Plazmaviy o'tqazish usulida boshqa amorf yarimo'tkazgichlar ham olinadi. "Gidridlangan" α -SiC amorf qatlamlarini $\approx 250^\circ\text{C}$ temperaturada $\text{SiH}_4 + \text{CH}_4$ aralashmani plazmaviy parchalash yo'li bilan olinadi. Legirlovchi kirishma manbalari: B_2H_6 va $\text{PH}_3 \leftrightarrow \alpha\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ pardalarini $\text{SiH}_4 + \text{GeH}_4$ aralashmani parchalash yo'li bilan olinadi. Bunday pardalarda tarkiblovchilar miqdorlari nisbatini (x) o'zgartirish taqiqlangan zona kengligini o'zgartiradi. Masalan, $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ uchun $E_g = 1,1 + 1,8x$ eV, $\alpha\text{-Si}_{1-x}\text{Sn}_x\text{:H}$ uchun $-1,1 + 1,4x$ eV.

Qiziqarli yangi modda mikrokristall kremniy (mk Si; H), α -Si dan farqli ravishda, biqsima razryad quvvati katta ($\approx 120 - 150 \text{ W}$) bo'lganda olinadi. Bu holda material kristallchalari o'rtacha o'lchami 6 nm bo'lgan

“mikrokristall” tuzilishga ega bo‘ladi. Uning taqiqlangan zonasi kengligi 1,8-1,9 eV, o‘tkazuvchanligi α -Si nikidan yuqori ($20 \text{ Om}^{-1}\text{sm}^{-1}$).

α -Si:H pardalarning tarkibi, tuzilishi va xossalari biqsimi razryad plazmasida kechadigan fizik-kimyoviy jarayonlar tabiatiga bog‘liq.

Gazsimon fazada, eng kimyoviy faol zarralar SiH_x monosilan radikallari, kremniy va vodorod bo‘ladi. Bu dissotsiatsiya (parchalanish) mahsulotlari taglik sirtiga tomon diffuziyanadi va xemosorbsiya oqibatida o‘sayotgan pardaga tiziladi. O‘tkazish sharoiti, avvalo gaz oqimi tezligi va plazmaning yuqori chastotali quvvati parda o‘shida qatnashadigan zarralar tarkibiga muhim ta’sir qiladi. Bu tarkibda SiH va SiH_2 bog‘lanishlar ham bo‘lishi mumkin.

Vodorod miqdori 5-8% bo‘lgan α -Si da SiH bog‘lanishlar ko‘proq bo‘lsa, bunday parda eng yaxshi fotoelektrik xarakteristikalariga ega bo‘ladi.

Qaralgan usullardan tashqari, yana bir qator usullar sifatli α -Si; H pardalar olishda qo‘llanilmoqda. Amorf kremniy pardalariga yuqori vakuum sharoitida 20- 25 keV energiyali vodorod ionlari kiritilsa yaxshi natijalar olinadi. Bunday pardalar kuchli yorug‘lik ta’sirida barqaror. Reaktiv changlash yo‘li bilan ham sifatli α -Si;H pardalar olinadi. α -Si;H pardalar (qatlamlar) o‘stirishda gazsimon fazadan kristallash an’anaviy usullari keng qo‘llaniladi. Ular orasida — past bosimli reaktorlarda monosilanni piroliz qilish usuli, bunda pirolizdan keyin vodorodli plazmada qizdirish yoki ionlar kiritish yo‘li bilan “gidridlanadi”;

- yuqori tartibli silanlarni ($40\%\text{SiH}_4 + 30\%\text{Si}_2\text{H}_2 + 15\%\text{Si}_3\text{H}_8 + 10\%\text{Si}_4\text{H}_{10}$) piroliz qilish usuli;

-gazsimon fazanig yuqori temperaturagacha qizdirilgan silanni gomogen parchalash usuli, bunda pirolizdan keyin ancha past temperaturali taglikaka kremniyni o‘tqaziladi;

- silanni gaz fazada ultrabinafsha nurlanish ta’sirida parchalash usuli.

Sanab o‘tilgan usullar biqsimi razryaddagiga nisbatan 1-2 tartib qadar (10-100 marta) α -Si pardalari o‘sh tezligini oshiradi. Bunday par-

dalar samarali legirlanadi (erishiladigan o'tkazuvchanlik $\sim 0,10 \text{ m}^{-1} \text{ sm}^{-1}$) va tashqi ta'sirlarga yuqori bardoshli. $\alpha\text{-Si:H}$ ning tuzilishi xususiyatlari kamroq o'rganilgan.

Elektron mikroskopiya usuli bilan aniqlanishicha, plazmaviy o'tqazishning muayyan sharoitida $\alpha\text{-Si:H}$ pardalarida ustunsimon tuzilish shakllanadi, u 10-20 nm diametrli va taxminan o'sish yo'nalishiga parallel o'qli ustunchalardan iborat, IQ spektrometrik tekshirishlar bunday pardalarda vodorodning notekis taqsimlanishini aniqladi: ustunlar ichida asosan mono va digidrid guruhlar, oraliq sohalarida ko'ndalang bog'lanishli polimer zanjirchalar $(\text{SiH}_2)_n$ bo'ladi. Ustunsimon tuzilishning tafsiliy tavsifi borasida ham ancha tadqiqotlar amalga oshirilgan. Ustunsimon tuzilish hosil bo'lishi sabablari; taglik sirtiga yomon ishlov berish, pardalar o'sishi sharoitining noma'qul bo'lgani, pardalarni legirlash.

$\alpha\text{-Si:H}$ pardalarning qo'llanishi eng asosiy sohalaridan biri yer ustidagi quyosh energetikasi. $\alpha\text{-Si:H}$ tomonidan ko'zga ko'rinadigan yorug'lik yutish koeffitsienti kristall kremniynikidan bir tartibdan (10 martadan) ham ortiq, optik yutish qatlami qalinligi 0,5-1 mkm. Bu xossalar yupqa pardaviy quyosh batareyalari yaratish imkonini beradi. Taqiqlangan zona kengligi quyosh nurlanishi spektr maksimumiga yaqin, bu esa quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish samaradorligini yuqori bo'lishini taqozo qiladi. $\alpha\text{-Si:H}$ ning yupqa pardalarini olishning soddaligi, arzonligi arzon quyosh batareyalari tayyorlash imkonini beradi. Tajriba ko'rsatishicha, $\alpha\text{-Si:H}$ asosida tayyorlangan *p-i-n* tuzilmalar yoki Shottki diodlaridan foydalanish maqsadga muvofiq.

p-i-n tuzilmalar asosidagi quyosh batareyalarida turli amorf yarimo'tkazgichning (getero) birlashmalari qo'llanishi muhim natijalar berdi. Masalan, *p*-sohani hosil qilish uchun bor (B) bilan legirlangan $\alpha\text{-SiC}$ pardalaridan foydalanildi ($\alpha\text{-SiC}$ ning taqiqlangan zona kengligi $\alpha\text{-Si}$ nikidan katta). Bu keng zonali deraza *p*-qatlamda yorug'lik yutilishini juda kamaytiradi va salt yurish kuchlanishini ko'tarish imkonini beradi.

Bunday keng zonali derazasi bor quyosh batareyalar FIK 8,5-10,5%ga yetdi va undan ko'proq bo'lishi kutiladi. Nazariy hisoblar bu batareyalar FIK 18-19% bo'lishini ko'rsatmoqda.

Quyosh batareyalari yetarlicha ko'p miqdorda ishlab chiqarilmoqda. Bu batareyalardan kam energiya talab qiladigan qurilmalarda (qo'l soatlari, mikrokalkulyatorlar, bolalar o'yinchoqlari va h.k.) eng ko'p foydalanilmoqda. Ammo, yuqori energiya talab qiladigan qurilmalarda quyosh batareyalaridan foydalanish sohasida uzluksiz ish olib borilmoqda.

α -Si:N pardalarining yana bir ajoyib xususiyati shuki, ularning sirti yaqinidagi sohada elektr maydon ta'sirida energetik sathlar siljiydi. Bu "maydoniy effekt" maydon hosil qilish yo'li bilan sirt yaqinida o'tkazuvchan kanal paydo qilishi mumkin, bunda zaryad tashuvchilar zichligi 10^3 - 10^4 sm^{-3} qadar hajmdagidan katta. Bu asosda maydoniy tranzistorlar yaratish mumkin. Bu tranzistorlar o'lchami juda kichik (parda qalinligi < 1 mkm, manba — zatvor oralig'i 10 mkm, o'tkazuvchan kanal kengligi 100 mkm), ularni tayyorlash uncha qiyin emas.

Gidridlangan (vodorodlangan) kremniy kserografiyada yorug'likka sezgir elementlar, birlamchi tasvir datchiklari (sensorlar), uzatuvchi televizion naylar (trubkalar) uchun videokonlar mishaenlari tayyorlash uchun yaxshi materialdir.

α -Si:H kserografiyada amalda butun ko'rinadigan spektral sohada yuqori yorug'likka sezgirliigi, tez ishlay boshlashi, mustahkamliigi, barqarorliigi bilan yuqori baholanadi. Elektrofotografik material sifatida α -Si:H tasvirni yuqori sifatli qiladi va yuqori ajratish qobiliyatini ta'minlaydi.

α -Si:H asosidagi optik datchiklardan videoaxborotni yozib olish, tekstil va metallurgiya sanoatida nuqsonlarni aniqlash va boshqa maqsadlarda foydalaniladi.

α -Si:H asosidagi termoelementlar o'z sezgirliigi bo'yicha metall termojuftlardan o'nlab marotaba yuqori. α -Si:H asosidagi tenzo-

datchiklar uchun deformatsiyaga nisbatan sezgirlik bir tartib yuqori. α -Si:H va uning geterokompozitsiyalari asosidagi xotira elementlari va yorug'lik nurlantiruvchi diodlar ham muhim vazifalarni bajaradi.

Nazorat uchun savollar

1. Qanday sintez jarayonlari mavjud?
2. Moddalarni olishning bir-biridan farq qiladigan qanday usullari bor?
3. Kimyoviy tiklash jarayonlari qanaqa?
4. Polikristall yarimo'tkazgichlar qanday olinadi?
5. Kremniy polikristallari qanday olinadi?
6. Germaniy polikristallari qanday olinadi?
7. Galliy va indiy arsenidlari olish texnologiyasi qanday?
8. Indiy va galliy fosfidlari qanday olinadi?
9. Amorf yarimo'tkazgichlar qanday olinadi?

7-BOB. MONOKRISTALLAR O'STIRISH · TEXNOLOGIYASI ASOSLARI

Yarimo'tkazgich monokristallar va epitaksial qatlamlar o'stirish qattiq fazadan, suyuq fazadan, gaz fazadan amalga oshirilishi mumkin. Biz quyida bu hollarning har biri haqida to'xtab o'tamiz.

7.1. Kristallarni qattiq fazadan hosil qilish

Bunday jarayonlar uch asosiy yo'nalishda olib boriladi: 1) qattiq fazada va qovushish holida deformatsiyalash qizdiruvi vositasida qayta kristallash: 2) polimer avrilishlar vositasida qayta kristallash: 3) amorf holatdan va o'ta to'yingan qattiq eritmadan qayta kristallash usullari mavjud.

Bu joyda qayta kristallash deganda qattiq fazadan kristall o'stirilganda kristall panjarasi simmetriyasi (tuzilishi) o'zgarmasligi (rekristallanish) yoki boshqa simmetriyali yangi kristall panjarasi hosil bo'lishini tushuniladi.

Bu usullarning afzalliklari: materialning suyulish temperaturasidan ancha past temperaturalarda kristallar o'stirish imkoniyati kristallar olish texnologiyasini soddalashtiradi; zarur shaklli kristallar olish jarayonlari soddalashadi, chunki, o'sayo'gan kristall shakli oldindan tayinlanadi; past temperaturada diffuziya koeffitsientlari kichik bo'lganligi tufayli kirishmalarning o'sayotgan kristalldagi taqsimoti dastlabki moddadagidek saqlanadi.

Mazkur usullarning kamchiliklari ham bor: qattiq fazadan kristallashning imkoniy markazlari miqdori ko'p bo'ladi. Markazlar vujudga kelishini va binobarin, yirik yarimo'tkazgich monokristallar o'stirishni boshqarish qiyin. Shuning uchun bu usullar batafsil qaralmaydi.

Amorf holatdan va o'ta to'yingan qattiq eritmalaridan qayta kristallash usullari yupqa epitaksial qatlamli yarimo'tkazgich moddalar va mikroelektron asboblarni texnologiyasida yetarlicha keng qo'llanishga ega bo'lmoqda.

7.2. Kristallarni suyuq fazadan hosil qilish

Kristallarni bunday o'stirishning ikki guruh usullari ishlangan bo'lib, ular suyuqmalarning o'zidan o'stirish va eritmalaridan o'stirish usullaridir.

7.2.1. Kristallarni suyuqmalardan hosil qilish

Bu usullar sanoatda keng qo'llanadi. Ularning unumdorligi yuqori. Jarayonlar kirishmalar deyarli bo'lmagan bir tarkiblovchili tizimda borgan tufayli o'stirish tezligi ancha katta, yetarlicha toza kristallar olinadi. Kristallarni bu usullarda o'stirishda mumkin bo'lgan eng katta temperaturalar talab qilinadi. Bu esa, ba'zi muammolarni keltirib chiqaradi. Xususan, jarayon yuqori temperaturada borishi uchun quvvatdor qurilmalar bo'lishi zarur. Ushbu sharoitda suyuqlar ifloslanishi ham mumkin.

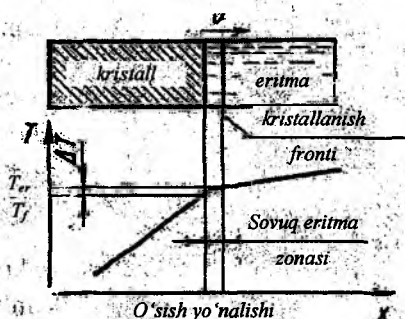
Monokristallarni suyuqmadan o'stirishning barcha usullari suyuqmaning yo'nalgan kristallanishi jarayonlariga asoslangan. Bunda suyuqlar ΔT qadar o'ta sovigan holda kristallning o'sishi bir fazaviy chegarada amalga oshadi va issiqlik kristallanish frontidan bir yo'nalishda asosan olib ketiladi (II.33-rasm). Bu jarayonda bitta monokristall hosil bo'ladi.

Yo'nalgan kristallanish usullari uch guruhga bo'linadi:

1) tayyorlama moddani suyuqlashtiriladi va keyin uni bir tomonidan kristallanadi (normal yo'nalgan kristallanish);

2) Suyulgan tayyorlama moddadan monokristall tortib olinadi (suyuqmadan kristallarni tortib olish);

3) Har bir paytda tayyorlama moddaning faqat uncha katta bo'lmagan qismi (zonasi ketma-ket suyuqlashtirilib, keyin uni kristallanadi (zonalar qayta kristallanishi usullari).



II.33-rasm. Suyuqmadan yo'nalgan kristallanish usulida kristall o'stirishda temperatura taqsimoti.

7.2.2. Suyulmalarning normal yoʻnalgan kristallanishi usullari

Bu usullarning barchasida suyulmali idish (tigel) devorlari bilan tegishgan holda kristall oʻsadi. Kristallanish frontida oʻta sovish hosil qilish uchun suyulmali tigelni isitgichga nisbatan yoki isitgichni tigelga nisbatan jildirib turiladi. Bu ishni, jildirishsiz suyulmali tigelni temperatura gradienti mavjud boʻlgan holda sovitish evaziga ham bajarish mumkin.

Normal yoʻnalgan kristallanish jarayoni maxsus ravishda kristallanish markazlari hosil qilmasdan ham oʻtkazilishi mumkin. Bu holda kristallanuvchi butun modda jarayon boshida suyuq holatda boʻladi. Tigelning moddaning suyulish temperaturasidan past temperaturadagi sohasi soviganda, qoida tariqasida, bir necha kristallanish markazlari oʻz-oʻzidan hosil boʻladi. Oʻsish jarayoni samaradorligini oshirish uchun bir necha xil tuzilishli tigellar ishlatiladi (II.34-rasm).

Dastavval kristallanuvchi modda xajmini kamaytirish uchun tigelning bir uchi konus shaklida qilinadi. Bu joyda kristallanish markazi hosil boʻlishi ehtimolligi ortadi. Oʻsish uchun qulay yoʻnalgan markaz boshqalari oʻsishini toʻxtatadi. Bunday natijaga erishish uchun tigelning bir uchi kapillar shaklida yasaladi (II.34, b,d-rasm)

Normal yoʻnalgan kristallanish jarayonini amalga oshirish uchun kerakli anjomlar:

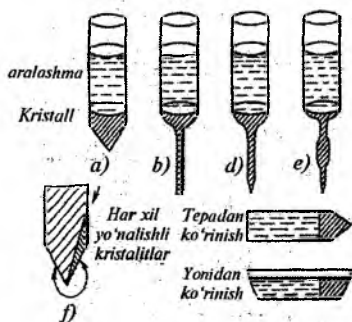
- tayin shaklli tigel, u kimyoviy barqaror (birikma hosil qilmaydigan, taʼsirlashmaydigan) moddadan tayyorlanadi;

- tayin issiqlik maydoni hosil qiladigan pech;

- pechning temperaturasini va tigel yoki isitgichni mexanik koʻchirishni boshqaradigan tizim.

Tigelni suyulma hoʻllamasligi, u yetarli termik va mexanik mustahkamlikka ega boʻlishi kerak.

Tigellarni tayyorlashda koʻpincha kvars shisha, aluminiy oksidi Al_2O_3 , sirkoniy dioksidi, toriy dioksidi va b. qoʻllanadi.



II.34-rasm Normal yoʻnalgan kristallanish usulida kristallar oʻstirishda qoʻllaniladigan tigellar shakllari.

Kristallarni pechlarda turli temperatura gradienti mavjud bo'lgan sharoitda ham o'stiriladi, bunda orasida temperaturalar farqi bo'lgan izotermik sohalar vujudga keltiriladi. Bir soha moddaning suyulish temperaturasidan yuqorida, ikkinchisi pastda bo'ladi (II.35, *a*-rasm). Bu sohalar orasida issiqlik almashinuvi juda kam bo'lishi choralari ko'riladi.

Agar tigelni jildirmasdan pechning temperaturasini umumiy pasaytirilishi hisobiga kristall o'stirilsa, bu holda temperatura taqsimoti II.35, *b*-rasmdagidek bo'ladi.

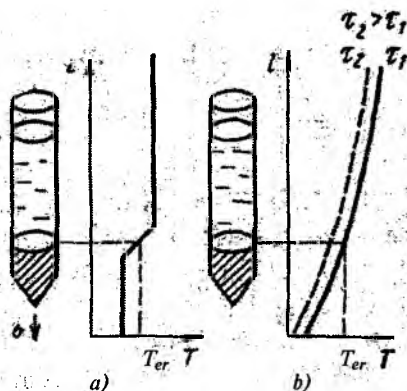
Normal yo'nalgan kristallash bir qator yarimo'tkazgichlar va dielektrlarning yirik kristallarini olish uchun qo'llanadi.

Qarab chiqilgan usulning asosiy kamchiligi shuki, o'stirilayotgan kristall va tigelnig issiqlikdan chiziqliy kengayish koeffitsientlari har xil bo'lishi tufayli bu usulda mukammal kristallar olish qiyin.

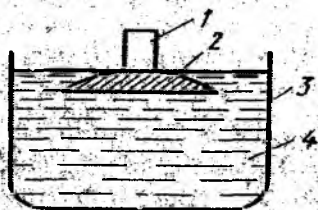
7.2.3. Suyulmadan kristallni tortib olish usullari

Bu usullar nazorat qilinadigan va qaytalanadigan xossalari yarimo'tkazgichlarning yirik monokristallarni sanoatda ishlab chiqarishda eng ko'p qo'llanadi. Kristallarni suyulmadan tortib olish asosiy qoidasini birinchi marta 1916-y. Choxralskiy taklif qilgan. Shuning uchun bu usullar turkumini umumlashtirib Choxralskiy usuli deyiladi. Bu usulning tavsifini mukammal tuzilishli monokristallar olish bandida keltiriladi.

Bu joyda biz Choxralskiy usuli haqida qisqa ma'lumot beramiz. Bu usul quyidagidan iborat, Sinchiklab tozalangan dastlabki moddani (poroshok yoki polikristall parchalarini) tigelga solinadi va suyulguncha qizdiriladi. Jarayonni jips yopiladigan kamerada (bo'lmada) vakuum sharoitida yoki neytral (inert) oksidlovchi yoki tiklovchi muhitda o'tkaziladi. So'ngra suyulmaga o'lchami bir necha mm bo'lgan xamirturush kristall botiriladi.



II.35-rasm. Normal yo'nalgan kristallanish usulida kristallar o'stirishda pechlardagi temperatura taqsimoti.



II.36-rasm. Kiropulos usulida kristallar o'stirish.

1-xamirturush; 2-kristall; 3-tigel;
4-suyulma.

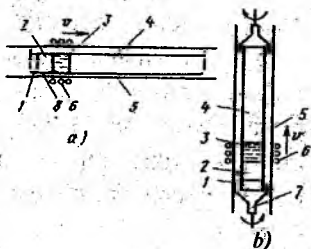
Xamirturushning uchi qisman suyulgan va muayyan temperatura maromiga erishilgandan so'ng, suyulmaning kristallanishi xamirturushdan boshlab yuz beradigan qilib, uni tortib chiqara boshlanadi. Kristallning diametrini tortib olish tezligini tanlash yoki suyulmani qizdirish yo'li bilan boshqariladi.

Kiropulos usuli. Bu usulda xamirturush suyulmaga kiritiladi va keyin undan tortib chiqarilmaydi, suyulma

ichida o'sa boshlaydi, bunga modda suyulishi temperaturasi mos izotermaning suyulmaning ichkarisiga ko'chishi sababchi bo'ladi. Bunga erishish uchu suyulmaning temperaturasi pasayganda kristall (xamirturush) tutgich orqali xamirturushni sovitiladi. Kiropulos usuli diametrining balandligiga (uzunligiga) nisbati katta bo'ladigan kristallarni o'stirishda qo'llaniladi.

Kristallni suyulmadan tortib olish usullari normal yo'nalgan kristallanish usulidan quyidagi afzalliklarga ega. Kristall erkin fazoda o'sadi, tigel unga mexanik ta'sir ko'rsatmaydi, qurilma o'sayotgan kristall o'lchamlarini har xil qilib olish imkonini beradi. Kristall o'sishi jarayonini kuzatib turish mumkin.

Bu usullar kremniy monokristallari olishda asosiy o'rin tutadi. Jahonda olinadigan kremniy monokristallari yiliga 2000 tonnadan ortiq. Texnologik qurilmalar tobora takomillashmoqda. Masalan, 1960-yilda kremniy kristallari o'stiradigan tigelning sig'imi 1 kg bo'lsa, hozir u 60 kg dan ortiq. O'stirilgan kristallar diametri 150-300 mm va uzunligi 1,5-2 m ga yetdi. Ularning tuzilishi ham mukammallashib bormoqda, dislokatsiyalarsiz kristallar o'stirilmoqda.



II.37-rasm. Zonaviy suyultirish usulida kristall o'stirish:

a) gorizontaal zonaviy suyultirish; b) vertikal tigelsiz zonaviy suyultirish:

1-xamirturush; 2-kristall; 3-suyulgan zona;
4-dastlabki modda; 5-jips yopiladigan kamera devori; 6-induktor; 7-kristall tutgich; 8-tigel.

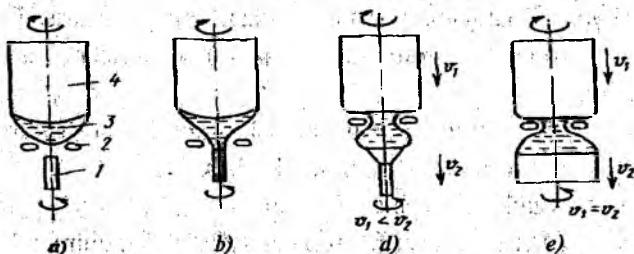
7.2.4. Zonaviy suyultirish usullari

Bu usullar yarimo'tkazgich monokristallarni o'stirish va moddalarni chuqur tozalashda muhimdir. Ularning bir fazilati kristallarni o'stirayotganda kirishmalarni ham bir tekis kiritish imkoniyatidir. Bulardan gorizontaal va vertikal zonaviy suyultirish, tigelsiz zonaviy suyultirish va Verneyl usullarini ko'rsatish mumkin.

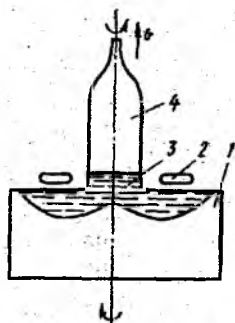
Gorizontaal zonaviy suyultirish usulida (II.37, *a*-rasm) kristallanuvchi modda tigelga joylanadi. Tigelning bir chetiga monokristall xamirturush joylanadi. Jarayon boshida xamirturush – dastlabki modda chegarasida suyuq zona hosil qilinadi. Uning, dastlabki modda orqali, xamirturushdan to tigelning boshqa chetiga siljib borishi tufayli monokristall o'sib boradi. Mazkur usulda kristallni tigeldan foydalanmsdan o'stirish mumkin (suzuvchi zona usuli) (II.37, *b*-rasm). Bu usul juda toza monokristallarni o'stirishda keng qo'llaniladi.

Tigelsiz zonaviy suyultirish jarayonida namunadagi suyulgan zonani sirtiy taranglik kuchlari ushlab turadi. (II.38-rasm). Kristallning shakli qanday bo'lishligi gidrostatik bosim va suyulmaning sirtiy tarangligi munosabatiga bog'liq. Bu usulni kremniy texnologiyasida qo'llash diametri 100 mm va undan ortiq bo'lgan monokristallar olish imkonini berdi. (II.38-rasm)

Monokristallarni tigelsiz, taglikdan o'stirish (garnissaj) usuli ham ishlab chiqilgan. Bu usulda suyultiriladigan katta diametrli sterjenning (taglikning) yuqorigi yuzida suyulma hosil qilinadi va xamirturush yordamida kristall tortib olinadi.



II.38-rasm. Induktor diametri suyultiriladigan sterjen diametridan kichik bo'lgan holda tigelsiz zonaviy suyultirish usulida kristalni o'stirish jarayoni bosqichlari (v_1 , v_2 – mos ravishda, sterjen va xamirturush harakati tezliklari): *a*-suyulma tomchisi hosil qilish; *b*-xamirturushni ho'llanishi; *d*-diametrni shakllantirish; *e*-o'zgarmas diametrli kristalni o'stirish.



II.39-rasm. Taglikdan kristallni tigelsiz o'stirish usuli:

1-taglik; 2-induktor;
3-suyulma; 4-o'stirila-
yotgan kristall.

Bu usulning afzalligi shundaki, uning yordamida uzunlik va ko'ndalang kesim bo'yicha kirishmalar yuqori darajada bir tekis taqsimlangan monokristallar olish mumkin.

Monokristallarni tigelsiz o'stirish usullari qiyin suyuladigan yarimo'tkazgich moddalar olishda ayniqsa ahamiyatlidir.

Verneyl usulida xamirturush kristall uchini alangada suyultiriladi. Bu usulni birinchi marta sapfir monokristallarini o'stirishda qo'llanilgan (II.40-rasm). Uni alangaga bardoshli moddalar kristallarini o'stirishda qo'llaniladi. Undan hozir sapfir, rubin, rutil, uirkoniy oksidi, ittriy oksidi, nikelli ferit va boshqa kristallarni o'stirishda foydalaniladi.

7.3. Kristallarni eritmadan o'stirish

Bu jarayon oldin ko'rilgan toza suyulmadan o'stirishga nisbatan ancha past temperaturalarda olib borilishi mumkin.

Ushbu usul bilan

- juda yuqori suyulish temperaturasiga ega bo'lgan moddalar kristallarini (masalan, olmosni);

- suyulish temperaturasida tarkiblovchilari bug'i bosimi juda yuqori bo'lgan yoki parchalanib suyuladigan kimyoviy birikmalarni;

- suyulmasi yuqori darajada qovushoq bo'lgan moddalar kristallarini;

- past temperaturali polimorf (ko'p shaklli) moddalar kristallarini o'stirish mumkin.

Jarayonning past temperaturali bo'lishi ko'pincha tozaroq va mukammalroq monokristallar olish imkonini beradi.

Erituvchiga qo'yiladigan talablar:

- u kristall o'stirish jarayoni temperaturasini muhim darajada pasaytirishi va o'z bug'ining bosimi yetarlicha past bo'lishi kerak;

- o'stirilayotgan kristallni ifloslamasligi, ya'ni taqsimot (segregatsiya) koeffitsienti kichik bo'lishi kerak;

- uning kristalldagi atomlari neytral kirishma bo'lishi ma'qul. Bunday erituvchini tanlab olish ancha qiyin.

Ushbu hollar farq qilinadi:

1. O'stirilayotgan kristall tarkibiga kirmaydigan modda erituvchi xizmatini bajaradi (masalan, NaCl kristallini o'stirishda suv).

2. O'stirilayotgan birikmaning tarkiblovchilaridan biri erituvchi bo'ladi (masalan, GaP kristallini o'stirishda).

Birinchi holda o'stirilgan kristall erituvchining barcha tarkiblovchilari kirishmalar sifatida qoldiq kirishmalar bilan birgalikda mavjud bo'ladi. Shuning uchun bunday kristallar uncha toza emas.

Ikkinchi holda eritmada chet moddalar yo'q, o'stirilayotgan kristallarning tozalik darajasini faqat eritma tarkiblovchilari tozaligi aniqlaydi.

Eritmadan kristall o'sishi holda bu jarayon quyidagi bosqichlardan iborat:

- dastlabki tarkiblovchilarning erishi;
- tarkiblovchilarning eritmaning suyuq fazasi orqali kristallanish fronti tomoniga diffuziyalanishi;

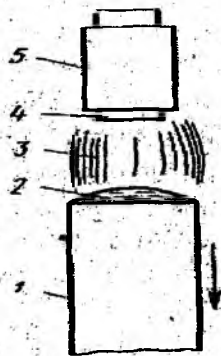
- kristallanish frontida tarkiblovchilarning o'tirib qolishi;
- kristallanish issiqligining sochilishi.

Eritmadan hosil qilinayotgan kristallarning o'sish tezligi o'z suyulmalaridan olinadigan kristallarnikiga nisbatan ikki-uch tartib chamasida kam (10^{-3} - 10^{-2} sm/soat) bo'ladi, ammo uni oshirishning ba'zi chorolari ham mavjud.

Kristallanuvchi moddaning eruvchanligini oshirish uchun shu modda bilan ta'sirlashuvchi tarkiblovchilar eritmaga qo'shiladi. Ularni *mine-ralizatorlar* deyiladi.

Eritmalardan yarimo'tkazgichlar monokristallarini o'stirish usullari bir-biridan eritmaning kristallanuvchi modda bilan o'ta to'yinishini qanday hosil qilinishi bilan farqlanadi:

- erituvchining bug'lanishi bilan;
- kristallanuvchi modda manbai va xamirturush orasida temperaturalar farqi vujudga keltirish bilan;



II.40-rasm. Alanga bilan suyultirish usulida (Verneyl usuli) kristallni o'stirish:

1-o'stirilayotgan kristal;
2-suyulma; 3-alanga;
4-dastlabki modda kukni va kislorod yuboriladigan naycha; 5-vodorod yuboriladigan naycha.

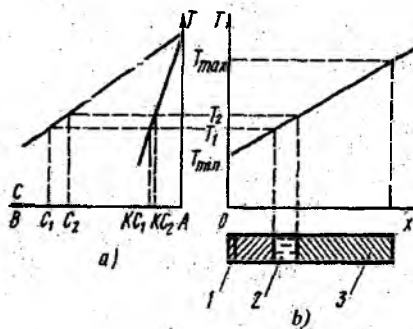
- elektr maydonda kristallash bilan;
- to'yingan eritmani sekin sovitish bilan;
- butun namunada hosil qilingan temperatura gradienti bo'lgani holda zonaviy suyultirish bilan.

Maxsus xamirturushlar kiritmasdan, balki kristallanish markazlarining o'z-o'zidan (spontan) paydo bo'lishi va o'sishi yo'li bilan ham eritmadan kristallarni o'stirish mumkin (ommaviy kristallanish) yoki kristallni xamirturush atrofida o'sishini nazorat qilib o'stirish mumkin.

Eng sodda holda kristall o'sishi uchun kerak bo'lgan eritmaning o'ta to'yinishini erituvchining bug'lanishi yoki to'yingan eritmaning sekin sovtilishi orqali paydo qilinadi. Bu holda ommaviy kristallanish oqibatida kichik kristallar olinadi, ularda nuqsonlar ko'p, kirishmalar juda notekis taqsimlangan.

Yirik kristallarni eritmalardan xamirturush asosida o'stirish xuddi suyulmadan o'stirish usullariga o'xshab ketadi.

7.3.1. Temperatura gradientli zonaviy suyultirish usuli



II.41-rasm. Temperatura gradienti bo'lgan holda kristallni zonaviy suyultirish usulida o'stirish:

a) – A (kristallanuvchi modda) – B (erituvchi) tizimi holatlari diagrammasining qismi;

b – namuna bo'ylab temperatura taqsimoti (1 – A modda xamirturushi; 2-suyuq A - B eritma zonasi; 3 – dastlabki A modda).

Ushbu usul kristallarni eritmadan o'stirishning muhim usulidir.

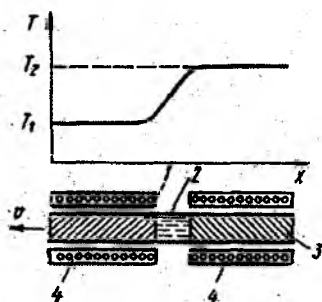
1 xamirturush va dastlabki 3 (A) modda orasida 2 erituvchining yupqa qatlami joylashgan. Ular temperaturasi taqsimoti II.41, b-rasmda tasvirlangan pechga joylanadi. Tizimning T_{maks} , eng katta temperaturasi A moddaning suyulish temperaturasidan past, eng kichik T_{min} temperaturasi esa A - B evertikaning suyulish temperaturasidan yuqori qilib olinadi. B erituvchi A modda bilan tutashgan holda suyuq faza hosil qiladi va u har ikki yo'nalishda gorizontall ravishda tarqaladi. Zona chegaralari temperaturasi T_1 va T_2 bo'lib qolguncha (ular A - B

tizimning muvozanatliy holatiga mos keladi) A moddaning erishi davom etadi. A moddaning muvozanatliy zichligi o'ng chegara yaqinida chap chegara yaqinidagidan yuqori. Suyulgan zonada (sohada) A modda zichligining gradienti o'rtnashadi va u zonaning issiq chegarasidan sovuq chegarasiga tomon diffuziyalanadi. Oqibatda **suyulgan zona temperatura gradienti** ta'sirida namunaning issiqroq uchi tomonga ko'chadi. Bu ko'chish zona ichida erituvchi zichligini o'zgartiradi. B erituvchining zonadagi miqdori uning A qattiq fazadagi eruvchanligi hisobidan ham kamayadi.

Suyulgan zona ko'chishi tezligini oshirish uchun temperatura gradienti (dT/dx) va A tarkiblovchining suyuqlikda D diffuziya koeffitsienti katta bo'lishi va likvidus chizig'i og'maligi (dT/dc) kichik bo'lishi kerak.

Bir jinsliroq kristallarni o'stirish uchun temperatura gradienti kichik bo'lishi, A qattiq fazada B erituvchi juda kam eruvchanlikka ega bo'lishi kerak.

Eritmaning zonasi orqali elektr tok o'tkazib, izotermik sharoitda kristallash mumkin. Bu holda ionlarning ko'chishi va Peltie effekti hisobiga kristallanish frontida eritma o'ta to'yinadi. Manba — eritma chegarasida Peltie issiqligi ajraladigan, eritma — taglik chegarasida esa u yutiladigan qilib tok yo'nalishi tanlanadi. Pelte issiqligi ta'sirida manba qatlami eriydi, shu vaqtda boshqa chegarada temperatura pasayib, eritma o'ta to'yinib qoladi, kristallanish yuz beradi. Elektrik maydonda bunday kristallanish jarayon temperaturasini bir muncha pasaytirish imkonini beradi, bu esa mazkur usulning afzalligidir.



II.42-rasm. Temperatura gradienti bo'lgan holda bir jinsli kristallarni zonaviy suyultirish usulida o'stirish

1- A modda kristali; 2-suyuq A - B eritma zonasi; 3-dastlabki A modda; 4-ikki zonali pech.

7.3.2. Kvars monokristallarini o'stirish

Kvars kristallari sanoatda muhim ahamiyatga ega. Ularni temperatura gradienti mavjud bo'lganida xamirturushlarda o'stirish usulini qarab chiqaylik.

Kvarsning erituvchisi sifatida suv ishlatiladi.

Yuqori temperatura va bosimda, mineralizator (NaOH) ishtirokida amalga oshadigan kvars kristallari o'stirish quyidagi tartibda olib boriladi:

- α -kvarsning mayda donalari kukuni reaktor-avtoklav tubiga solinadi, uning yuqorigi qismida α - kvars xamirturushlari osib qo'yilgan;
- avtoklavning (0,8) qismi ishqoriy eritma (0,5NaOH) bilan to'ldiriladi;

- avtoklav ikki zonali pechda tik vaziyatda joylanadi;

- avtoklavning kukunli pastki qismining temperaturasi yuqorigi qism - o'sish zonasi temperaturasidan yuqori;

- temperaturani suvning kritik temperaturasi 374°C dan pastroqqacha oshirilganda eritma sathi ko'tariladi va ishchi xajmni to'la egallaydi;

- avtoklav ichidagi bosimni temperaturalar maydoni va uning dastlabki eritma bilan to'ldirilishi aniqlaydi;

- pastki zona temperaturasi 400°C , yuqorigi zonaniki 350°C , avtoklavdagi bosim 200 MPa bo'lganida α -kvars monokristallarining o'sish tezligi [0001] yo'nalishda sutkada 2 mmga yetishi mumkin;

- kristallanish fronti yaqinida o'ta to'yinish 400°C da to'yingan eritmaning o'sish zonasiga konveksion ko'chirilishi hisobiga hosil qilinadi. Bu zonada 350°C da eritma o'ta to'yingan bo'lib qoladi.

Bu usul bilan kvarsning eng yirik va mukammal monokristallari o'stiriladi.

Kvars kristallarini o'stirishda avtoklav (tigel) po'latdan yasaladi. Boshqa moddalar uchun esa asl metallardan ichki qistirmalardan foydalaniladi.

Bayon qilingan usul bilan yana bir qancha moddalarning yirik kristallari o'stiriladi (saffir, rubin, rux oksidi, ittri-temir granat va b.).

Kristallarni eritmalardan o'stirish qonuniyatlari va usullari yarimo'tkazgichli asboblarda texnologiyasida epitaksial qatlamlar olish uchun keng qo'llaniladi.

7.4. Kristallarni gazsimon fazadan o'stirish

Gazsimon fazadan kristallarni o'stirishda qo'llanadigan usullarning ikki guruhi bor:

1. *Toza fizik kondensatsiyalanishga asoslangan usullar.* Ularning eng muhimi sublimatsiya-kondensatsiya jarayoniga asoslangan usuldur:

2. *Kristallanish zonasida (sohasida) gazsimon kimyoviy birikmalarning parchalanishi (yoki tiklanishi) hisobiga kimyoviy sintezlanish va kimyoviy ko'chirishga asoslangan usullar.*

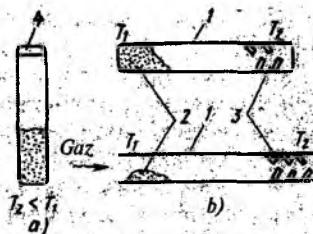
Elektronlar texnikasining gazsimon fazadan olinadigan eng muhim materiallari monokristallari orasida birinchi o'rinlarda $A^{II}B^{IV}$, $A^{IV}B^{VI}$ birikmalar va kremniy karbidi turadi.

Kristallarni gazsimon fazadan suyulish temperaturasidan ancha past temperaturalarda o'stirish mumkin. Bunda amalda har qanday moddalar kristallarini hosil qilsa bo'ladi.

Sublimatsiya-kondensatsiya usuli bilan kristallash.

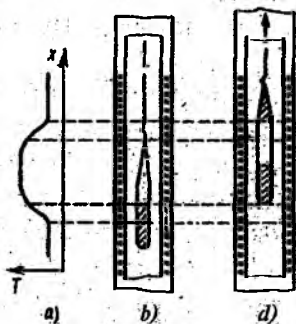
Bu usul bug'i suyulish temperaturasidan pastda yetarlicha yuqori bosim hosil qiladigan moddalar kristallarini boshqa gazsimon usullar nochor bo'lgan holdagi moddalar kristallarini o'stirishda qo'llaniladi. Bu usulda kristallanishni yopiq yoki oqimli tizimlarda o'tkaziladi.

Yopiq tizim kavsharlangan kvarts ampulasi bo'lishi mumkin. Qiyin suyuluvchan moddalar uchun korund (Al_2O_3) yoki qiyin suyuluvchan metallardan tayyorlangan kavsharlangan tigellardan foydalanish mumkin. Ba'zi hollarda, zaruratan, tigellarni boshqa materiallardan (masalan, grafitdan, shisha ugleroddan) jips yopilmaydigan qilinadi, ammo, tigeldan bug'larning chiqib ketishi kam bo'lishi kerak (*kvaziberk tizimlar*).



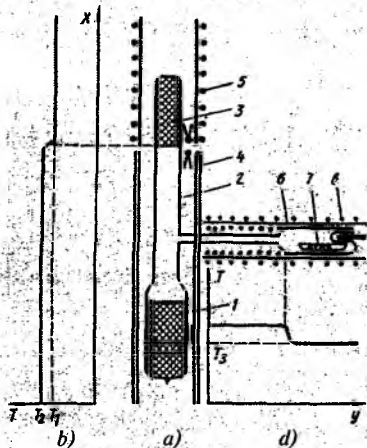
II.43-rasm. Gaz fazadan kristallarni o'stirish uchun qo'llaniladigan yopiq va oqimli (ochiq) tizimlar:

a – yopiq tizim; *b* – oqimli tizim (1 – konteyner; 2 – dastlabki modda (shixta); 3 – yalpi kristallanish zonas; 4 – monokristall xamirturush).



II.44-rasm. Ampulada kimyoviy transport reaksiyadan foydalanib kristall o'stirish:

a – pech balandligi bo'yicha temperatura taqsimoti;
b – tortib chiqarish boshida ampula vaziyati;
d – jarayonning keyingi bosqichi.



II.45-rasm. Monokristallarni bug' fazasidan (a) o'stirish va pechlar temperaturalari taqsimoti (b, d):

1-kvars tig'el; 2-kvars ampula; 3-xamirturush; 4, 5-pechlar; 6-kvars naycha; 7-uchuvchan tarkiblovchili qayiqcha; 8-uchuvchan tarkiblovchi bug'lari bosimini boshqaruvchi isitgich.

Berk (yopiq) tizimlarda massa uzatilishi molekulyar dastalar (vakuumda), yo molekulyar yoki konventiv diffuziya orqali amalga oshiriladi.

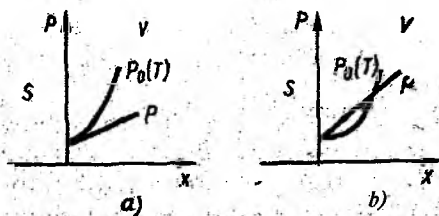
Oqimli tizimlarda kristallar o'stirishda dastlabki modda bug'larini kristallanish zonasiga inert gaz olib boradi.

Kimyoviy reaksiya ishtirokida kristallanish usullarini suyuqlik temperaturasidan pastda o'z bug'lari bosimi kichik bo'ladigan moddalar yoki sublimatsiya jarayonida o'z tarkibi buziladigan moddalar kristallarini o'stirishda qo'llaniladi. Kimyoviy transport ishtirokida kristallarni o'stirish berk yoki kvaziberk tizimlarda bajariladi: gazsimon kimyoviy birikmalarni parchalash (yoki

tiklash) usulini oqimli tizimlarda qo'llaniladi.

Kristallarni gazsimon fazadan o'stirish usullarining barchasida kristallanish markazlarining o'z-o'zidan hosil bo'lishidan yoki xamirturushlardan foydalanish mumkin (II.43-rasm). Birinchi holda o'stirilgan ignasimon kristallar, plastinasimon yoki polikristall o'smali kristallar elektron texnikada kamdan-kam qo'llanadi. Ba'zi hollarda xamirturushsiz texnologiya yetarlicha yirik monokristallar beradi (II.44-rasm).

Bug'ni xamirturush kristallchaga nazoratli o'tqazish usuli bilan kimyoviy tarkibi va stexiometriyasini nazorat qilib, o'stiriladigan yetarlicha yirik (diametri 100 mm gacha) kristallar hosil qilish mumkin. Bunday jarayonning tasviri HgSe monokristallari olish uchun II. 45-rasmda keltirilgan. Dastlabki polikristall moddani 2 kvars ampulaning 1 tig'eliga solinadi. Ampulaning yuqorigi qismida 3 monokristallik xamirturush joylanadi. Ampulani birikmaning sublimatsiya temperaturasigacha 4 pechda qizdiriladi. 4 va 5 pechlar siljib, kristall va bug' faza chegarasida zaruriy temperaturalar gradientini hosil qiladi.



II.46-rasm. Gaz fazadan kristall o'stirilganda barqaror (a) va barqaror bo'lmagan (b) fazalar ajralish sirtining mavjud bo'lishi shartlari.

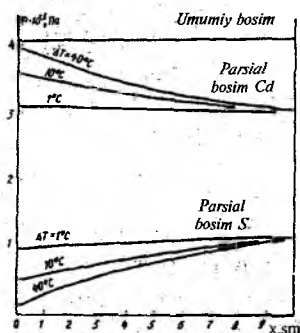
6 kvarts o'smaga simobli yoki selenli 7 qayiqchani joylanadi. 8 pechning temperaturasi boshqarib, 2 ampula ichida bug' fazaning zaruriy tarkibi paydo qilinadi. Xamirturushning T_1 va bug' fazaning T_2 temperaturalarini, shuningdek, pechlar siljishi tezligi o'stiriladigan monokristallar o'sish tezligi va sifatini aniqlaydi. T_3 temperaturani boshqarib, monokristall tarkibi va stexiometriyasini o'zgartirish mumkin. Simob selenidi HgSe monokristallari $T_1=230 \div 250^\circ\text{C}$, $T_2=300 \div 330^\circ\text{C}$, $T_3=250 \div 350^\circ\text{C}$ bo'lgan sharoitda olinadi va ularda zaryad tashuvchilar zichligi 10^{23} m^{-3} bo'ladi.

Odatda gazsimon fazadan monokristall o'sishi tezligi 10^{-2} – 1 mm/soat bo'lib, Choxralskiy usulida o'stirish tezligidan bir necha tartib qadar past. Chunki suyuqlikka nisbatan gaz zichligi 10^4 – 10^6 marta kichik.

Bosimni oshirish yo'li bilan gazsimon faza zichligini oshirish mumkin. Ammo buni chegaralovchi birmuncha sabablar bor. Bosimni juda orttirib yuborilsa, ampula portlab ketishi ham mumkin. Gaz tashuvchining majburiy konveksiyasidan (oqishidan), tabiiy konveksiyadan foydalanib, gazsimon fazadan kristallar o'stirish tezligini oshirish mumkin.

Kristallarni bug' (gazsimon) fazadan o'stirishda uning tezligini bug'ning konsentratsion o'ta sovishi hodisasi cheklab qo'yadi. Masalan, bir tarkiblovchi bug' o'tirganda (kondensirlanganda) kristall-bug' ajralish sirtining barqarorligi chegara yaqinidagi sohada kondensirlanayotgan moddaning P parsial bosimi va to'yingan bug'ning P_0 bosimi orasidagi munosabat bilan aniqlanadi.

Agar temperatura gradienti va u bilan bog'langan P_0 bosim gradienti $x \geq 0$ qiymatlar uchun mavjud bo'lsa, bu holda kristall o'sadi. Bunda kondensirlanish (kristallanish) P bosim qiymatlari gradientini hosil qiladi. Fazalar ajralish chegarasida $P=P_0$ deb faraz qilinadi. Agar $x \geq 0$ uchun $P < P_0$ bo'lsa, ajralish chegarasi barqaror, $P > P_0$ bo'lsa, bu chegara barqaror.



II.47-rasm. Nostexiometrik CdS tarkiblovchilarning parsial bosimlari hisoblangan qiymatlarining (turli ΔT lar uchun) manbagacha masofaga bog'liqligi.

rormas. Rasmlardan: agar $dP_0|dx|_{x=0} \geq dp|dx|_{x=0}$ bo'lsa, barqaror o'sish yuz beradi.

Gazsimon fazadan kristallarni o'stirish jarayonlarini tahlil qilishdan kelib chiqadigan xulosalar.

1. Biror modda kristallarini muayyan temperaturalar oralig'ida o'stirish mumkin, bunda har bir temperaturada ΔT gradientni va massalar ko'chirilishi mexanizmini o'zgartirish yo'li bilan o'sish tezligini o'zgartirish mumkin. Bu monokristallar olish texnologik sharoiti yetarlicha keng bo'lishi imkonini berdi.

2. O'stirish temperaturasi va kristall o'sishi tezligini o'zgartirganda ikki hol bo'lishi mumkin:

a) gazsimon faza o'sayotgan kristall hajmi bilan muvozanatda bo'lgan hol (o'sish tezligi v kristall tarkiblovchilari o'z diffuziyasi v_d tezligidan kichik, ya'ni $v < v_d$). Bu holda kristallning tarkibiy tuzilishi (stexiometriyasi), xususiyl nuqtaviy nuqsonlar zichligi gazsimon fazada temperatura, parsial bosimlarga bog'liq, ammo o'sish kinetikasi va kristallografik yo'nalishiga bog'liq emas.

b) yuqorida aytilgan muvozanat yo'q bo'lgan hol ($v > v_d$)da kristall stexiometriyasi adsorbsion va kinetik shartlar bilan aniqlanadi, o'sish tezligi va kristallografik yo'nalishiga bog'liq bo'ladi.

3. Kristall ko'p yoqlama o'sganda asosiy tarkiblovchilar, xususiyl nuqtaviy nuqsonlar va legirolovchi kirishmalar taqsimoti sektorial xarakterga ega bo'ladi.

Bu xususiyatlarni hisobga olgan holda gazsimon fazadan kerakli xossalni monokristallar olishni yo'lga qo'yish mumkin.

9.5. Kerakli shakldagi monokristallarni o'stirish

Quyidagi maqsadlarda monokristallarni kerakli shakllarda o'stiriladi.

1. Qimmatbaho va kamyob materiallarni asboblari tayyorlashda keshish, silliqlashda isroflanishini kamaytirish zarur. Masalan, yarim-

o'tkazgichlar kristallariga mexanik ishlov berishda isrof 70-90% ni tashkil qilishi mumkin.

2. Kristallarga mexanik ishlov berishni osonlashtirish kerak.

3. Kristallar asosida tayyorlanadigan asboblarga nisbatan qo'yiladigan talablarga muvofiq keladigan elektr-fizik xossalarga va geometrik o'lchamlarga ega bo'gan kristallar o'stirish zarur.

4. Materiallarni va ular asosida asboblarni ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatlashtirish va uzluksiz olib borishni tashkil qilish sharoitini barpo qilish kerak.

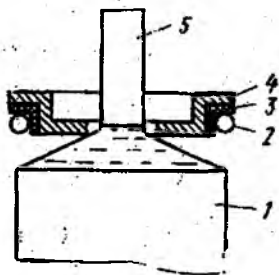
5. Materialdan tejimli foydalanish tufayli va muayyan shakl berilgan kristallarning yangi xossalari namoyon bo'ladigan qo'llanish sohalarini aniqlash lozim.

Bunday kristallarni qattiq fazalararo o'tishlar usuli bilan, suyuq eritmalaridan, suyuq eritmalaridan va gazsimon fazadan o'stirish mumkin. Birinchi usul kam qo'llanadi.

Kristallarni plastina yoki ignalar shaklida suyuq eritmalaridan va gazsimon fazadan o'stirilishi mumkin. Ammo, bu usullarning ba'zi kamchiliklari ham bor.

Gazsimon va suyuq fazadan monokristall taglikda yarimo'tkazgich pardalarni (yupqa qatlamlarni) epitaksial o'stirish kerakli shaklli kristall qatlamlarni olish usuli turli yarimo'tkazgichli asboblardan va integral sxemalar tayyorlash texnikasida keng qo'llaniladi.

Kristallarning kerakli shaklini hosil qilish qoidasi quyidagichdir. Hosil qilish xohlangan shakl yoki shakl elementi turli effektlar evaziga suyuq fazada paydo qilinadi: shakllangan suyuqlik xajmini, muayyan kristallanish sharoitini tanlagan holda, qattiq holatga o'tkaziladi.



II.48-rasm. Muayyan shaklli kristallarni taglikdan o'stirish:

1-dastlabki modda; 2-induktor; 3-izolatsiyalovchi qatlam; 4-elektromagnetik energiya yig'uvchi; 5-o'stirilayotgan shaklli kristall.

A.V. Stepanov (1938-y) maxsus shakllantiruvchilar yordamida kerakli shakldagi kristallarni suyulmadan o'stirib olish usulini taklif qilgan. Uni yupqa va uzun tayoqchalar va tasmalar, shuningdek, turli shakldagi monokristallar, xususan, yo'g'on monokristallar o'stirishga qo'llanish mumkin. Kremniy va ba'zi $A^{III} B^V$ birikmalar monokristallarini o'stirishda suyulmani ho'llovchi shakllantiruvchilar qo'llanadi. Kremniyning tasmaimon kristallarini o'stirishda grafitdan yoki kremniy karbididan tayyorlangan shakllantiruvchi ishlatiladi.

Kerakli shakldagi kremniy kristallarini tigelsiz usulda taglikdan o'stirish mumkin (II.48-rasm). Kremniy taglik silindrsimon bo'lib, u ichida yuqori chastotali energiyani grafit yig'uvchi joylashgan induktor bilan o'ralgan. Yig'uvchi (konsentrator) ning tuzilishi o'stiriluvchi kristall geometriyasini aniqlaydi. Kristall shaklining hosil bo'lishi konsentratoridagi tokning suyulmadagi induksion tok bilan o'zaro ta'siri evaziga amalga oshiriladi. Bunda shakllangan suyulma ustunidan shaklli kristallni kontaktsiz tortib olish mumkin.

Nazorat savollari

1. Kristallar qattiq fazadan qanday hosil qilinishi mumkin?
2. Kristallar suyug fazadan qanday hosil qilinishi mumkin?
3. Kristallar suyulmalardan qanday hosil qilinadi?
4. Normal yo'nalgan kristallanish usullarini tavsiflang.
5. Suyulmadan kristallarni tortib olishning qanday usullari bor?
6. Zonaviy suyultirish usulida kristallar qanday o'stiriladi?
7. Kristallarni eritmalaridan qanday o'stiriladi?
8. Kvars monokristallari qanday o'stiriladi?
9. Kristallarni gazsimon fazadan o'stirsa bo'ladimi?
10. Kerakli shakldagi monokristallar qanday usulda o'stiriladi?

8-BOB. YARIMO'TKAZGICH MONOKRISTALLAR O'STIRISH

Monokristallarni u yoki bu usul bilan olishdan avval ma'lum tayyorgarlik ko'riladi. Bu bosqichlarda bir necha muhim tadbirlar amalga oshiriladi.

Kirishmalarni kristall o'stiriladigan suyulmaga qattiq holatda kiritiladi. Ayrim hollarda esa, kirishmalarni suyulmaga gazsimon fazadan kiritiladi.

8.1. Kirishmalar hisobi

Oldindan tayin (talab) qilingan xossalarga ega bo'lgan monokristall o'stiriladigan suyulmaga kiritiladigan kirishma hisob qilinadi. Bu hisob quyidagi ma'lumotlarni o'z ichiga olishi kerak:

- a) kristalldagi kirishmaning talab qilinadigan zichligi;
- b) effektiv taqsimot (segregatsiya) koeffitsienti;
- d) monokristallda tayinli elektr xossalarni olish uchun suyulmaga kiritish kerak bo'lgan kirishmaning zichligi va massasi;
- e) konteynerdan suyulmaga beixtiyor kirishma o'tib qolishi oqibatida hosil bo'ladigan zaryad tashuvchilarni kompensirlovchi legirlovchi kirishmaning massasi;
- f) bug'lanish oqibatida kirishma isrofini to'latadigan uchuvchan legirlovchi kirishmaning massasi;
- g) ligatura massasi;

Ligaturalar monokristallar yoki polikristallar shaklidagi ko'p kirishma kiritilgan (kuchli legirlangan) va suyulmaga kiritiladigan yarimo'tkazgichlardir. Umumiy holda monokristall ligaturadan kuchsiz legirlangan (kam kirishmali), yuqori omli yarimo'tkazgich monokristallarini olish uchun, polikristall ligaturadan kuchli legirlangan, past omli monokristallar olish uchun foydalaniladi.

8.2. Komponovka

Xomashyoni sintez yoki kristallash jarayonlariga tayyorlash bosqichi *komponovka* deyiladi. U quyidagi ishlarni o'z ichiga oladi: xomashyoni maydalash, tarozida tortish, yedirish, so'ng uni tayyorlab qo'yilgan konteynerga joylashdan iborat.

8.2.1. Dastlabki xomashyoni maydalash

Juda toza yarimo'tkazgichlarni turli usullarda maydalanadi. Polikristall kremniyni mexanik pressda parchalanadi. Mo'rt moddalar (Sb, B_2O_3) bolg'a yoki qisqich bilan maydalanadi. Yumshoq metallarni molibden pichoq bilan kesiladi.

Yarimo'tkazgichlar polikristallari va yaroqsiz deb topilgan monokristallari maxsus arra bilan mayda bo'laklarga tilinadi.

Eng yaxshisi yarimo'tkazgichlar kristallari xomashyosi mexanik pressda parchalashdir.

Galliy va indiy metallari ftoroplast tigelda suyultirilishi va shu moddalardan yasalgan qoliplarga quyilishi mumkin. Bunda metallni oksidlardan tozalash amali ham bajariladi.

8.2.2. Oraliq texnologik bosqichlar

Bunda yarimo'tkazgich monokristallar sirti oksidlanadi va tashqi muhitdan kirindilar kirib qoladi. Shuning uchun navbatdagi bosqichda dastlabki yarimo'tkazgichlarni va ishlab chiqarish tashlamalarini yuviladi va kimyoviy yediriladi.

Yarimo'tkazgichlarni eritmalarda yuvish (yog'sizlantirish) ularning sirtidagi yog'lar, moylar, yelimlangan materiallarni bartaraf qilish maqsadida bajariladi.

Bu masalalar III qismda ancha batafsil qoraladi.

8.2.3. Kimyoviy yedirish

Bu jarayon yarimo'tkazgich sirtini oksidlash va keyin oksidni eritib yuborishdan iborat. Shuning uchun yediruvchi oksidlovchi, erituvchi va bu jarayonni tezlatgich yoki sekinlatgichdan iborat bo'ladi.

Yedirish amalidan keyin yarimo'tkazgich sirtida yedirish mahsulotlari va yediruvchi izlari qolishi mumkin. Ularni bartaraf qilish uchun yedirilgan moddani suvda (oldin distillangan, keyin ionsizlangan suvda) yuviladi.

Yuvilgan mahsulotni ikki bosqichda quritiladi:

1) $100^{\circ}C$ da toza havo oqimida termostatda (quritish shkafida) quritish yoki spirtida chayqash yo'li bilan havoda quritish;

2) vakuumda, 300–400°C dan oshmagan temperaturalarda (yarimo‘tkazgich birikmalar parchalanmaydigan temperaturalarda) quritish.

8.2.4. Birikmalar sintezi hisobi

Masalan, $A^{III}B^V$ yarimo‘tkazgich birikmalarda B^V tarkiblovchining stexiometrik miqdori ushbu

$$M_{B^V}^{CT} = A_{B^V} M_{A^{III}B^V} / A_{A^{III}B^V} \quad (\text{II. 54})$$

ifoda bo‘yicha aniqlanadi. Bunda $M_{B^V}^{CT}$ va $M_{A^{III}B^V} - B^V$ tarkiblovchining va sintezlanuvchi $A^{III}B^V$ birikmaning massalari, A_{B^V} va $A_{A^{III}B^V} - B^V$ tarkiblovchining va $A^{III}B^V$ ning atom va molekular massalari. Agar B^V tarkiblovchi uchuvchan (fosfor yoki arsenik) bo‘lsa, uning massasini $M_{B^V}^{\delta}$ qadar ko‘proq olinadi. Reaktorning erkin (bo‘sh) hajmini to‘latish uchun

$$M_{B^V}^{to'l} = PVA_{B^V}^{\delta} / [0,082(273 + t)] \quad (\text{II. 55})$$

yana B^V -tarkiblovchi massasi (g) kerak. Bunda P – uning reaktordagi bosimi, at; V -reaktor hajmi, l; t -reaktor devorlari o‘rtacha temperaturasi, °C; $A_{B^V}^{\delta} - B^V$ ning atom massasi, g.

Demak, B^V tarkiblovchining massasi

$$M_{B^V} = M_{B^V}^{CT} + M_{B^V}^{\delta} + M_{B^V}^{to'l} \quad (\text{II. 56})$$

bo‘lishi kerak.

A^{III} tarkiblovchining massasi:

$$M_{A^{III}} = M_{A^{III}B^V} - M_{B^V} \quad (\text{II. 57})$$

8.2.5. Tovar monokristallarini o‘stirish komponovkasi

Bu ish xomashyoning hisoblangan miqdorini tortish, uni yedirish, quritish va tigelga joylashdan iborat. Keyin tigelga legirlovchi moddalar bo‘lagi joylanadi, uning ustiga yedirilgan xamirturush qo‘yiladi. Buning xammasini polietilen paketga taxlanadi va monokristall o‘stiriladigan

joyga jo'natiladi. O'stirilgan monokristall quymasidan o'lchamlari (diametri va uzunligi) bo'yicha texnik talablarni qanoatlantiradigan qismi kesib olinadi.

Elektrofizik parametrlari o'lchangan monokristallning xaridorbop qismi kesib olinib, tekshirilib, tayyor (tovar) mahsulot omboriga jo'natiladi. Monokristallning qolgan qismlari (qiyqimlari), tigelda suyuqlanib kristallanib qolgan qoldiqlari (qaytmalar deyiladi) yana dastlabki xomashyo sifatida ishlatiladi.

Tayinli elektrofizik xossali monokristallar olish uchun komponovkada faqat ma'lum parametrlar xomashyodan foydalanish zarur.

8.3. Kirishmalar tekis taqsimlangan monokristallar olish

8.3.1. Bir tekis taqsimlanishni (bir jinslilikni) baholash

Bir jinslilik tushunchasi nisbiydir. Uni baholash uchun to'g'ri (bevosita) va bilvosita usullar qo'llanadi.

To'g'ri (bevosita) usullarga kimyoviy, spektral, mass-spektral, rentgenospektral, aktivatsion usullar mansub. Bilvosita usullarga fizik (solishtirma qarshilikni, Xoll doimiysini, termoEYK, optik o'tkazishni o'lchash va b.) usullar, tuzilishni tadqiqlash (rentgenografiya, elektronografiya va b.) usullari, metallografik (tanlovchan, anodiy, kimyoviy va termik yedirish, elektrolitik o'tqazish va b) usullari kiradi.

Yarimo'tkazgichlarda bir jinslilikni baholash uchun elektr xossalarni (masalan, solishtirma qarshilikni) o'lchash usullari keng qo'llanadi.

O'lchanadigan parametrning bir jinslimasligi o'lchovi uning qiymatlari sochilishini % larda ifodalaydigan

$$\Delta = \pm [(Y_{max} - Y_{min}) / (Y_{max} + Y_{min})] \cdot 100\% \quad (\text{II. 58})$$

kattalik orqali ifodalanadi.

Kristallning uzunligi va ko'ndalang kesimi bo'yicha bir jinslimasliklar sabablari har xil. Ular ikki guruhni tashkil etadi. Birinchi guruhga yo'nalgan kristallanish jarayonlarida kirishmalarning qonuniy bir jinslimas taqsimlanishi bilan bog'liq zaminij (asosiy) sabablar kiradi. Ikkinchi guruhga texnologik sabablar kiradi.

Haqiqiy hollarda kirishmalar taqsimoti odatda II. 49-rasmdagidek bo'ladi, zaminij sabablar taqozo qilgan asosiy egri chiziq ustiga texnologik sabablardan kelib chiqqan taqsimot tebranishlari qo'shiladi.

Bunday bir jinslimasliklarni mahalliy (lokal) deyiladi. Birinchi guruh bir jinslimasliklari qiymati ikkinchi guruhnikidan ancha katta.

8.3.2. Uzunlik bo'yicha kirishmalar bir tekis (bir jinsli) taqsimlangan monokristallarni o'stirish usullari

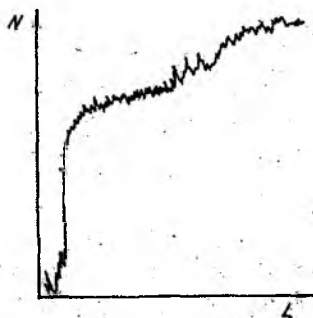
Kirishmalar uzunlik bo'yicha bir tekis taqsimlanishi darajasi oldindan tayinlangan monokristallar kristallanish jarayoniga qanaqadir o'zgarishlar kiritmasdan — passiv yo'l bilan va shuningdek, aktiv (faol) yo'l bilan olinishi mumkin. Birinchi holda, oddiy usul bilan suyulmadan o'stirilgan monokristallning taqriban bir jinsli qismidan foydalaniladi.

Kristallning taqriban bir jinsli qismi uning uchlaridan birligiga tutashgan bo'ladi. Mahsulotning nazariy miqdori ($G_{\Delta}, \%$) nazoratlanadigan parametrlarning Δ sochilishi orqali

$$G_{\Delta} = [1 - (1 - \Delta)^{1/k-1}] \cdot 100 \quad (\text{II. 59})$$

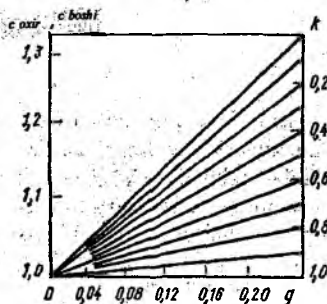
ifoda bo'yicha aniqlanadi. «+» belgi $K < 1$, «-» belgi $K > 1$ hollarga to'g'ri keladi.

Uchmovchan kirishma kristall uzunligi bo'yicha tayinli taqriban bir jins taqsimlangan monokristall ko'rinishida qotgan suyulmaning g ulushi II. 50-rasmdagi nomogramma yordamida hisoblanadi. Nomogramma esa



II.49-rasm. Zonaviy suyultirish usulida o'stirilgan kristallning L uzunligi bo'ylab kirishmaning N zichligining haqiqiy taqsimoti.

II.50-rasm. Choxralskiy yoki Brijmen usulida suyulmadan o'stirilgan kristallning tarkibi bir jins qismini aniqlash uchun nomogramma (g — mazkur kristall qismini hosil qiluvchi suyulma ulushi, K — taqsimot koefitsienti).



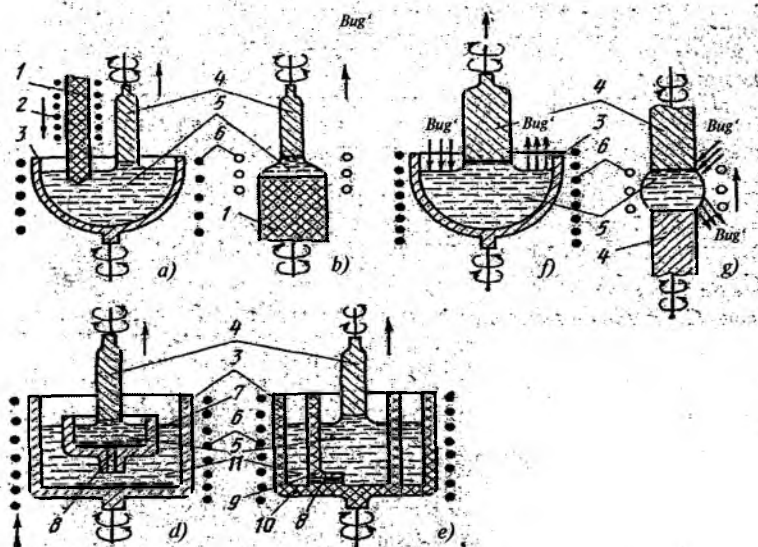
$$C = C_0(1 - g)^{k-1} \quad (\text{II. 60})$$

tenglama asosida yasalgan.

Misol. Kristall ko'rinishida (fosfor kirishma kiritib) qotgan germaniy suylamasining g ulushini topish kerak (jarayon sharoiti $k=0,2$; $\Delta = \pm 10\%$, $\Delta_{\Delta x} - \Delta_{\Delta y} = 20\%$, $C_{oxir}/C_{boshi} = 1,20$).

Chapki ordinatada 1,2 nisbiy konsentratsiyaning qiymati 1,2 bo'lgan nuqtani topib, abssissa o'qiga parallel chiziq o'tkazamiz, u $K=0,2$ grafik bilan kesishadi. Kesishish nuqtasidan abssissaga tik tushiramiz va unda $g=0,2$ qiymatni olamiz.

Aktiv usullar ikki asosiy guruhga bo'linadi. Birinchi guruhga kristallanish jarayonini programmashtirishga asoslangan usullar kiradi. Kristallanish jarayonini programmashtirish uchmovchan yoki sust uchuvchan kirishmalarga nisbatan qo'llanadi, kristallanish tezligi; kristall



II.51-rasm. Uzunligi bo'yicha birday legirlangan kristallarni o'stirishda kristallanuvchi suylamani qattiq (a, b), suyuq (d, e) va bug' (gaz) (f, g) fazalardan oziqlantirishdan foydalanadigan asosiy usullar:

1-oziquantiruvchi kristall (taglik); 2-qo'shimcha isitgich; 3-tigel; 4-o'stirilayotgan kristall; 5-kristallanuvchi (ishchi) suyluma; 6-asosiy yuqori chastotali yoki rezistiv isitgich; 7-suzuvchi tigel; 8-kapillyar kanal; 9-qo'sh tigelning ishchi qismi; 10,11-oziquantiruvchi suyluma.

va tigelni aylantirish tezligini va h.k. muayyan qonuniyat bo'yicha o'zgartirish sharoitida kechadi. Buning oqibati — K effektiv taqsimot (segregatsiya) koeffitsientining qonuniy o'zgarishi bo'lib, u $CK = const$ ko'paytmani saqlash uchun zarur.

Kristallanish jarayonini programmalashtirishdan foydalanuvchi usullar afzalligi ularni Choxralskiy, Brijmen yoki zonaviy suyultirishdek oddiy usullarda yarimo'tkazgichlar monokristallarini o'stirish uchun qo'llanadigan standart apparaturalarda amalga oshirish mumkinligidir.

Bu usullar kamchiligi — olinadigan monokristallar tuzilishining uncha mukammal bo'lmashligi bo'lib, buning sababi kristall o'sishi suyulmadan kristallanish tezligi, uning hajmi va aralashtirib turish maromi uzluksiz ravishda o'zgarib turishi sharoitida kechadi. Ammo, bu usullar uchmaydigan kirishmalar bilan legirlangan kristallarni o'stirishda eng samarali bo'lishi mumkin.

Kristallanayotgan *suyulmani oziqlantirish*—suyulmaga uning asosiy tarkiblovchisini toza yoki legirlangan ko'rinishda qonuniy kiritishdan, yoinki legirlovchi kirishmani unga kiritish yoki undan chiqarib yuborishdan iborat. Har qanday oziqlantirish amalining natijaviy maqsadi suyulmada legirlovchi kirishma zichligini o'zgarmas tutib turishdir, ya'ni $C = const$ ni saqlashdir.

Oziqlantirishning bir necha usullari bor. Kirishma zichligini oshirish uchun kristallanuvchi suyulmaga oziqa yoki element yoki uning birikmasi bug'lari ko'rinishida (II.51 *f*, *g*-rasm), yo asosiy tarkiblovchidagi kirishma eritmasi qattiq (II.51, *a*, *b*-rasm), yoinki suyuq (II.51, *d*, *e*-rasm) ko'rinishda kiritiladi.

Kirishma zichligini kamaytirish uchun oziqani bug'lantirish yo'li bilan chiqarib yuboriladi (II.51, *d*, *e*-rasm). Shu maqsadda kristallanuvchi suyulmaga toza asosiy tarkiblovchidan qattiq yoki suyuq holatda qo'shimcha qilinadi (II.51, *a*, *g*-rasm).

Oziqlantirish amali qo'llanib olingan kristallar tuzilishi yuqori darajada mukammal bo'ladi.

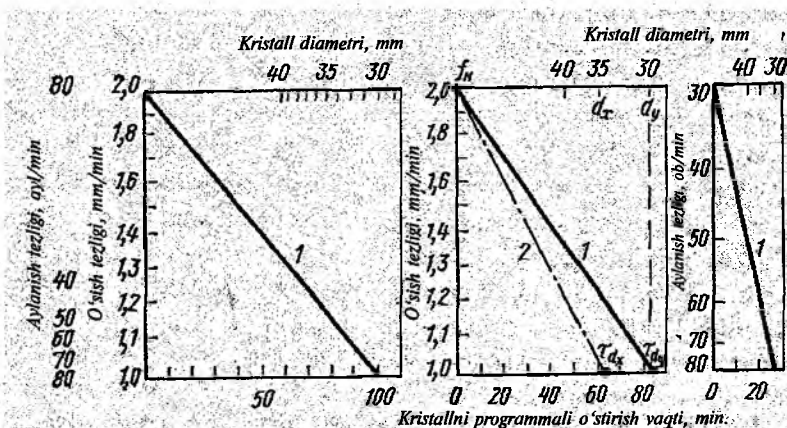
Uzunligi bo'yicha bir tekis legirlangan kristallar o'stirish usullarining (ularga oziqlantirish ham kiradi) asosiy kamchiliklaridan biri — apparaturaning muhim darajada murakkablashishidir. Ularning afzalliklari haqida bir necha marta to'xtalib o'tdik. Bu fazilatlar faqat katta ko'lamli ishlab chiqarishda to'la namoyon bo'ladi.

Ko'rilgan usullardan boshqa yana ikki asosiy guruhni birlashtirib foydalanadigan qo'shma usullar ham mavjud. Bunday usullar uchuvchan kirishma bilan legirlangan ($\alpha > 0$) suyuqlarni kristallashda sodda ravishda qo'llaniladi (Choxralskiy usuliga daxldor). Uchmaydigan kirishmalar uchun qo'shma usul boshqa ba'zi usullar bilan kristall o'stirish hollarida qo'llanishi mumkin.

Oziqlantirish va kristallanish jarayonini programmalash usullari birikuvli effektiv taqsimot koeffitsienti K kichik bo'lgan kirishmalar bilan legirlangan bir jinsli monokristallar olishda ayniqsa yaroqlidir.

Kristallanish jarayonini programmalash hisobi

Kristallanish va kristall aylanishi tezliklari o'zgarishining kristallni o'stirish vaqtiga, binobarin, kristall uzunligiga bog'lanishini aniqlashdan iborat.



II.52-rasm. Birday legirlangan monokristallar o'stirish dasturini tuzishda foydalaniladigan nomogrammlar.

Bunday programmalarni grafiklar—nomogrammlar ko'rinishida tasvirlash qulay (II. 52-rasm).

Ma'lumki, doimiy diametrli kristallni o'stirishdan oldin uning konussimon qismi o'stiriladi. Shuning uchun konussimon qism hosil bo'lishi uchun suyuqlarga qo'shimcha miqdorda modda kiritish zarur.

Kristallanuvchi suyuqlarni oziqlanish kristallanish jarayoni ketib turganida amalga oshiriladi.

Uzunligi bo'yicha uchuvchan kirishma bilan bir tekis legirlangan kristall o'stirishning umumiy shartlari

$$K = k + \frac{\alpha F}{f \cdot S} = \frac{C_{kir}}{C_{st}} (1 - A) + \frac{C_0 \alpha F}{C_{st} f S} + A \quad (\text{II. 61})$$

tenglama orqali ifodalanadi, bunda C_{st} va C_0 - suyulmadagi kirishmaning statsionar va muvozanatliy zichliklari, atom/sm³; S_{kir} - qattiq yoki suyuq oziqlantiruvchi moddada kirishma zichligi, atom/sm³; A - oziqlantirish parametri; qolgan belgilar oldin ishlatilgan.

Oziqlantirish parametri A kristallanish jarayonida kristallanuvchi (ishchi) suyulma hajmi o'zgarishini aks ettiriladi:

$$A = gV_s / V_{kr} = (V_{kr} - V_{oz}) / V_{kr} \quad (\text{II. 62})$$

bunda V_s - ishchi suyulmaning, V_{oz} - oziqlantiruvchi moddaning, V_{kr} - o'stirilayotgan kristallning hajmlari; g - kristallangan suyulma ulushi.

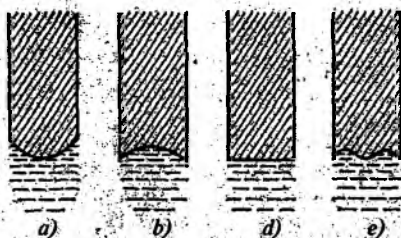
Suyulma hajmi o'zgarmas bo'lgan yo'nalgan kristallanish usullari uchun $V_s = \text{const}$, binobarin, $V_{kr} = V_{oz}$, bundan: $A=0$ bo'lishi kelib chiqadi.

Choxralskiy va Brijmen usullarida oziqlantirish yo'q. Shuning uchun $V_{oz}=0$, suyulma massasi o'sgan kristall massasiga teng, ya'ni $gV_s = V_{kr}$ yoki $A=1$.

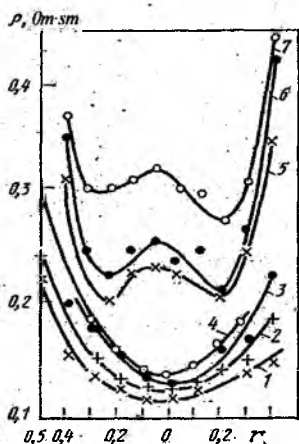
Yo'nalgan kristallanish boshqa usullari uchun $V_{oz} < V_{kr}$, ya'ni bu hollarda $0 < A < 1$ bo'ladi.

8.3.3. Ko'ndalang kesimi bo'yicha kirishma bir tekis (bir jinsli) taqsimlangan monokristallarni o'stirish usullari

Kristallarni o'stirishda kiritilgan kirishmalar ko'ndalang kesim bo'yicha notekis taqsimlangan bo'lishi mumkin. Buning haqiqiy sababi kristallanish frontiga tegib turgan suyulmada



II.53-rasm. Choxralskiy (a-b) va tigelsiz zonaviy suyultirish (2) usullarida kristallanish fronti shakli: a-suyulma tomonga qavariq; b-kristall tomonga botiq; d-tekis (yassi); e-S-simon.



II.54-rasm. Alumiiniy kirishmasi kiritilgan kremniy monokristallarining ko'ndalang kesimi bo'yicha solishtirma elektr qarshilik taqsimoti:

1-7 monokristallar raqami; r-monokristall markazidan sanalgan masofa.

issiqlik (konveksion) oqim bilan bir xil yo'nalgan oqim hosil qiladi. Oqibatda kesim bo'yicha kirishma taqsimoti yanada notekis bo'lib qoladi.

Agar kristall aylantirib turilsa, suyulmada suyuqlikning vertikal oqimlari hosil bo'ladi. Bu oqimlar issiqlik konveksion oqimlarga teskari yo'nalgan. Bu esa diffuzion qatlam qalinligi notekisligini, binobarin, kristallning ko'ndalang kesimi bo'yicha kirishmalar taqsimoti notekisligini kamaytiradi.

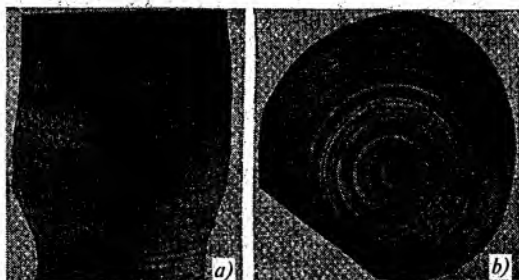
Tigel va kristall bir vaqtda aylantirib turilsa, suyulmada suyuqlikning murakkab oqimlari vujudga keladi. Bir jinslimaslikni kamaytirish uchun kristallni katta tezlik bilan, tigelni kichik tezlik bilan aylantirmoq zarur.

Monokristallning ko'ndalang kesimi bo'yicha kirishmaning notekis taqsimlanishi *kanal bir jinslimaslik* deb ataladigan hajmiy bir jinslimaslikni paydo qiladi. Bunday bir jinslimaslik yarimo'tkazgichlarda ko'p uchraydi. U odatda kuchli legirlangan kristalllarda vujudga keladi. Ustun yoki nay shaklidagi kanal sohasida kirishma zichligi kristallning boshqa qismidagidan bir necha marta ortiq bo'ladi.

suyuqlik oqimlarining notekis taqsimlanishidir. Oqibatda kristallanish fronti sirtidagi diffuzion qatlam qalinligi uning turli nuqtalarida har xil, bu esa kristall kesimi bo'yicha kirishma taqsimotini notekis qiladi (II. 53-rasm).

Kristallanuvchi suyulma hajmi yetarlicha katta bo'lganda va kristall hamda suyulmali tigel aylantirilmaganda suyulmada (tigelning qizigan devoridan suyulmaning sovuqroq markaziy qismiga yo'nalgan) konveksion suyuqlik oqimlari vujudga keladi, diffuzion qatlam markazda qalinroq, chetda esa yupqaroq bo'ladi, markazda kirishma miqdorini oshiradi. Solishtirma qarshilik ko'ndalang kesim bo'yicha hamma joyda bir xil bo'lmaydi (II. 54-rasm).

Agar tigel aylantirib turilsa, markazdan qochirma kuchlar suyulmani tigel devoriga tomon suradi, bu esa



II.55-rasm. Choxralskiy usulida o'stirilgan galliy arsenidi monokristallari bo'ylama (a) va ko'ndalang (b) kesimlarida kirishma taqsimotining qatlamdor bir jinsli emasligi.

Kanal bir jinslimaslikka turli yoqlar bo'yicha o'sish mexanizmi va tezliklari turlicha bo'lishligi (*yoqlar effekti*) asosiy hissa qo'shadi.

Kristallda dislokatsiyalar miqdori kamaysa, kanal bir jinslimasligi hosil bo'lishi imkoni ortadi.

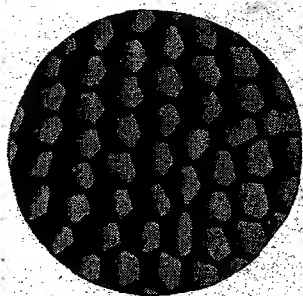
Kanal bir jinslimaslik hosil bo'lishiga yo'l qo'ymaslikning **asosiy choralari**: kristallni $\langle 111 \rangle$ yo'nalishdan ancha chetlangan kristallografik yo'nalishlarda o'stirish; tekis yoki ozgina egilgan kristallanish fronti bo'lishi uchun suyulmani yaxshilab aralashtirib turish kerak.

Kanal bir jinslimaslikka o'xshash makro bir jinslimasliklardan boshqa yana mikro bir jinslimasliklar ham uchraydi. Ulardan eng ko'p tarqalgani davriy, qatlamdor bir jinslimaslikdir.

Kristallning bo'ylama kesimida davriy bir jinslimaslik kristallanish frontiga parallel tasmalar ko'rinishida (II. 55,a-rasm), ko'ndalang kesimida esa halqalar, spirallar yoki boshqa halqasimon shakllarda (II. 55,b-rasm) uchraydi. O'sish qalin tasmalari oralig'i 50-150 mkm. Ular orasida bir-biridan 3-50 mkm masofada o'sish yupqa tasmachalari joylashgan. Yupqa tasmachalar vujudga kelishi sababi suyulmadan kristall o'sishi tezligining davriy o'zgarib turishidir. Qalin o'sish tasmalarini hosil qilinishi sabablari suyulmada temperaturaning davriy o'zgarishidir. Bu o'zgarish kristallanish fronti vaziyatini tebrantiradi. U suyulma tomonga siljib kristallga kirishmaga boyigan diffuzion qatlamni jalb qiladi, oqibatda kirishma taqsimoti qatlamdor bir jinslimasligi vujudga keladi.

Yana bir muncha texnologik sabablar ham bir jinslimasliklar keltirib chiqaradi. Bunday kanal bir jinslimasliklarni eng kam qilish choralari ham ishlab chiqilgan.

Yarimo'tkazgichlarning kuchli legirlangan monokristallarida vujudga keladigan mahalliy bir jinslimasliklarning yana bir ko'rinishi kirishmaviy subtuzilishlar, katak-katak subtuzilishlar va ikkinchi faza kirindilari ko'rinishida namoyon bo'ladi. Ikkala holda ham ularning vujudga kelish



II.56-rasm. Ravshan kataksimon tuzilishli kristallanish fronti sirtining tashqi ko'rinishi (qalay-qo'rg'oshin tizimi).

sababi kristallanish fronti silliqligi buzilishi va uning kataksimon bo'lib qolishidir.

Kristallanish frontida olti yoqli prizmalar ko'rinishidagi kataklar paydo bo'ladi (II. 56-rasm). Ko'p sonli bunday kataklar kataksimon kristallanish fronti hosil qiladi.

Kataksimon subtuzilishlar kataklar gardishi bo'ylab kirishmaning uyulishi natijasida vujudga keladi. Bu hajm bo'yicha notekis taqsimotni keltirib chiqaradi.

Ikkinchi faza kirindilari yarimo'tkazgichlarni $K < 1$ bo'lgan kirishma bilan kuchli legirlaganda vujudga keladi. Ularga kremniydagi aluminii, surma,

$A^{III}B^V$ birikmalardagi tellur va rux mansub.

$A^{III}B^V$ birikmalarda kirishmaviy subtuzilishlar vujudga kelishi sababi stexiometrik tarkibdan chetlanishdir. U kristallanish fronti silliqligini buzadi. Demak, stexiometrik tarkib saqlansa, mazkur nuqsonlar paydo bo'lmaydi.

8.4. Mukammal tuzilishli monokristallar o'stirish

Yarimo'tkazgichlar polikristall quymalarida ayrim donalar orasida fazaviy chegaralar bo'lishi va ularning ikki tomonida turli kristallografik yo'nalishli yarimo'tkazgich hajmlari mavjudligi, shuningdek, chegaralar bo'ylab kirishmalar yig'ilib qolishi tufayli polikristallar ko'pchilik yarimo'tkazgichli asboblari tayyorlashga yaramaydi. Tuzilish nuqsonlari monokristalldan tayyorlangan asboblari parametrlarini yomonlashtiradi. Shuning uchun, yarimo'tkazgich moddalar ishlab chiqarishning eng muhim masalasi mukammal monokristallar o'stirishdir. Ular muayyan kristallografik yo'nalganlikli bo'lishi, ularda dislokatsiyalar eng kam bo'lishi yoki hajm bo'yicha muayyan ravishda va tekis taqsimlangan bo'lishi, kichik burchakli chegaralar, egizaklar va boshqalar bo'lmasligi kerak.

7-bobda monokristallarni qatiq, suyuq fazadan o'stirish usullarini umumiy tarzda ko'rdik. Endi ko'p qo'llaniladigan ayrim usullarni alohida qarab chiqamiz.

8.4.1. Choxralskiy usulida monokristallar o'stirish

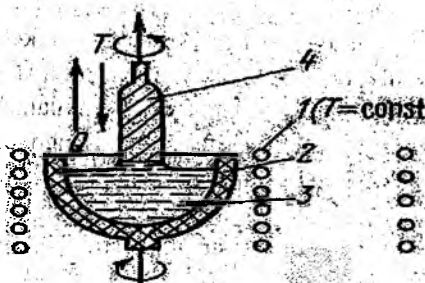
Bu usulning sxemalari II.57-rasmda tasvirlangan. Bu usul kremniy, germaniy, parchalanadigan va parchalanmaydigan $A^{III}B^V$ tipidagi va boshqa yarimo'tkazgichlar monokristallarini o'stirishda eng ko'p qo'llanadigan usuldir. Texnologik jihatdan u juda qulay — tigel yoki isitish tizimi tuzilishini o'zgartirib, mukammal tuzilishli monokristallar olish imkoniyatlariga egadir.

Choxralskiy usuli bilan monokristallar o'stirish jarayoni quyidagi bosqichlardan iborat:

- 1) Monokristall xamirturush uchini suyulma bilan o'rash-xamirturushlash va unda suyulmaning birinchi ulushlarini kristallash;
- 2) diametrga chiqish — xamirturushda o'stirilgan bo'yin o'lchamidan to kerakli diametrgacha monokristallni o'stirib borish;
- 3) doimiy diametrli monokristallning silindrik qismi o'sishi;
- 4) teskari konus deb atalgan kristall uchining hosil bo'lishi va monokristallning suyulmadan uzilishi;
- 5) o'stirilgan kristallni sovitish.

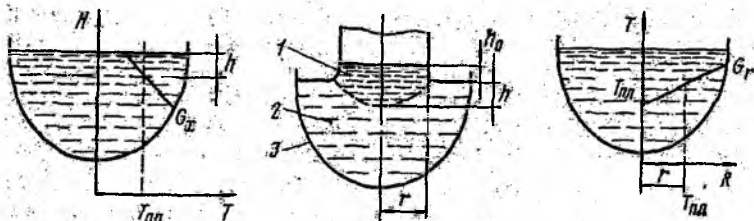
1) **Xamirturushlash.** Xamirturushda imkonicha dislokatsiyalar miqdori kam bo'lishi ma'qul. Xamirturush sirtidagi buzilishlarni mexanik va kimyoviy ishlov berib bartaraf qilinadi.

Suyulmaga xamirturush uchi tushirilgandan va uni suyulma bilan o'ralgandan keyin bo'yinni o'stirish amaliga kirishiladi. Bo'yinning uzunligi uning bir necha diametri chamasida bo'lishi kerak. Bo'yinni katta chiziqliq tezlikda o'stiriladi. Xamirturushdan bo'yinga o'sib kirgan dislokat-



II.57-rasm. Choxralskiy usulida yarimo'tkazgichlarni tozalash va ularning monokristallarini o'stirish chizmasi:

1-isitgich; 2-konteyner (tigel, qayiqcha); 3-kristallanadigan suyulma; 4-suyulmaning kristallangan qismi; Q-issiqlik ketkazish yo'nalishi strelka bilan ko'rsatilgan.



II.58-rasm. Tashqaridan issiqlik keltirib turiladiga tigeldagi suyuqlikda o'ta sovigan sohaning vujudga kelishi chizmasi:

1-suyulmaning o'ta sovigan sohasi; 2-uning asosiy hajmi; 3-tigel; H -suyulma balandligi koordinatasi; R -tigeldagi suyuqlama radiusi koordinatasi; T -temperatura; r va h -mos ravishda, suyuqlamadagi o'ta sovigan sohaning radiusi va chuqurligi; h_0 -suyulma ustuni balandligi.

siyalar vakansiyalar bilan ta'sirlashish oqibatida qisman yoki tamomila siqib chiqariladi.

2) **Diametrga chiqish.** Bunda dislokatsiyalar zichligi ortib ketmasligi uchun asosiy shart termik kuchlanishlarni kamaytiruvchi har tarafga o'sish burchagi kichik bo'lishi kerak. Masalan, kremniy monokristallining har tarafga o'sishi burchagi 60°C bo'lganda unda dislokatsiyalar zichligi 10^5 sm^{-2} , bu burchak 10°C bo'lganda dislokatsiya zichligi 10^3 sm^{-2} bo'ladi.

3) **Monokristallning silindrik qismi o'sishi.** Doimiy diametrli monokristall o'sishi bosqichida monokristallni shakllantirishda jarayonning issiqlik sharoiti yetakchi rol o'ynaydi. Ular kristall va suyuqlamadagi o'q bo'ylab va radius bo'ylab temperatura gradientlarini paydo qiladi. Bularga esa kristallanish fronti shakli va monokristalldagi termik kuchlanishlar, shuningdek. kristallanish fronti yaqinida suyuqlamaning o'ta sovigan sohasi o'lchamlariga bog'liq bo'ladi.

Suyulmada temperatura tigel devoridan uning markazi tomonga, tigelning tubidan suyuqlama sirti tomonga kamayib boradi. Oqibatda o'q bo'ylab G_x va radius bo'ylab G_r temperatura gradientlari vujudga keladi. Ularning T_s suyuqlash temperaturasi izotermasi bilan kesishishi suyuqlamaning o'ta sovigan sohasini hosil qiladi (II. 58-rasm).

Suyulmaning o'ta sovigan sohasi diametri suyuqlama ustuni diametrini aniqlaydi. Suyulma ustuni balandligi suyuqlamaning sirtiy taranglik koeffitsientiga to'g'ri proporsional, uning zichligiga, o'stirilayotgan kristall radiusiga teskari proporsional bo'lib, odatda u 3-5 mm ni tashkil etadi.

4) O'sayotgan monokristall diametri birinchi navbatda suyulmadagi temperatura gradientlariga bog'liq.

Isitgichning temperaturasi oshganda o'ta sovigan soha o'lchami kichrayadi. Unda va ustunda temperatura ortib kristallanish fronti ko'tariladi, ustun balandligi oshadi, oqibatda monokristall diametri kamayadi.

Isitgich temperaturasi pasayishi yoki kristallanish tezligi kamayishi, aksincha, suyulmadagi o'ta sovigan soha o'lchamini oshiradi, ustun balandligini kamaytiradi va uning meniskini qarshi tomonga egrilanishiga olib keladi. Monokristall diametri ortadi.

Suyulmadagi temperatura gradientlari kristall va tigel aylanishlari nisbiy tezligiga ham bog'liq. Kristallning aylanishi nisbiy tezligi oshganda o'ta sovigan soha o'lchami kamayadi, uning temperaturasi oshadi, kristall ostidagi suyulma ustuni ko'tariladi, monokristall diametri kamayadi. Aksincha, kristallning aylanishi nisbiy tezligi kamayganda monokristall diametri ortadi.

Suyulma ustuni balandligi kristallanish frontida issiqlik tengligi (balansi) buzilishiga ham sezgir bo'ladi.

5) Monokristallning uzunligi bo'yicha va ko'ndalang kesimi bo'yicha temperaturaning notekis taqsimlanganligi natijasida uning sovitilishi ham notekis boradi. Buning oqibatida kristallda termik kuchlanishlar vujudga keladi. Ular dislokatsiyalar hosil bo'lishi kritik kuchlanishidan ortganda monokristallda dislokatsiyalar paydo bo'ladi. Mazkur kritik kuchlanish (suyulish temperaturasida), masalan, kremniy uchun 130, germaniy uchun 15, galliy arsenidi uchun 7 gk/mm². Temperatura pasayganda u ortib boradi: 930°C da kremniy uchun – 220,830°C da – 330, germaniy uchun, mos ravishda 40 va 88 gk/mm².

Ba'zi kirishmalar dislokatsiyalar hosil bo'lishi kritik kuchlanishini keskin oshirib yuboradi (masalan, germaniydagi fosfor). A^{III}B^V birikmalarining ba'zilarida oltingugurt (S), tellur (Te), rux (Zn) shunday ta'sir qiladi.

Yuqorida keltirilgan ma'lumotdan ko'rinadiki, kremniy 150 mm dan ortiq diametrli dislokatsiyasiz monokristallarini oson o'stiriladigan yagona yarimo'tkazgichdir. Germaniyda kritik kuchlanish 4 marta kichik, uning hatto 30-40 mm diametrli dislokatsiyasiz monokristallarini o'stirish qiyin masaladir.

Monokristall o'stirish jarayonida xamirturushni ko'tarish tezligi, uning va tigelning aylanish soni o'zgarishi kristallanish fronti shakliga, dislokatsiyalar zichligiga ham ta'sir qiladi.

Termik kuchlanishlar o'stirilayotgan monokristall markazida va chetlarida eng katta. Ular orasida kuchlanishlar yo'q soha bor. Shunga muvofiq monokristall kesimi bo'yicha dislokatsiyalar taqsimoti notekis bo'ladi.

Dislokatsiyalar taqsimotiga monokristall hajmida kirishmalarning notekis taqsimlanishi ham ta'sir qiladi.

Kuchlanishlar va temperatura gradientlari ta'sirida dislokatsiyalar o'z sirpanish tekisligida ko'chadi.

Olmos va sfalerit panjaralarida bunday tekisliklar $\{111\}$ tekisliklardir. Monokristall o'sishi yo'nalishi bilan $\{111\}$ tekisliklar orasidagi burchak qancha katta bo'lsa, monokristalldan dislokatsiyalarning to'la va tez chiqib ketishi ehtimolligi shuncha katta bo'ladi.

Shunday qilib, dislokatsiyalar zichligini kamaytirish uchun eng ma'qul o'sish yo'nalishlari $[111]$ (uning atrofida $19^{\circ}28'$ burchak ostida 6 ta $\{111\}$ tekislik bor) va $[100]$ (uning atrofida $35^{\circ}16'$ burchak ostida 4 ta $\{111\}$ tekislik bor).

Agar suyuqlarning kristallanish tezligi dislokatsiyalar harakati tezligidan ancha katta bo'lsa. Ular sirpanish tekisliklarida yulduzsimon shakllarda to'planishi mumkin. Dislokatsiyalar to'planadigan alohida joylar kichik burchakli chegaralardir.

Monokristallarda kichik burchakli chegaralar ham kristallanish jarayonida, ham qattiq holatda hosil bo'lishi mumkin. $[111]$ yo'nalishda o'stirilgan monokristall kesimida bunday chegaralar o'sish yo'nalishiga parallel uchta $\{110\}$ tekislikda ko'proq joylashadi.

Dislokatsiyasiz monokristallarning tashqi ko'rinishi dislokatsiyalilaridan farq qiladi. Kremniy monokristallarida bu farq ayniqsa sezilarli: yon sirtidagi vintsimon ajinlar (tirnalishlar) dislokatsiyasiz monokristallarda yirikroq, tekis yoqlar, bo'rtma qirralar va noto'g'ri shaklli chiqiqlar bo'ladi.

Yarimo'tkazgichlarda ko'p uchraydigan tuzilish nuqsonlaridan biri egizaklar haqida oldin aytgan edik. Egizak o'sayotgan kristall yo'nalganligini o'zgartirishi mumkin.

«Teskari konus» hosil qilish. O'stirilgan monokristallni suyulmadan ajratib (uzib) olishdan oldin diametrini silliq ravishda kamaytiriladi-teskari konus hosil qilinadi. Buning zarurati shuki, tigeldagi suyulma sirtidan monokristall kesimi to'la yuzini ajratganda uning oxirida dislokatsiyalarni ko'paytirib yuboradigan issiqlik zarbasi oldini olish kerak.

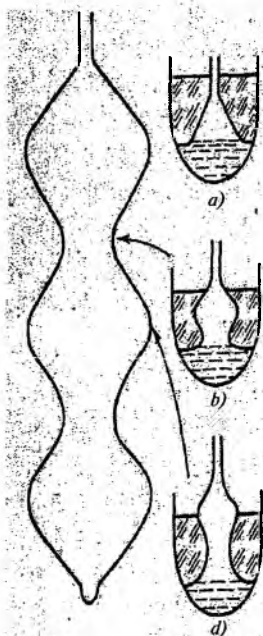
O'stirilgan monokristallni sovitish. O'stirilgan monokristallni, katta termik kuchlanishlar paydo bo'lmashligi uchun, sekin sovitiladi. Buning uchun suyulmadan ajratilgandan so'ng monokristallni suyulmadan ozgina baland ko'tariladi, bundan keyin qizigan tigelning temperaturasi sekin pasaytiriladi. Bu monokristall oxirida dislokatsiyalar zichligini boshlanish qismiga nisbatan kamaytiradi. Keskin sovitish esa teskari natijaga olib kelardi.

8.4.2. Suyuqlik germetizatsiyasi usuli

Bu usul oddiy Choxralskiy usulining eng ko'p tarqalgan ko'rinishlaridan biridir. Uni parchalanuvchi yarimo'tkazgich birikmalar monokristallarini o'stirishda qo'llaniladi. Bu usulda suyulmani jips yopadigan suyuqlik qatlami bilan qoplanadi, uning ustida esa inert gaz bosimi hosil qilinib, bu bosim birikmaning suyulish nuqtasida uchuvchan tarkiblovchi bug'ining muvozanatiy bosimidan 1,5-2,0 marta yuqori bo'lishi kerak. U arsenidlar uchun 1,5-2,0 at, indiy yoki galliy fosfidi uchun 60-80 at bo'ladi. Jips yopuvchi suyuqlik (qoplovchi flyus) sifatida shishasimon xossalari B_2O_3 bor angidridi ishlatiladi. Suyulgan holatda B_2O_3 juda kam faol. Ammo, qattiq holatda xona temperaturasida havodan suvni kuchli yutadi. Ishlatishdan oldin uni vakuumda quritiladi.

Jarayonning boshlang'ich paytida flyus tamomila shaffof. Ammo, u $1000^{\circ}C$ dan yuqorida uchuvchan (As yoki P) tarkiblovchilarni yoki oksidlarni yutib noshaffof bo'lib qoladi. Monokristall o'sishini kuzatish qiyinroq bo'ladi.

Flyus issiqlikni o'tkazmaslik xossasiga ega bo'lganligi uchun suyulma sirtidan issiqlik ketishini keskin kamaytiradi. Flyusning qalinligi kam bo'lsa va monokristall diametri kichik bo'lsa, bu effekt kam seziladi, ammo flyus qatlami katta bo'lsa, katta diametrli monokristall o'sishi barqaror bo'lmay qoladi. Monokristall tayinli diametrgacha o'sib yetgan-



II.59-rasm. Parchalanadigan yarimo'tkazgich birikmaning qalin flyus ostida o'stirilayotgan yirik monokristalning diametri o'zgarishi (suyulmaning o'sishi turli bosqichlarida unga o'zgarma kattalikli quvvat keltirib turiladi).

quyidagi ma'lumot tasdiqlaydi: galliy arsenidi (GaAs) da stexiometriyadan chetlanish to 10^{18} - 10^{19}sm^{-3} gacha zichlikdagi nuqtaviy nuqsonlar keltirib chiqaradi.

Flyus ostidan chiqayotgan monokristall temperaturasi yetarlicha katta bo'lsa, flyus uning sirtidan oqib tushadi, birikma parchalanib, sirt qatlamidan uchuvchan tarkiblovchi uchib ketadi, oqibatda sirt da dislokatsiyalar vujudga keladi. Buning oldini olish uchun mazkur usulda o'stirilayotgan monokristallarda flyus sohasida temperaturaning kichik gradientlarini hosil qilish zarur, sirt da temperatura 700 - 800°C dan yuqori

da (II.59, *a*-rasm) kristallanish frontida ajralgan suyulish yashirin issiqligi sochilib ulgurmasdan suyulma ustunida to'planadi. Shuning uchun ustun balandligi ortadi va monokristall diametri kamayadi (monokristall «tagidan kesiladi») (II.59, *b*-rasm). Ammo, monokristallning boshlang'ich qismi flyus qatlami ostidan chiqqandan keyin qisilgan gazda issiqlik ko'tarilib ketishi (konveksiya) tufayli mazkur qism tez soviy boshlaydi, kristallanish frontidan issiqlik ketishi oshadi va monokristall har taraflama o'sa boshlaydi (II.59, *d*-rasm). Issiqlik muvozanati o'rnamshgach, o'sayotgan monokristall diametri o'zgarishi jarayoni yana takrorlanadi.

Qaralayotgan holda flyusning me'yoriy qalinligi 10 - 12 mm. Bundan kam bo'lganda suyulmadan uchuvchan tarkiblovchi ko'p ketib qoladi, ortiq bo'lganda diametрни boshqarish qiyinlashadi.

Parchalanuvchi yarimo'tkazgich birikmalar monokristallari mukammalligiga suyulmaning stexiometrik tarkibdan chetlanishi katta ta'sir qiladi. Shuning uchun suyultiriladigan birikma tarkibi stexiometrik tarkibga juda yaqin bo'lishi kerak.

Suyulmaning stexiometrik tarkibdan chetlanishi naqadar muhim ekanligini

bo'limasin. Bu temperaturada flyusning qovushoqligi monokristall sirtida himoyalovchi qatlam hosil qilish uchun yetarli bo'ladi.

8.4.3. Tigelsiz zonaviy suyultirish usuli

Yarimo'tkazgich moddalar texnologiyasida tigelsiz zonaviy suyultirish jarayoni faqat kremniyning kislorod miqdori kam va noasosiy zaryad tashuvchilar yashash vaqti katta bo'lgan (10^3 mks) monokristallarini olish uchungina qo'llanadi. Elektronika sanoati talablariga binoan, bu usulning qo'llanishi kengaymoqda.

Tigelsiz zonaviy suyultirish usuli Choxralskiy usuliga nisbatan kam unumli va murakkab, yuqori chastotali qiymat apparaturada amalga oshiriladi.

Biroq kvars tigelning va grafit issiqlik shoxobchasining yo'qligi bu usul bilan tozalik darajasi ancha yuqori kremniy monokristallari olish imkonini beradi.

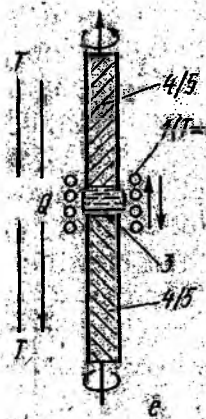
Dastlabki polikristall kremniy sterjenida (tayoqchasida) suyulgan zonani yuqori chastotali generatoridan (5,28 MHz) ta'minlanadigan induktor (pech) vujudga keltiradi (II.60-rasm). Bu usul jarayonini vakuumda ham inert gazlar muhitida ham o'tkazish mumkin.

Turli tuzilishli induktor (pech)lardan foydalanib, suyulmadagi va o'stirilayotgan monokristalldagi issiqlik maydonlarini boshqarish mumkin.

Hozirgi zamon texnologiyasi bo'yicha tigelsiz zonaviy suyultirish usulida diametri $d \leq 100$ mm bo'lgan kremniy monokristallari o'stirish mumkin.

Issiqlik maydonlarini bu usul jarayonida boshqarish ancha qiyin, ammo muayyan choralar bu ishni amalga oshiradi.

Diametri sterjen diametridan katta bo'lgan induktor suyultiradigan sterjenning kristallanish fronti murakkab to'lqinsimon shaklga ega (II.61-rasm). Kichik diametrli induktor suyultiradigan holda kristallanish

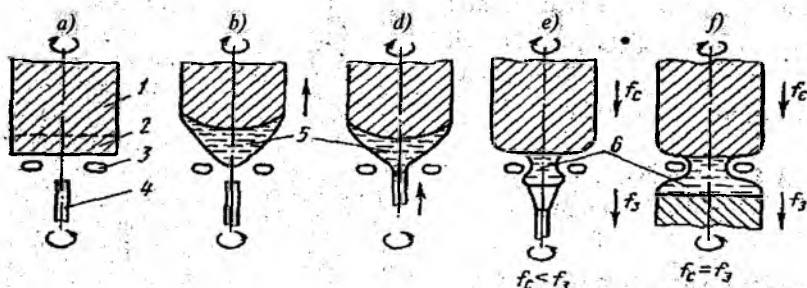


II.60-rasm.

Vertikal tigelsiz o'stirish usulida yarimo'tkazgichlarni tozalash va uning monokristallarini olish chizmasi:

1-isitgich; 3-kristallanayotgan suyulma; 4,5-suyulmaning kristallangan qismi;

Q-issiqlikni ketkazish yo'nalishi strelka bilan ko'rsatilgan.



II.61-rasm. Yuqori chastotali induktordan foydalanib tigelsiz zonaviy suyultirish jarayoni bosqichlari. Bunda induktorning diametri polikristall kremniyning suyuladigan sterjeni diametridan kichik (f_c va f_3 - mos ravishda, sterjen va xamirturush ko'chishi tezliklari);

a-kremniy sterjeni uchining qizdirilishi; *b*-suyulgan kremniyning osilgan tomchisi hosil bo'lishi; *d*-xamirturushlash; *e*-suyulgan zona hosil bo'lishning boshlang'ich bosqichi; *f*-barqaror rejimda suyulgan zona o'tishi; 1-sterjen; 2-sterjenning qizigan sohasi; 3-yuqori chastotali induktor; 4-monokristall xamirturush; 5-suyulgan tomchisi; 6-suyulgan zona.

fronti yanada noto'g'ri shaklga ega bo'ladi, oqibatda suyulgan zona markaziy qismiga suyulma ingichka oqim bo'lib quyiladi.

O'qlar bo'yicha katta temperatura gradientlari monokristallarda katta termik kuchlanishlar paydo qiladi, binobarin, dislokatsiyalar zichligini katta qiladi ($>10^4 \text{ sm}^{-2}$).

Shuning uchun mazkur usul bilan mukammal (dislokatsiyasiz) katta kremniy kristallari ($d > 60 \text{ mm}$) olish uchun qurilmaga suyulgan zonadagi issiqlik sharoitlarini faol boshqaradigan qismlar kiritish talab qilindi. Bu faol qismlar: qo'shimcha isitgichlar kiritishdi, sterjen va monokristall o'qlari bir-biriga nisbatan siljishiladi. Bu holda monokristallar, Choxralskiy usuliga nisbatan, kamroq mikronuqsonli bo'ladi.

Dislokatsiyasiz kremniy monokristallarida mikronuqsonlar eng ko'p o'rganilgan. Ularning ikki (*A* va *B*) asosiy turlari farq qilinadi: 1) *A* yassi dislokatsion sirtmoqlar (bukilgan halqalar shaklida) ular kristall hajmida kirishmalar to'plamlari so'rilishi oqibatida hosil bo'ladi, o'lchami katta, ularni yedirish usullari bilan oshkorlash mumkin;

2) *B* turdagi mikronuqsonlar kirishmalar yoki ularning birikmalari (SiC yoki $\alpha - \text{SiO}_2$) to'plamlaridan iborat.

Kremniy kristallarida mikronuqsonlar zichligi ularni o'stirish usuli va sharoitiga bog'liq.

Tigelsiz, zonaviy suyultirish usulida o'stirilgan monokristallarda A tur mikronuqsonlar o'rtacha zichligi 10^7 sm^{-3} , Choxralskiy usulida esa 10^9 sm^{-2} . B tur mikronuqsonlar A turdan bir-ikki tartib qadar ko'proq ($10^8 - 10^9 \text{ sm}^{-3}$).

Dislokatsiyasiz kremniy kristallarida mikronuqsonlarni kamaytirish uchun asosan suyulmada kislorod va uglerod kirishmalari miqdorini kamaytirish kerak.

Bu maqsad uchun argon muhiti eng qulay bo'ladi. Agar unga kislorodni bog'lovchi 10% vodorod qo'shilsa, natija yana ham yaxshi bo'ladi.

Monokristallni sovitish optimal (maqbul) tezligini tanlash, suyulmani kristallanish fronti sohasida tez-tez aralashtirib turish yarimo'tkazgichlar monokristallarida mikronuqsonlar paydo bo'lishini bartaraf qiladigan choralardir. Tigelsiz zonaviy suyultirish usulida qo'llanadigan yuqori chastotali qizdirish yo'li bilan aralashtirish Choxralskiy usulidagi konvektiv aralashtirishdan ko'p marta tezroq va samaraliroqdir.

8.4.4. Brijmen gorizontal usuli

Bu usul galliy arsenidi texnologiyasida katta qo'llanishga ega. Undan suyuqlik bilan jips yopish usulida dastlabki modda bo'ladigan polikristall birikmani sintez qilish uchun ham, monokristall o'stirish bilan birlashtirilgan sintez uchun ham foydalanish mumkin. Bu usul qurilmasi yetarlicha sodda va Choxralskiy usulidagi kabi murakkab avtomatlashgan boshqarish tizimini talab qilmaydi. Mazkur usul bilan, Choxralskiy usulida o'stirilganiga nisbatan bir jinsliroq, kuchli legirlangan galliy arsenidi monokristallari olish mumkin.

Brijmen gorizontal usuli vakuumlangan va kavsharlangan kvars ampulalarda amalga oshiriladi, ampulalarning bir chetida arsenikli kvars qayiqchani, ikkinchi chetida galliy solingan qayiqchani joylashtiriladi (II. 18, a-rasm).

Ampulada talab qilinadigan arsenik bug'i kerakli bosimi uning kondensirlangan fazasini termostatga ulab tutib turiladi. Kondensirlangan fazaning (suyulmaning) mutlaq temperaturasi ($610^\circ\text{C} - 625^\circ\text{C}$) jarayonning issiqlik sharoitiga, suyulmaning talab qilingan tarkibiga va kristallanish tezligiga bog'liq bo'ladi.

Usul qurilmasining pechlar bo'limi (bloki) ampula uzunligi bo'yicha kerakli temperatura taqsimotini ta'minlaydi va elektr qarshilik pechlaridan iborat. Pechlar bloki kuzatish derazasi bilan ta'minlangan. (II.18, b-rasm). Pechlar blokini qo'zg'almas ampulaga nisbatan siljitib borish yo'li bilan galliy-arsenik suyulmasi bo'lgan qayiqcha bo'ylab kristallanish fronti harakatlantiriladi.

Brijmen usulida monokristallar, o'stirilganda o'qlar bo'ylab temperatura gradienti uncha katta emas ($<10^{\circ}\text{C}/\text{sm}$) ularda dislokatsiyalar zichligi suyuqlik bilan jips yopish usulida olingan monokristallardagidek ($\approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ sm}^{-2}$).

Sharsimon qayiqchalarda kichik temperatura gradientlari bo'lganda uncha katta bo'lmagan kesimli dislokatsiyasiz monokristallar olish mumkin.

Monokristallarning tuzilishi mukammalligi monokristall xamirturush sifatiga, kristallanish tezligi va uning frontidagi temperatura gradienti orasidagi munosabatga bog'liq. Agar kristallanish tezligi $0,25 \text{ mm}/\text{min}$ dan katta bo'lmasa, gradient $8-10^{\circ}\text{C}/\text{sm}$ bo'lsa, kristallanish fronti deyarli yassi (egri emas!) bo'ladi, bu esa kichik burchakli chegaralar deb ataluvchi nuqsonlar hosil bo'lishini istisno qiladi.

Galliy arsenidi monokristallari [013] yo'nalishda o'stirilsa, ularda dislokatsiyalar kam bo'ladi (bu yo'nalish dislokatsiyalar sirpanishi tekisligi bilan $\sim 270^{\circ}$ burchak tashkil qiladi), vaholanki, Choxralskiy usuli uchun maqbul yo'nalishlar [111] va [100] edi.

Brijmen gorizontaal usuli amalda dislokatsiyasiz monokristallar olish imkonini berishligini tajribalar tasdiqlaydi.

8.5. Yuqori darajada toza monokristallar o'stirish

Yarimo'tkazgich moddalar va asboblarni ishlab chiqarishda epitaksial texnologiyaning rivojlanishi hajmiy monokristallar tozaligiga qattiq talablarni qo'ydi, chunki ulardan tagliklar tayyorlash uchun foydalaniladi. Shu tagliklar asosida gaz (Ge, Si, GaAs, InAs, Gap, InP) yoki suyuqlik (GaAs, InAs, Gap, InP) epitaksiya usullari bilan yarimo'tkazgichli asbob yoki integral sxemaning ishchi qatlami tayyorlanadi. Epitaksial texnologiya hozir yuqori darajada toza qatlamlar olish imkonini beradi.

8.5.1. Elementar yarimo'tkazgichlar (Ge, Si, Te, Se)da kislorod

Elementar yarimo'tkazgichlarda asosiy nazorat qilinmaydigan kirishma kislorod bo'lib, uning miqdori ko'pchilik hollarda legirlovchi kirishma miqdoridan ortiq bo'ladi. Germaniyda kislorod sezilarli ta'sir qilmaydi.

Choxralskiy usuli bilan o'stirilgan kremniy monokristallarida kislorod miqdori ayniqsa katta, u monokristallning turli qismlarida solishtirma elektr qarshilikni kamaytiradi (termodonor effekt).

Xona temperaturasida ionlanadigan termodonorlar (donor markazlar) kremniy monokristallariga 400-600°C da termik (issiqlik) ishlov berilganda vujudga keladi, bu hodisa kremniyda kislorodning o'ta to'yingan qattiq eritmasi parchalanishi oqibatidir. Suyulmadan o'stirilayotgan kremniy kristalli yuqori temperaturada ortiqcha miqdorda kislorodni yutadi. Uning bir qismi SiO₂ oksid hosil qiladi: bu oksid kremniy hajmida 1-50 mkm o'lchamli ikkinchi faza ajralmalari sifatida $1 \cdot 10^7 \text{ sm}^{-3}$ zichlik bilan tekis taqsimlanadi. SiO₂ ning yana bir qismi kremniyga mexanik yo'l bilan kirib oladi.

Biroq kislorodning katta qismi $2 \cdot 10^{18} \text{ atom/sm}^3$ zichlikda kislorod-kremniy qattiq eritmasi tarkibiga kiradi. Bu holatdagi kislorod kirishmasi kremniy elektr o'tkazuvchanligiga ta'sir ko'rsatmaydi. Lekin, kremniyni 400-600°C gacha sovitilgandan keyin shu temperaturalarda uni kamida 1 soat tutib turilsa, qattiq eritma parchalanib $\text{Si}-\text{O}_n$ ($n=1 \div 4$) turdagi birlashma (kompleks) ajraladi. Ularning ba'zilar ($\text{Si}-\text{O}_4$) elektr jihatdan faol bo'ladi. Ba'zan ular 600°C dan yuqorida ham hosil bo'lishi mumkin.

Katta diametrli va katta massali kremniy monokristallari sekin sovitiladi. Shuning uchun bunday monokristallarning yuqorigi qismi 2 soat chamasida termodonorlar hosil bo'ladigan temperatura oralig'ida bo'ladi. Oqibatda monokristallning boshlang'ich qismi ko'proq yuqori temperaturada turadi, bu joyda termodonor effekt vujudga keladi. Kremniy monokristallari ko'ndalang kesimidagi termodonor effekt monokristall chetlaridagi solishtirma qarshilikni kamaytiradi.

Termodonor effektini susaytirish asosan kremniydagi kislorod zichligini kamaytirishdir. Bundan tashqari, monokristallning boshlang'ich qismi termodonorlar hosil bo'ladigan temperaturada juda kam turadigan qilish zarur. Yana bir chora — kremniy monokristallarini 1 soat yoki undan

ortiq 700-800°C da tutib turiladi. Bunda faol $Si-O_n$ biriashmalar parchalanib, SiO_4 hosil bo'ladi (kislorod bog'lanadi).

Kislorod kristallda qanday paydo bo'ladi?

Kislorod kremniyda suyulmaning atmosfera bilan va yana konteyner kvarsi bilan ta'sirlashishdan, ya'ni



reaksiya oqibatida paydo bo'ladi. SiO yuqori temperaturalarda uchuvchan bo'ladi. Uning bir qismi suyulmada erib, kremniyni kislorod bilan ifloslaydi. Kislorodning eng ko'p zichligi $4 \cdot 10^{18}$ atom/sm³ bo'ladi.

Vakuumdagi o'stirilgan kremniyda kislorod zichligi pastroq.

Kremniy monokristallarida kislorod miqdori qanday bo'lishi suyulmani aralashtirish sharoitiga ham bog'liq. Tez aralashtirish kislorodni kvarts tigel devoridan (uning paydo bo'lish joyidan) kristallanish fronti tomonga ko'chiradi.

Natijada kislorod va u bilan bog'liq mikronuqsonlar zichligi ortadi. Monokristall diametri oshgan sari kislorod zichligi ham oshadi.

Shu sabablarga ko'ra, kam miqdordagi kislorodli kremniy va germaniy monokristallari olish uchun o'stirish jarayonini:

- yuqori ($1 \cdot 10^{-6}$ mm sim. ust) vakuumdagi.

- konteynersiz variantda (tigelsiz zonaviy suyultirish yoki Choxralskiy garnissaj usulida);

- toza vodorod muhitida;

- toza argonda olib borish kerak.

Choxralskiy garnissaj usulida o'stirilgan kremniy monokristallarida kislorod zichligi $5 \cdot 10^{15}$ atom/sm³ gacha pasaytirilishi mumkin.

Ba'zi hollarda elementar yarimo'tkazgichlar mono-kristallarida kislorod miqdorini kamaytirish uchun ularning kremniy suyulmalariga kislorodga yaqinligi katta elementlar (Ge, Sn, Pb, Ca, Al) kiritiladi. Ammo bu kirishmalarning monokristallar xossalari ta'siri e'tiborga olinishi kerak.

8.5.2. Elementar yarimo'tkazgichlar (Ge, Si, Te, Se)da uglerod

Uglerod ham nazorat qilinmaydigan kirishma bo'lib, uning zichligi $2 \cdot 10^{18}$ atom/sm³ ga yetadi. Uning yarimo'tkazgichlarga kirib qolish yo'llari:

- yomon tozalangan germaniy tetraxloridi va xlorosilanlardan;
- grafit qayiqchalarda GeO_2 oksidni vodorod bilan tiklash jarayonlaridan;

- Choxralskiy usulida yoki tigelsiz zonaviy suyultirish usulida monokristallar o'stirish jarayonida uglevodorod va SO shaklida qurilma kamerasing pechlar bo'limiga kirishdan.

Elementar yarimo'tkazgichlarda uglerod elektr jihatdan neytral kirishmadir. Kremniyning uglerod bilan boyigan suyulmasi kristallanishida monokristallarda $\alpha - \text{SiC}$ ajrilmalari paydo bo'lishi mumkin. Ular kremniy panjarasida mahalliy kuchlanishlar, B tur mikronuqsonlar hosil qiladi hamda dislokatsiyalar paydo bo'lishiga yordamlashi.

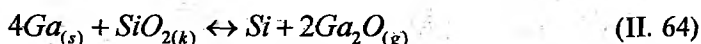
Uglerod elementar yarimo'tkazgichlardagi kislorod bilan birga moddaning elektr xossalariga ham ta'sir qilishi mumkin. Masalan, ko'p miqdordagi kislorod bo'lgan kremniyga kiritilgan uglerod kislorod bilan bog'lanib komplekslar hosil qiladi va shu bilan termodonorlar paydo bo'lishiga yo'l qo'ymaydi. Bu komplekslarning ba'zilari donor, ba'zilari esa neytral bo'ladi.

Uglerod kremniy monokristallari asosida tayyorlangan asboblarning xossalariga ham ta'sir qiladi. SO oksid qo'shilgan argon muhitida o'stirilgan monokristallarni tadqiqlash ko'rsatishicha, monokristallarga termoislov berilgandan so'ng uglerod o'ta to'yingan eritmadan ajralib chiqadi. Ajralib chiqqan uglerod miqdori oshgan sari $p-n$ o'tishning teshilish kuchlanishi pasayib boradi, sirqish toki oshib boradi.

8.5.3. Yarimo'tkazgich birikmalarda kremniy

Galliy arsenidi va fosfidi (GaAs , GaP) monokristallarida asosiy nazorat qilinmaydigan kirishmalar kremniy va kislorod bo'ladi. Ular asosan kvarts konteynerlar (qayiqchalar va reaktorlar)dan suyulmaga kirib qoladi. Kremniy bilan bir vaqtda eriyotgan kvartsdan suyulmaga boshqa kirishmalar ham kiradi. Masalan, GaAs kristalliga sintetik kvartsdan

$Na - 5 \cdot 10^{13}$, $Cu - 2 \cdot 10^{13}$, $Sb - 5 \cdot 10^{12}$, $Au - 3 \cdot 10^{10}$ atom/sm³ zichlikda o'tib oladi. Bu holda yuz beradigan reaksiyalar:

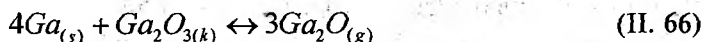


Reaksiya zonasidan ketayotgan uchuvchan Ga₂O uni o'ngga siljitadi, oqibatda suyulma kremniy bilan boyiydi. Ikkinchi reaksiya oqibatida reaksiya zonasidan uchuvchan SiO reaksiyani o'ngga siljitadi, galliy suyulmasida kremniy kamayadi.

Kremniyning GaAs suyulmasidagi zichligi galliy va kremniy oksidlarining parsial (ulushiy) bosimlari kattaligiga bog'liq. Ular qancha yuqori bo'lsa, galliy suyulmasida kremniy shuncha kam bo'ladi. Parsial bosimlar Ga va Si joylashgan konteynerning erkin hajmiga bog'liq, bu hajm qancha katta bo'lsa, parsial bosimlar shuncha kam va galliy suyulmasida kremniy shuncha ko'p. Agar erkin hajm kam bo'lsa, parsial bosimlar katta va suyulmada kremniy oz bo'ladi. Buning uchun erkin hajm kam bo'ladigan qilinishi kerak. Flyus qatlami ostidan monokristallar o'stirish usulida suyulma ustida erkin (gaz) hajm nolga teng, uning vazifasini bajaradigan flyus oksidlarni yutib yuqoridagi reaksiyalarni o'ngga siljitadi. Bundan tashqari, flyus sifatida ishlatiladigan bor angidridi B₂O₃ kvars bilan ta'sirlashadi. Galliy arsenidi monokristallarini kvars tigellarda (flyus ostidan) o'stirilgandan so'ng flyusdagi kremniy zichligi (massa bo'yicha) 0,2 % ni tashkil qiladi. Bu kremniy qisman galliy suyulmasiga o'tadi. GaAs va GaP yuqorida aytilgan flyus ostidan kvars tigellarda o'stirilganda kremniy zichligi $1 \cdot 10^{16}$ atom/sm³ tartibida bo'ladi.

GaAs monokristallarini Brijmen gorizonta usulida o'stirilganda suyulmada kremniy miqdorini Ga₂O oksidning suyulma atrofidagi muhitda bosimini orttirish yo'li bilan, shuningdek, uning reaktor soviq qismida kondensatsiyalanishini bartaraf qilish bilan kamaytiriladi. Buning uchun reaktorga yetarli miqdorda kislorod kiritiladi. U reaktorga Ga va

Ga₂O₃ aralashmasi ko'rinishida kiritilishi mumkin, uni qizdirganda uchuvchan Ga₂O oksid hosil bo'ladi (uning bug'i bosimi kattalashadi):



Kichik hajmli reaktorlarni qo'llanib, devorlari temperaturasi 1000°C gacha ko'tarib va kristallanish zonasini qolgan hajmdan kapillar to'siqlar bilan ajratib (bu Ga₂O ko'chishini to'xtatadi) GaAs dagi kremniy kirishmasi miqdorini bir tartibdan ko'proq pasaytirish mumkin bo'ladi.

Bu shartlar bajarilganda GaAs da Si zichligi 10¹⁵ atom /sm³ dan kam va elektronlar harakatchanligi 8000 sm² /V·s qilinishi mumkin (300 K).

8.5.4. Yarimo'tkazgich birikmalarda kislorod

Galliyli yarimo'tkazgich birikmalar suyulmasiga kislorodni har qanday shaklda kiritilsa ham u galliyning kvarts bilan ta'sirlashishini bosadi, demak, birikmada kremniy va boshqa ba'zi kirishmalar (agar ularning kislorodga yaqinligi galliyga nisbatan yaqinlikdan yuqori bo'lsa) miqdorini kamaytiradi. Bunday kirishmalar – uglerod, temir, xrom, mis.

Brijmen usulida GaAs monokristallari o'stirilganda uni konteynerga (ampulaga) elementar shaklda yoki oksidlar shaklida (Ga₂O₃, As₂O₃ va b.) kiritib uning tozalash ta'siridan foydalaniladi, Choxralskiy usuli qo'llanilganda esa kislorod bevosita flyusga kiritiladi va o'sha natijaga erishiladi.

Yana bir narsaga e'tiborni jalb etamiz. Agar GaAs va GaP suyulmasida kislorodning ortiqcha miqdori bo'lsa, kristallar qarshiligini oshiradi. Agar bu miqdor kam bo'lsa, yuqori temperaturada kristallga ishlov berilgach, uning qarshiligi keskin kamayadi. Agar kislorod miqdori ko'p bo'lsa, temoishlov kristallning solishtirma qarshiligiga sezilarli ta'sir qilmaydi.

Mazkur birikmalardagi kislorod kristallanish jarayoniga ta'sir ko'rsatadi. Masalan, konteynerning (qayiqchaning) suyulma tomonidan xo'llanishi kuchli darajada ortib ketadi, monokristall o'sishi buziladi.

Kislorod yuqori temperaturalar sohasida galliyli birikmalarning plastiklik xossalari keskin pasaytiradi. Shuning uchun Brijmen va Choxralskiy usullari bilan o'stirilgan kristallar osonlikcha yorilib ketadi.

Umuman aytganda, GaAs va GaP monokristallarida kislorod zararli kirishma hisoblanadi. Uning tozalovchi kirishma sifatida qo'llanishi ancha cheklangan. Shuning uchun GaAs va GaP yarimo'tkazgich birikmalar tozaligini ko'tarish uchun: 1) eng avvalo dastlabki moddalar tozaligini ko'tarish; 2) kvars konteynerlarni, masalan, alyuminiy va bor nitridlaridan yasalgan konteynerlar bilan almashtirish; 3) jarayonga kiritiladigan barcha moddalarni sinchiklab suvsizlantirish va gazzsizlantirish zarur.

8.6. Yarimo'tkazgichlarning lazer texnologiyasi

Quvvatdor lazerlar yarimo'tkazgichli asboblarni ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi. Ionlar kiritilgandan so'ng plastinalarni qizdirish (kuydirish) uchun, polikristall kremniyda donalar o'lchamini kattalashtirish uchun, stabiltronlarni tayyorlashda, metall kontaktlar yaratishda lazerlardan foydalaniladi. Masalan, yuqori energiyali ionlar kiritilganda kremniyning monokristall tuzilishi buzilishi, uni tiklash uchun beriladigan termoishlov 1000°C da 30 min davom etadi. Lazer bu ishni 10 marta tez bajaradi.

Lazer bilan samarali ishlov beriladigan yarimo'tkazgichlar texnologiyasi sohalari haqida to'xtalib o'tamiz.

8.6.1. Sirtni tozalash va relyefini yaxshilash

Lazer yordamida tozalashda yarimo'tkazgich sirtidagi iflosliklar ketkaziladi, ammo sirtning o'zi zararlanmaydi. Ishlov beriladigan sirtga yot atomlar kirmaydi, vakuum sharoiti buzilmaydi. Lazer vakuum kamerasidan tashqarida bo'ladi. Nur shaffof deraza orqali kiritiladi, bunda bir jarayonda bir necha amallar, masalan, tozalash, metallni yoki

epitaksial pardani vakuumda o'tqazish, tok keltiruvchi yo'lchalar (tasmalar) qilish va h. k. amallar bajariladi.

Tozalash uchun nurining diametri 3,5 mm bo'lgan rubin lazer ishlatiladi. Kremniy sirtida uglerod va kremniy dioksidi pardalarini kuydirib yuborish uchun har birida 2 J/sm^2 bo'lgan beshta ketma-ket impulslar energiyasi kifoya bo'ladi. Sirtni 16 ns davomiylikli ikki-uch (2 J/sm^2) impuls bilan nurlantirilsa, sirtning monokristalligi tiklanadi (u argon ionlari kirishidan buzilgan) va bir vaqtda argon ionlaridan sirtni tozalaydi.

Metall pardalari sirtini tekislash uchun ularni $\sim 1 \text{ mks}$ davomida lazer nurlanishi bilan qizdirish kifoya. Bu tekislash jarayonini vakuumda, havoda yoki inert gaz muhitida o'tkazish mumkin. Kremniyning epitaksial qatlamlari sirtidagi o'tkir chiziqlarni bartaraf qilish uchun lazer ishlovdan foydalaniladi, agar kremniy ($0,2 - 0,8 \text{ J/sm}^2$) energiyali impuls bilan nurlantirilsa, mazkur nuqsonlar (suyulib) io'la yo'q bo'lib ketadi.

8.6.2. Kirishmalar kiritish va ularni qayta taqsimlash usulari

Sirtiy qatlamlardan diffuziyalash usuli. Bu usul sirtiy manbadan diffuziyalash usuliga o'xshaydi, ammo bunda legirolovchi kirishmani lazer nurlanishi yordamida qizdiriladi. Sirtiy qatlam suyuladi va kirishma suyulgan modda ichiga diffuziyalanib kiradi. Ana shu usul bilan kremniyga donorlar va akseptorlar (bor, fosfor, surma va b.) kiritiladi.

Yupqa yarimo'tkazgich plastinalar sirtiga omik kontaktlar o'tqazish xuddi shu usulda amalga oshiriladi. 100 mm diametrli va 0,2 mm qalinlikli plastinalarda lazer bilan qizdirish termik kuchlanishlarga bog'liq buzilishlar qoldiradi. Oddiy texnologiyada esa ko'p kontaktlar shunday kuchlanishlar sababidan buzilib ketadi.

Suyuq yoki gazsimon manbadan diffuziyalash usuli. Rubin lazer nurlanishini p-Si plastinasi sirtiga o'tqazilgan etanoldagi surma trixloridi eritmasi orqali o'tkazib sirtidan 190 nm ichkarida p-n o'tish hosil qilinadi.

Gazsimon manba (10%PH₃+ 90% Ar gazlar aralashma) muhitiga plastina joylanadi. Aleksandrit asosidagi lazer ($\lambda=0,73$ mkm) bilan ishlov beriladi. Uning nuri diametri ~3mm.

Lazer yordamida fotolitik legirlash. Bu usul yarimo'tkazgich sirtiga kirishma o'tqazish va uni plastina ichiga kiritish jarayonlarini birgalikda olib borish imkonini beradi. Birinchi bosqichda gaz lazer nurlanishini yutadi, dissotsiatsilanadi, kirishmani ozod qiladi (fotoliz). Kirishma o'sha nurlanish ta'sirida sirtga o'tira borib, plastina ichiga kiradi.

Lazer yordamida ionlar kiritish. Tarkibida kirishma bo'lgan nishon quvvatdor CO₂ — lazer nurlanishi ta'sirida bug'lantiriladi, kirishma ionlari yarimo'tkazgichga kiradi.

Yarimo'tkazgichlarda kirishmani qayta-taqsimlash. Yarimo'tkazgichga kiritilgan kirishma plastinalar sirtini lazer yordamida kuydirish yo'li bilan qayta taqsimlanishi mumkin. Bu esa asboblarning tavsiflarini yaxshilash imkonini beradi.

8.6.3. Nuqsonlarni kuydirish

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida qo'llaniladigan termodiffuziya jarayonlarida elektr jihatdan nafaot kirishmalar uyumlari, pretsipitatlar hosil bo'ladi. Ular yarimo'tkazgichlar va ular asosidagi asboblarning xossalarni yomonlashtiradi.

Lazer ishlovi pretsipitatlarni «eritib» yuboradi, kirishma atomlarini faollashtiradi.

Impulslari davomiyligi 50 ns va energiya zichligi 1,5-1,8 J/sm² bo'lgan rubin lazeri bilan ishlov berilganda dislokatsiyalar va dislokatsion sirtmoqlar (ular kremniyga bor, fosfor ionlari va boshqa ionlar kiritilganda hosil bo'ladi) bartaraf qilinadi. Keyingi davrda kerakli xossali o'ta

katta, katta integral sxemalarni hosil qilishda ionlar kiritish usuli asosiy bo'lib qolgan. Ammo, katta energiyali ionlar (200 keV gacha) yarimo'tkazgichning sirtiy qatlamini zararlaydi, ba'zan uni amorf holatga keltiradi. Lazer bilan kuydirish sirt qatlamini qayta kristallaydi.

Lazer yordamida kuydirishning ikki usuli mavjud : 1) bir necha sm^2 yuzali sirtni qisqa impuls (100 ns) bilan nurlantirish; 2) kichik yuzaga (dog'ga) fokuslangan uzluksiz lazer nurini material sirti bo'yicha siljitib borish. Uzluksiz lazer bilan kuydirish sharoiti shunday tanlanadiki, bunda sirt qiziydi, ammo suyulmaydi. Demak, qayta kristallanish qattiq fazada yuz beradi. Bunda kiritilgan ionlarning plastina qalinligi bo'yicha taqsimoti o'zgarmas saqlanadi. Bir misol keltiramiz.

$5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-2}$ zichlikli va 100 keV energiyali arsenik (As) ionlari kiritilgan kremniy qatlamlarini kuydirish. Kuydirishgacha qatlam amorf tuzilishda. 7 W li argon lazeri yordamida kuydirish o'tkaziladi, Si plastinkadagi lazer dog'ining diametri $\sim 25 \text{ mkm}$, nurning siljish tezligi $2,7 \text{ sm/s}$. Kuydirishdan so'ng qatlam mukammal kristallik tuzilishga ega bo'lib qoladi. Vaholanki, termik kuydirish (1000°C , 30 min) amorf qatlamda dislokatsion sirtmoqlar ko'rinishida ko'p nuqsonlar ($\sim 10^{10} \text{ sm}^{-2}$) qoldiradi.

Lazer bilan kuydirish afzalliklari:

- 1) Kirishmaning diffuzion qayta taqsimlanish sezilmaydi, murakkab birikmalarda (masalan, $A^{III}B^V$ da) tarkib saqlanadi.
- 2) Termik kuydirishga nisbatan lazer kuydirishda legirlash samaradorligi yuqori bo'ladi.
- 3) Zaryad tashuvchilar faolligi bir necha marta ortiq bo'ladi.

8.6.4. Kirishmalarni getterlash

Getterlash deb asboblarning faol sohalaridan tez diffuziyalanadigan metall kirishmalarni (oltin, kumush, mis va b.) ketkazish jarayoniga aytiladi, chunki bu kirishmalar asboblarning sifatini pasaytiradi.

Odatda getterlash sohalarini plastinaning notekis tomonida hosil qilinadi, bunda muayyan nuqsonlar kiritilib, ular yuqorida aytilgan nokerak kirishmalarni o'ziga biriktirib oladi.

Lazer ishlovi oqibatida hosil bo'lgan nuqsonlar oson nazorat qilinadi, ifloslik kiritmaydi va barqaror bo'ladi. Ular kirishmalarni texnologik jarayonlar o'tkazilganda ham ushlab tura oladi.

Getterlash samaradorligini noasosiy zaryad tashuvchilar yashash vaqti bo'yicha baholanadi. Metall kirishmalar qancha kam bo'lsa, yashash vaqti shuncha katta bo'ladi.

8.6.5. Polikristall kremniy qarshiligi o'zgarishi

Yarimo'tkazgichli asboblarda va IMS larda metall o'tkazgichlar o'rniga ko'pincha legirlangan polikristall kremniy (PK) pardalardan foydalaniladi. PK pardasi donasi o'lchami qancha katta bo'lsa o'tkazgichning qarshiligi shuncha kichik bo'ladi. Lazer bilan kuydirish donalar o'lchamini kattalashtiradi, binobarin, piroliz yordamida (620°C va past bosimda) o'stirilgan PK pardalari qarshiligini kamaytiradi.

Lazer tizimi 30 ns davomiylikli va energiya zichligi $2-59 \text{ mW/sm}^2$ bo'lgan impulslar hosil qiladi. Rubin lazerdan foydalanilgan holda to'lqin uzunligi 0,6943 mkm yoki neodim lazer bo'lganda — 1,06 mkm bo'ladi, namunada yorug'lik dog'i 5 sm.

Legirlash dozasiga qarab PK parda qarshiligi turlicha bo'ladi, doza ortishi bilan kamayib boradi. Ammo, quvvat zichligi katta bo'lganda PK pardalari qatlamlanib, ularning qarshiligi ortadi. Arsenik (As) bilan legirlangan PK pardalari o'lchami kuydirishgacha $\sim 30 \text{ nm}$, termik kuydirishda u 40 nm ga yetadi, lazer bilan kuydirishda 150 nm gacha yetadi. Mos ravishda, qarshiliklar nisbati $15 \cdot 10^3:890:360$. Termik kuydirishdan so'ng faollashgan kirishma atomlari hisssasi 39%, lazer bilan kuydirishdan so'ng- 93%. Impuls rejimida plastina sirti bo'yicha

siljiyotgan lazer nuri polikristall kremniy qatlamini qayta kristallaydi. Bu qarshilikning yana ham kamayishiga olib keladi.

8.6.6. Amorf va polikristall qatlamlarning qayta kristallanishi

Epitaksial texnologiya yarimo'tkazgichli asboblarni yaratishda katta o'zgarish qildi. Ammo, uning ba'zi kamchiliklari bor. Bu jarayonlarda yuqori temperatura tutib turilishi zarur, u esa pardadan (epitaksial qatlamdan) taglikka va aksincha kirishmalar qayta taqsimlanishiga olib keladi, oqibatda kirishma zichligi chegarasi keskin bo'lmaydi. Bunday kamchiliklar lazerlar yordamida bartaraf qilinishi mumkin.

Polikristall yoki amorf qatlamlarni qayta kristallash yo'li bilan epitaksial pardalar olish texnologiyasining kelajagi bor. Bu usuldagi ko'ra, dastlab past temperaturada «tayyorlama» qatlamlari o'tqaziladi, keyin esa, **qattiq fazali kristallash** orqali monokristall qatlamlar shakllanadi. Oqibatda parda — taglik chegaralari keskin bo'ladi. Qattiq fazali qayta kristallash barcha bosqichlarda o'ta yuqori vakuum bo'lishini talab qiladi.

Agar lazer nurlanishi quvvati va uning nurini siljitib borish tezligi amorf qatlamni monokristallik taglikkacha suyultirishga yetarli bo'lsa, bu jarayon normal sharoitda kechishi mumkin. Yuqori chastotada changlab o'tqazilgan 440 nm qalinlikdagi amorf germaniy qatlamini suyuq fazadan qayta kristallash yo'li bilan yuqori sifatli monokristall qatlam hosil qilinadi. Bunda ishlatiladigan argon lazeri nurlanishi quvvati 9 W, siljib borish tezligi 200 sm/s. Jarayon vaqti kichik bo'lgani natijasida kirishmalar pardadan taglikka va aksincha o'ta olmaydi.

Impulsli lazerlardan foydalanganda vakuumda qatlamlarni (changlatib) o'tqazgandan keyinok havoda qayta kristallash yo'li bilan yuqori sifatli kremniy avtoepitaksial qatlamlari hosil qilinadi.

Lazer ishlovi tufayli germaniyaning kremniy taglikda va kremniyning sapfir taglikda geteroepitaksial qatlamlarini olish mumkin.

8.6.7. Polikristall kremniy tasmalarini kristallash

Kremniy tasmalarini (lentalarini) o'stirish arzon kremniy plastinalarini olish usullaridan biridir. Bu usul kesish, yedirish va silliqlashdan amallarsiz bajariladi. Bu amallarga esa dastlabki material 75% gacha isrof bo'ladi.

Dastavval kremniyni bug* fazasidan (past bosimda) vaqtincha taglikka o'tqaziladi. Keyin kremniy qatlami ajratib olinadi, taglikdan esa keyingi jarayonda yana foydalaniladi. Bu usul bilan 100 mkm va ortiq qalinlikdagi kremniy plastinalari olinadi. O'stirilgan tasmani lazer bilan kerakli o'lchamli plastinalarga ajratiladi. Biroq, bu plastinalar mayda donali polikristall tuzilishga ega, amalda ulardan foydalanib bo'lmaydi. Ularni ishlatishga yaroqli qilish uchun quyidagi amallar bajariladi.

Polikristall donalarini yiriklash uchun lazer ishlovi beriladi. Lazer nuri, masalan, 7,5 sm/min tezlikda siljib borib tasmaning torgina qismini suyultiradi. Qayta kristallashdan so'ng polikristall kremniy yirik donador tuzilishga ega bo'lib qoladi. Yuqori sifatli tasmalarnig sirti yaltiroq, mayda panjaraviy relyefga ega. Relyef davri 4,5 mkm. Argonda kuydirilganda silliq ko'zgusimon sirt hosil bo'ladi. Bunday tasmasimon materiallarda noasosiy zaryad tashuvchilar yashash vaqti katta va tuzilish nuqsonlari kam.

Qayta kristallangan tasmasimon yarimo'tkazgichlar quyoshliq elementlar ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi.

8.6.8. «Dielektr ustidagi kremniy» qatlamini qayta kristallash

Lazer yordamida qayta kristallash usuli bilan amorf moddalar sirtida shakllantirilgan «dielektr ustidagi kremniy» qatlamlari boshqa usullar bilan o'stirilgan qatlamlarga xos kamchililardan xalos. Bu holda tuzilmaning asosi kremniy taglik bo'ladi. Qayta kristallash impulsli yoki uzluksiz lazer yordamida amalga oshiriladi. Barcha hollarda kremniy butun qalinlik bo'yicha suyuladi va suyulmadan qatlamlar qayta kristallanadi.

Mazkur tuzilmalar ketma-ket o'tkaziladigan amallar natijasida olinadi: kremniy taglik termik (qizdirish) yo'l bilan oksidlanadi yoki taglikka kremniy nitridi o'tqaziladi (dielektr qatlam hosil qilinadi); buning ustiga kremniy qatlami o'tqaziladi- gazsimon fazadan (past bosimda) PK o'stiriladi; ionlar kiritish usuli bilan PK legirlanadi; PK qatlamni lazer qayta kristallaydi.

Yaxlit kremniy qatlamlariga lazer ishlov berilganda ular polikristalligicha qoladi, ammo, donalar o'nlab mkm gacha kattalashadi. Lazer yordamida qayta kristallashda kremniyning bir necha o'n kvadrat mkm li yuzali monokristallik donalari olmadi. Shunday usul bilan tayyorlangan «dielektr ustidagi kremniy» qatlamlari asosida MOY – tranzistolar, katta integral mikrosxemalar (KIMS) tayyorlanadi.

8.6.9. Yedirish

Ultrabinafsha spektr sohasida nurlanish chiqaradigan lazerlardan polimer va metall pardalarni bevosita yedirish uchun foydalaniladi. Yedirishning bir necha usullari mavjud: qattiq fazadan bug'lantirish yo'li bilan yedirish, lazer rag'batlantirgan yedirish. Bu amallardan integral sxemalar hosil qilishda keng foydalaniladi.

Nazorat savollari

1. Kiritiladigan kirishmalar qanday hisob qilinadi?
2. Komponovka nima?
3. Oraliq texnologik jarayonlar qanday bo'ladi?
4. Kimyoviy yedirish amallarini tavsiflang.
5. Yarimo'tkazgich birlakmalarni sintezlashga tayyorgarlik qanaqa bo'ladi?
6. Tovar monokristallar qanday o'stiriladi?
7. Monokristallarda tekis taqsimlangan kirishmalar hosil qilish choralari qanday?
8. Mukammal tuzilishli monokristallar olish usullari qanday?
9. Choxralskiy usulini tavsiflang.
10. Zonaviy suyultirish usulini tavsiflang.
11. Brijmen usulini tavsiflang.
12. Yarimo'tkazgichlarda kislorod va uglerod kirishmalari qanday ahamiyatga ega?

UCHINCHI QISM

YARIMO'TKAZGICHLI ASBOBLAR TAYYORLASH TEKNOLOGIYASI

9-bob. Yarimo'tkazgich materiallarga mexanik ishlov berish

9.1. Umumiy ma'lumotlar

Har qanday yarimo'tkazgichli asbobni tayyorlash jarayoni yarimo'tkazgich material quymasi elektrik o'tkazuvchanligining turi, uzunlik bo'yicha solishtirma qarshiligining taqsimoti xarakteri va qiymatini, zaryad tashuvchilarning yashash vaqti yoki diffuzion uzunligini, dislokatsiya zichligini aniqlash amallaridan iborat.

Keyingi yillarda yarimo'tkazgich asboblari tayyorlashda epitaksial qatlam vujudga keltirilgan yarimo'tkazgichli plastinkalar keng qo'llanilmoqda. Bunda epitaksial qatlamning qalinligi, solishtirma qarshiligi, qatlamning qalinlik va solishtirma qarshilik bo'yicha bir jinsliliigi, dislokatsiya va nuqsonlarning joylashish zichligi nazorat qilinadi.

Mexanik ishlov natijasida yarimo'tkazgichli plastinkalar aniq geometrik o'lchovga, kerakli kristallografik yo'nalganlik va sirt tozalik sinfiga ega bo'ladi. Bu plastinkalar keyinchalik asbob tayyorlash uchun xizmat qilishi mumkin yoki epitaksial qatlam olish uchun taglik vazifasini bajarishi mumkin.

9.2. Plastinka va kristallarga qo'yiladigan talablar

Ko'pchilik yarimo'tkazgichli asboblarni tayyorlashda monokristall quymalarning disk ko'rinishida kesilgan plastinkalari yoki ulardan kesib olingan kvadrat, to'g'ri to'rtburchak, doira yoki murakkab ko'rinishidagi kristallardan foydalaniladi.

Tayyorlanadigan asboblarga qo'yiladigan talablarga asosan, plastinkalarning qalinligi 0,2-0,7 mm gacha, kristall yuzasi esa 0,1 dan 25-30 mm² gacha bo'lishi mumkin.

Mexanik ishlovning asosiy vazifasi talab darajadagi sirtli plastinka yoki kristallni kerakli o'lcham, shakl va kesimda tayyorlashdan iboratdir.

Bu vazifa quymani plastinkalarga kesish, u plastinkalarni tekislash va silliqlash bilan amalga oshiriladi.

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida plastinkalar va kristallar sirti sifatiga juda qattiq talab qo'yiladi. Bularga quyidagilar kiradi:

1) Qalinligi o'rtacha 200 mkm plastinkaning qalinligi nominaldan ± 3 mkm dan oshmasligi kerak.

2) Plastinkalarni kristallografik tekisligi yo'nalganligi aniqligi 3'-6' atrofida bo'lishi kerak. Oksidlash, diffuziya, kirishmalar kiritish va boshqa jarayonlarni qayta takrorlanishi shunga bog'liq. Ko'pincha (111) tekislikda kesilgan kristallardan foydalaniladi.

3) Plastinkalarning yassi parallelligi diametri bo'yicha ± 1 mkmdan oshmasligi kerak. Albatta, bu talabni plastinka diametri 80-110 mm dan yuqori bo'lganda bajarish qiyin.

4) Mexanik buzilgan qatlamni eng yupqa holga keltirish yoki umuman yo'qotish kerak. Bu talab ayniqsa, o'ta yuqori takroriylikli asboblarda uchun muhim bo'ladi.

5) Sirt shakli chuqurligi $\pm 0,025$ mkm dan oshmasligi talab qilinadi va u sirtning 14-sinfiga to'g'ri keladi.

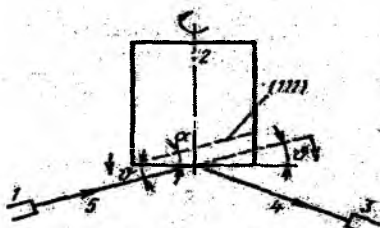
9. 3. Monokristallarni yo'naltirish usullari

Yarimo'tkazgichli asboblarda tayyorlash texnologiyasida quyma monokristallarni plastinkalarga aylantirishdan oldin kristallografik yo'nalishi aniqlanadi. Chunki tanlangan kristallografik yo'nalish asboblarning yuqori sifatli chiqishida katta ahamiyatga ega.

Monokristallarni o'stirib olishda, asosan (111) yo'nalish tanlanadi. Biroq, monokristallni o'stirish jarayonida tanlangan yo'nalishdan biroz og'ishlar bo'lishi mumkin. Shuning uchun barcha quyma monokristallarning kristallografik yo'nalishlari rentgenografik yoki optik usul bilan aniqlanadi.

Rentgenografik usul kristall tekisliklaridan qaytgan rentgen nurlarining sochilish intensivligini har bir tekislikdagi atomlar joylashish zichligiga bog'liqligiga asoslangan. Ancha yuqori zichlikka ega bo'lgan (111) tekislik uchun sochilish intensivligi boshqalarga nisbatan yuqori bo'ladi. Shu bilan birga har bir modda uchun xarakteristik rentgen nurlari kristallografik tekislikka mos aniq burchak ostida qaytadi.

Modda	Tekisliklar uchun sochilish burchaklari		
	(111)	(110)	(100)
Germaniy (Ge)	17°14'	28°56'	43°10'
Kremniy (Si)	17°56'	30°12'	45°23'



III.1-rasm. Quyma yo'nalishini rentgen usuli sxemasi:

1-rentgen nay, 2-quyima, 3-nur qabul qilgich, 4-qaytgan nur, 5-tushuvchi nur

Yarimo'tkazgich quyma monokristallini rentgenografik usulda yo'naltirish III.1- rasmda ko'rsatilgan.

Quymani yo'naltirishdan oldin uni uchi quyma o'qiga tik holda kesilib, kesim (yoq) tekislanadi. Shu tekislangan yoqni nurlanish oqimiga qaratib kristall stolchaga o'rnatiladi. Stolchaga o'rnatilgan quyma yo'nalganligini boshqarish

imkoniyati bo'lib, unga rentgen nurlari oqimi γ burchak ostida yo'naltiriladi. Tushuvchi nur tekisligidan qaytuvchi nurni kuzatish uchun 2γ burchak ostida qabul qilgich (3) o'rnatiladi. Stolcha quyma bilan birgalikda vertikal o'qqa nisbatan og'dirib qabul qilgichga qaytgan nur eng katta ravshanlikka ega bo'lishiga erishiladi. Shundan so'ng, quymani stolchaga shu yo'nalishda mahkamlanadi va o'z o'qi atrofida 180° aylantirilib, yana eng katta ravshanlikka erishiladi. Shunda (111) tekislik aniqlangan bo'ladi. Quymalarni yo'naltirishining bu usuli aniqligi $\pm(3\div5)^\circ$ bo'lib, aniqlash uchun 15-30 minutgacha vaqt sarflanadi.

Optik usulda quyma monokristallning kristallografik tekisliklari (111), (100) va (110) ni aniqlash uchun, quyma uchi tanlovchan yedirgichlar yordamida yediriladi va uch sirtlarida kristallografik tuzilish qirralari yuzaga chiqariladi. Bu qirralarni yuzaga chiqarish asosiy kristallografik tekisliklarga mos kelib, quyma sirti tekisligiga nisbatan ular turli og'gan burchaklarda bir-biridan farq qiladi.

Agar yedirilgan quyma uchi sirtiga yorug'lik nuri tushirilsa, bu sirtan nurning qaytgan burchagi kattaligiga qarab sirtan qaytgan nurning shakliga qarab, quyma yo'nalganligi to'g'risida xulosa chiqariladi. Chuqur qirralardan qaytgan nurni ekranga tushirilsa, u holda ekranda o'ziga xos soyalar (shakllar) hosil bo'ladi. Bu figuralar ko'rinishi III.2-rasmida ko'rsatilgan.



(111)



(100)



(110)

III.2-rasm. Quyma monokristallarda yo'nalishlarning ko'rinishi.

Quymaning geometrik tekisligini o'zgartirsak, u holda ko'rilayotgan kristallografik tekislikdagi qaytgan nur hosil qilgan soya shakli o'zgaradi. Shakl ma'lum burchakka siljiydi va ko'rinishi buziladi. Optik usulda yo'nalganlik aniqligi yedirgich sifatiga bog'liq bo'lib, hozirgi kunda u kremniy uchun $\pm 3'$, germaniy uchun esa $\pm 15'$ ga yetkazilgan. Yo'nalganlik aniqligini lazerdan foydalanib oshirish mumkin. Optik usulning rentgenografik usulga nisbatan afzalligi shundan iboratki, qurilma sodda, tezkor va xavfsiz.

9.4. Quyma monokristallarni plastinka va kristallarga kesish usullari

Yarimo'tkazgichli asboblarni tayyorlash texnologiyasida yarimo'tkazgich quymalarni plastinkalarga kesishning bir qancha usullaridan foydalaniladi:

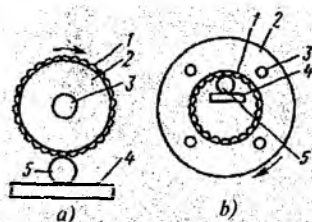
- 1) Qirrasli tashqi yoki ichki olmosli diskda kesish;
- 2) Abrziv-suspenziya yordamida po'lat tasma yoki ingichka simda kesish.

Plastinkalarni kristallarga kesishda esa 1) ultratovush; 2) ingichka sim, 3) olmos kesgich va boshqa usullardan foydalaniladi.

Turli usullarni solishtirish uchun bir qancha mezonlar mavjud bo'lib, ularga: unumdorligi (kesish tezligi); mexanik buzilgan qatlam chuqurligi; foydali materialning chiqishi; yarimo'tkazgich material chiqindisidan qayta foydalanish; turli ko'rinishdagi kristallarni tayyorlash kabilar kiradi.

Yuqoridagi usullarni ketma-ket ko'rib chiqamiz.

1. Olmosli diskda kesish maxsus qurilmalar yordamida amalga oshiriladi. Bu usul keng tarqalgan. Olmosli disk yupqa po'lat disk bo'lib, tashqi yoki ichki cheti o'lchamlari 20-40 mkm li donador olmos bilan singdirilgan.



III.3-rasm. Tashqi (a) va ichki (b) olmosli disklar yordamida quymani kesish sxemasi:

1-olmos qirrali disk; 2-po'lat disk; 3-mahkamlovchi tirqish; 4-quymani mahkamlovchi plastinka; 5-quyma

Tashqi qirrali qirquychi diskni diametri 50 mm, qalinligi 0,1-0,2 mm. Bunday disklar yordamida diametri 10 mm li quymalarni kesish mumkin (III.3, a-rasm).

Ichki keskich olmos qirrali diskning ichki diametri 50-60 mm va tashqi diametri 100-150 mm bo'lib, qalinligi 0,1-0,15 mm. Bu disklar maxsus qurilmaga mahkamlanadi va unda tepkili tebranishlar bo'lmaydi. Kesish katta aylanishda (8000-12000 ayl/min) olib boriladi. Diskning bunday katta burchak ostida aylanishida kesishning chiziqli tezligi 20 m/s ga yetishi mumkin.

Kesilayotgan joyni suv bilan sovutiladi. Plastinkalar qalinligi bo'yicha bir-biridan farq $\pm 0,03$ mm dan oshmasligi kerak. Bu usulda kesilish kengligi disk qalinligidan 2, 5-3 marta katta, shuning uchun material chiqindisi 40-45% ni tashkil qiladi.

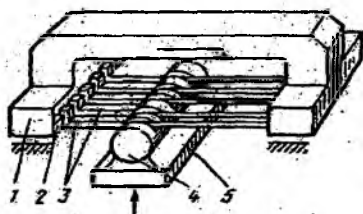
Ichki keskich olmos qirrali diskda kesishning bir qancha afzalliklari bor. U unumdor va chiqindi kam. Usulning kamchiliklari: mexanik buzilgan qatlamning qalinligi, qurilmaning murakkabligi va uni sozlash qiyinligi va boshqalar.

2. Abrziv suspenziya (mayda donador qattiq material + suv) yordamida po'lat tasmada quymalarni kesish sanoatda olmosli keskichlar chiqmasdan oldin qo'llanila boshlagan. Qalinligi 0,05-0,1 mm va kengligi $5 \div 10$ mm po'lat tasmalar maxsus po'latlarni qayta termik ishlov berish natijasida olinadi. Tasmalar maxsus kassetaga tartib bilan joylashtiriladi. Tasmalarni kesish jarayonida egrilanishidan saqlash maqsadida, ular ancha qattiq tarang tortib mahkamlangan bo'ladi. Qurilmaga o'rnatilgan kasseta quyma bilan tutashtiriladi va ilgarilanma-qaytma harakatga keltiriladi. Kesish zonasiga uzluksiz ravishda abraziv suspenziya quyilib turadi.

Tasmaning quymaga solishtirma bosimi $(7 \div 9) \cdot 10^3$ N/m². Kesish tezligi 10-15 mm/soat

Usulning asosiy afzalligi: kesishning kichik kenglikda bo'lishidir. Kesilishning sifati tasmaning harakat tezligi, tasmaga bo'lgan bosim,

abrazivning donadorlik o'lchami va qattiqligi, abraziv suspenziya konsentratsiyasi, ishlov berilayotgan material xususiyatiga bog'liq. Masalan, kremniyning kesilishi germaniyga qaraganda 2 marta kam. Kamchiligi: qurilmaning murakabligi va tasmani xizmat vaqtini kichikligidir.



III.4-rasm. Abraziv suspenziyalı tasma yordamida quymani plastinkalarga kesish sxemasi:

1-kasseta asosi; 2-ajratuvchi qistirma; 3-tasma; 4-quyma; 5-quymani mahkamlash uchun taglik.

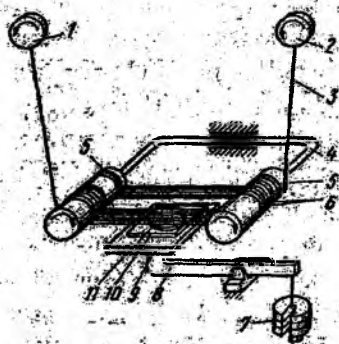
Abraziv suspenziya bilan simda quymani kesish usuli xuddi tasma bilan kesish usuliga o'xshab ketadi. Farq: tasma o'rniga ingichka sim qo'llaniladi.

Sim volfram yoki volfram-molibden ($50\%W + 50\% Mo$) qotishmadan tayyorlanadi, uning diametri 0,1-0,15 mm (III.5-rasm):

Chulg'am simlar o'ralgan g'altak quyмага qo'yiladi va u ilgarlanmaytma harakati tufayli kesishni amalga oshiradi. Bir vaqtning o'zida kesuvchi simlar soni 25-40 ta bo'ladi.

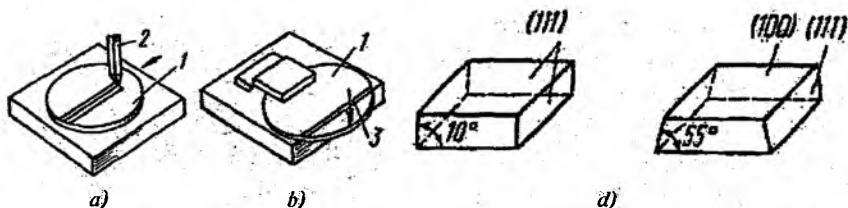
Sim bilan kesish usuli afzalligi - kesilish kengligining yuqoridagi usullardan yana ham kichik va yuqori unumdorli bo'lishligidir.

Katta chuqurlikda kesish imkoniyati yo'qligi usulning asosiy kamchiligidir. Shuning uchun bu usul asosan plastinkani kristallarga kesishda qo'llaniladi. Diametri 30-40 mm li plastinkalarni 0,1 mm li simlarda 10-15 min da kesish mumkin.



III.5-rasm. Abraziv suspenziya bilan simda quymani kesish sxemasi:

1-uzatuvchi g'altak;
2-qabul qiluvchi g'altak;
3-sim;
4-rama;
5-g'altak-kasseta;
6-tartib bilan o'ralgan sim chulg'amlari;
7-posongi;
8-plastinkani qisish uchun richag;
9-mahkamlanuvchi plita;
10-shisha plastinka;
11-yarimo'tkazgich plastinka



III.6-rasm. Skraybirlash (a), plastinkani sindirish (b), kristall (d) olish sxemasi.

Quyimalarni kesishda po'lat taglikka epoksid kompaund yoki abraziv qo'shilgan yelim bilan mahkamlanadi, plastinkalar esa shellak, pitsein, smola va boshqalar bilan yopishtiriladi.

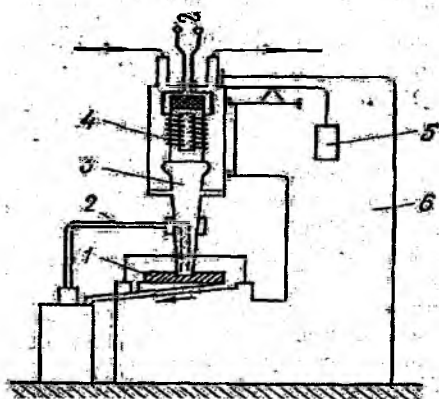
Skaybirlab chegara chizish usuli sanoatda plastinkalarni kristallarga kesishda keng qo'llaniladi. Skaybirlash (inglizcha so'zdan olinib, *scribe-tirnamoq*, tirnab chizmoq ma'nosini anglatadi) asosida uch yoki to'rt qirrali piramida ko'rinishidagi olmos keskich bilan plastinkada paralel chizilgan kichik ariqchalar hosil qilinadi. Ular qoldirgan izlar bo'yicha kvadrat yoki to'g'ri burchakli kristallar sindirib hosil qilish mumkin (III.6-rasm).

Skaybirlash usuli yuqori unumdorli va kesilgan chiziqlarning kengligi kichik, ya'ni material isrofi juda oz, shu afzalliklari bilan u boshqa usullardan ajralib turadi. Shu bilan birga, skaybirlash sifati plastinkalar

qalinligiga, kesuvchi olmos shakliga va kristallografik yo'nalish bo'yicha kesilishiga bog'liq.

Skaybirlash maxsus yarim-avtomat dastgohlarda amalga oshiriladi. Qurilma qadamli harakatlantirgich bilan ta'minlangan bo'lib, kesishni 0,01 mm oraliqda 0,01 mm dan to 9,99 mm gacha skaybirlashni amalga oshiradi. Skaybirlash tezligi 2-3 m/min.

Skaybirlashdan so'ng plastinkalarni sindirish turli usullarda olib borilishi mumkin. Bu



III.7-rasm. Ultratovushli kesish qurilmasining tuzilishi:

1-yarimo'tkazgich plastinka, 2-abraziv suspenziya berish mexanizmi, 3-konsentrator, 4-vibrator, 5-yuk, 6-korpus.

larga yumshoq taglikda valikni yurgizish; elastik membrana yordamida va boshqalar kiradi. **Yumshoq taglikda plastinkalarni sindirish** quyidagicha olib boriladi. Skraybirlangan plastinka yumshoq taglik sirtiga qo'yilib, chiziq tortilgan tomoni orqasidan kuch qo'yiladi. Kuchlar bilan plastinkani ikki chekkasidan ketma-ket bosib boriladi.

Ultratovushli abraziv ishlov berish turli geometrik shakldagi kristallarni kesish uchun sanoatda keng qo'llaniladi. Undan tashqari, bu usul yordamida plastinka va kristallarni tekislash mumkin. Qurilmaning ishlashi III.7-rasmda ko'rsatilgan. Ultratovush generatordan 4 vibratorga beriladi. Natijada magnitostriksion effekt tufayli 3 konsentrator 10 mkm amplituda bilan tebranadi. Konsentrator uchiga kesuvchi uskuna mahkamlangan bo'ladi. Uskuna 1 yarimo'tkazgich plastinka bilan kontaktda bo'lganligi uchun unga uzluksiz abraziv suspenziya 2 quyilib turadi va tebranishlar natijasida plastinka kesiladi.

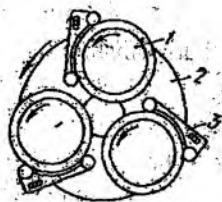
Uncha katta bo'lmagan 1-1, 5 mm chuqurlikda sirtga ishlov berish natijasida uskuna bilan yonlab kesishida kristallning to'g'ri burchakli to'rtburchak, kvadrat va boshqa ko'rinishlarini hosil qilish mumkin. Ultratovush bilan ishlov berish natijasida erishilgan plastinka sirtining sifati abrazivning donadorlik o'lchami va uskunaning tebranish amplitudasiga bog'liq.

Ultratovush bilan ishlov berish usuli unumdorligi bir qancha omillarga (generator quvvati va takroriyiligi, vibratorning f.i.k, konsentratorning transformatsiya koeffitsientiga, suspenziyaga va yarimo'tkazgich materialning mexanik tavsifnomalariga) bog'liq.

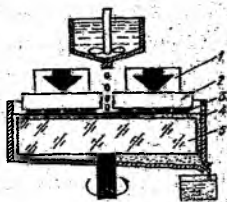
9.5. Plastinkalarni tekislash va silliqlash

Yarimo'tkazgichli asboblarni, ayniqsa integral mikrosxemalar tayyorlash texnologiyasida tekislash va silliqlash amallari katta ahamiyatga ega. Bu amallar plastinkalarda mexanik buzilgan qatlam va notekisliklarni olib tashlash, kerakli qalinlikka keltirish, plastinkalarning yassi parallelligini yaxshilash, sirt tozaligini talab darajasidagi sinfda olish uchun bajariladi.

Yarimo'tkazgich plastinkalarni tekislash va silliqlash uchun turli abraziv materiallardan foydalaniladi.



III.8-rasm. Tekislovchi dastgohning kinematik sxemasi:
1-planshayba,
2-tekislagich,
3-rostlagich.



III.9-rasm. Tekislashda yarimo'kazgich plastinkalar joylashishi:

1-yuk; 2-planshayba;
3-yarimo'kazgich plastinkalar;
4-abraziv suspenziya; 5-tekislagich.

Yarimo'tkazgich plastinkalarni tekislashda tekislovchi qattiq disk (cho'yan, po'lat, jez, shisha va boshqa materiallar) va abraziv mikrokukunlar (donadorligi o'lchamlari 5÷220 mkm) dan foydalaniladi. Abraziv mikrokukun materiallarga olmos, kremniy karbidi SiC, bor karbidi B₄C, korund α -Al₂O₃ va boshqalar kiradi. Tekislash natijasida sirt tozaligi $\nabla 9 \div \nabla 12$ sinflarga to'g'ri keladi.

Tekislash jarayoni texnologik belgisiga qarab, old va oxirgi; konstruktiv belgisiga qarab, bir tomonlama va ikki tomonlamaga; foydalaniladigan materiallar turiga qarab, erkin va bog'langan abrazivli sillqlash jarayonlariga bo'linadi. Old va oxirgi ishlov berishlar ikkita jarayondan iborat bo'lib, ular maqsadlari, rejimi va qo'llaniladigan materiallari bilan farqlanadi. Old tekislashning maqsadi plastinkalar sirt tekisligini tez ravon qilish, iflosliklarni kiyetkazishdan iborat.

Jarayonni o'tqazish rejimida tekislagichning aylanish takroriyiligi yuqori bo'ladi va plastinka sirtiga abraziv qum bosim berib turiladi. Old tekislash uchun M14 va M10 abraziv qumdan foydalaniladi. Oxirgi tekislash ancha yumshoq rejimda o'tkaziladi, bunda M7 va M5 abraziv qumlaridan foydalaniladi. Oxirgi tekislashning asosiy maqsadi plastinka sirtiga yaxshiroq ishlov berish va uning geometrik parametrlarini yanada sifatli qilishdir.

Yarimo'tkazgich plastinkalarini bir va ikki tomonlama aniqlash qonuniyati bir xil, farqi tekislovchi qurilmalarning konstruktiv tuzilishiga bog'liq, xolos. Bir tomonlama sillqlashda yarimo'tkazgich plastinkalar maxsus taglikka yopishtiriladi. Shundan so'ng plastinka sirtiga aylanuvchi sillqlovchi moslama tegiziladi. Sillqlash zonasiga suvga aralashtirilgan abraziv suspenziya berib turiladi.

III.8-rasmda tekislovchi qurilmaning kinematik sxemasi berilgan.

III.9-rasmda tekislash jarayonida yarimo'tkazgichli plastinkalar joylashishi ko'rsatilgan.

Silliqlash. Plastinkalarni silliqdash 3 dan 0,25 mkm abraziv yog'li pastalar singdirilgan yumshoq tagliklar (fetr, velyur yoki batist matolari) yordamida amalga oshiriladi. Bunday plastinkalarning sirt tozaligi $\nabla 14$ va undan yuqori sinflarga to'g'ri keladi. Yarimo'tkazgichli plastinkalarni silliqdashda olmos qumlar va qum pasta, kubik bor nitridi, alyuminiy oksidi, seriy oksidlari, xrom va kremniy asosidagi pastalardan foydalaniladi. Silliqlash uchun olmosni qo'llash hamma vaqt ham yaxshi natijalar bermaydi, chunki sirtida mikroskopik shakl — olmos dog'i qoladi. Yumshoq abrazivlardan, masalan, xrom, sirkoniy yoki kremniy oksididan foydalanish unumdorlikni kamaytirsada, biroq yuqori sinf tozaligidagi sirtni olish imkonini beradi.

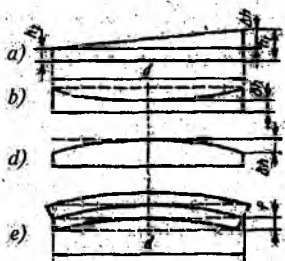
9.6. Mexanik ishlovdan so'ng plastinkalar va kristallar sifatini nazorat qilish

Mexanik ishlovdan so'ng plastinkalar va kristallar sifatini baholash quyidagi asosiy meyorlar bilan aniqlanadi: geometrik shaklning takomilligi (noparallelik, plastinkalar egilish darajasi); mexanik buzilgan qatlam qalinligi, sirt g'adir-budurligi; ruxsat etilgan chegaradagi qalnlikka mosligi.

Plastinkalardagi asosiy nuqsonlar ko'rinishi III.10-rasmda ko'rsatilgan.

Plastinka sirt tekisligi og'ishi δh — bu haqiqiy sirt nuqtasidan o'tkazilgan to'g'ri chiziq yoki tekislikkacha bo'lgan eng katta masofa (III.10, *b*, *d*-rasm). Plastinkalarning egriligi f — radial kesimda haqiqiy shakl nuqtasidan sirtida yotuvchi to'g'ri chiziqgacha bo'lgan masofa (III.10-rasm, *e*). Plastinkalarning egrilanishi qoldiq mexanik kuchlanishlar farqidan va bir tomonlama ishlov berish natijasida paydo bo'lishi mumkin.

Plastinkalar va kristallar nuqsonlarini nazorat qilish amallarni bajarish oralig'ida va asbobning oxirgi ishlovidan so'ng qilinadi. Mexanik ishlovlarning oxirida sirtida buzi-



III.10-rasm. Plastinkalardagi asosiy nuqsonlar ko'rinishlari.

lishlar hosil bo'lmashligi uchun kontaktsiz optik yoki fotoelektrik usullarda nuqsonlar nazorat qilinadi. Mexanik buzilgan qatlam qalinligi rentgenografik yoki elektronografik usulda yupqa qatlamini ketma-ket elektrokimyoviy usulda olish bilan monokristall uchun to'g'ri keladigan rentgenogramma (elektronogramma) olgungacha aniqlanadi.

13-14-sinf tozaligidagi sirtlar interferensiyon usulda Linnik mikroskoplari yordamida nazorat qilinishi mumkin.

Nazorat savollari

1. Monokristallarni kesishning qanday usullari bor? Har bir usulning afzalligi va kamchiliklarini ayting.

2. Ultratovush kesish mexanizmi qanaqa?

3. Plastinkalarni tekislash nega kerak? Silliqlash- chi?

4. Sirt sifatini nazorat qilishning qaysi usullarini bilasiz?

5. Kremniy plastinkalarga qanday talablar qo'yiladi?

6. Abrziv materiallar nima va abraziv ishlov nimadan iborat?

10-BOB. YARIMO'TKAZGICH PLASTINKALAR VA KRISTALLARGA KIMYOVIY VA ELEKTROKIMYOVIY ISHLOV BERISH

10.1. Umumiy ma'lumotlar

Yarimo'tkazgichli asboblarda ishlab chiqarishda kimyoviy jarayonlar namunalarni kristallografik yo'naltirishdan boshlab to tayyor asbobning korpusi zanglashiga qarshi qoplama o'tqazishgacha deyarli barcha texnologik bosqichlarda qo'llaniladi.

Kimyoviy ishlov asbobning turi va texnologik jarayonning borishiga qarab turli usullar bilan bajariladi. Kimyoviy ishlov mexanik ishlovdan so'ng amalga oshiriladi. Uning natijasida yarimo'tkazgichning mexanik ishlovda buzilgan qatlami kiyetkaziladi va sirt tozaligiga erishiladi. Ba'zi hollarda kimyoviy yoki elektrokimyoviy ishlov plastinkalar sirtida turli geometrik relyef (andozalar) olish uchun ham qo'llaniladi.

Kimyoviy qayta ishlovlarni bajarish va tugatish diqqat bilan nazorat qilinadi. Ayniqsa, asosiy diqqat kimyoviy reaktivlarga berilishi kerak, ularning tozaligi yarimo'tkazgich materiallarning tozalik sinfidan kichik bo'lmashi zarur.

Kimyoviy va elektrokimyoviy ishlovni qo'llash bilan quyidagi vazifalarni bajariladi.

- 1) Sirtni tozalash va turg'unlashtirish;
- 2) Sirtni shakllantirish;
- 3) Yarimo'tkazgich material yoki $p-n$ o'tish sifatini nazorat qilish;
- 4) Yarimo'tkazgich sirtiga turg'unlovchi, himoyalovchi yoki kontakt hosil qiluvchi qoplamalar o'tqazish;

Birinchi guruhga yarimo'tkazgich sirtini oksid pardalar va turli xildagi chetki iflosliklardan tozalash; mexanik buzilgan qatlamni kiyetkazish; sirtni turg'unlash; tayyor asbob tavsiflarini o'zgartirish maqsadida $p-n$ tuzilmalarni yedirishlar kiradi.

Ikkinchi guruhga mexanik buzilmagan qatlam qalinligidagi kristall va plastinkalar olish uchun boshqaruvli kiyetkazish, sirtida talab darajasidagi shaklni olish, quymalarni plastinkalar va kristallarga ajratish kiradi.

Uchinchi guruhga kristall tuzilmalar nuqsonlarini oshkorlash: dislokatsiyalar, blok va donadorlik chegaralari, egizaklik chegaralari va boshqalar; kirishmalar taqsimotidagi notekisliklarni, $p-n$ o'tish chegarasini, pretsipitatlarni va boshqalarni oshkorlash amallari kiradi.

To'rtinchi guruhga sirt xossalarini barqarorlash, uni himoyalash maqsadida qoplamalar (oksidlar, fosfatlar, xromatlar) o'tqazish; kontaktlar hosil qilish uchun metall qoplamalarni kimyoviy yoki elektrokimyoviy o'tqazish kiradi.

Yuqorida sanab o'tilgan ishlarni faqat kimyoviy yoki elektrokimyoviy yo'l bilan bajarish mumkin.

Yarimo'tkazgich asboblarni ishlab chiqarishda yedirish, odatda yog'sizlantirishdan so'ng amalga oshiriladi. Chunki, bu holatda yedirgich plastinka sirtini to'la ho'llaydi va tashqi qatlam tekis yemiriladi.

Biz yedirish jarayonini tavsiflashdan oldin kimyoviy tozlash to'g'risida to'xtalib o'tamiz.

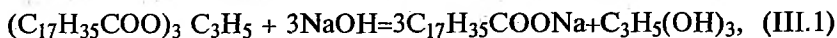
10.2. Yarimo'tkazgich plastinkalarni organik eritmalarda tozalab yuvish

Bu ko'rinishdagi ishlov berish kimyoviy reaksiyalar natijasida sirdagi iflosliklarni parchalash yo'li bilan tozalashdan iborat.

Kimyoviy yog'sizlantirish deganda ishlov beriluvchi materialga ta'sir qilmaydigan, biroq yog' molekulalarini parchalovchi jarayonni bajaruvchi tarkib tushuniladi. Bu jarayonda teskari ifloslanish ro'y bermay, barcha yog' molekulalari eritmaga o'tadi.

Yuvuvchi kukun eritmalarda yog'sizlantirish, asosan yelimlangan plastinkalarni mexanik silliqlangandan so'ng to'g'ridan-to'g'ri dastlabki tozalovni bajarish uchun qo'llaniladi. Yog'sizlantirish jarayonida suvda tuz eritmasidan iborat bo'lgan sovun plastinka sirtidagi sovunli yog'lar eritmasiga o'tadi, so'ng suvda yuvib tozalanadi.

Sovunlanish yog'lariga murakkab efirlar glitserin va yuqori molekulyar organik kislotalardan (stearin, olein, palmitin va boshqalar) tarkib topgan o'simlik va hayvon yog'lari kiradi. Masalan, stearinning sovunlanish jarayonini quyidagi tenglamadan ko'rish mumkin.



bu yerda $C_{17}H_{35}COONa$ — natriy stearati (sovun); $C_3H_5(OH)_3$ — glitserin. Ikkala modda suvda oson eriydi.

Ishqorlarda yog'sizlantirish kimyoviy reaksiya (III.1) asosida ro'y beradi. Bunda sovunlanmaydigan yog'lar parchalanmaydi, biroq sirt-faol moddaga ishqorni kiritilishida emulsiya hosil bo'lishi mumkin. Tozalanuvchi sirtga iflosliklarning qayta o'tirishiga emulsiya to'sqinlik

qilib, iflosliklarni yuvuvchi eritma ushlab qoladi. Eritmada ishqorning doimiy zichligini ushlab turish uchun ishqoriy metall tuzlari qo'shib turiladi, ular suv bilan o'zaro ta'sir qilib, ishqor hosil qiladi.

Yog'sizlantirish jarayoni turli usullarni qo'llash (botirish, purkash va ultratovush vannalarda) bilan 70..90°C temperaturalarda olib boriladi.

Peroksid ammiakli yog'sizlantiruvchi eritmalar vodorod peroksid, ammoniy gidrooksid va suvdan ($\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:4$) tashkil topib, yarimo'tkazgichli asboblarda va integral mikrosxemalarni tayyorlashning turli bosqichlarida keng qo'llaniladi. Bunday eritmaning yog'sizlantirish xossasi organik erituvchilarga nisbatan yaxshi bo'lib, universal hamdir. Chunki, ular sovunlanadigan va sovunlanmaydigan yog'larini, noorganik iflosliklarni, hamda natriy mis, kumush va boshqa metallar ionlarini ketkazadi.

Yog'sizlantirish jarayonida vodorod peroksid atomar kislorod chiqarish bilan parchalanadi:



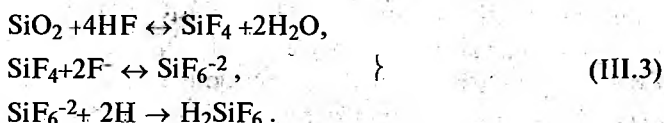
Atomar kislorodning ajralib chiqishi temperaturaga bog'liq bo'lganligi uchun jarayon 80..90°Cda olib boriladi. Atomar kislorod organik va noorganik iflosliklarni oksidlaydi. NH_4OH ishqor pereoksidni ajralish reaksiyasini tezlashtiradi. Natijada sovunlanish yoki yog'larning emulsiyasi hamda Mendeleyev davriy sistemasidagi birinchi va ikkinchi guruh elementlarini eritib yaxshi eriydigan komplekslarni bog'laydi. Jarayon organik iflosliklar oksidlanishida karbonat gazining jadal ajralib chiqishi ko'piksimon ko'rinishda o'tadi.

10.3. Kislotalarda yuvib tozalash

Bu usul sirtni yot atomlar va metall ionlari, yog'li iflosliklar, hamda oksidlar, nitridlar, sulfidlar va boshqa kimyoviy birikmalarda tozalashda qo'llaniladi. Metall ionlarni uzoqlashtirish ularni vodorod ionlari bilan o'rin almashtirishi ko'rinishida boradi. Metall atomlarini ketkazish uchun metallarni erituvchi kislotalar ishlatiladi. Tozalanuvchi sirtida metall atomlarining qayta adsorbsiyasini bartaraf qilish uchun kompleks hosil qiluvchilar qo'llaniladi. Ular metall ionlar bilan turg'un birikmalar — komplekslar hosil qiladi va eritmada qoladi.

Kremniy plastinkalar sirtidan oksid pardalarni kyetkazish uchun vodorod floridi kislotaning asetonidagi eritmasi 1:15 (hajmiy) nisbatda qo'llaniladi.

Bu ishda aseton qo'llanilishiga sabab, u kremniy plastinka sirtini florli kislota bilan ifloslanishini kamaytiradi va bu holda reaksiya quyidagicha kechadi:



10.4. Suv bilan yuvib tozalash

Suv bilan yuvish moysizlantirishdan so'ng qutbli eritma qoldiqlarini, yedirgich qoldiqlarini, flyuslarni, kislotalarni, ishqorlarni, tuzlarni va boshqa iflosliklarni kyetkazish maqsadida qo'llaniladi.

Suvda ko'pchilik tuzlar, kislotalar va ishqorlar eriydi. Yuqori temperaturalarda suv ko'pchilik metallar bilan ta'sirlashadi. Tabiatda suv turli kirishmalar: changlar, gazlar, kimyoyaviy elementlar, mikroorganizmlar bilan ifloslanadi. Shuning uchun ham tabiiy suv yarimo'tkazgichli asboblari va IMSlarni tayyorlashda umuman qo'llanilmaydi.

Yarimo'tkazgichli asboblarni tayyorlash jarayoni dastlabki bosqichlarida distillangan suv va keyingi bosqichlarida esa ionsizlantirilgan suvdan foydalaniladi.

Toza suvni olishda avvalo tabiiy suvni mexanik kirishmalardan tozalanadi, ya'ni qum va mayda shag'al qatlamlari orqali filtrlanadi, mikroorganizmlar esa, xlorlash bilan tozalanadi. Suvni keyingi tozalash ko'p martalab haydash bilan bajariladi. Bunday suvni **distillangan suv** deyiladi.

Distillangan suvda yetarli katta miqdorda kirishmalar bo'ladi. Kirishmalar miqdori 1mg/l da o'lchanib, ular sulfatlar, xloridlar, kalsiy nitrati, og'ir metallar va boshqalar bo'lishi mumkin. Shunday qilib, distillangan suvni $p-n$ o'tishlarni va yarimo'tkazgichli tagliklarni yuvish uchun ishlatish mumkin emas. Odatda undan yarimo'tkazgichli asbobning korpus va qismlarini yuvishda va mahsulotni kimyoviy yedirishdan oldin qo'llash mumkin.

O'ta yuqori tozalikdagi, ya'ni ionsizlantirilgan suvni olish uchun distillangan suv qo'shimcha tozalanadi. Buning uchun distillangan suvda

mavjud bo'lgan noorganik kirishmalar: kationlar Fe^{2+} , Cu^{2+} , Na^{2+} , va anionlar NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} va boshqalardan tozalash zarurdir. Toza suvni olish uchun ion almashtirish usulidan foydalaniladi, ya'ni geterogen sistemada suv va ionit o'rtasida ionlar almashinuvi ro'y beradi. Ionitlar sifatida odatda turli xildagi ion almashtiruvchi smolalarda foydalaniladi. Smolalar, ikki xil kation $[R-H]$ va anionlarga $[R-OH]$ bo'linadi. Bu yerda R -smolaning polimer asosi, H , OH -aktiv holatda kompleks hosil qiluvchi guruhlar. Smolalar sharcha ko'rinishida bo'lib, ularning o'lchami 1-5 mm ni tashkil qiladi.

Agarda distillangan suv oldin kationit smolalar to'ldirilgan idish orqali o'tkazilsa, unda smolalar musbat zaryadlangan metall kationlarni ushlab qoladi.

Agarda shu jarayondan so'ng anionit smola to'ldirilgan idish orqali suv o'tkazilsa, unda suv tarkibidagi manfiy zaryadlangan anionlarni ushlab qoladi.

Yarimo'tkazgichli asboblarda ishlab chiqarish sanoatida ionsizlantirilgan suvning ikki xili A va B markalari qo'llaniladi.

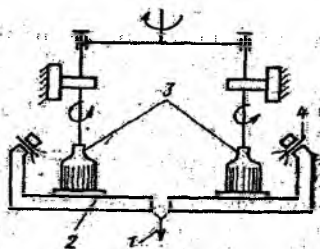
Tozalangan suvlarning tavsifiy parametrlari III.2-jadvalda ko'rsatilgan.

III.2-jadval

Marka	300 K da solishtirma qarshiligi, Om sm	Oksidlanish, mg/l dan kat-ta emas	Kremniy kislotasining mavjudligi, mg/l
Distillangan suv	$1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5$	12, 0	10, 0
Ionsizlantirilgan suv (B marka)	$1 \cdot 10^6$ dan kichik bo'lmagan	2, 5	1, 0
Ionsizlantirilgan suv (A marka)	$7 \cdot 10^6$ dan kichik bo'lmagan	1, 3	0, 2

Yuqori tozalash jarayoni $50-60^\circ\text{C}$ gacha isitilgan ionsizlantirilgan suvda amalga oshiriladi. Yuqori tozalashni past temperaturalarda olib borish samaradorligi kam, yuqori temperaturalarda esa ishlov berilayotgan sirtga ba'zi iflosliklar o'tirib qolishi mumkin. Masalan, ular ishqor tuzlari gidrolizi natijasida ishqoriy eritmalar qoldiqlari bo'lishi mumkin.

Suv bilan yuqori tozalash ko'p kaskadli vannalardan o'tqazish, kichik oqim, gidromexanik usul, ultratovush vannalarda va boshqalar bilan bajariladi.



III.10-rasm. Gidromexanik yuvib tozalash jarayonining sxemasi:

- 1-suvni to'kish;
- 2-ishlov beriluvchi plastinka;
- 3-cho'tkalar;
- 4-suvni berish.

Botirish bilan yuvish o'ta ifloslangan plastinkalarni tozalash uchun laboratoriya sharoitida qo'llanilib, soddaligi bilan ajralib turadi.

Ko'p kaskadli vannalardan o'tqazishda yuvib tozalash plastinkalardan iflosliklarning uzliksiz ketishini taminlaydi. Plastinkali kassetalar bir vannadan ikkinchi vannaga suv oqimiga qarama-qarshi harakatlantiriladi.

Kichik oqimda yuvib tozalash suv aylanish va suvni isitish qurilmalarida bajariladi. Sentrafuga diskida harakatlanayotgan plastinkalarga 50-200 kPa bosim ostida forsunka orqali suv beriladi. Sentrafugani aylanish chastotasi 200....600 ayl/min. Kichik oqimda yuvib tozalash afzalligi shundaki, suvning uzluksiz almashinishi va oqimning gidromexanik ta'siri plastinkalar sirtidan iflosliklarning samarali ketishini ta'minlaydi.

Gidromexanik yuvib tozalash murakkab harakatlanuvchi su'niy yoki hayvon junlaridan tayyorlangan cho'tkalar yordamida bajariladi (III.10-rasm).

Bu usul plastinka sirtiga suvning yopishqoqligini oshirib ifloslikni mexanik kyetkazishga olib keladi. Plastinkalar vakuum usul bilan mahkamlanadi. Ionsizlantirilgan suv bosim ostida beriladi. Uning kamchiligi cho'tka orqali qaytadan ifloslanib qolishi bo'lib, cho'tkani davriy tozalab turish zarur bo'ladi.

10.5. Yedirish

Yarimo'tkazgichli tagliklarga kimyoviy ishlov berish jarayoni kislotali yoki ishqoriy yedirgichlarning sirt qatlamiga ta'siriga asoslangan. Ushbu jarayon yarimo'tkazgich material bilan yedirgich orasida ikki turdagi muhit chegarasi oralig'ida: qattiq taglik va suyuq yedirgich bo'ladi. Taglik bilan yedirgich kimyoviy o'zaro ta'sirining boshqacha xususiyati shundan iboratki, yedirish jarayoni muvozanatli bo'lmay yuvilgan yarimo'tkazgich

materialning hajmi yedirgichnikidan kam. Yedirgichning ortiqchaligi va uning temperaturasi o'zgarmas bo'lishi tufayli kimyoviy ishlov jarayonini o'zgarmas tezlikda olib borish mumkin. Natijada yarimo'tkazgich materialdan ketkazilayotgan qatlam qalinligini aniq hisoblash mumkin. Biroq, shuni hisobga olish kerakki, yedirish tezligi yarimo'tkazgich plastinkani mexanik buzilgan qatlamdagi bilan buzilmagan qatlamda bir xil emas. Bu mexanik buzilgan qatlamda yarimo'tkazgich material bilan yedirgich o'rtasidagi o'zaro ta'sir jadal maydonini kattaligi bilan tushuntiriladi. Demak, mexanik buzilgan qatlamda yedirish tezligi katta bo'ladi.

Yarimo'tkazgich materiallarni o'z-o'zidan eritilishining ikkita nazariyasi — kimyoviy va elektrokimyoviy nazariyalari mavjud. Kimyoviy nazariyaga asosan yarimo'tkazgich materialni eritish ikki bosqichda ro'y beradi: oldin material oksidlanadi, hosil bo'lgan oksid eritmaga o'tadi (eriydi).

Elektrokimyoviy nazariyaga asosan, yarimo'tkazgich material bilan yedirgich orasidagi o'zaro ta'sir oksidlanish va oksid eritilishi kimyoviy jarayon bilangina chegaralanmaydi, u anod va katod jarayonlardan iborat. Bunda yarimo'tkazgich plastinkani turli qismlari orasida mahalliy toklar o'tishi bilan kuzatiladi. Yedirgichga yarimo'tkazgich tagliklarni botirishda taglik-yedirgich oraliq sirtida qo'sh elektr qatlam hosil bo'ladi, elektrolit va taglik orasida potentsiallar farqi vujudga keladi, hamda yarimo'tkazgichni eritilishining elektrokimyoviy jarayoni bo'lishiga olib keladi.

Yarimo'tkazgichlarni suyuq yedirish uchun turli tarkibdagi yedirgichlar mavjud. Har qanday yedirgichda ikkita majburiy tarkiblovchi- oksidlovchi va oksidni erituvchi bo'lishi kerak.

Oksidlovchi sifatida HNO_3 , H_2SO_4 *mineral kislotalar*, H_2O_2 , Na_2O_3 peroksidlar, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, KMnO_4 , NaClO kompleks tuzlardan foydalanish mumkin.

Oksidni erituvchilar sifatida galoid tarkibli HF , HSl kislotalar, KOH , NaOH *gidrooksidlar* va boshqa bir qancha moddalardan foydalaniladi. Suv, qo'llanilish sharoitiga qarab, oksidlovchi va kompleks hosil qiluvchi vazifalarini bajarishi mumkin.

Undan tashqari, yedirgichlar tarkibidagi asosiy tarkiblovchilardan, tashqari yedirish tezligini boshqaruvchi — sekinlashtirgichlar yoki tezlash-tirgichlar qo'shiladi. Sekinlashtirgichlar orasida ancha keng tarqalgani karbonat kislotalar, ya'ni ulardan biri sirka kislota ishlatiladi.

Tezlashtirgichlar ko'p hollarda yarimo'tkazgichni qo'shimcha faol oksidlovchi bo'lib, yedirish jarayoni tezligini orttiradi. Tezlashtirgichlar sifatida og'ir galogenlar (Br_2 , I_2), unga mos kislotalar (HBr , HI) yoki tuzlar (KB_2 , NaI) dan foydalaniladi. Bulardan eng ko'p qo'llaniladigani bromdir.

Germaniyni yedirish. Germaniya kimyoviy ishlov berish uchun turli tarkibli yedirgichlar ishlatiladi. Germaniy uchun asosan nitrat kislota (HNO_3) va vodorod floridi (HF), hamda vodorod gidroksidi (H_2O_2) kabi yedirgichlardan foydalaniladi. Nitrat kislota germaniyni kuchli oksidlovchi bo'lsa, florid kislota (HF) germaniy ikki oksidini oson eritadi. Vodorod peroksidini germaniy uchun yedirgich sifatida ishlatganda kimyoviy jarayon $70-80^\circ\text{C}$ temperaturada olib boriladi. Kimyoviy reaksiyani tezlashtirish uchun brom, sekinlashtirish uchun esa, sirka kislota qo'shish mumkin.

Kimyoviy ishlovning asosiy parametri germaniyni yedirish tezligidir. Turli tarkibdagi yedirgichlar va turli kristallografik yo'nalishga yedirish tezligi bir-biridan farq qiladi. Germaniyning erish tezligidagi farqlar kristall panjaradan atomlarni ajratib olish uchun kerak bo'lgan energiya-ning bir xil bo'lmashligidan kelib chiqadi.

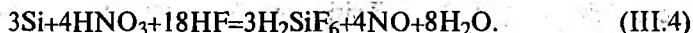
Germaniy uchun eng ko'p qo'llaniladigan yedirgichlarga quyidagilar kiradi (III.3-jadval):

III.3-jadval

Yedirgich turi	Tarkibi	Qo'llanilishi
Yedirgich N:2	1ml H_2O_2 , 1 ml HF , 4ml H_2O	(100) sirt uchun
Ishqor-peroksidli	8g NaOH , 100 ml 30%li H_2O_2	Turli kristallografik tekisliklar uchun
Sr-4	25 ml HNO_3 , 15 ml HF , 15 ml CH_3OOH , O, 3 ml Br	Barcha kristallografik yo'nalishlar uchun
Kukunli yedirgich	1g HNO_3 , 22 HF , 2g 50 % AgNO_3 . eritma	Dislokatsiyalarni aniqlash uchun

Kremniyni yedirish. Kremniy uchun yedirgichlarni tanlash germaniya nisbatan chegaralanganligi kremniy sirtining doimo turg'un oksid SiO_2 bo'lishligi bilan aniqlanadi. Shuning uchun kremniy uchun asosan ishqorlar va kislotalardan foydalaniladi. Kislotali yedirgichlar sifatida nitrat va florid kislotalarning turli aralashmalari qo'llaniladi.

Kremniyni yedirish juda katta tezligi $\text{HNO}_3:\text{HF}=1:4$. 5 mol nisbatda bo'ladi. Bunday tarkibli yedirgichda kremniy erishi quyidagi reaksiya bo'yicha kechadi:



Ishqoriy yedirgichlar sifatida *KON* va *NaOH* ning (10-20%) suvli eritmalaridan foydalaniladi. Ishqoriy tarkibda kremniyni yedirish 90-100°C temperaturada o'tkaziladi. Ishqoriy yedirgichlarda ishlov berish kremniy sirtini talab darajasidagi silliqiligini bermaydi. Shuning uchun bu yedirgich sanoatda keng qo'llanilmaydi. Biroq anizotrop yedirishda, ya'ni sirtida qandaydir shakl hosil qilishda (V-ko'rinish) qo'llash mumkin.

Ishqoriy yedirgichning kamchiligi ishqoriy metall ionlari bilan kremniy sirtini ifloslanishi bo'lib, uni kyetkazish ancha qiyin. Bunday yedirgichda hosil qilingan sirt shakli notekis va u mexanik ishlov berish sifatiga kuchli bog'liq.

III.4-jadvalda Si uchun $\text{HNO}_3\text{-HF}$ asosidagi asosiy yedirgichlar berilgan.

III.4-jadval

Yedirgich turi	Tarkibi	Qo'llanilishi	Optimal ish vaqti
Sr-8	$\text{HNO}_3\text{-}2, \text{HF-}1$	Kimyoviy silliqlash	1-2 min
Sr-4A	$\text{HNO}_3\text{-}5, \text{HF-}3$ $\text{CH}_3\text{COOH-}3$	Kimyoviy silliqlash , <i>p-n</i> o'tish chegarasi paydo qilish.	2-3 min
Uayt yedirgich	$\text{HNO}_3\text{-}3, \text{HF-}1$	(111)tekislik bo'yicha silliqlash.	15 s
Desh yedirgichi	$\text{HNO}_3\text{-}3, \text{HF-}1$ $\text{CH}_3\text{COOH-}8$	Barcha tekisliklar bo'yicha sekir kimyoviy silliqlash.	1dan 16 soatgacha

Kremniyda asosiy kristallografik tekisliklar bo'yicha yedirish tezligi quyidagi munosabatlarda bo'ladi: (110)>(100)>(111)-kislotali yedirgichlar uchun va (100)>(110)>(111) – ishqoriy yedirgichlar uchun.

Kremniy karbidini yedirish. Kremniy, karbidi (SiC) bir qancha yuz gradus (°C) temperaturalarda kimyoviy ta'sirlarga o'ta chidamli. Yuqorida ko'rilgan yedirgichlarning birortasi ham kremniy karbididan tayyorlangan taglik sirtini ishlovdan o'tkazolmaydi.

Kremniy karbidi uchun yedirgichlardan to'g'ri keladigan tarkibida erigan tuzlar va ishqorlar bo'ladi. Misol tariqasida kremniy karbidi uchun bir qancha yedirgichlarni 900°C temperaturada erigan NaOH (KOH); 1000°C temperaturada erigan tuz K_2CO_3 ; 1000°C temperaturada 3:1

munosabatda olingan erigan tuzlar Na_2CO_3 va K_2CO_3 ni ko'rsatish mumkin.

Galliy arsenidini yedirish. Galliy arsenidi ishqoriy va kislotali yedirgichlarda yediriladi. Tajribada 5% li suvli eritma NaOH va 30%li vodorod peroksidi 5:1 munosabatda olingan ishqoriy yedirgichdan 40-60°C temperaturada taglikka kimyoviy ishlov berish uchun foydalaniladi.

Nitrat va xlorid kislota va suv aralashmasidan 1:2:2 munosabatda olingan kislotali yedirgich 25-30°C temperaturada (111) tekislikda yo'nalgan galliy arsenidi taglikni yedirish uchun foydalaniladi.

Galliy arsenidni taglik uchun jilvirlovchi sifatida tarkibida nitrat va fluorid kislota va suv 3:1:2 munosabatda olingan yedirgichdan foydalaniladi.

Mahalliy epitaksiya uchun hamda yarimo'tkazgich tuzilmalarni alohida sohalarda ajratish uchun galliy arsenidi tagliklikni tayyorlashda anizotrop yedirish ancha qiziqish uyg'otadi. Galliy arsenidini anizotrop yedirish uchun suv, vodorod peroksid va sulfat kislota 1:8:1 munosabatda olingan aralashmadan foydalaniladi. Taglikda yaxshi yedirilgan uyani olish yedirgich aralashma tarkibida sulfat kislota ham bo'lishi bilan amalga oshiriladi.

Umuman olganda, yuqoridagi GaAs ga qo'llanilgan yedirgichlarni $A^{III}B^V$ va $A^{II}B^{VI}$ yarimo'tkazgich birikmalarni yedirishda ham qo'llash mumkin.

10.6. Yarimo'tkazgich plastinka va kristallarni yedirish usullari

Yarimo'tkazgich plastinka va kristallarni yedirish jarayoni maxsus idishlarda o'tkazilib, idish materiali bir qancha talablarga javob berishi kerak. Asosiylardan biri, idish materiali hatto eritma-yedirgichning qaynash temperaturasida ham o'zaro ta'sirlashishi kerak emas.

Agar yedirish temperaturasi 150-200°C dan kichik bo'lsa, uni ftoroplast materialdan tayyorlangan idishlarda amalga oshiriladi. Bu material keng temperaturalar oralig'ida mineral kislota va ishqoriy eritmalarga nisbatan yetarlicha kimyoviy chidamli. Faqat ishqor metallar eritmasida va yuqori miqdorda mavjud bo'lgan elementar ftor va xlor muhitida qizish tufayli ftoroplastning jadal ajralishi kuzatiladi.

Agar yedirish jarayoni 200°C temperaturadan yuqorida o'tkir muhitda olib borilsa, unda platina pirolitik bor nitridi, leykosapfir, yuqori zichlikli pirolitik grafit va boshqalardan tayyorlangan idishlardan foydalaniladi.

Yedirishning birinchi usuli, ya'ni kimyoviy jarayoni taglikni qo'zg'almas holda olib borish, uni yassi parallelligi keskin buzilishiga va chekka qirg'oqlarida uyumlar hosil bo'lishiga olib keladi.

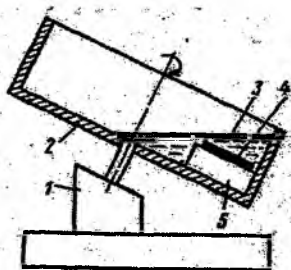
Shuning uchun hozirgi paytda yuqoridagi kamchiliklarni yo'qotish maqsadida yarimo'tkazgichli tagliklarni kimyoviy-dinamik ishlov berish qoidasiga asosan, to'g'ridan-to'g'ri taglik sirtida yedirgichning jadal aralashishi va taglikning o'zgarmas tezlikda aylanib turishidan foydalaniladi.

Ma'lumki, yarimo'tkazgich materialni yedirish tezligi birinchi o'rinda, taglik sirtidan reaksiya mahsulotlarining ketishi va taglik-yedirgich chegarasida yangi yedirgich eritmaning kelish tezligiga bog'liq. Yedirgichning uzluksiz aralashtirilishi yedirish kamerasi hajmi bo'yicha yedirgich tarkibi tezda tenglashib turishi imkonini beradi va natijada yarimo'tkazgich taglikka kimyoviy ishlov berish jarayoni tekis o'tishiga olib keladi.

Kimyoviy-dinamik ishlov berish jarayoni taglik sirtining yuqori darajada yassi parallelligini ta'minlaydi, kam vaqt sarflanadi va kam reaktivlar ketadi va bu jarayonni avtomatlashtirish mumkin bo'ladi.

Hozirgi paytda yarimo'tkazgichlar texnologiyasida kimyoviy-dinamik ishlov berish qurilmasi qo'llanilmoqdaki, uning yordamida 14-sinfga to'g'ri keluvchi tozalikdagi silliq sirtga ega bo'lgan yarimo'tkazgichli taglik olinmoqda.

Kimyoviy-dinamik yedirish qurilmasining sxemasi III.11-rasmda ko'rsatilgan. Bu yerda yedirgich aralashishi 45° burchak ostida ftoroplast idish (2) ichiga joylashtirilgan disk (5) ga plastinkalar mahkamlangan va idish dvigatel yordamida aylanma harakatga keltiriladi. Harakatlantirgich aylanish takroriyligi va yedirgich (3) yopishqoqligini o'zgartirish bilan plastinka sirtini tekislash, ya'ni jilvirlashni yuqori tezlikda bajarish mumkin.



III.11-rasm. Plastinkalarni kimyoviy-dinamik yedirish uchun qurilma sxemasi: 1-harakatlantirgich; 2-ftoroplast idish; 3-yedirgich; 4-plastinka; 5-disk.

10.7. Sirtga elektrokimyoviy ishlov berish

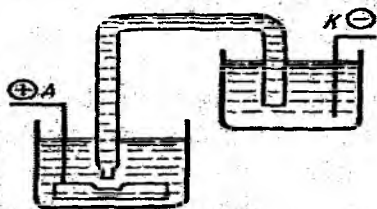
Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida kimyoviy ishlov berish bilan birga elektrokimyoviy ishlov berish ham keng qo'llaniladi. Bu ishlov $p-n$ o'tish chegarasini ochish, kirishma taqsimoti shaklini, elektrokimyoviy jilvirlashni, elektrolitik kesishni, lokal shakllashni, alohida sohalarda kristallning o'ta yupqa qatlamlarini, olish, galvanik qoplamalar o'tqazish va boshqa maqsadlar uchun ishlatiladi.

Yarimo'tkazgich tagliklarga elektrokimyoviy ishlov berish ikkita jarayon elektrolitik anod eritish va yarimo'tkazgichli materiallarni mexanik silliqlashdan iborat.

Elektrolitik anod eritish jarayoni ishlov beruvchi yarimo'tkazgich materialga musbat potensial berish bilan amalga oshiriladi. Elektrolitga cho'ktirilgan taglik va metall elektrod orqali tok o'tkazilsa, unda elektroliz jarayoni boshlanadi. Bunda elektrolitlar kimyoviy parchalanishi yuz beradi.

Barcha jarayon oksidlash-tiklanish reaksiyalaridan iborat bo'lib, anod oksidlovchi bo'lib, u elektronlarni qabul qiladi. Katod esa tiklovchi, chunki u elektronlarni beradi. Shunday qilib, yarimo'tkazgichli materiallarni elektrolitik yedirish ikkita elektrolitik jarayonlardan: anodli eritish va katodli tiklanishdan iborat. Anionlar va kationlar elektrodlarda o'z zaryadlarini yo'qotib, elektrodlar eritmalar bilan qaytadan yana ikkilamchi o'zaro ta'sirlashishga kirishadi.

Kremniyni elektrolitik anod eritish, asosan fluorid (HF) kislota eritmalarida o'tkaziladi. Amalda tarkibida vodorod floriidi, fluorid ammoniy va glitserin bo'lgan elektrolit keng qo'llanilmoqda. Kremniyni anod erish jarayoni kichik tok zichliklarida o'tkaziladi.



III.12-rasm Virtual katoddan foydalanilgan holda sirtga elektrokimyoviy shakllantirish qurilma sxemasi.

Anod tok zichliklari (20-50 mA/sm²) kichik bo'lgan hollarda kremniyning erishi jarayonida fluorli ikki valentli kremniy birikmasining qalin amorf pardasi hosil bo'lishi kuzatiladi. Bu parda tarkibiga fluor-kremniyli kompleks SiF kirib, vodorod ajralib chiqishi bilan suvda eriydi.

Katta tok zichliklarida (50-70

mA/sm²) anod oksidlanish jarayoni tezlashadi va elektrolit orqali oqayotgan tok kamayadi. Biroq, oksidlanish jarayoni tezlanishi elektrolit hajmidan fluorid kislota molekularining diffuziyasi bilan chegaralangan. Bu o'z navbatida fluorli birikmalar hosil bo'lishini qiyinlashtiradi va to'rt valentli shaklda kremniy anod erishi yangi elektrolitik jarayonni boshlab beradi. Bu jarayonning mahsuloti kremniy-fluorli kislota bo'ladi.

Yanada yuqori tok zichliklarida (80-150 mA/sm²) kremniy ikki oksidi passivlovchi pardasi, ya'ni anod oksidlanishi boshlanadi, kremniy anod erish jarayoni to'xtaydi.

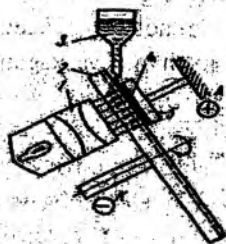
Kremniyning elektrolitik anod erish jarayoni bir qancha afzalliklarga (plastinka chetlarida do'ngliklar bo'lmashligi, plastinkalar yuqori yassi parallelligi va ishlovning yuqori sinfdagi tozaligi) ega, bu jarayondan taglikni tayyorlashda foydalanish imkonini beradi.

Elektrolitik usullardan yana biri yarimo'tkazgich sirtining cheklangan joyiga elektrolitik ta'sir qildirish bo'lib, u turli xildir. Ulardan biri **virtual katod usuli** bo'lib, sirtida turli shakl hosil qilishda qo'llaniladi. (III.12-rasm).

Elektrolit bilan to'ldirilgan vannaga yarimo'tkazgich plastinka joylashtirilgan. Katod yacheyka anoddan ajralgan holda elektrolitli nay bilan bog'langan. Shunday qilib, anod va katod yacheykalar elektrolit orqali galvanik bog'langan.

Agar elektrolit solishtirma qarshiligi yarimo'tkazgich solishtirma qarshiligidan yetarli darajada katta bo'lsa, unda erish faqat virtual katod yaqinidagina ro'y beradi. Katod nayli chiqish tirqishlarini o'zgartirib va ma'lum programma asosida ko'chirish bilan yarimo'tkazgich sirtida juda katta aniqlikda har qanday shaklni 400 mkm chuqurlikda hosil qilish mumkin.

Yarimo'tkazgich tagliklarni **anod-mexanik yedirish** jarayoni birdaniga ikkita usulni: elektrolitda yarimo'tkazgich materialning anod erishi va jilolanishga mexanik ta'sirdan foydalanishga asoslangan.



III.13-rasm. Yarimo'tkazgich sirtini jilvirlashning anod-mexanik sxemasi.

1-maxsus yoritgich sistemasi; 2-metall katod disk; 3-tomchilagich; 4-yarimo'tkazgich plastinka; 5-metall anod disk; ⊕ anod; ⊖ katod.

Amalda yarimo'tkazgich plastinkalar sirtini anod-mexanik jilolash katta qiziqish o'yg'otadi (III.13-rasm). Yarimo'tkazgich plastinka 4 metall anod disk 5 ga yopishtiriladi va plastinka sirtida ariqchalar ko'rinishida kesilgan metall katod disk 2 bilan tutashtiriladi. Katod disk maxsus su'niy tolali qog'oz bilan o'ralgan bo'lib, tomchilagich 3 yordamida, u elektrolit bilan ho'llab turiladi.

Katod disk 20-30° og'gan va u 100-200 min⁻¹ chastotada aylanadi. Elektrik o'tkazuvchanligi *n*-turdagi yarimo'tkazgichga ishlov berganda plastinkada kovaklarni generatsiyalash uchun maxsus yoritgich sistemasi 1 orqali plastinka yoritiladi. Yarimo'tkazgichga nisbatan nurlanish yarimo'tkazgichni chegara yutishga to'g'ri keluvchi to'lqin uzunlikga nisbatan kichik bo'lishi kerak. Yarimo'tkazgichni eritish ishlovida sirtga mexanik ta'sir bilan plastinka sirtidan oksidning uzoqlashishi tezlashadi va plastinkaning butun yuzi bo'yicha yuqori sinfdagi sirtga ega bo'lish mumkin.

10.8. Bug'- gazli yedirish

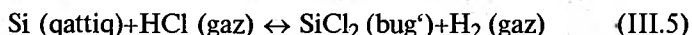
Yarimo'tkazgichli asboblarda va IMS ishlab chiqarish uchun planar-epitaksial jarayonlar texnologiyasi rivojlanishi bilan kremniy, galliy arsenidi va fosfidi va boshqa yarimo'tkazgichlarning bug'- gaz aralashmalarida yuqori temperaturali yedirish usuli keng qo'llanilmoqda. Gazli yedirish yuqori darajada sirt tozaligini taminlashdan tashqari, bitta reaktordan plastinkalarni chiqarmasdan epitaksial va oksidlash jarayonlarini qo'shgan holda bajarishi mumkin. Bu usulning sirtning yuqori tozaligini ta'minlashiga asosiy sabab tashuvchi gaz oqimi yarimo'tkazgich sirtidagi barcha ifloslik va yarimo'tkazgichning o'zidagi yengil uchuvchi birikmalarni qo'shib olib chiqib ketadi.

Reagentlar sifatida galogenlar F₂, Cl₂, Br₂, vodorod galogenlar HF, HCl, HBr, HJ, vodorodli oltingugurt H₂S, oltingugurt geksافتريد, turli freonlar (CCl_nF_{1-n}) va boshqa aktiv muhitlar qo'llaniladi. Bu reagentlar vodorodga, argonga yoki geliyga 1-5% miqdorda qo'shiladi va zaglamas po'lat balonlarda 100-150 atm bosimda saqlanadi.

Ushbu ishlov berishning bir qancha usullarini ko'ramiz.

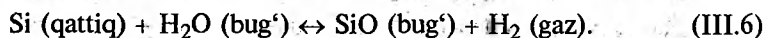
HCl+H₂ aralashmada ishlov berish. Jarayon 1200°C temperaturada germetik kamerada o'tkaziladi. Kremniy plastinkalar reaktorning ishchi kamerasiga joylashtiriladi va tozalangan vodorod oqimida qizdiriladi.

Undan so'ng hajmi bo'yicha 0,5-2% suvsiz vodorod xlorid vodorod oqimiga qo'shib haydaydi. Bunda quyidagi reaksiya yuz beradi.

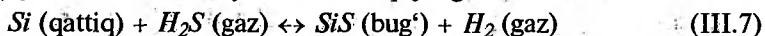


Bu reaksiyadan ko'rinib turibdiki, oson uchuvchi birikma SiCl_2 yoki SiCl_4 . Xuddi shunga o'xshash natijani boshqa aralashmalar ($\text{HBr} + \text{H}_2$) va ($\text{HI} + \text{H}_2$) dan foydalangan holda ham olish mumkin. Agarda ishlovni yuqoridagi aralashmalar uchun ham ($\text{HCl} + \text{H}_2$) aralashma uchun qo'llangan temperaturalar va konsentratsiyalarda o'tkazilsa bir xil natija olinadi.

($\text{Cl}_2 + \text{H}_2$), ($\text{Br}_2 + \text{H}_2$) va ($\text{I}_2 + \text{H}_2$) aralashmalarda ishlov berish. Suv bug'ida kremniyga ishlov berish yuqori 1250-1270°C temperaturada olib boriladi. Ishchi kameraga 0,02-0,1% suv bug'i qo'shilgan vodorod oqimi beriladi. Buning natijasida suv bug'ining kremniy bilan o'zaro ta'sir reaksiyasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:



($\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2$) aralashmada ishlov berish. Oltingugurtli vodorodning kremniy bilan o'zaro ta'siri yuqori ishchi temperaturalarda (1200°C tartibda) yuz beradi. Reaksiya ko'rinishi quydagicha:



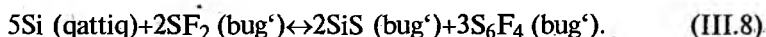
Kremniyga ishlov berish uchun 0,5%li vodorod sulfidning oqimidan foydalaniladi. Bu ishlov ($\text{HCl} + \text{H}_2$) va ($\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$) da ishlov berishdan ancha yaxshi.

Vodorod sulfidning asosiy kamchiligi zaharliligidir.

Bug'-gaz aralashma ($\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2$) da ishlov berilgan kremniy taglikda o'stirilgan epitaksial qatlamlarda joylashish nuqsonlar miqdori va qo'shimcha ulanishlar kam bo'ladi.

($\text{SF}_2 + \text{H}_2$) aralashmada ishlov berish. Oltingugurt geksaftoridi vodorod sulfidga nisbatan zaharli emas. Oltingugurt geksaftorididan foydalanib kremniyga bug'-gaz ishlovi uchun ishchi temperaturani 1000°C gacha tushirish mumkin.

Kremniyning oltingugurt geksaftorid bilan o'zaro ta'sir reaksiyasi quyidagicha:



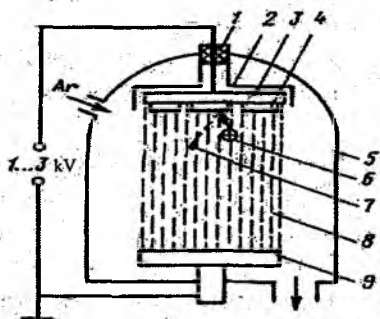
$\text{SF}_6 + \text{H}$ aralashmada ishlov berish jarayonida kremniyni mahalliy (lokal) yedirish uchun foydalaniladi. U yassi chuqur va yon qirralariga tik chuqurlarni olish imkonini beradi.

Umuman olganda, bug'-gaz ishlovda yedirilgan kremniy qatlami 10-15 mkm dan oshmaydi. Bug'-gaz ishlovi berishda ishchi temperaturani kamaytirish uchun xlor va geliy gaz aralashmasi, hamda ancha murakkab tarkibli gaz aralashmalar, masalan vodorod, geliy, vodorod yodid (HJ) va vodorod fluorid (HF) dan quyidagi 80:20:0,5:0,01 nisbatda foydalanish mumkin.

10.9. Tagliklarga ion-plazma ishlov berish

Yarimo'tkazgichlar mikroelektronikasida maxsus jarayonlardan biri tagliklarga ionli-plazma ishlov berishdir, bu jarayonda suyuq yedirgichlardan foydalanilmaydi. Jarayon mohiyati tarkibida aktiv gazlari bo'lgan tezlashtirilgan inert gaz ionlari oqimining ishlov berilayotgan taglik sirti bilan o'zaro ta'siriga asoslangan.

Bu jarayonni amalga oshirish uchun inert gaz bosimi vujudga keltirilgan ishchi kameraga taglik yarimo'tkazgich joylashtiriladi. Undan tashqari, kameraga joylashtirilgan elektrodlar (ular taglikga yaqin) yordamida turg'un biqsima razryadga erishiladi. Biqsima razryad fazosi kvazineytral elektron-ion plazma bilan to'ladi. Plazmaga nisbatan yarimo'tkazgichli taglikka yetarli katta manfiy kuchlanish (1-3 kV) beriladi (III.14-rasm).



III.14-rasm. Vakuum kamerada ion-plazma yedirish jarayoni sxemasi:

- 1-izolator,
- 2-ekran,
- 3-katod,
- 4-plastinkalar,
- 5-vakuum kamera,
- 6-bombardimonlovchi argon ioni,
- 7-plastinkadan sochilgan zarra
- 8-biqsima razryad plazmasi,
- 9-anod

Natijada plazmaning zaryadlangan ionlari taglik sirtini bombardimonlaydi va sirtidan qatlam-qatlam bilan atomlarni uzib chiqaradi, ya'ni unga ishlov beradi (yediradi).

Yedirish jadalligi sochilish koeffitsienti bilan xarakterlanib, u son jihatidan bitta bombardimon qilgan ion bilan sochilgan modda atomlarining miqdoriga teng.

Sochilish koeffitsienti S ishlov berilayotgan modda massasi m_1 ga, ionning massasi m_2 , energiyasi E va tushish burchagi θ ga bog'liq. Albatta, u ishlov berilayotgan taglikning sirt holatiga ham bog'liq:

$$S = k m_1 m_2 E / \lambda (m_1 m_2). \quad (\text{III.9})$$

Bu yerda k - sirt holatini xarakterlovchi koeffitsient, λ - θ burchakka bog'liq bo'lgan ionning o'rtacha erkin yugurish uzunligi.

Ionlarning tushish burchagi oshishi bilan sochilish koeffitsienti ortadi. Bunga sabab ionlarni sirtida ko'chish yo'li oshishi natijasida nishonda atomlar bilan uchrashish ehtimolligi ortadi. Burchak oshishi bilan sochilish eng katta qiymatga yetadi va so'ng kamayish boshlanadi. U sirtida ionlarning qaytishi bilan izohlanadi.

Yuqorida biz ko'rgan qurilma sxemasi diodli kamerada yedirilish deyiladi. Hozirgi paytda diodli kameradan tashqari triodli kamera ham mavjud.

10.10. Tagliklarga plazma-kimyoviy ishlov berish

Plazma-kimyoviy ishlov berish qattiq fazada turuvchi taglikni sirt qatlamini olib tashlash jarayonlarida taglikning aktiv gazlar yoki gaz aralashmalar bilan o'zaro ta'siridan foydalaniladi. Bu holda taglik materialni reaktiv yedirish jarayoni o'tadi.

Plazma-kimyoviy ishlov berish jaryoni ion-plazma jarayonidan shu bilan farq qiladiki, taglik sirtidan moddani uzoqlashishi faqatgina plazmaning musbat zaryadlangan ionlarini bombardimon qilishi bilangina emas, tagliklar bilan plazma aktiv reagentlarining kimyoviy o'zaro ta'siri natijasida ham yuz beradi. Shunday qilib, taglikka plazma-kimyoviy ishlov berishda plazmaning yuqori kimyoviy reaksiya imkoniyati katta ahamiyatga ega.

Taglikka plazma-kimyoviy ishlov berish usuli bir qancha afzalliklarga ega. Birinchidan, u oson boshqariladi va uni o'tqazish jarayonlari rejimini boshqarish imkoniyati bor. Ikkinchidan, u uncha katta bo'lma-

gan mersion xususiyatga ega. Uchinichidan, jarayonda suyuq yedirgichlar talab qilinmaydi. To'rtinchidan, plazma-kimyoviy usul yuqori ajrata olish qobiliyatiga ega va taglik sirtiga yuqori aniqlikda ishlov beradi.

Plazma-kimyoviy ishlovda bitta kamerada turli texnologik amallarni bajarish mumkin: sirtni tozalash, yedirish va yangi qatlamlar o'tqazish. Bu taglikning ifloslanishini keskin kamaytiradi hamda ancha qiyin bo'lgan amallar (taglikni yuvish va quritish)dan xolis qiladi.

Kremniy tagliklarga ishlov berish uchun tarkibida reaktiv plazma hosil qiluvchi sifatida ftorli va xlorli gazlar aralashmasi kislorod bilan birgalikda foydalaniladi.

Kremniyni izotrop yedirish $\text{CF}_4 + \text{O}_2 + \text{N}_2$ gaz aralashmasida o'tkaziladi. Past temperaturali plazmada ftor ionini ajralishi bilan CF_4 ajralishi yuz beradi. Ishchi kamerani to'ldiruvchi kislorod molekullari ionlashadi va oson kremniy sirtini oksidlanishigacha o'zaro ta'sirlashadi. Ftor ionlari oksid qatlam bilan o'zaro ta'sirlashib taglik sirtida oson uchuvchi SiF_4 birikmani hosil qiladi va sirtidan uchib ketadi. Kremniyda plazma-kimyoviy yedirish shunday ro'y beradi. Past temperaturali plazma sharoitlarida azotning bo'lishi kislorodni ionlanishga olib keladi.

Kremniyni anizotrop yedirish turli gaz aralashmalarda olib borilishi kerakli anizotropiya koeffitsientini tanlab olish imkonini beradi. Agarda anizotropiya koeffitsienti K sifatida kremniyni (100) tekisligidagi yedirish tezligini (111) yo'nalishi bo'yicha kremniyda yedirish tezligiga nisbati deb bilsak, unda reaktiv tarkibdagi gaz aralashmasidan foydalanish, $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$ reaktiv tarkib $K=30$ ni, $\text{C}_2\text{F}_6 + \text{O}_2$ tarkib $K=1,1$, $\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4 + \text{O}_2$ tarkib $K=0,8$ ni beradi.

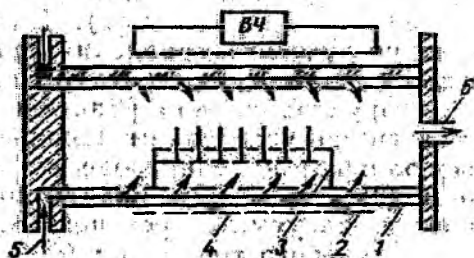
Aluminiyli taglikka plazma-kimyoviy ishlov berish uchun $\text{CCl}_4 + \text{Ar}$, $\text{CCl}_4 + \text{He}$, $\text{CBr}_4 + \text{Ar}$, $\text{HCl} + \text{Ar}$, $\text{HBr} + \text{Ar}$, $\text{Cl}_2 + \text{Ar}$ va boshqa aralashmalardan foydalaniladi. Xlor va bromli reaktiv aralashmalar konsentratsiyasi 15-20% qilib tanlab olinadi.

Xrom qoplamali tagliklarni $\text{C}_2\text{HCl}_3 + \text{O}_2$, $\text{Cl}_4 + \text{O}_2$, $\text{Cl} + \text{O}_2$, $\text{BCl}_3 + \text{O}_2$, $\text{PCl}_5 + \text{O}_2$, $\text{Cl}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$, $\text{CCl}_4 + \text{Ar}$ va boshqa aralashmalar bilan ishlov beriladi. Oltin qoplamalarga ishlov berish uchun reaktiv gaz CF_3Cl dan foydalaniladi.

Plazma-kimyoviy usul bilan ishlov berish texnologiyasi fotolitografiya jarayonida taglik sirtidan fotorezistni ketkazish uchun keng qo'llaniladi.

Fotorezistlarni ketkazish uchun aktiv gaz sifatida kislorod, azot va vodorod aralashmasidan foydalaniladi. Fotorezist bilan kimyoviy

reaksiyaga kiruvchi aktiv zarrachalar gaz razryadli plazmada kislorod molekularining dissotsiyanishi hisobiga paydo bo'luvchi atomar kislorod va ozon bo'ladi. Unga katta bo'lmagan miqdorda azot va vodorod (1%ga yaqin) ni qo'shish taglik sirtidan fotorezist qatlamini kyetkazish tezligini oshirishga olib keladi.



III.15- rasm. Plazma-kimyoviy yedirish uchun vakuum kamera sxemasi:

- 1-kvars kamera,
- 2-maxsus ekranli silindr,
- 3-plastinkalar kassetasi,
- 4-yuqori takroriylikli induktor,
- 5-ishchi gaz berish, 6-chiqish trubkasi

Taglikka plazma-kimyoviy usulda ishlov berishni amalga oshirish uchun past

bosimli yuqori chastotali gaz razryadli plazmadan foydalaniladi. III.15-rasmda plazma-kimyoviy yedirish uchun vakuum kamera sxemasi berilgan. Yedirish maxsus metall ekranli gaz razryadli plazmadan ajralgan holda vakuum kamera sohasidan o'tkaziladi. Yuqori chastotali plazma ishchi kameraning silindrik sirti va ekran oralig'ida qo'zg'atiladi. Yedirish plazmadan plastinkalar joylashgan zonaga o'tuvchi neytral kimyoviy aktiv atomlar yoki yashash vaqti katta bo'lgan radikallar F^* bilan amalga oshiriladi.

Bu usulda silindrik ekran tirqishlari orqali plazmaning zaryadlangan zarrachalari sirtga tushmaydi. Zonada qo'zg'algan atomlar fluor va atomar kislorod ishchi gaz molekulari bilan bir qancha to'qnashish natijasida tartibli harakat qiladi. Bu esa, plastinkalarni bir jinsli yedirilishga olib keladi.

10.11. Galvanik qoplamalarni o'tqazish

Ko'p turdagi yarimo'tkazgichli asboblarda va integral mikrosxemalarni tayyorlash texnologiyasida yarimo'tkazgichli tagliklarga turli qalinlikdagi va ko'rinishdagi metall qatlamlar o'tqazish ko'p qo'llaniladi. Bu qatlamlar ikki elektrod orqali tok o'tishi natijasida hosil bo'ladi. Bulardan bittasi taglik bitta elektrod vazifasini bajarsa, ikkinchisi ma'lum

tarkibli elektrolitdir. Elektrolitik usul bilan metallarni o'tqazish jarayoni asosida katod tiklanish reaksiyasi yotadi.

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida galvanik qoplamalarni o'tqazish yarimo'tkazgich taglikka omik kontaktlar hosil qilish, elektrod chiqqichlar yaratish, kontakt maydonchalar va tok yo'llari, ko'p qatlamli metall kompozitsiyalar, sharsimon va konsolli elementlarni tayyorlash uchun qo'llaniladi.

Yarimo'tkazgich taglikka metallni elektrolitik o'tqazish jarayoniga juda ko'pchilik omillar ta'siri mavjud. Bularga elektrolit tarkibi, elektrod materiallarning kimyoviy tarkibi, berilgan elektrolitda elektrod potensial va elektrolit orqali oqayotgan tokning qiymati va yo'nalishi, elektrolit temperaturasi va boshqalarga bog'liq.

Metallarni galvanik o'tqazish jarayonida o'tqazishda ayniqsa foydalanilayotgan elektrolitlarning tozaligiga katta ahamiyat berish zarur. Tayyor elektrolitda o'tqazilayotgan qatlam tarkibi va elektrofizik xususiyatini o'zgartiradigan kirishmalar bo'lmasligi kerak.

Elektrolitga suvdan kirishmalar tushib qolishi mumkin. Shuning uchun yarimo'tkazgichlar ishlab chiqarishda elektrolitlar tayyorlaganda faqat ionsizlashtirilgan suvdan foydalaniladi. Ishlab chiqarishda galvanik qoplamalar misdan, ruxdan, kumushdan, oltin, qalay, kadmiy, xrom va indiydan foydalaniladi.

Mislashtirish nikel, xrom, kumush va oltin qoplamalar hosil qilishdan oldin qo'llanilib, u sianli va kislotali elektrolitlarda o'tkaziladi. Sianli elektrolitlarga nisbatan kislotali elektrolitlar tarkibi bo'yicha sodda va misni o'tqazishni ancha yuqori tok zichligida o'tqazish imkonini beradi.

Sianli elektrolit sifatida tarkibida 15 g/l sian misi, 10 g/l sian natriy, 15 g/l karbonat angidrid natriy va 30 g/l sulfat kislotali natriy bo'lgan eritmadan foydalanish mumkin.

Misni o'tqazish jarayoni 18°-20°C, tok zichligi 0,3-0,5 A/dm² da o'tkaziladi. Kislotali elektrolit tarkibida 200 g/l mis poroshogi (kuporos), 5 g/l sulfat kislotasi va 2 g/l etil spirt kiradi. Jarayon 20°-25°C va tok zichligi 2-3 A/dm² da o'tkaziladi.

Nikellash jarayonida ikki xil ko'rinishdagi, ya'ni kislotali va kuchsiz kislotali elektrolitlardan foydalaniladi. Misol tariqasida, nikellashda qo'llaniladigan elektrolit tarkibi: 150-200 g/l sulfat kislotali nikel, 70 g/l oltingugurt kislotali natriy, 10 g/l sulfat kislotali magniy, 30 g/l bor kislota

va 5 g/l natriy xloridi bo'lishi mumkin. O'tqazish jarayoni 18°-20°C, tok zichligi 0,5-1,0 A/dm² bo'lganda bajariladi.

Kremniyda omik kontaktlarni olish uchun va geometrik tuzilishi murakkab bo'lgan qismlarda tekis qalinlikdagi nikelni olish uchun kimyoviy nikellash jarayonidan ham foydalaniladi. Bu usulning asosiy mohiyati shundan iboratki, bunda elektr tokini qo'llanmasdan nikel qoplama olishda kimyoviy tiklanish jarayonidan foydalaniladi. Tiklovchilar sifatida natriy, kaliy, ammoniy yoki kalsiy gipofosfit xizmat qiladi. Kimyoviy nikellash uchun tarkib: 30g/l nikel xloridi, 10 g/l natriy gipofosfit, 50 g/l xlorli ammoniy va 65 g/l natriy sitrati bo'ladi. Nikelni o'tqazish jarayoni 70°C da o'tkaziladi.

Kumush qoplamalar yarimo'tkazgichli asboblarda va IMSlar konstruksiyasida tok o'tkazuvchi elementlar elektr o'tkazuvchanligini oshirish uchun va kontaktlardagi o'tish qarshiliklarni kamaytirish maqsadida foydalaniladi. Kumushni o'tqazish uchun elektrolit tarkibiga 205 g/l kumush xlor va 80-100 g/l kaliy sianidi kiradi. Jarayon 18°-20°C va tok zichligi 1, 5 -2 A/dm² oraliqlarida o'tkaziladi.

Oltin qoplamalar o'tqazish ham yarimo'tkazgichlar texnologiyasida ancha keng tarqalgan bo'lib, u yarimo'tkazgich taglik sirtiga yupqa parda sifatida qoplanadi. Bu qoplama har qanday kimyoviy-texnik ishlov, ya'ni agressiv muhitda ham chidash imkonini beradi. Oltin qoplangan taglik vodorod floridi, nitrat va sirka kislotalariga ham chidash beradi, ya'ni taglik yemirilmaydi. Oltin qoplamalarni o'tqazish uchun to'rt turdagi elektrolitlar: ishqorli, kuchsiz ishqorli, neytral va kislotali elektrolitlar qo'llaniladi. Oltin qoplamalarni olishda asosiy tarkiblovchilardan tashqari (oltin tuzlar kompleksi va erkin sianid), elektrolitga turli qo'shimchalar kiritilib, ular oltin qoplama sifatini va uning elektrofizik xususiyatini yaxshilashi mumkin. Misol uchun, ushbu elektrolit tarkibini ko'rsatish mumkin: 1 g/l kaliy disianoureti, 1,5 g/l kaliy xlor, 1,3 g/l kaliy biftaleat, 0,2 g/l trilon. O'tqazish jarayoni 90°C, tok zichligi 0,5 A/dm².

10.12. Termik ishlov berish (kuydirish)

Termik ishlov berish sirtga o'tirgan kirishmalarni ketkazish, sirt iflosliklarini parchalash va uchuvchi birikmalarni bug'lantirish uchun qo'llaniladi. Termik ishlov to'g'ridan-to'g'ri oksidlash, epitaksiya va boshqa jarayonlar oldidan vakuumli va termik qurilmalarda olib boriladi.

Masalan, kremniy plastinkada epitaksial qatlam o'stirishda, qoplovchi gaz pardalar va namliklar sirtidan uzoqlashtirish uchun oksidlanish temperaturasi-gacha qizdiriladi. Yarimo'tkazgich plastinkalarni vakuumda termik ishlov berishda oksidlangan sirtidan namligini, karbonat angidrid gazini, yengil uglevodlarni 400°C da oson uchirib yuborish mumkin. Kremniy sirtidan oksid parda 900°C dan yuqori temperaturada ketadi. Kremniyli epitaksial qatlamni hosil qilishdan oldin oksid pardani vodorod muhitida 1200°C..1250°C termik ishlov bilan ketkaziladi. Keramika, shisha, kvars, sapfir tagliklarning oxirgi amallari vakuumda ishlov berishdir. Termik ishlovni samaradorligi, albatta, temperaturaning ortishi bilan yaxshi bo'ladi, biroq kirishmalarning diffuziyasi va materialning erib ketishi bilan chegaralangan.

Nazorat savollari

1. Yedirgich nima va ularning turlarini ayting?
2. Yedirgichlar qanday tarkibda bo'ladi?
3. Nima maqsadda kislotali yedirgichga sirka kislota qo'shiladi?
4. Qanday maqsadlarda quruq yedirish qo'llaniladi?
5. Kimyoviy suyuq tozalov uchun qaysi eritmani qo'llaniladi?
6. Kislotali yedirgichning ishqoriy yedirgichdan afzalligini ayting.
7. Kislota aralashmali kremniy yedirgich kimyoviy reaksiyasini yozing va tahlil qiling.
8. Kimyoviy nikellash qanday amalga oshiriladi?

11-BOB. QOTISHMALI USULDA TUZILMALAR OLISH

11.1. Umumiy ma'lumotlar

Qotishmali usul 50-yillarda elektr parametrlari nazariyasiga yaqin bo'lgan yassi diodlar va tranzistorlar yaratilishiga imkon berdi. Hozirgi paytda u yarimo'tkazgich kristallga kontakt va elektrodnlarni ulash va ba'zi hollarda elektr o'tishlar tayyorlash uchun katta ahamiyatga ega. Usul yarimo'tkazgich plastinkasi sirtiga legirlovchi metall yoki qotishmani o'tqazish va uni suyulish temperaturasiga qizdirish va keyin sovitishdan iborat. Bunda kristallanayotgan yarimo'tkazgich legirlovchi kirishma atomlarini ushlab qoladi. Qotishmali jarayonni tushunish uchun kirishma-yarimo'tkazgich binar tizimining holat diagrammasini bilish kerak. Qotishmada asosiy fizik-metallurgik jarayon — yarimo'tkazgich sirtiga metallning ho'llanilishi, suyulmada yarimo'tkazgichning suyulishi va uning qayta kristallanishidan iboratdir. Qotishmali usulda tuzilmalarni sifatli olish texnologik rejimga, elektrod metallarni o'tqazish usuliga, qotishmali jarayonini o'tqazish usuliga bog'liq. Aks holda yomon ho'llanilishiga, suyulishning notekis frontda bo'lishiga, kristallda tirqishlarning bo'lishiga olib keladi.

11.2. Qotishmali p - n o'tish hosil bo'lishining fizik-metallurgik asoslari

Yarimo'tqazgichli asboblarni ishlab chiqarish texnologiyasida qotishmali usul p - n tuzilmani yaratish, omik o'tishlar va elektrodnlarga chiqqichlar ulash uchun foydalaniladi.

Qotishmali p - n o'tish olish uchun yarimo'tkazgich kristall sirtiga elektrod material (metall yoki qotishma) joylashtiriladi. Sistema qotishma hosil bo'lguncha qizdiriladi va uncha katta bo'lmagan vaqt davomida ushlab turilib, so'ng sovitiladi. Olinadigan o'tishlar sifati metall va yarimo'tkazgichning sirt holatlariga va tashqi muhitning tozaligiga,

suyuq fazada metall va yarimo'tkazgich atomlarining diffuziyasiga, suyulmaning oqib ketishiga bog'liq bo'ladi.

Qotishmalanish jarayonida yuz beradigan fizik jarayonlarni uchta ketma-ket bosqichga bo'lish mumkin. Ular yarimo'tkazgich sirtini elektrod material ho'llashi; holat diagrammasi bo'yicha aniqlanadigan elektrod qotishmalarning yarimo'tkazgichning ma'lum hajmida suyulishi; suyulmanig sovishida erigan yarimo'tkazgich materialning kristallanishi natijasida *p-n*- yoki omik o'tish hosil bo'lishidan iborat.

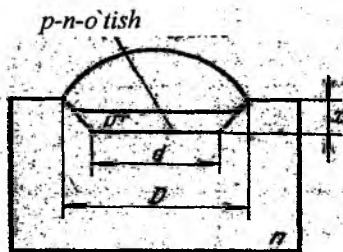
Agar sof element elektrod materiallar talablariga javob bersa hech qanday qo'shimchasiz yarimo'tkazgich bilan eritilaveradi.

Qotishmada berilgan tarkiblovchining suyulish holat diagrammasi likvidus chizig'i bilan aniqlanadi. Suyulish jarayoni diffuziya bilan kuchli bog'langan. Suyulmaga diffuziyalanib o'tuvchi yarimo'tkazgich atomlari unda tekis taqsimlanishga intiladi. Qotishma sirtidan ketuvchi atomlar yarimo'tkazgichning yangi qatlamida suyulish imkonini beradi. Suyulma va qattiq yarimo'tkazgich orasida yarimo'tkazgichning kimyoviy potentsiali suyulmada, uning qattiq holatdagi kimyoviy potentsialiga teng bo'lganda muvozanat bo'ladi. Agar zichlik muvozanatdagidan katta bo'lsa, suyulmadan qattiq jism kristallanaveradi, bu jarayon ikkala fazaning kimyoviy potentsiallari bir-biriga teng bo'lmaguncha davom etadi.

11.3. Elektron-kovak o'tishning hosil bo'lishi va uning geometriyasi

Muvozanat holat suyulganda elektrod qotishma berilgan chuqurlikda yarimo'tkazgichni eritgandan so'ng suyulmani sovitish amalga oshiriladi. Yarimo'tkazgichning suyulma bilan to'yinishi natijasida qattiq fazada kristallanish yuz beradi. Yarimo'tkazgichning suyulmada kristallanishi jarayoniga qayta kristallanish (rekristallanish) deyiladi, chunki uning o'tirishi qattiq taglikning suyulgan qismida ro'y beradi. Sovish boshlanguncha qattiq va suyuq faza chegarasida yarimo'tkazgichning turli sohalari turlicha legirlangan bo'lib kontakt hosil qiladi (III.17-rasm).

Agar, eritilayotgan metall akseptor kirishma bo'lsa, suyulma bilan yarimo'tkazgich oralig'ida p -turdagi qatlam hosil bo'ladi. Natijada, taglik yarimo'tkazgich plastinka o'tqazuvchanligi n -tur bo'lsa, p - n o'tish hosil bo'ladi. Unda kirishma taqsimoti pog'onalikka yaqin bo'ladi. Odatda yarimo'tkazgich taglik plastinkada kirishma konsentratsiyasi yetarli darajada kam (10^{14} – 10^{16} sm^{-3}), rekristallangan qatlamda etarli katta va 10^{18} – 10^{20} sm^{-3} ni tashkil qiladi.

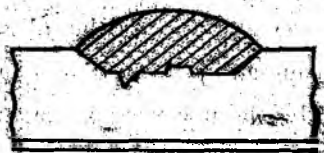


III-17 rasm. Qotishmali usulda p - n o'tish hosil bo'lishi.

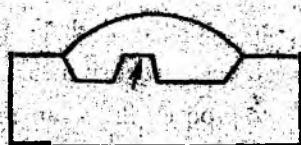
Suyultirish jarayonining natijalari p - n o'tishning geometrik o'lchamlari, suyulishning chuqurligi va frontining shakli, hamda p - n o'tishning maydoni bilan xarakterlanadi. Elektrod materialning suyulish chuqurligini x deb belgilansa, u yarimo'tkazgich sirtidan qattiq va suyuq faza chegarasigacha bo'lgan masofadir. (III.17-rasm). U yarimo'tkazgichning suyulgan miqdoriga, elektrod qotishma xiliga va suyultirish vaqtiga bog'liq:

$$x = \frac{S_{ya}}{1 - S_{ya}} \frac{d_m}{d_{ya}} h, \quad (\text{III.10})$$

bu yerda S_{ya} -massa birligida metallda yarimo'tkazgichning eruvchanligi; d_m va d_{ya} – metall va yarimo'tkazgich zichligi; h -elektrod material diskining qalinligi.



III.18-rasm. Kristall tuzilma buzilgan joyda elektrod materialdan yarimo'tkazgichning mahalliy suyulishi



III.19-rasm. Yarimo'tkazgich sirtida to'la ho'llanmaslik oqibatida «kallik» hosil bo'lishi

Qotishmali $p-n$ o'tishni olishda ahamiyatli geometrik tavsifnomalardan biri suyulish frontining shakli bo'lib u yassi tekis bo'lishi kerak. Ideal yassilikdan chetlanish $p-n$ o'tishning effektiv maydonning qisqarishiga, baza qalinligi notekisligiga va boshqa hodisalarga olib keladi. Kassetali suyultirish usuli yassi frontli suyultirish olishga imkon beradi. $p-n$ o'tishning maydoni elektrod materiali tayyorlanishiga, suyultirish temperaturasiga va qizdirish rejimiga bog'liq. Suyultirish frontining notekisligi, kristall sirtining turli qismlarida suyulish tezligi bir xil bo'lmasligidan kelib chiqadi. Bunga bir qancha sabablar bo'lishi mumkin. Suyulish jarayonida faollash energiyasi kamayishiga bog'liq bo'lgan sirtidagi turli nuqsonlar va uning turlari (dislokatsiya, chizilishlar, kichik yoriqlar) bo'ladi. Shuning uchun bu buzilishlar elektrod materialining oqishiga to'sqinlik qiladi va bu sohalarida yarimo'tkazgichning mahalliy suyulishiga olib keladi.

Qotishma material sirtining yetarli toza bo'lmasligi va yarimo'tkazgich sirtidagi qoldiq oksidning bo'lishi suyulmagan qismlar («kalliklar») paydo bo'lishiga olib keladi (III.19-rasm). Bu qismlar $p-n$ o'tishning omik qarshiligi bilan shuntlanib qolishi qo'shimcha teskari tok hosil bo'lishiga olib keladi.

11.4. Elektrod materiallarga talablar

Elektrod materiallarni ikkita guruhga bo'lish mumkin. Birinchi guruhga $p-n$ o'tishni olish mumkin bo'lgan qotishmalar bo'lib, ularni elektrod qotishmalar deyiladi. Ikkinchi guruhga omik kontaktlar olish mumkin bo'lgan qotishmalar kiradi. Qotishmali $p-n$ o'tishlarning xossalari ko'proq eritilayotgan metall va qotishmalarning xossalari bilan aniqlanadi. Shuning uchun ularga bir qancha talablar qo'yiladi.

1) elektrod material yarimo'tkazgichning ma'lum qismida hosil qiladigan o'tqazuvchanlik turi, yarimo'tkazgich taglik o'tqazuvchanligi turiga qarama-qarshi bo'lishi kerak;

2) agar elektrod material sifatida qotishma qo'llanilsa, unda suyuq fazada qotishma tarkiblovchi bir-birida to'la suyulishi kerak;

3) kristallangan qatlam yuqori elektr o'tqazuvchanlikka ega bo'lishini ta'minlash uchun legirolovchi elementning qattiq yarimo'tkazgichda taqsimot koeffitsienti va eruvchanlik yuqori bo'lishi shart;

4) yetarli past temperaturalarda elektrod material yarimo'tkazgich sirtini yaxshi ho'llashi kerak;

5) u temperatura yarimo'tkazgichning suyulish temperaturasiga nisbatan mumkin qadar past bo'lishi kerak, chunki yuqori temperaturada suyultirish yarimo'tkazgichda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini kamaytiradi;

6) elektrod materialda yarimo'tkazgich elektrofizik xossalarini yomonlashtiruvchi tez diffuziyalanuvchi kirishmalar bo'lmاسligi kerak;

7) elektrod materialning suyultirish temperaturasida bug'lanish bosimi kichik bo'lishi kerak, aks holda vakuumda materialning intensiv bug'lanishi kuzatiladi;

8) u yuqori o'tqazuvchanli va issiq o'tqazuvchanli bo'lishi kerak, bu esa, $p-n$ o'tishning to'g'ri yo'nalishida yo'qotishlarni kamaytiradi va issiqlikni olib ketishini yaxshilaydi;

9) elektrod material $p-n$ o'tish olingandan keyin, diodni olishning keyingi jarayonlarida ham, ya'ni barcha temperaturalarda ham qattiq qolishi kerak;

10) elektrod material yuqori mexanik xossaga ega bo'lishi kerak, u barcha amaliy ish temperaturalariga va talab darajasidagi mexanik yuklamaga chidamli bo'lishi kerak.

11.5. Qotishmali tuzilmalarning sifatini nazorat qilish

Ko'ndalang jilo (shlif) tayyorlash. Qotishmali yarimo'tkazgichli tuzilmalar to'g'risida qimmatli ma'lumotlarni, elektr va elektrofizik o'lchashlardan tashqari, tavsiflaridagi og'ish sabablarini jilo olish yo'li bilan aniqlanadi. Ko'ndalang jilo tayyorlashning asosiy bosqichlari *p-n* o'tishli kristallni plastmassaga jips yopishtirish, *p-n* o'tish tekisligiga tik jilolash, olingan kesimni silliqlash va tanlovchan yedirishdan iborat. Tashqi nuqsonlarni aniqlash uchun kristallni mikroskop ostida diqqat bilan kuzatiladi. Kristall jilosini aniqroq ko'rish uchun 30 sm³ *HNO*₃, 10 sm³ *HF* va 120 sm³ *CH*₃*COOH* eritmalar yordamida kuchsiz yediriladi. Kimyoviy ishlovdan so'ng jiloda *p-n* o'tishning chegaralari ochiladi. Bunda esa, suyulish chuqurligi va rekristallangan soha kengligi, hamda suyulish fronti tekisligi kuzatiladi.

Nazorat savollari

1. Qanday *p-n* o'tish qotishmali deyiladi?
2. Qayta kristallangan qatlam qanday hosil bo'ladi?
3. Elektrod qotishmalarga qanday talablar qo'yilgan?
4. Kremniyli *p-n* o'tishlarda mexanik kuchlanishlarni paydo bo'lish sabablarini ayting.
5. Qotishmali tuzilmalarni sifati qanday nazorat qilinadi?

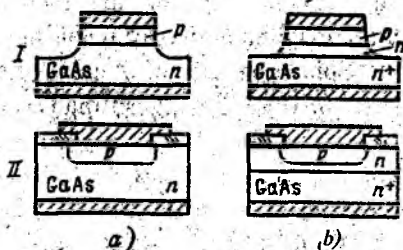
12.1. Umumiy ma’lumotlar

Hozirgi zamon texnologiyasida integral mikrosxemalar va diskret yarimo‘tkazgichli asboblarning ishlab chiqarishda epitaksial jarayonlar eng oldingi o‘rinni egallaydi. Epitaksial texnologiya qo‘llanilishi keyingi 10-15 yil ichida sifatli mahsulotlar ishlab chiqarishni 4-5 marta oshirib yubordi. Epitaksial qatlamlar tuzilish jihatdan hajmiy monokristalldan ancha takomillashganligi, ularda kirishmalarni haqiqiy taqsimotiga ega bo‘lishi bilan birga, nazorat qilib bo‘lmaydigan iflosliklar kamligi bilan farq qiladi.

Odatda, yarimo‘tkazgichli asboblarning aktiv sohasi plastinkaning uncha chuqur bo‘lmagan sirt mikrohajmi qismida vujudga keltiriladi. Plastinkaning qolgan qismi esa, shu aktiv sohani ushlab turish uchun xizmat qiladi. Demak, asbob tuzilmasi aktiv va passiv qismlardan tashkil topadi. Passiv qism texnologik jarayonda konstruktiv vazifani bajarib turadi, xolos. Chunki, o‘ta yupqa plastinkalar bilan ishlab chiqarish jarayonida ishlab bo‘lmaydi.

Epitaksiya, umuman, yarimo‘tkazgich plastinkani asbob uchun kerak bo‘lmagan passiv qism parazit qarshiligini kamaytirish yo‘lini qidirish tufayli vujudga keldi. Epitaksiya kichik omli plastinkalarda yuqori omli yarimo‘tkazgichli qatlamlarni o‘stirish imkonini berdi.

III.20-rasmda bir jinsli galliy arsenidi plastinkasida va n^+-n tuzilmada tayyorlangan planar va diskret meza diodlarning kristallari ko‘rsatilgan. Bunda p -epitaksial qatlam solishtirma qarshiligi bir jinsli n -GaAs plastinaning solishtirma qarshiligiga teng. Meza kristallar (III.20-rasm, *a*, I) va planar kristallar (III.20-rasm, *a*, II) solishtirishlaridan kelib chiqadiki, ikkinchi holat epitaksial tuzilmalarda (III.20-rasm, *b*, I va II)



III.20-rasm. Galliy arsenidi plastinka-sida va n^+-n tuzilmada tayyorlangan planar va diskret meza diodlarning kristallari:

- I) meza diodlar
- II) planar diodlar
- a) n^+ -GaAs, b) n^+-n -GaAs

kristallning qalinlik qarshiligi R kam. Shunday qilib, n^+-n tur epitaksial tuzilmali diodlarning mezaepitaksial va epitaksial-planarlarning chegara takroriyliklari yuqori bo'ladi. Chunki, $f \approx 1/RC$, bu yerda $C - p-n$ o'tishning to'siq sig'imi.

Epitaksiyaning afzalliklaridan yana biri, qalinlikning qatlam bo'yicha talab darajasidagi kirishmalar taqsimotiga ega bo'lgan legirlangan plastinkani olish imkoniyatini beradi. Bu esa, turli xildagi yarimo'tkazgichli asboblarda va IMSlarning yaratilishiga olib keldi.

12.2. Epitaksial o'tqazishning asosiy usullari

Yarimo'tkazgichli asboblarda va IMSlar tayyorlash texnologiyasida yarimo'tkazgich materialga ba'zi qarama-qarshi talablar qo'yiladi. Masalan, impulsli diodlarda teshilish kuchlanishini oshirish uchun yarimo'tkazgich plastinaning solishtirma qarshiligini oshirish kerak, u esa ikkinchi tomondan, yoyilma oqim qarshiligi o'sishiga, asbobning impuls xossalari va tezkorligini yomonlashtiradi. Tranzistorlar tayyorlash texnologiyasida ham muammolar mavjud. Masalan, kollektor sohasining solishtirma qarshiligini katta bo'lishi yuqori teshilish kuchlanishi olishiga imkon beradi, biroq kollektor hajmida katta miqdordagi zaryadlar to'planishiga olib kelib, tranzistor tezkorligini kamaytiradi va kollektorning katta ketma-ket qarshiligi tranzistor quvvatini chegaralab qo'yadi. Xuddi shunday muammolar boshqa yarimo'tkazgichli asboblarda va IMSlar tayyorlashda ham uchraydi. Epitaksiya usuli yaratilishi yuqoridagi muammolarni echishda anchagina imkoniyat berdi.

Epitaksiya termini o'tgan asrning 50-yillarida paydo bo'lib, u «*epi*» — sirti, «*takis*» — joylashish ma'nolarini anglatadi. Binobarin, epitaksiya bu kristall taglik sirtida muayyan yo'nalishli kristall qatlamni o'stirishdir. Demak, epitaksial qatlam — taglik tuzilishini saqlovchi, kristall taglikka o'tqazilgan monokristall material. Epitaksial o'sish jarayonida hosil bo'luvchi faza epitaksial qatlam o'sishi yordamida kristall panjarani qonuniy davom ettiradi.

O'tish qatlami kristall fazada o'suvchi taglik tuzilishi to'g'risidagi ma'lumotni tashuvchi vazifasini bajaradi. Epitaksial jarayonning uch guruhi: avto-, getero- va xemoepitaksiya ko'rinishlari ma'lum.

Avtoepitaksiya (gomoepitaksiya) — taglik moddadan kimyoviy farq qilmaydigan, tuzilishi bo'yicha bir xil bo'lgan taglik sirtida yo'nalishli

kristall qatlam o'stirish jarayonidir. Bu jarayonda gomogen elektron-kovak tuzilma paydo bo'lishi imkoni yaratiladi.

Geteroepitaksiya — kristallokimyoviy o'zaro ta'sir natijasida taglik modda tarkibidan farq qiladigan modda qatlamining yo'nalishli o'sishi jarayonidir. **Xemoepitaksiya** — tashqi muhitdan keluvchi modda bilan taglikning o'zaro kimyoviy ta'siridan yangi faza hosil bo'lgani holda moddaning yo'nalishli o'sishi jarayonidir. Hosil bo'lgan xemoepitaksial qatlam, tarkibi bo'yicha, taglik moddadan va sirtga keluvchi moddadan ham farq qiladi.

O'suvchi qatlam hosil bo'lishidagi fizik-kimyoviy hodisalar tabiati farqi bo'yicha epitaksiyaning uchta asosiy texnologik usullari mavjud:

- 1) vakuumda molekularlar oqimidan molekular-nur epitaksiya;
- 2) gaz yoki bug'-gaz aralashmasida kimyoviy o'zaro ta'sir oqibatida yuz beradigan gaz fazali epitaksiya;
- 3) eritish yoki suyuq fazadan rekristallanish yo'li bilan suyuq fazada epitaksiya.

Endi qisqacha bu uchta usulning asosiy xususiyatlarini ko'rib chiqamiz.

Molekular-nur epitaksiya. Vakuumda molekular-nurlar oqimidan hosil qilinadigan epitaksiya moddaning to'g'ri ko'chishidan sodir bo'ladi. Modda-manba yuqori vakuumda fokuslangan elektron nur oqimi yordamida molekular zarrachalar oqimini uzluksiz bug'latib (oralik o'zaro ta'sirsiz) taglikka yetkazib beriladi. Taglik sirtga o'tirgan yarimo'tkazgich zarralari molekular o'zaro ta'sir ostida yarimo'tkazgich kristali yo'nalishini aniqlovchi to'g'ri tizimni hosil qiladi. Epitaksial qatlam o'sishi sirt bo'ylab yuz beradi va o'suvchi qatlam taglik tizimini qaytaradi.

Molekulyar-nur epitaksiyaning boshqa turi — bu sublimatsiya usulidir. Bu usulda taglikdan bir necha yuz mikrometr narida joylashgan yarimo'tkazgichni elektr tokida qizdirish bilan bug'lantirib epitaksial qatlam hosil qilinadi. Bu holda na'muna — manba suyulmaydi, faqat bug'lanish va uning taglikka ko'chishi yuz beradi. Olingan qatlam o'ta yuqori solishtirma qarshilikka ega bo'ladi, chunki vakuumli kamerada kirishmalar kam bo'ladi. Biroq, bu usulning unumdorligi kichik bo'lganligi uchun ishlab chiqarishda qo'llanilmaydi.

Kimyoviy o'zaro ta'sir yordamida gaz fazada epitaksiya. Gaz fazada yarimo'tkazgich atomlari kimyoviy birikmalar tarkibida ko'chib, kimyoviy o'zaro ta'sir yordamida ajralib taglikka o'tiradi.

Kimyoviy birikmada elementar yarimo'tkazgichlar — germaniy va kremniy qatnashishi mumkin. Ishlab chiqarish sharoitida epitaksial qatlamlarni olish kimyoviy usullari ancha keng qo'llaniladi.

Gaz fazada epitaksial o'sishning mexanizmlaridan ikkitasini ko'rib o'tish mumkin. Birinchi mexanizmga asosan, taglikda yarimo'tkazgich taglik sirtida kataliz dissotsiatsiya reaksiyasi natijasida hosil bo'ladi. Ikkinchisiga asosan, taglikdan yuqoriroqda yarimo'tkazgich birikmalari parchalanishi sodir bo'ladi. Gaz fazada diffuziya yo'li bilan yarimo'tkazgich zarrachalar taglikka yetib boradi.

Yarimo'tkazgich atomlarining ajralib chiqish kimyoviy reaksiyalarini to'rtta guruhga ajratish mumkin:

1. Galoid birikmalarning dissotsiyanishi



bu yerda Ya — yarimo'tkazgich atomi (germaniy, kremniy); G- galoid atomi (xlor, fluor, brom, yod).

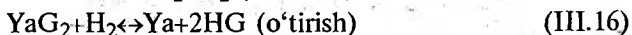
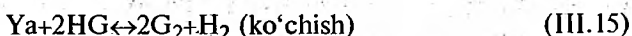
2. Galoid birikmalarni vodorod bilan tiklash reaksiyasi



3. Qizdirish natijasida birikmalarning parchalanishi — piroliz (issiq sochilish)



4. Ikkita bosqichda o'tuvchi kimyoviy ko'chish reaksiyasi



Bu yerdagi barcha reaksiyalar qaytuvchi. Reaksiya qaytishi yo'nalishi va o'tirish tezligi boshlang'ich moddalar zichligi va jarayon rejimiga bog'liq.

Suyuq fazada epitaksiya. Suyuq fazali epitaksiya usuli to'yingan yarimo'tkazgich material eritmasidan yarimo'tkazgich monokrystall qatlamini o'stirishdan iborat. Eritmaga cho'ktirilgan yarimo'tkazgich taglik sirtida uni sovitish natijasida kristallanishi yuz beradi. Ko'pchilik hollarda suyuq fazadan kristallanishda erituvchi sifatida yarimo'tkazgich suyuq holatida eruvchanligi yuqori bo'lgan metall, masalan, Al — Si yoki Au — Si tizimdan foydalaniladi. Yarimo'tkazgich birikmalarining suyuq fazada epitaksiyasini olish uchun erituvchilar sifatida oson eruvchi birikma tarkiblovchilari, masalan, GaAs va GaP uchun Ga qo'llaniladi.

Bu esa kristallanish temperaturasi kamayishiga, taglik eritma chegarasida temperatura gradienti kamayishiga olib keladi va o'stirilgan qatlam tozaligini oshiradi.

Gaz va suyuq epitaksial qo'shilgan usul (bug'-suyuq-qattiq jism jarayoni) istiqbollidir. Yarimo'tkazgich taglik sirtiga evtektiv tarkibli suyuq fazani hosil qiluchi yupqa metall qatlam surkaladi. Bu past temperaturalarda epitaksial qatlamlarni olish imkonini baradi.

Yarimo'tkazgich atomlari suyuq qatlam bilan taglik hosil qilgan chegara orqali gaz faza orqali o'tiradi va ularning diffuziyalanishi natijasida kristallanish yuz beradi. Bu yerda eritma qatlami 1 mkm dan oshmaydi va amalda epitaksial qatlam o'sish tezligi eritmada diffuziyalanish vaqtiga bog'liq bo'lmaydi.

Epitaksiya usulida olingan tuzilmalar tavsifnomalari qotishmali usulidagiga asosan o'xshashdir.

12.3. Kremniy va germaniy epitaksiyasi

Epitaksial qatlamlarni germaniy va kremniy asosida o'stirish usullari ichida keng tarqalgani monosilan SiH_4 va monogerman GeH_4 larni tetraxlorid vodorodda tiklanishi va -issiqlik parchalanishidir. Kremniy va germaniy monokristall qatlamlari qizigan tagliklar orqali xloridli yoki gidridli bug'li vodorod gazini va legirlanuvchi kirishmalar haydalib taglik sirtida o'tiradi.

Epitaksial o'stirish jarayoni quyidagi amallardan iborat:

- 1) reaktorga plastinkalarni joylashtirish;
- 2) inert gaz va vodorodni reaktor orqali o'tqazish (purchash bilan);
- 3) plastinalarni tozalash uchun plastinkalarni qizdirish va gazli yedirish uchun reagentlarni berish;
- 4) yedirishni to'xtatish va o'stirish uchun kerak bo'lgan temperaturani ta'minlash;
- 5) epitaksial qatlam va legirlash uchun reagentlarni berish;
- 6) reagentlarni berishni to'xtatish va qisqa vaqt davomida vodorodni haydash;
- 7) qizdirish, vodorod va inert gazlarni berishni to'xtatish;
- 8) reaktorni bo'shatish.

Ishlab chiqarishda kremniy epitaksial qatlarni olish keng qo'llanilmoqda.

Epitaksial kremniyni xloridli olish usuli. Bu usulni keng qo'llanilishiga uning yetarli darajada soddaligi va ishlatiladigan materiallar qulayligi sabab bo'lmoqda. Kremniy tetraxlorid bug'lari va vodorod reaktorga berilib, u yerda asosan kremniyning tiklanish reaksiyasi yuz beradi:



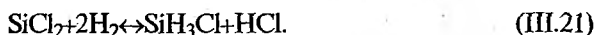
Ba'zan tetraxlorid o'rniga trixlor bilan SiHCl_3 dan foydalanilib, bu yerda reaksiyada asosan tiklanish yuz beradi:



O'ng va chap yo'nalishda bo'ladigan reaksiya natijasida qoldiq vodorod xlorididan HCl kremniy sirtidagi iflosliklar, SiO qoldiqlari, kremniy taglik sirtidan tizim buzilishlarini olib tashlashda gazli yedirish uchun foydalaniladi. SiCl_4 tiklanishi jarayoni (III.17) ifodaga nisbatan ancha murakkab. Oraliq o'zaro ta'sir reaksiyasi ikki usulda ro'y berishini e'tiborga olish kerak. Birinchi tizimga asosan, tiklanish kremniy dixlorid SiCl_2 , HCl va H_2 larni qatnashishi reaksiyasi bilan kuzatiladi. O'tirish reaksiyasi (III.17) kremniyni yedirish reaksiyasi bilan birga boradi:



Bu reaksiyaga qo'shimcha vodorodda tetraxlorid konsentratsiyasi oshishi epitaksial qatlam o'sish tezligini kamaytirishga olib keladi. Bundan tashqari quyidagi reaksiya ham sodir bo'ladi:



Hosil bo'luvchi kremniy vodorod xlorid birikmasi vodorod bilan sof kremniy hosil bo'lguncha tiklanadi.

Ikkinchi sxemaga asosan, gaz fazada SiCl_4 tiklanishi quyidagi reaksiyalardan birida yuz beradi:



yoki



SiCl_4 qisman tiklanishi taglikda atomar kremniy hosil bo'lishi bilan xloridlar tiklanishi yoki disproporsiyalanish bo'yicha ketadi. SiCl_4

molekulasiga nisbatan $SiHCl_3$ molekulasining ancha yengil sochilishi $Si-Cl$ energiya bog'lanishiga nisbatan $Si-H$ bog'lanish energiyasining kichikligi bilan aniqlanadi.

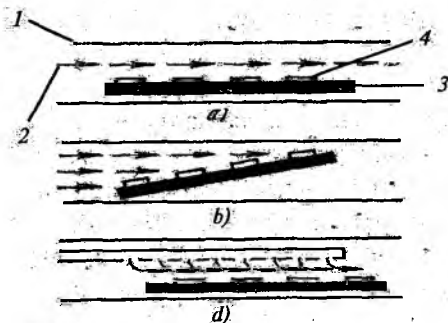
Vodorodda kremniy tetraxloridni kichik zichliklarda (III.17) reaksiyaga asosan o'sish tezligi $SiCl_4$ zichligiga chiziqli bog'lanishga egaligi kuzatiladi. $SiCl_4$ zichligi keyingi oshishi o'sish tezligini kamaytiradi va (III.19) reaksiya kuchayib taglik edirilishiga olib keladi.

Kremniyni o'tqazishni $1150^{\circ}C-1250^{\circ}C$ temperaturalar oralig'ida vodorodda tetraxlorid konsentratsiya sathini 0,5%-1%, gaz oqim tezligini 0,1-1 m/s ushlagan holda amalga oshirish mumkin. Shu sharoitda qatlam o'sish tezligi 1 mkm/min ga yaqin. Uncha yuqori bo'lmagan temperaturalarda va bug'da katta miqdordagi tetraxloridlarda, amorf yoki polikristall kremniy qatlami hosil bo'ladi. Taglikda temperatura oshishi va gaz aralashmasida tetraxloridning mol kamayishi qatlam zichlashishiga va kristallanishiga olib keladi.

Kremniy epitaksiya qatlamlari olishning gidrid usuli. Yuqoridagi epitaksiyaning xlorid usulida taglik temperaturasi $1200^{\circ}C$ ga yaqin. Shuning uchun yuqori legirlangan plastinka-taglikdan kirishmalarning o'sayotgan kuchsiz legirlangan epitaksiyasi qatlam tomon diffuziyanishi yuz beradi. Bu hodisani *avtolegirlash* deyiladi. Avtolegirlashda o'sayotgan qatlamdan taglikka teskari tomonga kirishmalar diffuziyasi ro'y berishi ham mumkin. Avtolegirlash epitaksial qatlamda kirishmalar zichligini, qatlam-taglik chegarasida kirishmalar zichligini va epitaksial qatlamda berilgan zichlikdagi kirishma sohasi qalinligini o'zgartiradi.

Taglikka kirishmalar diffuziyanishini chegaralash uchun diffuziya koeffitsienti kichik bo'lgan kirishmalar, masalan, n^+ — tagliklarda fosfor o'rniga Sb va As tanlanadi.

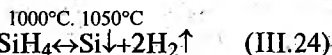
Kirishmalar diffuziyasini chegaralashning boshqa imkoniyati bu jarayon temperaturasini kamaytirishdir. Kremniy epitaksiyasida temperaturani $1000^{\circ}C$ gacha kamaytirish uchun o'stirish vaqtida taglikni ultrabinafsha nurlari bilan nurlashdan foydalanish mumkin. Ultrabinafsha nurlanish gaz fazada adsorbirlashgan kirishmalar ta'sirini kamaytiradi. Bu esa, kremniy taglik atomlarining sirt bo'ylab haraktachanligiga ta'sir qiladi. Avtolegirlashni ancha yuqori darajada chegaralash jarayon temperaturasini kamaytirish imkonini beruvchi epitaksiyaning gidrid usulidan foydalanishdir. Bu usulda monosilan piroliz bo'lganligi uchun



III.20-rasm. Gorizontalar reaktorlar turlari:

1-reaktor (kvars); 2-gaz oqimi;
3-taglik ushlagich; 4-plastinkalar.

uni ba'zan *silanli usul* deyiladi. Silanli usul silanning termik parchalanishi qaytmas reaksiyasiga asoslangan:



Silan usulida epitaksial qatlamlarni o'stirish qurilmasining tuzilishi xlorid usuliga yaqin va monosilan bilan ishlaganda ehtiyotkorlik uchun qurilma havo va nam qoldiqlarini haydash uchun moslamalar bilan ta'minlangan bo'lishi kerak.

Monokristall qatlamlarni $1000^{\circ}\text{C} - 1050^{\circ}\text{C}$ temperaturalarda monosilan parchalanishi hisobiga olinadi. Manba sifatida 4%-5%li monosilandan tarkib topuvchi aralashma va yuqori tozalikdagi 95%-96% He, Ar yoki H_2 gazidan foydalaniladi. Jarayonni o'tkazish davrida vodorodda monosilan zichligi 0,05%-0,1%, gaz oqimi tezligi 30 sm/s — 50 sm/s. Shu sharoitda o'sish tezligi 0,2 dan 2 mkm gacha o'zgaradi.

Usulning kamchiliklari monosilanning o'z-o'zidan yonishi va portlashi bo'lganligi uchun, maxsus choralar ko'rish kerak. Shuning uchun amalda monosilan vodorodli aralashmada qo'llaniladi. 5%li monosilan aralashmasi o'z-o'zidan yonmaydi. Aralashma bilan ishlash xavfsizlik qoidasi toza vodorod bilan ishlashdagidek.

12. 4. Epitaksial qatlamlar olish qurilmalari

O'suvchi epitaksial qatlamlar sifati ko'p jihatdan temperatura va gazodinamik sharoitlariga bog'liq. Shuning uchun epitaksiya qurilmalariga yuqori talablar qo'yiladi. Epitaksial o'stirish qurilmasi reaktorlar tuzilishiga bog'liq. Ularning gorizontalar va vertikal xillari bor.

Gorizontalar reaktor ancha sodda tuzilishga ega (III.20,a-rasm). Bunda bug'-gaz aralashma oqimi taglik ushlagichga parallel o'tadi va epitaksial qatlamlar qalinligi hamda solishtirma qarshilikni o'zgartirishga olib keladi. Yanada tekis o'stirishni hosil qilish uchun ikkita usuldan foydalaniladi: 1) taglik ushlagich gaz oqimi yo'nalishiga ma'lum bir

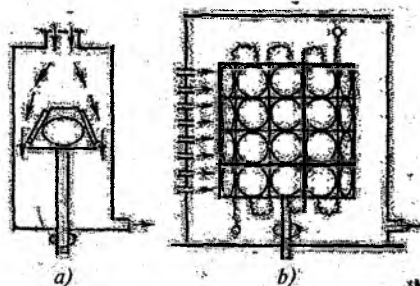
burchak ostida joylashtiriladi (III.20, b-rasm); 2) taglik ushlagich uzunligi bo'yicha gazni taqsimlab kiritish (III.20. d-rasm).

Vertikal reaktorlar konstruksiyasi yaxshiligi qizdirish va aralashma gaz oqimi uchun ancha yaxshi sharoitni ta'minlaydi. Taglik ushlagichning aylantirilishi issiqlik va gazodinamik maydonlarning tekis taqsimlanishiga olib keladi. III.21, a-rasmda to'rt qirrali taglik ushlagich va gaz-

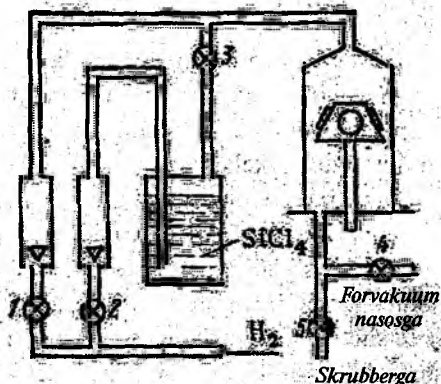
bug' aralashmani vertikal kiritishning vertikal reaktor qurilmasi ko'rsatilgan. III.21, b-rasmda yuqori unumdorlikka ega bo'lgan ishchi aralashmani gorizontall kiritishning baraban ko'rinishidagi vertikal reaktori ko'rsatilgan. To'rt qirrali grafitli taglik ushlagichni qizdirish yuqori chastotali tok induktori bilan amalga oshiriladi, reaktor kvarts naydan iborat. Barabanli taglik ushlagichni zanglamas po'latdan tayyorlangan reaktor ichida rezistiv elementlar yordamida qizdiriladi. Bu qizdirish ba'zan reaktorning kamchiligi deb ataladi.

Xlorid usulida epitaksial qatlamlarni olish qurilmasi III.22-rasmda berilgan.

Legirlangan epitaksial qatlamni olish uchun tetraxlorid kremniy yoki legirlovchi qo'shimchalar p -turni BBr_3 yoki n -turni PCl_3 hosil qiluvchi legirlovchi qo'shimcha tarkibli aralashmalar $\text{SiCl}_4 + \text{BBr}_3$ yoki $\text{SiCl}_4 + \text{PCl}_3$ termostat idishda tetraxlorid temperaturasi yuqori aniqlikda ushlab turiladi. Bu esa, zaruriy bug' bosimini ta'minlaydi. Odatda bu temperatura 0°C dan past, chunki SiCl_4 juda uchuvchi suyuqlik.



III.21-rasm. Vertikal reaktorning tuzilishi: a) kvarts nayli reaktor; b) zanglamas po'lat qalpoqli reaktor



III.22-rasm. Epitaksial kremniy olish uchun qurilma sxemasi.

Sistemaga palladiy tozalovidan o'tgan vodorod beriladi. Chunki palladiy tozalov nam va kislorod qoldiqlaridan vodorodni tozalaydi. Palladiy yoki platinali tozalov sistemasi 400°C - 450°C qizdirilgan diafragma dan iborat. Bu diafragma orqali yuqori tezlikda atomar vodorod diffuziyanadi va uning sarfi $1\text{m}^3/\text{soat}$ ni tashkil qilib boshqa moddalar bu diafragma orqali umuman o'tmaydi, chunki ularning diffuziya koeffitsienti kichik. Tozalov nuqtasi shudringdan so'ng -70°C ni tashkil qiladi. Vodorod 1 kran-vodorod sarfini o'lchovchi rotametr orqali o'tadi. 2, 3, 4 kranlar yopiq. Kremniyli tagliklar 1000°C - 1200°C gacha qizdiriladi va ularning sirti vodorod oqimida tozalanadi. 1 kran yopiladi, 2 va 3 kranlar ochiladi. Vodorod SiCl_4 li idish orqali o'tadi va reaktorga tetraxlorid bug'i bilan to'yinib elementar kremniy tiklanadi.

Reaksiyada qatnashmagan SiCl_4 , H_2 , HCl va boshqa mahsulotlar 5 ochiq kran orqali skrubberga chiqadi. Skrubber vazifasi zaharli chiqindilarni ushlab qoladi, vodorod alangasida yondirib yuboradi. Epitaksial o'stirishda gaz yedirish uchun 1 kran orqali HCl epitaksiya jarayonidan oldin beriladi.

Epitaksial o'stirish texnologiyasi plastinkaga qo'yilgan talablarlardan kelib chiqadi. Bu epitaksial qatlam qalinligi va legirlanish sath qiymatlari (aniqligi $\pm 5\div 10\%$) yomon bo'lmagan holda yechiladi. Epitaksial qatlam qalinligi talab darajasidagi takroriylikka erishish uchun o'sish tezligining doimiylikini saqlash kerak. Buning uchun esa SiCl_4 , SiH_2 asosiy moddalar konsentratsiya sathini, bu jarayonda temperaturani o'zgarmas ushlab turish kerak. Epitaksial qatlam solishtirma qarshiligining bir xil bo'lishligi uchun qizdirish tekis bo'lishi kerak.

Germaniy epitaksiyasi. Germaniy epitaksiyasiga qiziqish germaniyli kam shovqinli o'ta yuqori chastotali tranzistorlar va IMS yaratish muhimligidan kelib chiqadi. Chunki, bu asboblari kremniyli IMS larga nisbatan past temperaturalarda samaraliroq ishlaydi. Germaniy epitaksial qatlamlarini o'stirishning xlorid usuli yaxshi o'rganilgan.

O'tqazish 800°C da bajariladi va germaniy tetraxloridi zichligi 0,2%ga yaqin bo'ladi. Aralashma oqimi tezligi tanlangan qiymati reaktor tuzilishiga, oqim berish usuliga bog'liq bo'lib, odatda tezlik kattaligi 20 sm/s dan oshmaydi. Epitaksial qatlamning 800°C da o'sish tezligi 0,5 mkm/min ni tashkil qiladi.

Germaniy epitaksial qatlamlarni o'stirishning gidrid usulida olish vodorod muhitida GeH_4 yordamida 700°C temperatura yaqinida va

GeH_4 zichligi 0,1%–0,2% bo'lganida bajariladi. O'sish tezligi 800°C gacha oshib boradi, keyin gaz fazada GeH_4 parchalanishi kamayadi. GeH_4 ning gaz fazali parchalanishini kamaytirish uchun yuqori tezlikdagi gaz oqimidan foydalaniladi. Sanoat yetarli darajada toza germaniy tetraxlorididan foydalanganligi uchun solishtirma qarshiligi 15 Om-sm dan katta bo'lgan epitaksial qatlamni olish imkonini beradi.

Yana kamroq qo'llaniladigan usullardan biri yopiq havosi so'rilgan kvarts nayda olishdir. Nayda germaniy tetraxlorid GeI_4 bo'lib, bu zona 550°C – 700°C gacha qizdiriladi. Nayning ikkinchi zonasida germaniy taglik bo'lib uning temperaturasi 300°C – 400°C ni tashkil qiladi. Birinchi zonada quyidagi reaksiya ketadi: $\text{GeI}_4 + \text{Ge} \rightarrow 2\text{GeI}_2$. Germaniy diyodid taglikka diffuziyalanib, quyidagi reaksiya sodir bo'ladi:



Natijada germaniy taglikka o'tiradi, bug'lari esa manba zonasiga diffuziyalanadi va reaksiya yana qaytariladi.

12.5. Epitaksial tuzilmalarni legirlash

Kerakli solishtirma qarshilikli epitaksial qatlamlarni olish uchun qattiq fazaga aniq miqdorda kirishmalar kiritish kerak. Epitaksiya jarayonida kirishmalarni kiritish uchun uchuvchi birikmalarining III va V guruh elementidan foydalaniladi. Bu moddalarga galogenidlar (PCl_3 , AsCl_3 , SbCl_3 , SbCl_5 , BCl_3 , BBr) va gidridlar (PH_3 – fosfin, AsH_3 – arsin, B_2H_6 – diboran) kiradi.

Galogenidlar va gidridlar qatnashishida legirlash reaksiyalarini quyidagicha yozish mumkin:



Donor kirishmalar bilan kremniyni legirlashda bu reaksiyalarning muvozanati o'ng tomonga kuchli siljigan bo'lib, amaliy jihatdan kirishma birikmalarining to'la aylanishi yuz beradi.

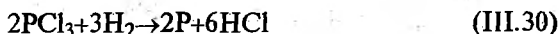
Epitaksial qatlamlarni legirlashning asosiy usullariga quyidagilar kiradi: gaz aralashmali, suyuq legirlash va gaz razryadli.

Gaz aralashmali usulda kirishma manbayi sifatida hajm bo'yicha 10⁻²–10⁻⁴% uchuvchi gidridli legirlovchi element bo'lgan inert gaz aralashmasidan foydalaniladi. Usul o'suvchi qatlamni kuchsiz legirlashni amalga oshiradi. Argonli 0,01%AsH₃ yoki argonli 0,01% B₂H₆ dan iborat gaz aralashma kamera bo'yicha oqayotgan vodorod oqimiga qo'shib yuboriladi. Bu esa aralashma konsentratsiyasini qo'shimcha suyultirish va qatlamda konsentratsiya sathini yaxshi boshqarish mumkinligini ta'minlaydi. Diboranli gaz aralashmasida solishtirma qarshiligi 1 Om-sm dan katta bo'lgan kremniy qatlamlarini olib bo'lmaydi. Shuning uchun qattiq va suyuq manbalardan foydalaniladi. Gaz ko'rinishdagi manbalardan ko'p qo'llaniladigani arsenikdir. Gaz taglikka yetkaziladi, ular sirtga yutiladi, dissotsiyalanadi:



ozod bo'lgan arsenik kremniyning o'suvchi qatlam panjarasiga joylashadi.

Suyuq legirlash usulida legirlovchi kirishma manbayi sifatida galogenidlar PCl₃, POCl₃, BBr₃ va boshqa birikmalardan foydalaniladi. Galogenidlar kremniy tetraxloridida yaxshi eriydi, oson bug'lanadi va o'tuvchi vodorod oqimida to'yinadi. Manba kirishma bug'lari issiq sirtga vodorod bilan tiklanadi:



Galogenidlar yuqori bug' bosimiga ega bo'lib temperaturaga kuchli bog'liq, shuning uchun temperaturaning ozgina o'zgarishi o'suvchi qatlamda kirishma konsentratsiyasining keskin o'zgarishiga olib keladi. Keyingi vaqtda bor bilan legirlash uchun bug' bosimi temperaturaga kuchsiz bog'liq bo'lgan yuqori teperaturada qaynovchi birikmalar qo'llanilmoqda. Bu birikmalar olingan kremniy qatlam solishtirma qarshiliklari 0,005 dan 5 Om-sm oralig'ida yotadi.

Gaz razryadli usulda qattiq manbalar sifatida B₄C, AlB₂, Sb + (1...2)%As qotishma va boshqalar ishlatiladi. Ular gaz razryadli kamerada elektrodlar vazifasini o'taydi. Ishchi reaktorli qurilmaga ulangan elektrodlar orasiga impuls kuchlanish berish natijasida kamerada uchqunli razryad yuz beradi. Uchqunli razryad plazmasida elektrod materiallar qisman bug'lanadi. Vodorod bilan ko'chuvchi bug'lar qurilmaning reaksiya zonasiga yetadi. U yerda ularning erkin legiranoovchi kirishmalarga ajralishi bilan yoyilish yuz beradi. Kirishma konsentratsiyasini elektrodlar orasidagi masofani o'zgartirish, elektrod-

larga berilayotgan kuchlanish, takroriylik va impulslar davomiyligi berish hamda gaz razryadli kamera orqali o'tayotgan vodorod oqimi tezligi bilan boshqarish mumkin.

Kremniy n -o'tkazuvchanlikdagi qatlamni olish uchun elektrod materiallar sifatida surmali $Sb+0,1\%P$ yoki $Sb+1\%As$, hamda GaP , $GaAs$ yoki $InSb$ qotishmalaridan foydalaniladi. Gazli uchqun razryad bu moddalar sochilishi tufayli parchalanadi, bunda P , As va Sb vodorod bilan birikib gidridlar hosil qilib, elektrodlar orasida ko'chadi. Taglik zonasida gidridlar sochiladi va kirishmalar o'suvchi kremniy qatlamiga kiradi. Galliy gidridlar hosil qilmaydi va kameradan epitaksial qatlamlarni olish uchun lantan borid LaB_6 , aluminiy borid AlB_2 , bor karbidi B_4C elektrodlaridan foydalaniladi. Bunda bor vodorod bilan diboran hosil bo'ladi. Gaz fazada kiritilayotgan kirishmalar zichligini uchqun razryad takroriylikini boshqarish bilan o'zgartirish mumkin.

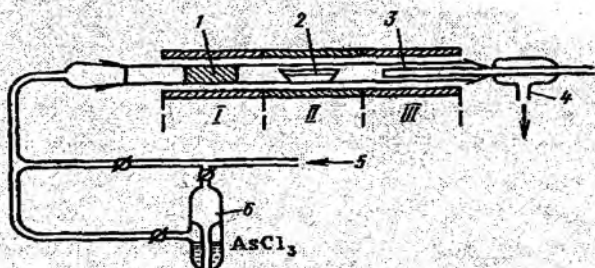
12.6. $A^{III}B^V$ turdagi yarimo'tkazgich birikmalar epitaksiyasining texnologik xususiyatlari

$A^{III}B^V$ turdagi kimyoviy birikmalarning qo'llanilish sohalari uzluksiz kengayib bormoqda. Hozirgi vaqtda optoelektronikada informatsiyaning tasvirli tizimlari, nurlanish manbalari va qabul qilgichlar, yarimo'tkazgichli lazerlar va boshqalar yaratilishida keng foydalanilmoqda. Yuqoridagi barcha qurilmalarda yarimo'tkazgichli tuzilma faol ishtirok etadi, odatda, eng kamida ikkita avto-yoki geteroepitaksial qatlam mavjud.

$A^{III}B^V$ turdagi birikmalar va ular asosidagi qattiq eritmалarni ularning erish temperaturasi va bug'lanish bosimining balandligi tufayli elementlardan to'g'ridan-to'g'ri sintez qilish murakkabdir. Galliy arsenidi havoda $300^\circ C$ temperaturada qizdirilsa oksidlanadi, $600^\circ C$ dan boshlanib arsenik ajralib chiqish bilan birikma bug'lana boshlaydi. Suyulish temperaturasida bug' bosimi 10^5 Pa ni tashkil qiladi.

GaP suyulish temperaturasida fosfor bug'ining bosimi $3,5 \cdot 10^6$ Pa tashkil qiladi. Suyulma holdagi $GaAs$ va GaP barcha konteyner materiallar bilan juda faol va o'zaro ta'sirda bo'la boshlaydi. $A^{III}B^V$ texnologiyasida qo'llanilayotgan sun'iy kvarts qotishma $GaAs$ ni kremniy bilan ifloslantiradi.

Yuqoridagi qiyinchiliklarni birikmaning suyulishi erish temperaturasidan pastroq temperaturada gaz fazadan $A^{III}B^V$ turdagi birikmalar epitaksial qatlamlarini o'stirishda yo'qotish mumkin.



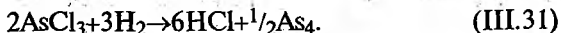
III.23-rasm. Ga – AsCl₃ – H₂ tizimida GaAs epitaksial qatlamlar olish uchun qurilma sxemasi:

1-arsenik zonası 425°C (I); 2-galliy zonası 800°C (II); 3-taglik zonası 750°C-900°C (III); 4-reaksiya mahsulotlari chiqishi; 5-vodorod kirishi; 6-AsCl₃ li barboter

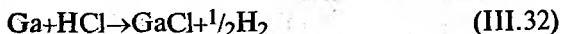
GaAs va qattiq eritmalar asosida gaz fazada epitaksiya olishda gaz tashuvchi sifatida vodoroddan foydalanilgan holda xlorid va xlorid gidrid tizimi o'tqazish mumkin. Bu usulning asosiy afzalligi foydalanilayotgan dastgohning soddaligi; oqim tezligini va birikma-tashuvchi zichligini o'zgartirish yo'li bilan qatlam o'sishi jarayonini boshqarish mumkinligi; turli kirishmalar bilan legirlash; uzluksiz jarayonda ko'p qatlamli tuzilmalarni olish; jarayonni avtomatlashtirish; yedirishning osonligi va boshqalar kiradi.

Endi qisqacha asosiy reagentlar tizimida kimyoviy aylanishlar va epitaksiyaning bir qancha kinetik xususiyatlariga to'xtalamiz.

Ga-AsCl₃-H₂ tizimlari afzalliklari bitta reaktorda AsCl₃ ni vodorodli tiklanishida tozalash usulida chuqur tozalikda AsCl₃ va yuqori tozalikda arsenik va vodorod xloridi olish mumkinligidir. Bu tizimda galliy arsenidi epitaksial qatlamini olish qurilmasi III.23-rasmida ko'rsatilgan. Reaktor uchta qizish zonasiga ega. Uning kirishiga vodorodli bug' AsCl₃ aralashma keladi va birinchi zonada quyidagi reaksiya sodir bo'ladi:

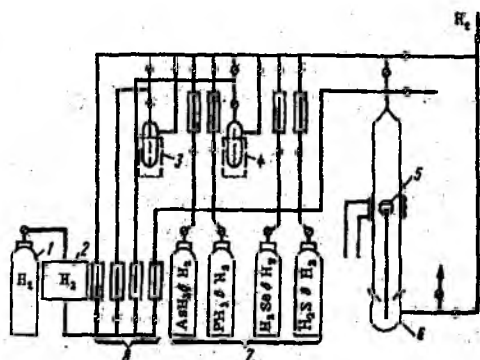


Ikkinchi zonada birinchi zonadan kelgan vodorod xloridi eritma galliy bilan o'zaro ta'sirlashadi. 700°C dan yuqori temperaturada ortiqcha galliy mahsuloti ta'sirida galliy subxloridi paydo bo'ladi:



Uchinchi zonada geterogen reaksiya natijasida galliy arsenidi sintezi va taglikda epitaksial qatlam hosil bo'ladi:





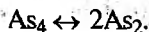
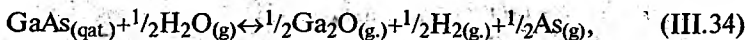
III.24-rasm. Galliy-organik birikmalardan foydalangan holda galliy arsenidi epitaksial qurilma sxemasi:

- 1-gaz tashuvchi ballon;
- 2-gazni tozalash bloki;
- 3-galliy-organik birikmali barboter;
- 4-legirlovchi qo'rg'oshin manbayi;
- 5-taglik;
- 6-kvars reaktor;
- 7-vodorod aralashmali gidrid ballonlar;
- 8-rotometr.

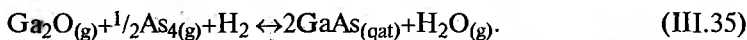
Jarayonning o'ziga xos xususiyati ikkinchi zonada arsenik bilan galliy eritmasining to'yinishidir.

Eritma to'yingandan so'ng uning sirtida galliy arsenidi pardasi hosil bo'ladi, zonaga keluvchi ortiqcha arsenik vodorod oqimi bilan qo'shilib ketadi va reaktorning sovuq qismlariga o'tiradi. Odatda taglikni galliy eritmasi arsenik bilan to'yinish jarayoni tugagan joyga kiritiladi. Bu gaz aralashma tarkibi o'zgarmasligini ta'minlab qatlamning bir jinsli o'sishiga olib keladi. Zona kirishdagi $AsCl_3$ va $GaCl$ bug' bosimlari nisbatini o'zgartirish bilan o'tirish zonasida taglikni yedirish va turli tezlikda epitaksial qatlam o'stirish rejimlarini aniqlash mumkin. Qatlam o'sishi tezligi taglik yo'nalganligiga bog'liq. Odatda quyidagi munosabat kuzatiladi: $\vartheta_{(III)A} > \vartheta_{(100)A} > \vartheta_{(211)B} > \vartheta_{(311)B}$. Bu yerda A -metall, B -metalloid panjara qismiga tegishli belgilar.

Galliy arsenidining boshqa tizimlaridan ham epitaksial qatlamlarni olish mumkin. Bular $GaCl-AsCl_3-H_2$; $GaCl_3-As-H_2$; $GaAs-HCl-H_2$; $GaAs-I_2-H_2$; $GeAs-H_2O-H_2$ tizimlaridir. O'tirish zonasidagi kimyoviy reaksiyalar kinetikasi o'xshash. Faqat, oxirgi tizimda, farqli ravishda tashuvchi sifatida suv bug'idan foydalaniladi. Bu tizimda manba zonasida temperatura $1000^\circ-1100^\circ C$ bo'lib, jarayon galliy arsenidining oksidlanishiga olib keladi:



Temperaturasi 50% kam bo'lgan zonada, ya'ni o'tirish zonasida galliy arsenidining sintezi ro'y beradi va bu yerda suv ajralib chiqishi ham kuzatiladi:



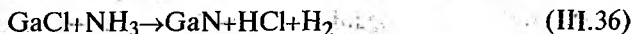
Galliy arsenidi o'stirishi uchun xlorid-gidridli Ga-HCl-AsH₃-H₂ dan ham foydalanish mumkin.

A^{III} B^V yoki ularning qattiq eritmalari binar birikmalari epitaksial qatlamlarini olishda B^V tarkiblovchining uy temperaturasida gaz holda bo'lganligi, gaz fazada tarkibi o'zgarmasligi va legirlash jarayonini boshqarishni ta'minlaydi.

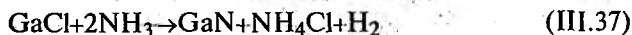
III.24-rasmda binar birikmalar GaAs, GaP, GaN va qattiq eritmalar GaAs_x, P_{1-x}, Ga_xIn_{1-x}P, Al_xIn_{1-x}P, Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}, Ga_xAl_{1-x}N va boshqa gaz fazadan o'stirish mumkin bo'lgan boshqa aralashmalardan epitaksial o'sish va legirlash uchun qurilma sxemasi ko'rsatilgan.

Gaz fazada GaN epitaksiyasi birgina shu usulda olinib, u bu material asosida texnologiyalashgan monokristall qatlamini olishni ta'minlaydi.

Epitaksiyani xlorid-gidridli Ga-HCl-NH₃-Ar(He) tizimda olib boriladi. Galliy xlorid zona temperaturasi 800°-850°C bo'lganda galliy subxloridi GaCl hosil bo'lguncha davom ettirilib, so'ng inert gaz oqimida o'stirish zonasiga o'tkaziladi. Bog'lanmagan kanal orqali o'tqazish zonasiga ammiak to'g'ridan-to'g'ri taglikka beriladi. Bu yerda 1050° -1100°C temperaturada geterogen reaksiya yuz beradi:



Qisman jarayon quyidagicha bo'lishi ham mumkin:



Reaksiyada qatnashuvchi gazlar va bug'lar zichligi bo'yicha bir-biridan kuchli farq qiladi, shuning uchun epitaksial o'stirish bir jinsli bo'lishi uchun gaz oqimlarini yuqori tezlikda o'tkaziladi. Shuning uchun bu aralashma — gulxan rejim deb ataladi. Bunda gaz aralashma gomogenlashmagan bo'ladi va u A^{III} B^V birikmalar epitaksiyasidan farq qiladi.

Taglik sifatida odatda yo'nalishi (0001), (1120) yoki (1012) bo'lgan sapfirlardan foydalaniladi, keyin ular vodorodda yuqori temperaturali yedirishdan o'tkaziladi. Qatlamning o'sish tezligi ~1 mkm/min bo'lishi mumkin.

Galliy nitridi asosida yorug'lik diodlari bitta jarayonda olinadi. Oldin azot panjarasida vakansiya hisobiga yuqori elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan legirlanmagan qatlam o'stiriladi. Keyin bu qatlam ustiga

qo'rg'oshin bilan legirlangan kompensatsiyalangan i-qatlam o'stiriladi. Legirlangan qatlam o'sishi 900°C da amalga oshiriladi.

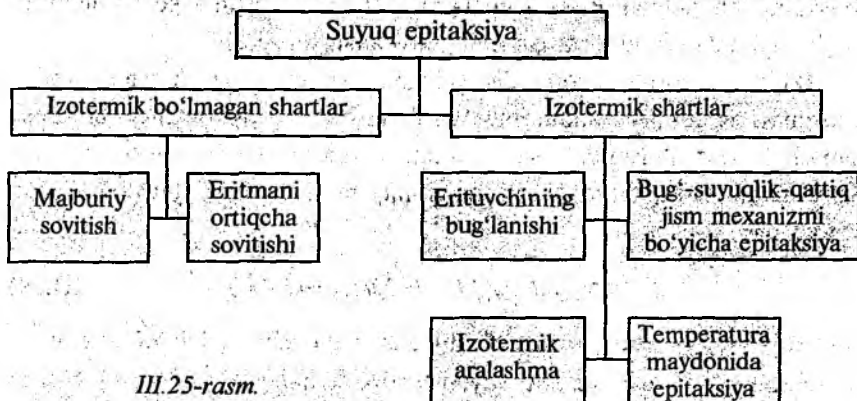
Suyuq fazada epitaksiya. Suyuq fazada epitaksiya ko'pchilik $A^{III} B^V$ binar va uchlik yarimo'tkazgich birikmalarni o'tqazish uchun, ayniqsa turli tagliklarda ko'p qatlamli p -n- va izoturdagi tuzilmalarni olish uchun qo'llaniladi.

Suyuq fazali epitaksiyaning afzalliklari: stexiometrik eritmadan foydalanish zarur emasligi; faza o'sishi temperatura kombinatsiyasi va likvidus chizig'iga yaqin tarkibda yuz berishi; bu o'z naybatida qatlamlarda kimyoviy tuzilish nuqsonlari zichligini kamaytirishga, temperatura pasayishi bilan ko'pchilik kirishmalarning taqsimot koeffitsientining kamayishiga imkon beradi. Issiqlik vakansiyalar zichligi ham kamayadi.

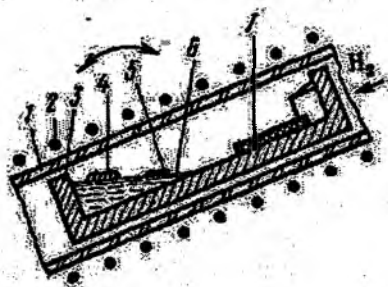
Suyuq epitaksiyada likvidusning har qanday nuqtasida kristallanishi va unda yengil uchuvchi tarkiblovchilarning bug' bosimi kamayishi sodir bo'ladi. Masalan, galliy asosida qotishma-eritmadan 1000°C da GaP ni o'stirishda fosfor P_2 bug'i bosimi 10 Pa tashkil qiladi va natijada fosforning yo'qotishlari yetarlicha oz bo'ladi. (Stixiometrik qotishmadan 1470°C da o'stirishda fosfor bosimi $3,2 \cdot 10^6$ Pa ni tashkil qiladi).

Suyuq epitaksiya jarayonida o'sish tezligi kichik bo'lganligi sababli qatlam qalinligini yuqoriroq aniqlikda boshqarish imkonini beradi. Bu usul diffuzion va boshqa shakllar hosil qiluvchilarga nisbatan ham bir qancha marta ko'p afzaldir. Bu ayniqsa, ko'p qatlamli davriy tuzilmalarni olishda ahamiyatlidir.

Suyuq fazada epitaksiya usuli, taglikka nisbatan, qatlamda dislokatsiya zichligi kamayishiga olib kelib, yorug'lik asboblari yuz



III.25-rasm.



III.26-rasm. Nelson usuli bo'yicha suyuq epitaksiya uchun konteyner sxemasi:

1-kvars reaktor; 2-qarshilik elektr-pechii; 3-grafit qayiqcha; 4-modda-manba; 5-ligatura; 6-eritma (geliy); 7-taglik

beraligan nurlanishsiz rekominatsiya jarayonlarini kamaytiradi.

Suyuq fazadan epitaksiya olish usullarini ikkita katta guruhga bo'lish mumkin. Ulardagi farq qatlamda kirishmalarning oxirgi taqsimoti bilan aniqlanadi.

1. Yo'nalishli kristallanish usuli.

Bu holda epitaksiya ma'lum tarkibdagi suyuq fazadan va tashqi muhit bilan o'zaro ta'sirsiz hajmda bo'ladi. Epitaksiya jarayonida suyuqlama hajmi kamayadi.

2. Dastur zonali qayta kristallanish usuli. Bunda tashqi manbalar gaz, suyuq yoki qattiq

fazada vaqt davomida kam o'zgaruvchi ma'lum hajmli suyuq fazali qatlamdan foydalaniladi.

Birinchi guruh usullari uchun qatlamning butun qalinligi bo'yicha kirishmalar taqsimoti bir jinsli emasligi xarakterlidir.

Kirishmalar zichligining o'zgarishi yo'nalishli kristallanish asosiy tenglamasiga binoan bo'lishini ko'rsatadi.

$$N_{qat} = N_{jo} k (1-g)^{k-1}, \quad (III.38)$$

bu yerda N_{qat} - qatlamda kirishma zichligi; N_{jo} - suyuq fazada kirishma boshlang'ich zichligi; k - kirishmalarning effektiv taqsimot koeffitsienti; g - taglik hajmida suyuq faza hajmining kristallangan ulushi.

Ikkinchi guruh usullarida olingan qatlamlarida kirishmalarning taqsimoti epitaksial qatlamning boshlanish va oxirgi qismida bir jinsli emasligi, o'rta qismida esa kirishmalar taqsimoti bir jinsli ekanligi kuzatiladi. Qattiq fazada kirishmalar taqsimoti quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$N_{qat} = N_{qat.o} [1 - (1-k) \exp(-kh/\lambda)] \quad (III.39)$$

bu yerda $N_{qat.o}$ - qattiq fazada kirishmalarning boshlang'ich zichligi; h - epitaksial qatlam qalinligi; λ - suyulish zona uzunligi.

Suyuq epitaksiyani amalga oshiradigan asosiy variantlar III.24-rasmda ko'rsatilgan.

Suyuq epitaksiyaning klassik usuli Nelson tomonidan taqdim qilingan bo'lib, konteynerning (maxsus idish) qarama-qarshi tomonlariga boshlang'ich eritma tarkiblovchilari va taglik joylashgan bo'ladi (III.26-rasm).

Odatda konstruksiyasi buraluvchi yoki chayqaluvchi (tebranuvchi) pechkadan foydalaniladi.

Ko'rilayotgan tizimni faza diagrammasining ko'rinishidan aniqlangan temperaturada ushlab turilgandan so'ng va hosil bo'lgan suyuq fazada to'yingan eritma mahkamlangan taglikka quyiladi. Sistemani sekin sovitish bilan eritmaning o'rtasiga to'yinishi, uning yemirilishi va epitaksial qatlam ko'rinishida taglikda eritma moddaning ajralib kristallanishi paydo bo'ladi. Shu paytning o'zida legirlashni ham amalga oshirish mumkin.

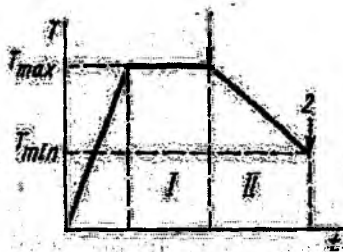
III.27-rasmda suyuq epitaksiyada temperaturaning vaqtga bog'liq rejimi ko'rsatilgan. Eritma sovush tezligi $1-10 \text{ K/min}$ tashkil qiladi.

Nelson usulini amalga oshirishning turli xillari mavjud.

Kremniy karbidi epitaksiyasi. Kremniy karbidi SiC epitaksiyasi yordamida yorug'lik va to'g'rilagich diodlar, yuqori temperaturaga chidamli tenzorezistorlar, yuqori energiyali zarrachalarni qayd qiluvchi asboblarda va boshqa turli asboblarda tayyorlash mumkin. Bu material — yuqori mexanik qattqlik va mustahkamlikka ega. Uning elektr o'tkazuvchanligi turi va solishtirma qarshiligi qiymatini boshqarish imkonini beradi. Undan juda qiyin sharoitlarda ishlashi mumkin bo'lgan qurilmalar va asboblarda yaratish mumkin.

Kremniy karbidi epitaksial qatlamini gaz fazada va suyuq fazada olish mumkin.

Gaz fazada SiC epitaksiyasi. Usul asosida inert gaz muhiti yoki vakuumda oldindan sintezlangan SiC sublimatsion qayta kristallanishi yotadi. Jarayon yuqori temperaturali pechkalarda, grafitli konteynerlarda o'tkaziladi (III.28-rasm).

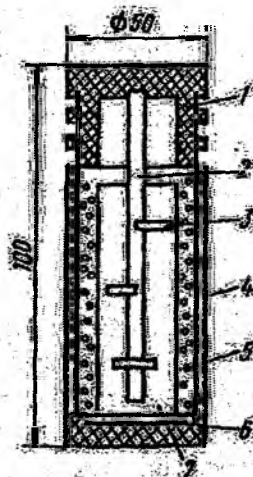
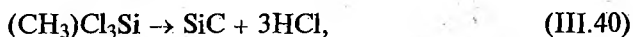


III.27-rasm. Suyuq epitaksiyada temperatura-vaqt rejimi:

- I-eritmaning to'yinish sohasi;
- II-kristallanish sohasi; I-taglikning qotishma bilan kontakti;
- 2-taglikdan qotishmaning ketishi.

Argon gazda epitaksiya zona temperaturasi o'rtacha 2000°–2200°C ni tashkil etsa, vakuumda jarayon ancha past temperatura (1800°–1900°C)da ketadi. Bunda 5 manba materiali qisman parchalanishi bilan bug'lanadi, material bug'i yupqa grafit diafragma orqali 7 kristallanish zonasiga o'tadi, bu yerda 3 tagliklar joylashgan. Bu zonada temperatura manba temperaturasiga nisbatan 50°–60°C kam. Bu yerda vujudga keltirilgan ozgina o'ta to'yingan bug' (3%–4%) epitaksial qatlam SiC o'sishi uchun yetarli.

Gaz fazada kremniy karbidi epitaksiyasini olishning boshqa ko'rinishi bir qancha kimyoviy usullarda olinib, undan biri metiltriqlorsilan pirolizi usulidir



III.28-rasm. Gaz fazada kremniy karbidi epitaksiyasi uchun konteyner:

- 1-issiqlik ekranli qopqoq;
- 2-taglik ushlagichi;
- 3-taglik;
- 4-konteyner korpusi;
- 5-kremniy karbidi (manba);
- 6-pastki qopqoq;
- 7-kristallanish fazasi.

Epitaksial SiC o'stirish 800°C dan boshlanib, 1200°–1250°C larda kremniy karbidi tagliklarida va kremniy tagliklarda jarayon paytida kremniy karbidi monokristall qatlamlari olinadi.

Gaz fazada qatlamlarni azot (donor), bor (akseptor)ni hosil qilish uchun B_2H_6 yoki BF_3 dan, aluminiy (akseptor) ni AlCl_3 yoki $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ dan foydalanib legirlash amalga oshiriladi.

Gaz fazada epitaksiya usuli kamchiligi kristallanish frontining to'la ochiqligidir. Bunda turli xildagi ta'siriar konteynerlarda yoki butun pechka hajmida yuz berishi mumkin.

Suyuq fazada SiC epitaksial o'sishida kristallanish fronti suyuq faza bilan to'silgan va kristall bilan oziqlantirishga asoslangan. Ancha keng tarqalgan usullardan biri harakatdagi

erituvchi bo'lib, mazmuni quyidagicha. Vakuumdagi purkash usuli bilan taglik va kristall—manba sirtiga erituvchi qatlam qoplanadi, uning qalinligi ~ 100 mkm ni tashkil qiladi. Ikkala kristall ichida erituvchisi bo'lgan «sendvich»ga joylashtiriladi. Manba-erituvchi-taglik sistema temperatura gradienti ($T_m > T_{tag}$) bo'lgan holda grafit qizdirgichga joylashtiriladi. Moddaning manbadan taglikka ko'chishi eritgich orqali diffuziya yo'li bilan ro'y beradi. Eritgichni tanlash katta ahamiyatga ega bo'lib, u epitaksiya jarayonini va kinetik parametrlarini va o'sgan qatlam xususiyatini aniqlaydi. Eritgichlar sifatida Co, Fe, Ni, Cr, Ag lardan foydalanish mumkin. Biroq, ular epitaksial qatlamni ifloslantirishi ham mumkin.

Nazorat savollari

1. Epitaksiya deb nimaga aytiladi?
2. Epitaksial qatlam olish usullarini ayting?
3. Epitaksial qatlamga qanday talablar qo'yiladi?
4. Gaz fazada epitaksiyani tushuntiring?
5. A^{III} B^V turdagi yarimo'tkazgich asosida epitaksial qatlamlar olishning asosiy xususiyatlarini ayting?
6. Suyuq fazada epitaksiya nima?
7. Gaz fazada SiC epitaksiyasi qanday sodir bo'ladi?

13-BOB. DIFFUZIYA USULIDA TUZILMALAR OLISH

13.1. Umumiy ma'lumotlar

Ishlab chiqarishda kirishmalar diffuziyasi yarimo'tkazgichni legirlashning keng tarqalgan usuli bo'lib, u elektron-teshik tuzilmalar yaratishda, integral mikrosxemalarning (IMS larning) aktiv va passiv elementlarini ajratishda ishlatiladi. Usulning asosiy afzalligi—appaturalarning soddaligi, jarayoning boshqaruvchanligi, sodda matematik modellar asosida diffuzion shakllarni oldindan aytish mumkinligidir. Himoya niqobi qo'llash bilan kirishmalar mahalliy diffuziyasi—planar texnologiyaning asosini tashkil qiladi. Diffuzion legirlashni yarimo'tkazgichlarga boshqa usullarda kirishmalar kiritish bilan ham qo'shib olib borilishi yarimo'tkazgichli asboblarda yangi turlari yaratilishiga olib keldi.

Kremniy yoki germaniyni o'tkazuvchanlik turini o'zgartirish uchun diffuziyadan foydalanishni 1952-yili birinchi bo'lib amerikalik olim Pfann taklif qilgan.

Yarimo'tkazgichli plastinkalar sirtida diffuzion tuzilmalarni tayyorlashda ichki tomon diffuziyani o'tkazish uchun legirlovchi kirishmaning yuqori konsentratsiyasi ancha yuqori temperaturalarda vujudga keltiriladi. Taglik sirtidagi kirishma konsentratsiyasi diffuziya jarayonida o'tkazilgan temperatura bilan aniqlansa, ichki tomon kirish chuqurligi jarayonning o'tkazilish vaqti bilan aniqlanadi.

Diffuziya usuli yarimo'tkazgich plastinkalar yoki unda o'stirilgan epitaksial qatlamlarga yarimo'tkazgich namuna o'tkazuvchanligiga nisbatan boshqa turdagi o'tkazuvchanlik yoki ancha kichik elektr qarshilik olish uchun keng qo'llaniladi. Birinchi holda ikki qutbli tranzistorni emitter va baza sohalari, maydon tranzistorlarning manba va paynovlari, integral sxemalarda elementlarni biri-biridan va umumiy plastinkadan ajratishni amalga oshirish mumkin. Ikkinchi holda — IMSlarda rezistorlar, kollektor yoki kontakt yaqinidagi sohalarda qarshilikni kamaytirish uchun yashirin n^+ , p^+ — sohalar vujudga keltirilib, omik kontakt sifatini yaxshilash mumkin.

Diffuziya usuli yana polikremniy qatlamlarni legirlash uchun ham qo'llaniladi.

Yaxshi impuls xossali tezkor tuzilmalarni tayyorlashda asosiy bo'lmagan tok tashiuvchilarning yashash vaqtini kamaytiruvchi va

yarimo'tkazgichning taqiqlangan zonasida chuqur sathlar hosil qiluvchi kirishmalarni kiritish uchun diffuziyadan foydalaniladi. Kremniy uchun bunday kirishmalar sifatida oltin yoki nikel ishlatiladi. Diffuzion qatlamlar qalinligi 0,1..100 mkm gacha bo'ladi.

Diffuzion legirlangan qatlamlarning asosiy xossalaridan biri, taglik yoki epitaksial qatlam hajmida kirishma konsentratsiyasining notekis taqsimlanishidir, ya'ni sirtida konsentratsiya eng katta va qatlam ichi tomon kamayib boradi.

13.2. Diffuziyada kirishmalar taqsimoti

Yarimo'tkazgichda kirishma atomlarining diffuziyasi atomlar konsentratsiyasi kamayishi yo'nalishida tartibsiz issiqlik harakati tufayli yuz beradi. Atomlar yo vakansiya bo'yicha, yoki tugunlar orasi bo'yicha ko'chadi. Yarimo'tkazgichlarda asosiy legirlanuvchi kirishmalar asosan vakansiya bo'yicha, qolgan kirishmalar esa – tugunlar orasi bo'ylab yuz beradi. Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida kirishma atomlari taqsimotining ikki holi bor:

I) agar boshlang'ich paytda tekis yupqa sirt qatlamidan chegaralangan miqdordagi kirishma manbayidan diffuziya ketsa, unda konsentratsiya taqsimoti ko'rinishi quyidagicha bo'ladi:

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (\text{III.41})$$

bu yerda N -diffuziyaning har qanday vaqtda o'zgarmaydigan (sirtning birlik maydoniga to'g'ri keluvchi) kirishma atomlari zichligi, at/sm²; x -berilgan konsentratsiyaga to'g'ri keluvchi chuqurlik, sm; D -kirishmaning diffuziya koeffitsienti sm²/s; t -diffuziya davomiyligi, s.

Diffuzion p - n o'tishni hosil bo'lish sharti, kompensatsiyalanmagan kirishmalarning natijalovchi konsentratsiyasi $C(x, t)=0$ bo'lganda, diffuzion p - n o'tishning chuqurligi hisoblashlar bo'yicha quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \cdot \sqrt{\ln(C_o / C_b)}, \quad (\text{III.42})$$

bu yerda C_b - yarimo'tkazgich plastinkadagi kirishma konsentratsiyasi, $x=0$ da (sirtida) kirishma konsentratsiyasi

$$C_o = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (\text{III.43})$$

Ko'pchilik amaliy hollar uchun p - n o'tishning joylashish chuqurligi

$$x_j \approx 6\sqrt{Dt}. \quad (\text{III.44})$$

2) agar diffuziya kirishma atomlari o'zgarmas C_o konsenratsiya manbayidan ketsa, unda taqsimot quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$C(x,t) = C_o \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (\text{III.45})$$

Bu ifodada erfc — xatoliklarning qo'shimcha funksiyasi, unda (III.41) ifodadagi $\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$ ni soddalashtirib

$$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \approx \exp \left[\left(-\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + 0,3 \right)^2 \right], \quad (\text{III.46})$$

ko'rinishga ega bo'lish mumkin.

Bu holat uchun p - n — o'tishning joylashish chuqurligi

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \cdot (\sqrt{\ln(C_o / C_b)} - 0,3). \quad (\text{III.47})$$

Diffuziya usulida olingan elektron-kovak o'tishlarda kirishma taqsimoti tekis bo'lib, egriligi a konsentratsiya gradienti bilan xarakterlanadi.

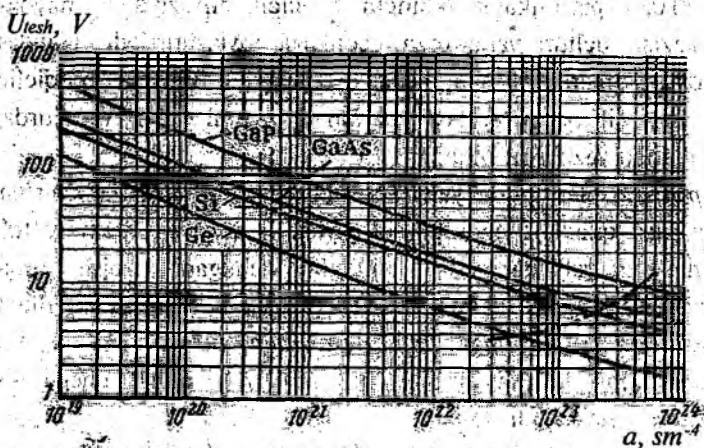
Yarimo'tkazgichli ko'pchilik asboblarning asosini elektron-kovak o'tish tashkil qilib, uning eng asosiy parametrlaridan biri teshilish kuchlanishidir. Bu parametr yarim o'tkazgichni qaysi materialdan tayyorlanganligagina bog'liq bo'lmasdan, p - n o'tishning sirt holati va geometrik ko'rinishi hamda p - n o'tishdagi kirishmalar konsentratsiyasi gradientiga kuchli bog'liq. Shuning uchun biz bu yerda texnologik tayyorlanish bo'yicha teshilish kuchlanishining kirishma konsentratsiyasiga bog'liqligining empirik ifodalarini ko'rsatamiz.

Xona temperaturasida Ge, Si, GaAs va GaP materiallar asosida tayyorlangan chiziqliy p - n o'tishlar uchun quyun teshilish kuchlanishining kirishma konsentratsiyasi gradientiga bog'liqligi III.29-rasmda ko'rsatilgan. O'zgarmas gradientli yassi p - n o'tishlar uchun teshilish kuchlanishlarini aniqlashda taxminiy hisob fomulasidan ham foydalanish mumkin

$$U_{tesh} = 60 \cdot \left(\frac{\Delta E}{1.1} \right)^{1.2} \cdot (3 \cdot 10^{20} / a)^{0.4}, \quad (\text{III.48})$$

bu yerda ΔE - taqiqlangan zona, eV larda; a -kirishmalar konsentratsiyasi gradienti, sm^{-4} .

Albatta, keskin va tekis p - n o'tishlar tushunchalari ideallashtirilgan. Taglik plastinkada diffuziya chuqurligi ortishi va kirishma miqdori ancha yuqori bo'lishi o'tishning ancha tekis bo'lishiga olib keladi va unda fazaviy zaryad sohasida kirishmalar taqsimoti chiziqli o'tish modeliga mos keladi. Taglik plastinkada diffuziya chuqurligi va kirishma konsentratsiyasi qancha kam bo'lsa, shunchalik u keskin o'tishga yaqinlashadi.



III.29-rasm. Elektron-kovak o'tishlar Ge, Si, GaAs va GaP yarimo'tkazgichlar asosida olinganlar uchun teshilish kuchlanishining kirishma konsentratsiyasi gradientiga bog'liqligi.

13.3. Planar texnologiyada diffuziya

Planar soʻzi inglizchadan olingan boʻlib, *plane* — soʻzi tekislik maʼnosini anglatadi. Hozirgi vaqtda tayyorlanadigan asboblarda va integral mikroshema yarimoʻtkazgichning tekis plastinkasida maxsus usullar yordamida koʻp sonli kichik oʻlchamli elementlar (*p-n* oʻtishlar, kontaktlar, sigʻimlar, tranzistorlar va h.k.)dan bir butun tuzilma koʻrinishida olinadi, Ana shu texnologiyani planar texnologiya deyiladi

Planar texnologiyada ayniqsa, yaxshi nazoratga olingan kichik sirt konsentratsiyasini olish zarur boʻlsa, diffuziya ikki bosqichda olib boriladi. Oldin yuqori sifatli taglikda oʻzgarmas sirt konsentratsiyani hosil qilish uchun qisqa diffuziya — kiritish amalga oshiriladi (taxminan 1000°–1050°C da). Bunda sirt konsentratsiyasi yo kirishmaning chegaraviy eruvchanligidan, yoki diffuziant manbadagi kirishma miqdoridan aniqlanadi.

Qisqa diffuziya — kiritishdan soʻng taglik-plastinkalar pechkadan chiqarib olinadi va kiritish bilan oksidlovchi atmosferada kremniy sirtida hosil boʻlgan oynasimon qatlam (masalan, bor silikatli shisha) ketkaziladi. Toza plastinkalar ikkinchi bosqich diffuziya — haydash amalini oʻtkazish uchun yana toza pechkaga joylashtiriladi. Haydash ancha yuqori temperatura sharoitida oʻtkaziladi. Birinchi bosqichda olingan yupqa diffuzion qatlam uchun chegaralangan miqdordagi kirishmalar manba vazifasini oʻtaydi.

Planar *p-n* oʻtishlar sodda yassi oʻtishlardan geometrik koʻrinishlari bilan keskin farq qiladi. Planar texnologiyada *p-n* oʻtish kremniy toʻrt oksid bilan himoyalangan sirt pardada ochilgan tirqish orqali yarimoʻtkazgich hajmiga kirishma diffuziyasi bilan hosil qilinadi. Bunda kirishma faqat ichkari tomonga emas, himoya niqobi osti sirti boʻylab ham diffuziyalanib plastina sirtiga chiquvchi *p-n* oʻtish chegarasini passivlashtirishga olib keladi.

Hosil boʻlgan *p-n* oʻtish koʻrinishi III.30-rasmda berilgan. Planar *p-n* oʻtishlarning joylashishi chuqurligi kichikligi sababli, odatda 10 mkm dan oshmaydi. Shuning uchun ham ularda himoya niqobi osti qirgʻoqlarida egrilik juda katta boʻlmaganligi uchun mahalliy elektrik maydonni oshirishga va quyun teshilish kuchlanishini kamayishiga olib keladi.

Kichik planar o'tishlarning tuzilmasi yassi qismi keskin p - n o'tishga o'xshaydi. III.31-rasmda yon chekkalari silindrik va sferik (uzuq chiziqlar)li keskin p - n o'tish uchun quyun teshilish kuchlanishining kirishmalar konsentratsiyasiga bog'liqligi ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, p - n o'tish yon chegara egrilik radiusi r_i o'tish chuqurligi x_i joylashishiga teng. Yassi qismi uchun esa, egrilik radiusi cheksizlikka intiladi va teshilish kuchlanishi eng katta bo'ladi.

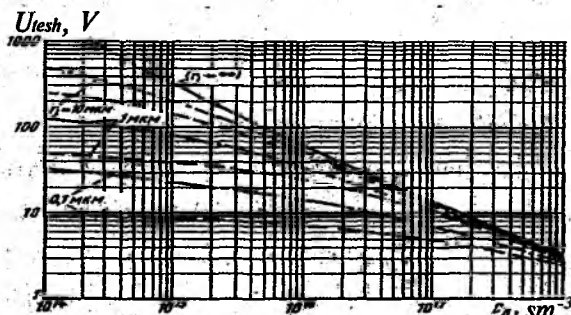
Egrilik radiusi r_i qiymatlari va bir xil kirishma konsentratsiyalarda sferik o'tishda teshilish kuchlanishi silindrik o'tishga nisbatan kichik.

Planar p - n o'tishlarda teshilish kuchlanishilarini Si, Ge, GaAs va GaP materiallar uchun quyidagi formuladan foydalaniladi :

$$U_{tesh}^* = U_{tesh} \left\{ \left[(n + \gamma + 1) \cdot \gamma^n \right]^{\frac{1}{n+1}} - 7 \right\} \quad (III.49)$$

bu yerda $U_{tesh} = 60 \cdot (\Delta E / 1,1)^{1,5} \cdot (10^{16} / C_b)^{0,75}$ (III.49')—keskin p - n o'tishlar uchun aniqlangan quyun teshilish kuchlanishi, unda ΔE —taqiqlangan zona kengligi, C_b —kuchsiz legirlangan sohadagi kirishma konsentratsiyasi, sm^{-3} , silindrik o'tish uchun $n=1$ va sferik o'tish uchun $n=2$; $\gamma=r_i/\omega$ (ω —keskin p - n o'tishning fazoviy zaryad sohasi kengligi).

O'tish egrilik radiusi kichik va $\gamma \rightarrow 0$ da qavs ichidagi ko'paytma nolga intiladi va teshilish kuchlanishi kamayadi. Agar p - n o'tish chuqurligi yuqori, egrilik radiusi katta va $\gamma \rightarrow \infty$ bo'lsa, unda ko'paytma birligacha ortadi va III.49 ifoda (III.49) formulaga keladi.



III.31-rasm.

Turli geometrik keskin p - n o'tishlar uchun quyun teshilish kuchlanishining kirishma konsentratsiyasiga bog'liqligi

13.4. Diffuzion tuzilmalarni hisoblash usullari

Diffuziya yetarli darajada chegaralangan oraliq temperaturalarda o'tkaziladi. Masalan, kremniy uchun bu oraliq 1100-1300°C bo'lib, ikki bosqichli diffuziyada, ya'ni birinchi bosqich (kiritish)da temperatura 1150°C bo'lsa, ikkinchi bosqich (haydash)da temperaturani 1250°C qilib olinadi. Temperaturani bunday tanlanishiga sabab, yuqorida ko'rsatilgan temperaturalardan past temperaturalarda diffuziant kirishmalarning diffuziya koeffitsienti juda kichik va diffuziya chuqurligi kichkina. 1300°C dan yuqori temperaturalarda kremniy sirtidagi buzilishlar hisobiga diffuzion qatlamlar qoniqarsiz bo'ladi.

Diffuzion jarayonlar asosan ochiq yoki yopiq kvars shisha naylarda o'tkaziladi. Bulardan ko'p qo'llaniladigani ochiq nayda, qattiq, suyuq va gaz ko'rinishidagi diffuziant manbalarda o'tkazishdir. Kremniyda asosiy diffuziantlar bor va fosfor hisoblanadi. Planar asboblarni tayyorlashda diffuzion jarayon ikki bosqichda o'tkaziladi. Birinchi bosqich (kiritish)da kremniy sirtida *erfc*-taqsimotli kirishmalarnig yupqa diffuzion qatlami vujudga keltiriladi. Ikkinchi bosqich (haydash)da yarimo'tkazgich plastinalar diffuzion atomlari bo'lmagan muhitda bir zonali pechkada qizdirilib, bunda kirishmalarning diffuzion qayta taqsimlanishi yuz beradi. Ikkinchi bosqich kirishma miqdori chegaralangan manbadan diffuziyaga to'g'ri keladi.

Diffuzion tuzilmalarni hisoblashda ikki turdagi masala; berilgan texnologik rejim asosida aralashma taqsimot kesimini aniqlash (to'g'ri masala) va tuzilmada kirishmalar taqsimotini oxirgi parametrlariga asosan diffuziya jarayon rejimini aniqlash (teskari masala) yechiladi.

Ikki bosqichli diffuziya jarayoni uchun kirishma taqsimotini hisoblash. Yuqorida ko'rdikki, planar texnologiyada diffuziya ikki bosqichda olib boriladi. Kirishma kiritish bosqichi C_{01} -o'zgarmas sirt konsentratsiyasida t_1 qisqa vaqtda amalga oshiriladi. Kiritishda kiritilgan N kirishma

atomlari miqdori t_2 vaqt davomida sirt konsentratsiyasi o'zgaruvchi haydashda diffuziant manbasi vazifasini o'taydi:

$$C_{o2} = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}}$$

Ikki bosqichli diffuziya holida kirishmalar kesimini ko'rish uchun kiritish va haydash davomiyligi va temperaturasini bilish kerak. Temperatura T_1 uchun, kirishma diffuziya koeffitsienti D_1 va sirt konsentratsiyasi C_{o1} kirishmalarni chegaraviy eruvchanligidan aniqlanadi.

Kiritish bosqichida kiritilgan kirishma atomlari sirt zichligi kirishma taqsimotini integrallash bilan aniqlanadi:

$$N = \int_0^{\infty} C(x) dx = \int_0^{\infty} C_{o1} \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} dx = 2 \cdot C_{o1} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} \quad (\text{III.50})$$

Haydash bosqichidan so'ng kirishma taqsimoti

$$C(x, t) = \frac{2C_o}{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) \quad (\text{III.51})$$

ifoda bilan aniqlanadi.

1-misol. Elektrik o'tkazuvchanligi p -tur, solishtirma qarshiligi 10 Om-sm bo'lgan kremniyga ikki bosqichli diffuziya bilan fosforni $T_F=1050^\circ\text{C}$, $t_1=10$ min, $T_2=1150^\circ\text{C}$, $t_2=2$ soat rejim bilan olingan p - n o'tishning joylashish chuqurligi va aniqlangan kirishma taqsimoti kesimi chizilsin.

1. S_{o1} ni aniqlaymiz. Buning uchun kitob oxirida berilgan rasmdan foydalanib, $T=1050^\circ\text{C}$ temperatura uchun fosforning kremniydagi chegaraviy eruvchanligi $1,2 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}$ ekanligini topamiz. $C_o=1,2 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}$ deb olamiz.

2. D_1 ni aniqlaymiz. Fosforni $T=1050^\circ\text{C}$ temperaturada kremniy uchun fosforning diffuziya koeffitsientini kitob oxirida berilgan rasmdan foydalanib topamiz. Unda $D_F=2,5 \cdot 10^{-14} \text{ sm}^2/\text{s}$ ekanligini aniqlaymiz.

3. Birinchi bosqich diffuziya (kiritish)dan atomlarning sirt zichligi N ni aniqlaymiz

$$N = 2C_{o1} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} = 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{21} \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^{-14} \cdot 10 \cdot 60}{3,14}} = 5,2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}.$$

4. Yuqoridagidek fosforning diffuziya koeffitsienti D_2 ni aniqlaymiz. 2-rasm, a (kitob oxiriga qaralsin) yordamida $T=1150^\circ\text{C}$ da $D_2 = 4 \cdot 10^{-13} \text{ sm}^2/\text{s}$ bo'lishligini topamiz.

5. Taqsimot egri chiziqlarini tuzamiz:

$$\begin{aligned} C(x, t) &= \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 D_2 t_2}\right) = \\ &= \frac{5,2 \cdot 10^{15}}{\sqrt{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot 4 \cdot 10^{13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}\right) = \\ &= 5,5 \cdot 10^{19} \exp\left(-\frac{x^2}{1,5 \cdot 10^{-8}}\right) \end{aligned}$$

Haydashdan so'ng fosfor konsentratsiyasining taqsimot kesimi III.32-rasmida ko'rsatilgan. Solishtirish maqsadida shu rasmni o'zida kiritish bosqichidan so'ng fosforning taqsimlanish egri chizig'i berilgan.

$$C(x, t) = C_{o1} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} = 1,2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{7,75 \cdot 10^6}$$

p - n o'tishning joylashish chuqurligini aniqlaymiz. (III.38) formulaga asosan

$$x_i = 2\sqrt{D_2 t_2} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{C_{o2}}{C_b}\right)}$$

Namuna plastinkadagi kirishma konsentratsiyasini $\rho = f(S)$ egri chiziq yordamida $\rho=10 \text{ Om-sm}$ uchun $C_b=1,2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bo'lishligini aniqlaymiz (kitob oxiridagi Q.3-rasm, b ga qaralsin).

$$\text{Unda } x_i = 2\sqrt{4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60} \cdot \sqrt{2,3 \cdot \lg\left(\frac{5,5 \cdot 10^{19}}{1,2 \cdot 10^{15}}\right)} = 3,5 \cdot 10^{-4} = 3,5 \text{ mkm}$$

Soddalashgan (III.50) formula bo'yicha

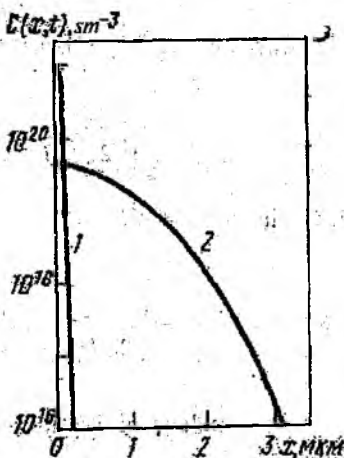
$$x_i = 6\sqrt{D_2 t_2} = 6\sqrt{2,3 \cdot 10^{-9}} = 3,2 \text{ mkm}$$

yeterli darajada aniq qiymatga ega.

Ketma-ket ikkilama diffuziyada kirishma taqsimotini hisoblash. Diffuzion tranzistorlar, tiristorlar, varikaplar va juda ko'pchilik boshqa asboblarda tayyorlashda turli elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan qatlamlarni yuzaga keltiruvchi kirishmalarni ketma-ket diffuziya yo'li bilan aktiv tuzilmalar olinadi. Agar oldin parametrlari C_{oA} , D_A , t_A bo'lgan akseptor kirishma, keyin parametrlari C_{oD} , D_D , t_D donor kirishma n -turdagi elektr o'tkazuvechanlikli yarimo'tkazgichga konsentratsiyasi C_b bo'lgan kirishma tekis legirlangan n -turdagi elektr o'tkazuvchanlikli yarimo'tkazgichga ikkilangan ketma-ket diffuziya qilinsa, unda konsentratsiyaning natijaviy taqsimoti quyidagi ko'rinish oladi:

$$C(x, t) = C_{oA} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_A t_A}\right) - C_{oD} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_D t_D}} - C_b \quad (\text{III.52})$$

Shunday qilib, akseptor va donor kirishmalar o'zaro bir-birini kompensatsiyalaydi, unda hisoblashda konsentratsiyalar taqsimot kesim qiymatlari musbat (akseptor uchun) va manfiy (donor uchun) belgilar beriladi yoki teskarisi. Birinchi diffuziya ancha chuqur, keyingilari esa ancha sayoz, biroq yuqori konsentratsiyada bo'lishi kerak. Shuning uchun ketma-ket ikkilangan diffuziyada (III.48) formulaga asosan n - p - n -tuzilma, agar kirishma o'rni o'zgartirilsa, p - n - p tuzilma olinadi. Xuddi shu usullarda tranzistor olinadi. Kichik sirt konsentratsiya va katta chuqurlikdagi birinchi diffuziyani bazali deyiladi. U tranzistor tuzilmaning p -sohali bazasini yaratish uchun xizmat qiladi. Yuqori sirt konsentratsiya va kichik chuqurlikdagi ikkinchi diffuziyani emitterli deyiladi. U elektrik o'tkazuvchanligi n -turli emitter sohani olish uchun mo'ljallangan.



III.32-rasm. Kiritish (1) va haydash (2) dan so'ng fosfor taqsimotini hisoblashlar natijasida olingan kesimi

Baza p -sohani olish uchun diffuziya ikkita bosqichda olib borilganligi uchun uning yig'indi taqsimoti (III.52) Gauss egriligi ko'rinishida bo'ladi. Unda emitter diffuziya odatda bitta bosqichda bo'lib, uni kirishma taqsimot funksiyasi $erfc$ funksiya bilan ifodalanadi. Agarda emitter diffuziya vaqtida akseptor kirishmaning aralashishi sezilarli yuz bermasa, (III.48) ifoda to'g'ri bo'ladi, unda umumiy holda

$$C(x,t) = C_{od} \exp \left[-\frac{x^2}{4(D_A t_A + D_A^* t_D)} \right] - C_{od} erfc \frac{x}{2\sqrt{D_D t_D}} - C_B, \quad (III.53)$$

bu yerda

$$C_{od} = \frac{N_s}{\sqrt{\pi(D_A t_A + D_A^* t_D)}}; \quad (III.53')$$

bunda D_A^* -donorlar diffuziyasi temperaturasi akseptorlar diffuziya koeffitsienti.

Emitter p - n o'tishning joylashish chuqurligini aniqlash uchun yig'indi konsentratsiyani nolga tenglashtiramiz va taglikka legirlangan kirishmalar konsentratsiyasi C_b diffuziyalanuvchi donorlar va akseptorlar konsentratsiyasiga nisbatan ko'p marta kichikligini hisobga olamiz. Unda (III.52) taqsimot uchun

$$C_{od} erfc \frac{x_{is}}{2\sqrt{D_D t_D}} = C_{od} \exp \left(-\frac{x_{is}}{4D_A t_A} \right) \quad (III.54)$$

$erfc$ funksiya taqribiy ifodasidan foydalanib,

$$C_{od} \exp \left[\left(\frac{x_{is}}{2\sqrt{D_D t_D}} + 0,3 \right)^2 \right] = C_{od} \exp \left(-\frac{x_{is}}{4D_A t_A} \right) \quad (III.55)$$

ifodasini o'zgartirib,

$$x_{is} = \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{D_D t_D}} + \frac{0,3}{x_{is}} \right)^2 - \frac{1}{4D_A t_A} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{\ln \left(\frac{C_{od}}{C_{od}} \right)}. \quad (III.56)$$

Bu tenglamani itaratsiya usulida yechamiz va uning boshlang'ich qiymati.

$$x_{is} = 6\sqrt{D_D t_D}, \quad (III.57)$$

unda

$$x_{i2} \approx \left(\frac{1}{4D_D t_D} - \frac{1}{4D_A t_A} \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{\ln \left(\frac{C_{oD}}{C_{oA}} \right)}. \quad (\text{III.58})$$

Emitter p - n o'tishning joylashish chuqurligini yanada aniqroq aniqlangan qiymati

$$x_{i2} = \left[\left(\frac{1}{2\sqrt{D_D t_D}} + \frac{0,3}{x_{i21}} \right)^2 - \frac{1}{4D_A t_A} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{\ln \left(\frac{C_{oD}}{C_{oA}} \right)}, \quad (\text{III.59})$$

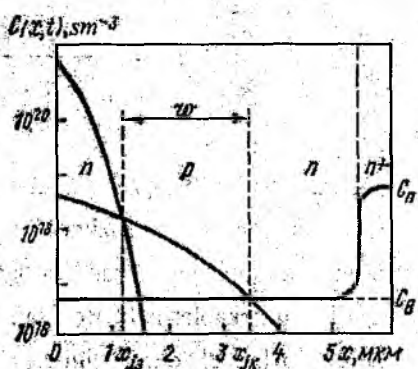
Kollektor o'tishning joylashish chuqurligi aniqlashda emitter diffuziyada uning siljishini hisobga olish kerak, shuning uchun

$$x_{jk} = 2\sqrt{D_A t_A + 4D_A^* t_D} \cdot \sqrt{\ln \left(\frac{C_{oD}}{C_b} \right)}, \quad (\text{III.60})$$

bu yerda C_{oA} (III.49') formuladan aniqlanadi. Bu ifodalarni konkret hollar uchun, ya'ni n - p - n tranzistor uchun kirishma taqsimotini III.33-rasmda ko'rish mumkin.

Diffuziya rejimlarini aniqlash. Endi teskari masalani yechishga e'tibor beramiz. Teskari masala katta amaliy ahamiyatga ega, chunki diffuziya parametrlari bo'lmish jarayon davomiyliги va temperaturalarini bilish texnologik jarayonlarni o'ziga xos xususiyatlari va texnologik qurilmalar imkoniyatlari aniqlanadi.

Teskari masalani yechish Dt ko'paytmani aniqlashga olib keladi. Ko'pincha temperatura T berilgan bo'ladi va shu temperatura uchun tajribalardan topilgan diffuziya koeffitsient qiymatidan diffuziya



III.33-rasm. Ikkilama ketma-ket diffuziya yo'li bilan olingan n - p - n -tranzistorda kirishmalar taqsimoti.

vaqti t aniqlanadi.

Ba'zan rejimni tanlashda diffuziya koeffitsientining temperaturaga bog'liqligini hisobga olmasdan kirishmalarning chegara eruvchanligini hisobga olish ham mumkin.

Kirishma taqsimotining berilgan parametrlari asosida diffuziya rejimini aniqlash. Haydash bosqichi yoki bir bosqichli diffuziyani hisoblash uchun teskari masala yetarlicha oddiy. Deylik, oldindan chegaralangan miqdordagi kirishma ion kiritish yordamida hosil qilingan qatlamdan diffuziya o'tkazilgan bo'lsa, unda

$$x_i = 2\sqrt{Dt} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{C_o}{C_B}\right)}, \quad (\text{III.61})$$

ifodagaga asosan

$$Dt = \frac{x_i^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{C_o}{C_B}\right)}. \quad (\text{III.62})$$

Endi yo temperatura, yoki jarayon vaqti tanlanadi. Unda ishlab chiqarish talabiga asosan kichik vaqtlar uchun diffuziya koeffitsientini hisoblab topishimiz mumkin:

$$D = \frac{x_i^2}{4t \cdot \ln\left(\frac{C_o}{C_B}\right)}. \quad (\text{III.63})$$

Ketma-ket diffuziya rejimlarini aniqlash. Ketma-ket ikkilama diffuziyada emitter diffuziya bir jinsli bo'lmagan legirlangan baza sohasiga tomon yo'nalgan bo'lganligi uchun texnologik rejimlarni aniqlash murakkablashadi. Boshlang'ich ma'lumotlar kollektor va emitter o'tishlari joylashish chuqurligi x_{ik} , x_{ie} , epitaksial qatlamda kirishmalar konsentratsiyasi C_b , diffuziyalanuvchi akseptor va donor kirishmalar sirt konsentratsiyasi C_{oA} , C_{oD} , deb belgilanadi. Aniqlash kerak bo'lgan parametrlar baza diffuziyasida akseptor kirishmalar kiritish (T_A , t_A , N_A)

va haydash (T_{Ar} , t_{Ar}) rejimlari emitter diffuziyasida donor kirishmalar uchun haydash (T_D , t_D) rejimi. Baza diffuziyasini hisoblash uchun xuddi bir tekis legirlangan yarimo'tkazgichli ikki bosqichli diffuziya rejimi hisoblashga o'xshab ketadi. Hisoblashlarni soddalashtirish emitter diffuziya jarayonida akseptor kirishmalar taqsimoti deyarli siljimaydi, deb hisoblaymiz, ya'ni

$$(Dt)_{er} = D_{Ar}t_{Ar} + D_{Az}t_D \approx D_{Ar}t_{Ar}, \quad (\text{III.64})$$

bu yerda D_{Az} -emitter diffuziyada akseptor kirishmalar diffuziya koeffitsienti.

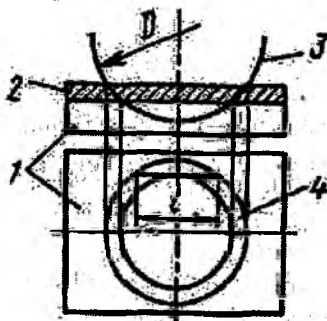
Emitter diffuziya rejimini hisoblash uchun emitter o'tishning joylashishi chuqurligini aniqlashdan olingan tenglik (III.59) dan foydalaniladi. $D_D t_D$ ko'paytmaga nisbatan yechib, temperatura yoki diffuziya davomiyligini aniqlanadi.

$$D_A t_D = \frac{x_i^2}{4 \sqrt{\ln\left(\frac{C_{oA}}{C_{oD}}\right) + x_{ib}^2(4D_A t_A) - 0,3}^2}. \quad (\text{III.65})$$

13.5. Diffuzion tuzilmalar parametrlarini nazorat qilish

Diffuzion qatlamlarni nazorat qilish, asosan, olingan $p-n$ o'tishning joylashishi chuqurligini, sirt qatlami o'tkazuvchanligi va kirishma atomlarining sirt konsentratsiyasi kabi parametrlarni aniqlash bo'yicha olib boriladi.

Elektron-kovak o'tishning joylashish



III.34-rasm. Diffuzion qatlamli plastinkada sferik shlif tayyorlash jarayoni sxemasi:

1-yarimo'tkazgich plastinka; 2- $p-n$ o'tish; 3-po'lat sharcha; 4-shlif tus olgan p -sohasi.

chuqurligini aniqlashning ancha ko'p tarqalgan usullardan biri shlifga rang berish usulidir.

Joylashish chuqurligi o'lchamini (bir mikrometr va undan kichik tartibli) o'lchash uchun sferik shlifdan foydalanish qulay. Uni olish uchun plastinka sirtiga diametri 35-100 mm li sharcha qisiladi va sharchani qo'zg'almas o'q atrofida aylantirish bilan plastinka sirtida chuqur o'yiqlik sfera hosil bo'ladi. Buning uchun aylanuvchi shar va kristall plastinka kontakt oralig'iga abraziv suspenziya beriladi. O'lchamlar aniqligi yuqori bo'lishi uchun abraziv material donasining diametri 1mm dan oshmasligi kerak.

p - n o'tish chegarasini ochmoq uchun sferik o'yiqlik chuqurligi p - n o'tishning joylashish chuqurligidan katta bo'lishi kerak. Chegarani 48%li fluorid kislota (HF) ga 70% li nitrat kislotani ozgina 0,05%-0,1% gacha qo'shishdan tayyorlangan yedirgichda oksidlanish natijasida p -sohani tuslanishi bo'yicha aniqlanadi. Diffuzion p - n o'tishning joylashish chuqurligi

$$x_j = \frac{\lambda^2}{4D}, \quad (\text{III.66})$$

ifoda bilan aniqlanib, unda λ —sferik chuqurlikda hosil bo'lgan kontur egri chizig'ining ikki nuqtasini birlashtiruvchi to'g'ri chiziq uzunligi (III.34-rasm) mikroskop yordamida o'lchanadi; D -shar diametri.

O'lchovlar aniqligini oshirish uchun bir qancha shliflar tayyorlanadi (5 tagacha), keyin olingan natijalar o'rtachalashtiriladi.

Sirt qarshiligini o'lchashning eng ko'p tarqalgan usullaridan biri, to'rt zondli usuldir. Sirt qarshiligini o'lchash xatoligi odatda 5%-10%dan oshmaydi.

Legirlangan kirishmalar sirt konsentratsiyasini aniqlash uchun jarayonni o'tkazish sharoitiga bog'liq holda diffuzion sohada kirishmalar taqsimot xarakterini bilish zarur.

Kirishmalarning sirt konsentratsiyasini aniqlash maqsadida tajribada olingan diffuzion $p-n$ o'tish joylashish chuqurligi va sirt qarshiligi qiymatlaridan namuna kristallarining turli konsentratsiyali kirishmalarda turli kirishma diffuzion taqsimotlari uchun sirt konsentratsiyasining grafik bog'lanishlari olinadi, ya'ni

$$N_o = f \left[\frac{1}{\rho_s x_j^2} \right] \quad (III.67)$$

Nazorat savollari

1. Diffuziyaning qanday mexanizmlarini bilasiz?
2. Kirishmalarning sirt konsentratsiyasining fizik ma'nosini ayting.
3. O'zgarmas va chegaralangan manbalarda kirishma diffuziyasi taqsimot tenglamalarini yozing.
4. Diffuzion tuzilmalarda $p-n$ o'tishning joylashish chuqurligini aniqlash ifodalarini yozing.
5. Planar texnologiyada diffuziya deganda nimani tushunasiz?
6. Kremniyda kirishmalarning chegaraviy eruvchanligi qanday aniqlanadi?
7. Diffuziya-haydash va diffuziya- kiritish usullarini tushuntiring?
8. Diffuziya usulida $p-n-p$ tuzilmalar qanday olinadi ?

14-BOB. IONLAR KIRITIB LEGIRLASH USULIDA TUZILMALAR OLIISH

14.1. Umumiy ma'lumotlar

Yarimo'tkazgichdagi kirishmalar haqidagi 2-bobda bu masalalar umumiy tarzda qaralgan edi. Oldingi bobda va ushbu bobda ular tuzilmalar olish nuqtayi nazaridan ko'riladi.

Ionlar kiritib legirlash energiyasi bir necha kiloelektron volt dan bir necha megaelektron-voltgacha (odatda 20-100 keV) bo'lgan ionlashgan atomlarni bombardirovka yo'li bilan taglikning sirt qatlamiga boshqargan holda kiritishdir.

Ion kiritilib legirlash jarayoni yarimo'tkazgich sirt qatlamining elektrofizik xossalarini o'zgartirish xususiyatiga ega.

Hozirgi vaqtda ion kiritib legirlash usuli yarimo'tkazgichlar texnologiyasida ancha afzal bo'lib, kelajakda electron-kovak o'tishli tuzilmalar hosil qilishning boshqa usullari (qotishmali, diffuziya va epitaksiya usullari) o'rnini olishi mumkin.

Bu afzallik ion kiritib legirlashning qattiq jism va legirlovchi modda o'zaro ta'siri temperaturaga bog'liq emasligidan kelib chiqadi. Birinchidan, bu usul universal, chunki qattiq jismga (metall, dielektrik, yarimo'tkazgich) har qanday kirishmani kiritish mumkin; ikkinchidan, legirlashning izotop tozaligini ta'minlaydi, legirlangan qatlamlarga nazorat qilib bo'lmaydigan kirishmalar kirib qolishidan amaliy jihatdan saqlaydi; uchinchidan, ion kiritib legirlash juda past temperaturalarda o'tkaziladi (ba'zi hollarda xona temperaturasida). Legirlangan qatlamlarga issiqlik ishlovi (otjig) berish diffuzion kiritib legirlashga nisbatan ancha past temperaturalarda o'tkaziladi.

Nihoyat, ionlarning energiyasini o'zgartirish yo'li bilan barcha uch o'lchov yo'nalishida kirishmalar taqsimotini boshqarish; yarimo'tkazgich

hajmi sirti ostida legirlangan qatlamlarni olish; oqimda ion toki zichligi va nurlantirish vaqtini o'zgartirish hisobiga kirishmalarni aniq dozalash; ularni dielektrik va metall qoplamalar orqali kiritish; legirlash temperaturasi muvozanat konsentratsiyasidan yuqori miqdorda kirishmalar kiritish imkoniyatiga ega.

Usulni qo'llanishdagi chegaralashlar quyidagicha:

- 1) ionlar kirish chuqurligi kichikligi hisobiga $p-n$ o'tishlarning joylashish chuqurligi kichik bo'ladi;
- 2) texnologik qurilma murakkabligi;
- 3) texnika xavfsizligi bo'yicha maxsus qoidalarga rioya qilishning o'ta zarurligi va boshqalar.

Ion legirlashning ancha keng qo'llanilishiga, ayniqsa kirishma atomlarini dozalangan miqdorda kiritish va undan kirishma taqsimot kesimini hosil qilish uchun keyingi diffuziyaon haydash manbayi sifatida foydalanish sabab bo'lmoqda.

Undan tashqari, ion kiritish qo'shqutbli tranzistorlarning yupqa baza sohalarim yaratish uchun, MDYa-tranzistorlar chegara kuchlanishlarini boshqarish va boshqa maqsadlar uchun foydalaniladi.

Ion legirlash bilan olingan tuzilmalarni nazorat qilish uchun kirishma atomlar taqsimoti kesimi va zaryad tashuvchilarning samarali sirt konsentratsiyasi tekshiriladi.

14.2. Ionlar kiritilgan tuzilmalarni hisoblash usullari

Ion legirlashni amalga oshirish texnologiyasi asoslari qo'llaniladigan kirishmalar, ion kiritib legirlashning fizik asoslari kitobning I qism 2-bobida berilgan.

1. Ion legirlangan tuzilmalarni texnologik hisoblashlarda xuddi diffuzion tuzilmalarga o'xshash to'g'ri va teskari masalalar uchraydi. To'g'ri masala uchun misol qilib, berilgan ionlarning energiya va

nurlanish dozasi uchun konsentratsiya taqsimot kesimini ko'rsatish mumkin.

Moddaga ionning kirish chuqurligi yugurish bilan xarakterlanadi. Kristallda alohida ionlarning traektoriyalari singan chiziqli, har biri to'g'ri chiziqli qism va to'la uzunlikka o'xshashligi bilan bir- biridan farq qiladi. Alohida ionlarning yugurishlarini barcha yig'indisi o'rtacha to'la yugurish R , yugurishning o'rtacha kvadratik og'ishi ΔR qiymatlari bo'yicha tasodifiy kattaliklar normal taqsimoti qonuni bo'yicha guruhlariga bo'linadi. Amaliy ahamiyatga ega bo'lgani o'rtacha normal yugurish R_p — ionning boshlang'ich tezlik yo'nalishidagi o'rtacha to'la yugurish traektoriyasining proyeksiyasi va uning o'rtacha kvadratik og'ishi ΔR_p .

Kiritilgan ionlarning konsentratsiya taqsimot kesimi nurlantirilgan qatlam chuqurligi bo'yicha o'rtacha normal yugurishlar taqsimoti bilan aniqlanadi. Ionlar yugurishlarini hisoblashlarda kristallda atomlar tartibsiz taqsimlangan hol uchun deb qaraladi. Ionlar oqimi shunday moddalarga tushadiki, unda atomlar bilan to'qnashish tasodifiy bo'lib, yugurishlar taqsimoti tasodifiy taqsimot kattaliklari bilan yoziladi. Xuddi shunday hol monokristallar uchun ham kuzatiladi. Chunki, ionlar oqimi plastina sirtiga turli yo'nalishlarda tushishi mumkin. Bu holda kiritilgan atomlar taqsimoti kesimi Gauss egri chizig'i bilan ifodalanadi:

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - R_p)}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \quad (\text{III.68})$$

Bunda N - nurlantirish dozasi, ion/sm²; R_p -o'rtacha normal yugurish qiymati;

ΔR_p - o'rtacha normal yugurishning kvadrat og'ishi.

Ion legirlashda kirishmalarning eng yuqori konsentratsiyasi diffuzion kiritib legirlashga o'xshab sirtidan emas, $x=R_p$ chuqurlikda aniqlanadi:

$$C_{\max}=0,4N/\Delta R_p. \quad (\text{III.69})$$

Ion legirlash bilan epitaksial qatlamda tranzistor tuzilmaning olinishini ko'ramiz.

Epitaksial qatlami n turi bo'lgan plastinkasimon kremniyda energiyasi E_A va dozasi N_A bo'lgan akseptor kirishma va energiyasi E_D va dozasi N_D bo'lgan donor kirishma ionlaridan, mos ravishda, baza va emitter sohani hosil qilish uchun kiritib, ketma-ket ion kiritib legirlash bilan n - p - n turdagi tranzistor hosil qilinsin. Bunda quyidagi shart bajarilishi kerak, ya'ni o'tish $R_{pA} > R_{pD}$ va $C_{maxA} < C_{maxD}$.

Kirishmalar yig'indi taqsimoti quyidagicha ifodalanadi:

$$C(x) = C_{maxA} \exp \left[- \left(\frac{(x - R_{pA})}{\sqrt{2\Delta R_{pA}}} \right)^2 \right] - C_{maxD} \exp \left[- \left(\frac{(x - R_{pD})}{\sqrt{2\Delta R_{pD}}} \right)^2 \right] - C_B \quad (\text{III.70})$$

Kollektor o'tishning joylashish chuqurligi quyidagi shartda aniqlanadi:

$$C_{maxA} \exp \left[- \left(\frac{(x_{jk} - R_{pD})}{\sqrt{2\Delta R_{pD}}} \right)^2 \right] - C_B = 0, \quad (\text{III.71})$$

unda
$$x_{jk} = R_{pD} + \Delta R_{pA} \sqrt{2 \ln \left(\frac{C_{maxA}}{C_B} \right)}, \quad (\text{III.72})$$

bu yerda
$$C_{maxA} = \frac{N_A}{\sqrt{2\pi\Delta R_{pA}}}.$$

Emitter o'tishning joylashish chuqurligi $C(x_{je}) \gg C_B$ shartdan aniqlanadi:

$$C_{maxA} \exp \left[- \left(\frac{(x_{je} - R_{pA})}{\sqrt{2\Delta R_{pA}}} \right)^2 \right] = C_{maxD} \exp \left[- \left(\frac{(x_{je} - R_{pD})}{\sqrt{2\Delta R_{pD}}} \right)^2 \right] - C_B, \quad (\text{III.73})$$

bunda
$$x_{je} = (-m + \sqrt{m^2 - ac}) / a, \quad (\text{III.74})$$

bu yerda
$$a = \Delta R_{pD}^2 - \Delta R_{pA}^2 \quad m = -R_{pA}\Delta R_{pD}^2 - R_{pD}\Delta R_{pD}^2;$$

$$c = R_{pA}^2 \Delta R_{pD}^2 - R_{pD}^2 \Delta R_{pA}^2 - 2 \Delta R_{pA}^2 \Delta R_{pD}^2 \ln \frac{N_A \Delta R_{pD}}{N_D \Delta R_{pA}}.$$

Emitter o'tishning joylashish chuqurligini soddaroq holda $C(x_{je})=C_B$ shartidan foydalanib ham topish mumkin:

$$x_{je} \approx R_{pD} + \Delta R_{pD} \sqrt{2 \ln \left(\frac{C_{\max D}}{C_B} \right)} \quad (\text{III.75})$$

Baza sohasining qalinligini quyidagi ifodadan aniqlash mumkin:

$$W \approx x_{jk} - x_{je} \quad (\text{III.76})$$

1-misol. Agar $C_B = 10^{16} \text{sm}^{-3}$, $E_A = 100 \text{ keV}$, $N_A = 5 \cdot 10^{13} \text{sm}^{-2}$, $E_D = 200 \text{ keV}$, $N_D = 1 \cdot 10^{15} \text{sm}^{-2}$ bo'lgan n turdagi kremniyga $^{11}\text{B}^+$ va $^{31}\text{P}^+$ larni ion kiritib legirlash natijasida hosil bo'lgan tranzistor tuzilmada kirishmalar konsentratsiyasi taqsimoti kesimi hisoblansin.

1. Energiyasi 100 keV li bor ionlari uchun $R_{pA} = 0,398 \text{ mkm}$, $\Delta R_{pA} = 0,094 \text{ mkm}$, 200 keV fosfor uchun $R_{pD} = 0,254 \text{ mkm}$, $\Delta R_{pD} = 0,061 \text{ mkm}$ larni III.5- jadvaldan aniqlaymiz.

III.5-jadval

E, keV		$^{11}\text{B}^+$	$^{27}\text{Al}^+$	$^{31}\text{P}^+$	$^{75}\text{As}^+$	$^{121}\text{Sb}^+$
20	R_p	78	29	26	16	14
	ΔR_p	32	11	9,4	3,7	2,4
60	R_p	244	85	73	38	31
	ΔR_p	71	27	23	8,4	5,1
100	R_p	398	144	193	58	46
	ΔR_p	94	42	35	12,5	7,4
160	R_p	603	236	201	89	67
	ΔR_p	116	60	52	18	10,5
200	R_p	725	297	254	110	81
	ΔR_p	126	70	61	22	12,5

2. Bor va fosforning maksimal konsentatsiyasini topamiz:

$$C_{\max A} = \frac{0,4 N_A}{\Delta R_{pA}} = \frac{0,4 \cdot 5 \cdot 10^{13}}{0,094 \cdot 10^4} = 2,12 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3},$$

$$C_{\max, D} = \frac{0,4 N_D}{\Delta R_{pD}} = \frac{0,4 \cdot 1 \cdot 10^{15}}{0,061 \cdot 10^{-4}} = 6,55 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}.$$

3. Kollektor va emmitter p - n o'tishlarning joylashish chuqurligini topamiz:

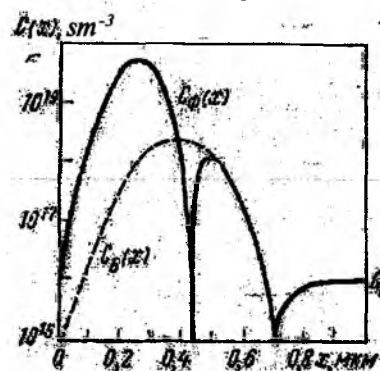
$$x_{jk} = R_{pA} + \Delta R_{pA} \sqrt{2 \ln \frac{C_{\max, D}}{C_B}} = 0,398 + 0,094 \sqrt{4,6 \ln \frac{2,12 \cdot 10^{18}}{1 \cdot 10^{16}}} = 0,705 \text{ mkm}$$

$$x_{je} = R_{pD} + \Delta R_{pD} \sqrt{2 \ln \frac{C_{\max, D}}{C}} = 0,254 + 0,061 \sqrt{4,6 \ln \frac{6,55 \cdot 10^{19}}{1 \cdot 10^{16}}} = 0,50 \text{ mkm}.$$

4. (III.66) ifodadan foydalangan holda n - p - n - tranzistorda akseptor va donor kirishmalarning yig'indi taqsimoti III.35- rasmda ko'rsatilgan.

Shu rasmda kiritilgan bor $C_b(x)$ va fosfor $C_f(x)$ atomlarining taqsimoti alohida ko'rsatilgan. Undan ko'rinib turibdiki, ifoda etarli darajada aniqlikda emitter o'tish holatini aniqlab bergan.

Teskari masala bo'yicha, agar p - n o'tishning joylashish chuqurligi, kirishma eng katta konsentratsiyasi $C_{\max}$ va yarimo'tkazgich taglik plastinkada kirishma konsentratsiyasi C_b ma'lum bo'lsa, kiritilgan kirishma konsentratsiyasi taqsimoti kesimini Gauss egri chizig'i bo'yicha aniqlash uchun o'rtacha normal yugurish R_p , yugurishning o'rtacha kvadratik og'ishi ΔR_p va nurlanish dozasi N ma'lum bo'lishi kerak.



III.35-rasm. Ion legirlash usulida olingan n - p - n tuzilmali tranzistorda bor va fosfor taqsimoti.

Demak, p - n o'tishning joylashish chuqurligi (III.70) ifodaga asosan $C(x)=0$ da aniqlanadi:

$$x_j = R_p + \Delta R_p \sqrt{2 \ln \left(\frac{C_{\max}}{C_b} \right)} \quad (\text{III.77})$$

Nurlanish dozasini quyidagi munosabatdan aniqlanadi:

$$C_{\max} = 0,4 \frac{N}{\Delta R_p} \text{ yoki } N = 2,5 \Delta R_p C_{\max}. \quad (\text{III.78})$$

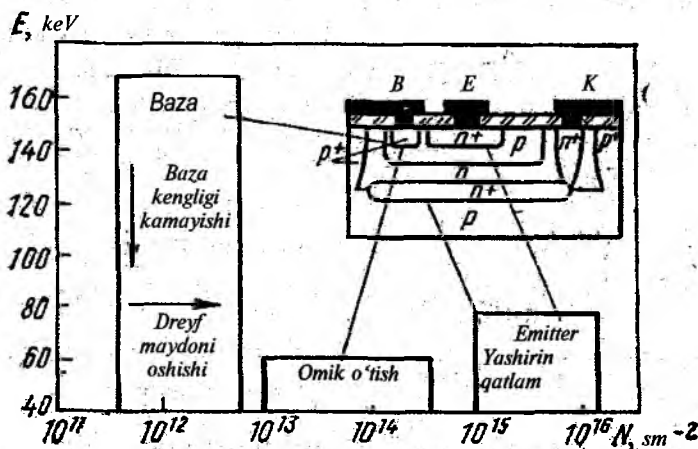
Yugurishning o'rtacha kvadratik og'ishi ΔR_p ni aniqlash uchun grafik usulidan foydalanamiz. ΔR_p va R_p lar uchun bir necha qiymatlar berib, (III.77) ifodadagi tenglamaning o'ng

qismi energiyaga bog'liqligini chizamiz. Keyin energiyaga parallel X_j lar uchun chiziqlar chizilsa, (III.70) tenglamaning o'ng va chap qismlari kesishish nuqtalari E energiyani beradi. Topilgan energiya bo'yicha ΔR_p va nurlanish dozasi N aniqlanadi.

14.3. Yarimo'tkazgichli asboblarni texnologiyasida ion kiritib legirlash jarayonlaridan foydalanish

Ion legirlash jarayonlarini yuqori darajada o'rganish yarimo'tkazgichli asboblarni parametrlarini yetarlicha yaxshilash, ularni takror ishlab chiqarish, ishlab chiqarilgan mahsulotning yaroqli bo'lishiga va narxini kamaytirish imkonini yaratdi. Umuman olganda, hozirgi vaqtda ion kiritishni qo'llamasdan yangi turdagi asboblarni yaratish juda qiyin yoki mumkin emas.

Ion kiritish asosan legirlanuvchi kirishmalarni kiritish uchun keng qo'llaniladi. Ion energiyasi 30 – 300 keV va $10^{11} - 10^{17} \text{ sm}^{-2}$ doza oraliqlarida qo'llanilishi turli diskret yarimo'tkazgichli asboblarni yaratilishiga olib keldi. Bularga : qo'sh qutbli tranzistorlar va IMSlar,



III.36-rasm. Qo'sh qutbli tranzistorlarni tayyorlashda ionlarning energiya va doza kattaliklari.

o'ta yuqori chatotali tranzistorlar, maydon tranzistorlari, fotopriyomniklar va boshqalarni ko'rsatish mumkin.

Yarimo'tkazgichli asboblarda va IMS larning keyingi rivojlanishi, ya'ni submikronli texnologiyada elektron va rentgen litografiyasi asosida elementlar o'lchami 1 mkm dan kichik bo'lgan tuzilmalarni olish ham ion kiritishsiz mumkin emas. Misol tariqasida qo'sh qutbli tranzistorni tayyorlashda ion kiritishning qo'llanilishini ko'ramiz.

Qo'sh qutbli tranzistorlar. Qo'sh qutbli tranzistorlarni tayyorlashda ion kiritish emitter, baza, kollektor, kollektor va baza kontaktlar uchun yuqori legirlangan sohalar, ajratuvchi-bo'luvchi diffuziya, yashirin n^+ - qatlamlar va boshqalarni olish uchun qo'llaniladi (III.36-rasm).

Bazani yaratishda nurlanish dozasi o'zgarishi emitter tok uzatish koeffitsientini boshqarish imkonini beradi, ionlarning energiyasini o'zgartirish esa, bazada legirlangan kirishmalarning taqsimot ko'rinishini vujudga keltirishda uning kengligini boshqarib, asboblarning takroriylik tavsifnomasi o'zgartiriladi.

Uzatish koeffitsienti yuqori bo'lgan qo'sh qutbli tranzistorlarni yaratish uchun ikkita usul qo'llaniladi. Ular p -bazani hosil qilish uchun yuqori energiyada uncha katta bo'lmagan dozada borni va kichik emitterni olish uchun yuqori dozada arsenikni kiritishga asoslangan. Birinchi holda kiritilgan kirishma kesimini o'zgarmas saqlash va 10- 15 min davomida 900-950°C temperaturada emitter qatlamini issiqlik ishlovi (otjig) jarayonida kirishmalarni yuqori elektr faolligini ta'minlashga intiliniladi. Ikkinchi holda yuqori temperaturali qisqa vaqtli emitter kirishmalarning haydashidan foydalaniladi. Qo'sh qutbli tranzistor tuzilmasini tayyorlash bor diffuziyasi yordamida passiv bazani yaratishdan boshlanadi.

Niqob himoyasining qalinligi 1 mkm bo'lgan SiO_2 dan foydalanib, energiyasi 100 keV va dozasi 10^{15} - 10^{16} sm⁻² bo'lgan $^{75}\text{As}^+$ ionlar

kiritiladi. 1000°C da 20- 30 min issiqlik ishlovidan so'ng arsenik 0,3 mkm chuqurlikka diffuziyalanib emitter $p-n$ o'tish hosil bo'ladi.

Aktiv baza 200 keV energiyali va $2 \cdot 10^{12} - 10^{13} \text{ sm}^{-2}$ dozali borni kiritish va 850°C da 20 min davomida termik ishlov jarayonida vujudga keltiriladi. Chunki borning o'rtacha normal yugurishi 725 nm, yugurishning o'rtacha kvadratik og'ishi 126 nm tashkil qiladi, unda bor taqsimoti kesimining asosiy qismi kristall chuqurligining emitter qatlamida joylashadi. Shu yo'l bilan tayyorlangan tranzistorlarning tok bo'yicha kuchaytirish koeffitsienti 100- 300 va chegara chastotasi 1-8 GHz ni tashkil qiladi.

Nazorat savollari

1. Ion legirlashning tuzilmalar olishdagi afzallik va kamchiliklarini ayting?
2. Ion legirlashda $p-n$ o'tishning joylashish chuqurligi qanday aniqlanadi?
3. Ion legirlash usulida olingan tranzistorda konsentratsiya taqsimoti ko'rinishini chizing?
4. Ion legirlashda kiritish energiyasi qancha bo'lishi mumkin?

15-BOB. PLANAR TEXNOLOGIYADA HIMOYAVIY DIELEKTRIK PARDALAR

15.1. Umumiy ma'lumotlar

Yarimo'tkazgichli asboblarda va integral mikrosxemalarni planar texnologiya bo'yicha tayyorlashda himoyaviy dielektrik pardalar katta rol o'ynaydi. Ular donor va akseptor kirishmalarni mahalliy diffuziya qilishga, mikrosxemaning aktiv va passiv elementlarini bir-biridan izolatsiyalashga, hamda $p-n$ o'tishlarni tashqi ta'sirlardan himoyalashga imkoniyat beradi. Shuning uchun planar texnologiya himoyaviy dielektrik pardalarga quyidagi asosiy talablar qo'yadi: boshlang'ich taglik sirtiga diffuziyalanuvchi elementlarning (bor, surma, arsenik va boshqalar) kirishini to'la himoyalash; vaqt o'tishi bilan kimyoviy barqarorlik va turg'unlik; bir jinslilik va nuqsonsizlik; yuqori solishtirma qarshilik va elektr mustahkamlik; yuqori mexanik mustahkamlik talablari qo'yiladi. Albatta, bu talablarni to'la bajaradigan moddani topish qiyin. Biroq ma'lum talablarga javob beradigan moddalar mavjud.

Himoyaviy dielektrik pardalar uchun tayanch materiallar sifatida kvars, kremniy monooksid va to'rt oksidi, kremniy nitridi va boshqalardan foydalanish mumkin. Biroq, hozirgi kunda ikkita material (kremniy IV oksidi va nitridi) keng qo'llanilmoqda.

15.2. Kremniyning termik oksidlash kinetikasi

Planar texnologiyada yarimo'tkazgichli asboblarda va integral mikrosxemalar tayyorlashda kremniyning termik oksidlash usuli keng tarqalgan. Bunda boshlang'ich kremniy taglikda oksidlovchi muhitda qizdirish natijasida himoyaviy dielektrik parda SiO_2 olinadi. Bu usul qalinligi va tuzilishi bo'yicha tekis, hamda yuqori himoya va dielektrik xossaga ega bo'lgan sifatli niqoblovchi parda olish imkoniyatini beradi.

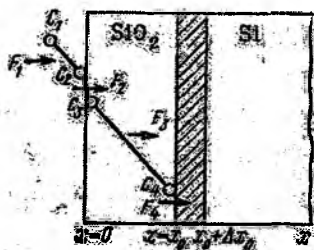
Kislorod muhitida kremnini termik oksidlashda himoyaviy dielektr parda SiO_2 ning hosil bo'lish jarayoni kinetikasini ko'ramiz.

Termik oksidlanish jarayonini bilish uchun oksidlovchi oqim tushunchasini kiritamiz. "Oksidlovchi oqim" deganda birlik vaqtda taglikning birlik sirtidan o'tuvchi oksidlovchi molekulalar miqdori tushuniladi.

III.37-rasmda kremniyning termik oksidlanish jarayoni modeli ko'rsatilgan bo'lib, u oksidlovchi (gaz)—oksid qatlam (qat.)—kremniy taglikdan iborat. Bu tizim orqali to'rt oksidga oksidlovchi oqim o'tadi va ularning har biri oksidlovchi tashqi muhit—kremniy taglik tizim sohalaridan biriga mos keladi.

Rasmdan ko'rinib turibdiki, F_1 oqim kremniy taglik sirti tomon oksidlovchi gaz faza massa ko'chirishiga to'g'ri keladi. Ma'lumki, kremniy sirtida hamma vaqt yupqa oksid qatlami mavjud, unda F_1 oqim bu holda oksid sirti tomon oksidlovchini ko'chirishga mos keladi. Bu ko'chirish diffuziya jarayoni hisobiga, hamda gaz—tashuvchining oqimi bilan majburiy ko'chishi hisobiga amalga oshiriladi. Ko'chish tezligi oksidlanish jarayonining texnologik rejimiga bog'liq bo'ladi.

Sanoatda kremniyni termik oksidlash jarayoni uchun aniq bir tezlikda ishchi kamera orqali o'tuvchi majburiy oksidlovchi F_1 oqimdan foydalaniladi:



III.37-rasm. Kremniyning termik oksidlanish jarayoni modeli

$$F_1 = h(C_1 - C_2)$$

(III. 79)

bu yerda h —oksidlovchi gaz ko'rinishidagi massaning ko'chirish jarayon tezligi doimiysi; C_1 —hajmda gaz fazadagi oksidlovchining muvozanat konsentratsiyasi; C_2 —oksid sirti yaqinida oksidlovchi konsentratsiyasi.

Oksidlovchi zarralari oksid sirtiga yetib borganda bu sirtida yutiladi va unda eriydi. Bunda gaz fazada oksidlovchi konsentratsiyasi va qattiq fazada eruvchi oksidlovchi konsentratsiyasi munosabatlaridan taqsimot koeffitsienti aniqlanadi. Oksidda oksidlovchining erish jarayoni harakatdagi kuch gaz-oksid sirt sistemasida oksidlovchi konsentratsiyasi gradienti bo'ladi. Shuning uchun oksidlovchi oqimi

$$F_2 = \delta(C_2 - C_3), \quad (\text{III.80})$$

bu yerda δ -oksid qatlamda oksidlovchining erish jarayoni tezligi doimiysi; C_3 – gaz fazali oksid qatlam chegarasidagi oksidlovchi konsentratsiyasi.

Oksid qatlamda erigan oksidlovchi gaz faza sirti chegarasidan (oksiddan) oksid chegara (kremniy taglik) tomon diffuziyalanadi. Bu holda oksidlovchi oqim F_3 oksid chegarasidagi konsentratsiyalar farqiga proporsional va oksid qatlam qalinligiga teskari proporsional. Shunday qilib, oksidlovchi oqim

$$F_3 = D \frac{C_3 - C_4}{x_0}, \quad (\text{III. 81})$$

bu yerda D -oksidda oksidlovchining diffuziya koeffitsienti; C_4 -oksid-kremniy taglik chegarasida oksidlovchi konsentratsiyasi; x_0 -oksid qatlam qalinligi.

Oksid qatlam orqali diffuziyalanuvchi oksidlovchi oksid-kremniy chegarasidan o'tib kremniy bilan reaksiyaga kirishadi. Natijada kremniyning oksidlanishi yangi oksid qatlamni hosil qiladi. F_4 oqim oksid-kremniy sirt qismida ro'y beradigan oksidlanish reaksiyasining kimyoviy tezligini xarakterlaydi. Kremniyning oksidlanish tezligi oksidlovchi konsentratsiyasiga proporsional, natijada

$$F_4 = k C_4, \quad (\text{III.82})$$

bu yerda k -oksidlanish reaksiyasi tezligi doimiysi.

Agar muvozanat rejimida barcha oqimlar bir-biriga teng desak, unda $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F$ bo'lsa, oqimlar uchun tenglamani birgalikda yechish natijasida oksidlovchining yig'indi oqimi uchun ifoda olish mumkin.

Gaz-tashuvchi laminar (qatlamdor) oqim va oksidlovchini gaz-qattiq jism chegara qismida oksidlovchining konsentratsiyasi taqsimotini chiziqli deb ko'rsak,

$$C_1 = a C_2 \text{ bu yerda } 0 < a < 1,$$

$$F_2 = F_4 \text{ shartdan}$$

$$\delta(C_2 - C_4) = kS_4 \text{ yoki } \frac{\kappa}{\delta} = \frac{C_2 - C_4}{C_4} \quad (\text{III.83})$$

ifodani topamiz. $F_3 = F_4$ shartdan:

$$D \frac{C_3 - C_4}{x_0} = kC_4 \text{ yoki } \frac{\kappa x_0}{D} = \frac{C_3 - C_4}{C_4} \quad (\text{III.84})$$

Bu ifodalarni hadma-had qo'shib, C_4 ni C_1 ga ($C_1 = aC_2$) bog'liqligini topamiz:

$$\frac{\kappa x_0}{D} + \frac{k}{\delta} + 1 = \frac{C_3 - C_4}{C_4} + \frac{C_3 - C_3}{C_4} + 1, \quad (\text{III.85})$$

$$C_4 = \frac{C_2}{1 + \frac{k}{\delta} + \frac{\kappa x_0}{D}} = \frac{\frac{C_1}{a}}{1 + \frac{k}{\delta} + \frac{\kappa x_0}{D}} \quad (\text{III.86})$$

F_4 oqim ifodasiga C_4 qiymatni qo'yib, oksidlovchining yig'indi oqimini aniqlaymiz:

$$F = \frac{\frac{k}{a} \cdot C_1}{1 + \frac{k}{\delta} + \frac{\kappa x_0}{D}} = k_{ef} \cdot C_1 \quad (\text{III.87})$$

Bu yerda k_{ef} — oksidlanish jarayoni tezligining effektiv doimiysi.

Agar oksidni birlik V hajmda hosil bo'lishida oksidlanish reaksiyasi natijasida N ta oksidlovchi zarracha o'tgan bo'lsa, unda oksid qatlamning o'sish tezligi quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$\frac{dx_o}{dt} = \frac{F}{N} = FV = k_{ef} C_1 V, \quad (\text{III. 88})$$

$$\frac{dx_o}{dt} = \frac{\frac{1}{a} C_1 V}{1 + \frac{k}{\delta} + \frac{kx_o}{D}} = \frac{\frac{1}{a} C_1 V D}{\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{\delta}\right) D + x_o} \quad (\text{III. 89})$$

Belgilashlar kiritamiz:

$$A = 2\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{\delta}\right) D \quad \text{va} \quad B = 2\frac{1}{a} C_1 V D, \quad (\text{III. 90})$$

unda

$$\frac{dx_o}{dt} = \frac{B}{A + 2x_o} \quad (\text{III. 91})$$

Bu tenglamaning ikkiala tomonini integrallab, olamiz:

$$\int (A + 2x_o) dx = \int B dt \quad (\text{III. 92})$$

yoki

$$x_o^2 + Ax_o - Bt = 0 \quad (\text{III. 93})$$

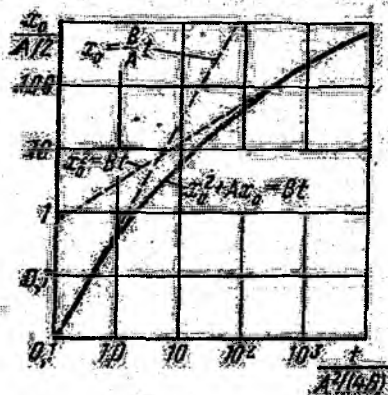
ifodaga ega bo'lamiz.

Bu kvadrat tenglamani yechib, vaqt funksiyasida oksid qalinligi uchun ushbu ifodani olamiz:

$$x_o = -\frac{A}{2} + \frac{A}{2} \sqrt{1 + \frac{4Bt}{A^2}} \quad (\text{III. 94})$$

yoki

$$\frac{2x_o}{A} = \sqrt{1 + \frac{4Bt}{A^2}} - 1 \quad (\text{III. 95})$$



III.38-rasm. Kremniy II-oksida parda qalinligining kremniyning oksidlanish jarayonini o'tkazish vaqtiga bog'liqligi.

Kremniyning termik oksidlanish jarayonini ikkita chegaraviy hollar uchun ko'ramiz. Oksidlanish jarayoni vaqti katta bo'lganda, ya'ni, $t \ll A^2/(4B)$, bo'lganda,

$$\left(\frac{2x_0}{A}\right)^2 = \frac{4Bt}{A^2} \quad (\text{III.96})$$

ifodani olamiz. Shunday qilib, bu chegaraviy hol uchun oksidlanish termik jarayonining parabolik qonuniga ega bo'ldik. Bu yerda B koeffitsient oksidlanish tezligi doimiysi sifatida ko'riladi.

Boshqa chegaraviy holda, oksidlanish vaqti kichik bo'lganda, ya'ni $t \ll A^2/(4B)$ shartda

$$\frac{2x_0}{A} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{4Bt}{A^2} \right); \quad x_0 = \frac{B}{A} t \quad (\text{III.97})$$

ifodani olamiz.

Oksid qatlamning termik oksidlanishi jarayonining o'tkazish vaqtiga bog'liqligi ikki chegaraviy hol uchun III.38-rasmida ko'rsatilgan.

15.3. Suv bug'ida kremniyning termik oksidlash

Kremniy sirtida yuqori tozalikdagi (10-20 MOm-sm tartibda) himoyaviy dielektr parda olish uchun suv bug'ida termik oksidlanishdan foydalaniladi. Bug' miqdori reaksiya tezligini chegaralamaganda, suv bug'i bilan kremniyning yuqori temperaturadagi reaksiyalaridan foydalaniladi. Suv bug'lari parsial bosimini ushlab turish uchun kremniy plastinkalar sirtida suvni qizdirib turish kerak (III.39-rasm). Oksid pardaning tuzilmali shakllanishi kremniy sirtiga oksid qatlam orqali suvning diffuzion ko'chishi hisobiga bo'ladi. Oksid pardaning tuzilmali shakllanishiga oksidlanish reaksiya jarayoni natijasida vodorodning

paydo bo'lishi va uning plastinka ichki tomon diffuziyasi ta'sir ko'rsatadi. Chunki, vodorodning 1050°C temperaturada diffuziya koeffitsienti $2 \cdot 10^{-6} \text{ sm}^2/\text{s}$ bo'lib, suvning shu temperaturada diffuziya koeffitsientidan ($9 \cdot 10^{-10} \text{ sm}^2/\text{s}$) ancha yuqori, unda kremniy-oksidi chegarasida gidrooksillarning paydo bo'lishi faqat suv molekullari mavjudligigina emas, vodorodning ham bo'lishli bilan tushuntiriladi.

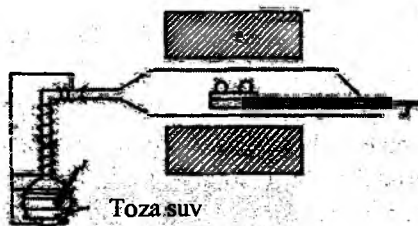
Oksidlanish jarayoni 1100°C dan yuqori temperaturalarda oksid qatlam hosil bo'lishi parabolik qonun bo'yicha, ya'ni $x^2 = Bt$ qonuniga mos keladi. 1100°C dan past temperaturalarda jarayon quyidagi qonuniyat ko'rinishida kechadi:

$$x^2 + b_1x = b_2t \quad (\text{III. 98})$$

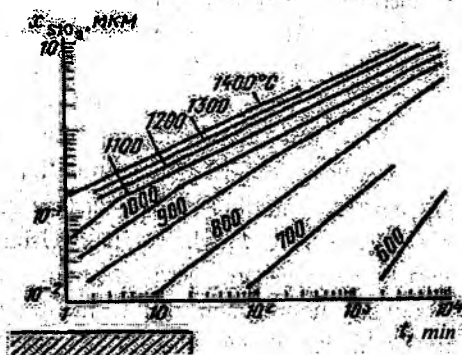
Oksidlanish temperaturasi qancha kichik bo'lsa, oksid qatlam hosil bo'lish qonuni chiziqlikka yaqin bo'ladi. Oksid qatlam chiziqliy o'sishini $500\text{--}800^{\circ}\text{C}$ temperaturalarda yuqori bosim ($2,5 \cdot 10^5\text{--}4,0 \cdot 10^7 \text{ Pa}$) ostida suv bug'ida olish mumkin.

Suv bug'i muhitida turli temperaturalarda oksid parda qalinligi o'zgarishining jarayonni o'tkazish vaqtiga bog'liqligi III.40-rasmda ko'rsatilgan.

Albatta, oksid qatlamning o'sish tezligi taglikning yo'nalishiga, elektr o'tkazuvchanlikning turiga va namuna taglikda kirishmalar konsentratsiyasiga ham bog'liq.



III.39-rasm. Suv bug'ida kremniy oksidlash uchun qurilma sxemasi:
1-termometr; 2-qarshilik pechkasi;
3-termopara



III.40-rasm. Suv bug'i muhitida turli temperaturalarda o'stirilgan SiO_2 parda qalinligining vaqtga bog'liqligi.
1- 600°C ; 2- 700°C ; 3- 800°C ; 4- 900°C ;
5- 1000°C ; 6- 1100°C ; 7- 1200°C ; 8- 1300°C ;
9- 1400°C .

15.4. Quruq kislorodda kremniyni termik oksidlash

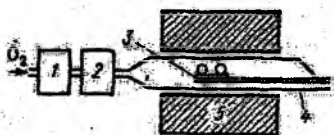
Quruq kislorodda yuqori temperaturali oksidlash usuli kremniyni oksidlash usullaridan keng tarqalgani bo'lib, u yuqori sifatli niqob xossasiga va kremniy-oksidi chegarasida bog'langan zaryadlarning kichik zichlikdan, ya'ni 10^{10} sm^{-2} dan kam olishni ta'minlaydi.

Atmosfera bosimida oksidlash jarayonining temperaturasi 850°C – 1200°C oralig'ida bo'ladi. Oksidlashni ancha past temperaturalarda ham olib borish mumkin. Biroq, bu holda oksid o'sishi sust bo'ladi. Past temperaturalarda kislorod bosimini oshirish oksidlanish jarayonini tezlashtirish imkonini beradi.

Kislorodda kremniyni termik oksidlash uchun qurilma sxemasi III.41-rasmda ko'rsatilgan.

Qurilma kirishma diffuziyasi jarayonini o'tkazish uchun qo'llaniladigan qarshilik pechkasi 5 dan iborat. Ishchi zonada temperatura $900\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ oralig'ida o'zgartirilishi mumkin. Biroq, temperatura aniqligi $\pm 1^{\circ}\text{C}$ sathda ushlab turiladi. Pechkaning ishchi kanaliga reaktor 4 joylashtiriladi. Ushlagich 3 ga plastinkalar o'rnatilganidan so'ng reaktorga joylashtiriladi. Reaktor tashqi reaksiya muhitidan ajratilishi uchun shlif bilan ta'minlangan. Reaktor kirishi kislorodni beruvchi sistemaga ulangan, unga kislorod manbai (odatda bug'lantirgich bilan ta'minlangan suyuq kislorodli Dyuar idish), quritgich 1 va filtr 2 kiradi. Uzatuvchi magistralga jo'mrak ulangan bo'lib kislorod sarfini boshqaradi va rotometr uning sarfini o'lchash uchun ulangan. Gaz oqimi tezligi soatiga bir necha o'n litrni tashkil qiladi.

Kislorodda kremniyning termik oksidlanishi natijasida parda hosil bo'lishi quyidagi reaksiya bo'yicha ifodalanadi:



III.41-rasm. Quruq kislorodda oksidlanish uchun qurilma sxemasi.

1-quritgich; 2-filtr; 3-plastinka ushlagich; 4-kvars reaktor; 5-qarshilik pechkasi.

Kremniyning oksidga o'tish jarayoni uning tuzilmasi va $\text{Si} - \text{SiO}_2$ o'tish sohasi tuzilmasini aniqlaydi. Kremniy bilan kislorodning o'zaro kimyoviy ta'siri oksid-kremniy sirt qismida oksid sirtida, oksid ichida bo'lishi mumkin.

Oksid o'sishi tezligining temperatura-

ga va parda qalinligiga bog'liqligini turli bosqichlarda nazorat qilish mumkin. Oksidlanish tezligi past temperaturalarda, asosan kremniy-oksid chegara qismidagi kimyoviy reaksiya kinetikasi bilan aniqlanadi.

Yarimo'tkazgichli asboblarda va IMS lar ishlab chiqarishda kremniyni oksidlashning ikki va uch bosqichli usullaridan keng foydalaniladi. Bu usullar yuqorida ko'rilgan usullarning umumlashgan ko'rinishidir. Bunda oksidlovchi sifatida quruq kislorod, nam kislorod yoki suv bug'i va yana quruq kisloroddan ketma-ket foydalanishga asoslangan. Bunday texnologik jarayonda hosil bo'lgan kremniy oksidning himoyaviy dielektr pardasi quruq kislorod muhiti bilan tartibli parda hosil qiladi, lekin o'sish tezligi kichik, nam kislorod va suv bug'ida o'sgan parda tuzilishi uncha takomilashmagan bo'ladi, lekin o'sish tezligi ancha yuqori.

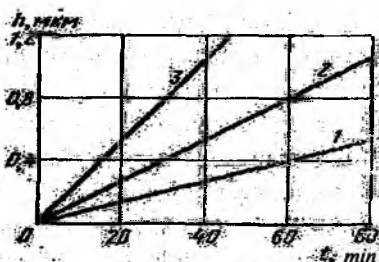
Termik o'stirilgan pardalarning chegara qalinligi 1-1,5 mkm dan oshmaydi. Planar texnologiyada amaliy maqsadlar uchun oksidli himoya pardalarning qalinligi 0,2-0,8 mkm ni tashkil qilishi kerak. Undan oshsa, talab darajasidagi mikrotasvir o'lchamini olish qiyin bo'ladi, kamaysa pardada teshiklar va yoriqlar bo'lishi ehtimolligi oshadi.

15.5. Kremniy oksid pardalarini pirolitik o'tqazish

Kremniy oksidlarini ancha sodda texnologik usul bilan kremniysiz tagliklarda kremniyning turli organik birikmalarini pirolitik parchalanishidan olish mumkin. Shunday qilib, bu usul kremniy oksid pardani har qanday materillardan tayyorlangan materialga o'tqazish mumkinligini ko'rsatadi. Bu usulning zaruriy afzalligi jarayon ancha past temperaturalarda o'tkaziladi. Ushbu usulning ikki xilini ko'rib chiqamiz:

1. Tetraetoksilanning termik parchalanishi. Bu jarayonda reaksiya mahsulotlari to'g'ridan-to'g'ri taglik sirtiga yoki alohida kameraga beriladi. Tetraetoksilan $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ parchalanish reaksiyasi 700-750°C temperaturalarda ro'y beradi. Reaksiya natijasida kremniy IV oksidi, kremniy oksidi, uglerod oksidi va gaz ko'rinishidagi organik radikallar ajralib chiqadi. Bu reaksiyada kislorod manbayi bo'lib tetraetoksilan o'zi xizmat qiladi. III.42-rasmda parda qalinligining jarayonni o'tkazish vaqtiga bog'liqligi ko'rsatilgan.

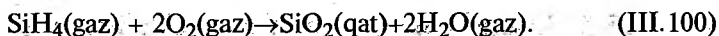
Agar tetraetoksilanning parchalanishi taglik bilan bitta kamerada o'tkazilsa, unda taglik temperaturasi piroliz temperaturasi bilan bir xil



III.42-rasm. Turli temperaturalarda piroliz usulida olingan kremniy to'rt oksidi parda qalinligining vaqtga bog'liqligi: 1-700°C; 2-725°C; 3-750°C

turidagi birikmalarning stexiometrik tarkibiga ta'sir qilmagan holda o'tkazish imkonini beradi.

Kremniy IV oksid hosil bo'lishida reaksiya o'tishi uchun tashqi qizdirishning zarurati yo'q, biroq yuqori sifatli kremniy oksidi pardasini olish uchun jarayon 150° – 300°C da olib boriladi:



Bu jarayonlarni o'tkazish uchun boshlang'ich moddalar bo'lib monosilan SiH_4 , argon yoki azot (gaz-tashuvchi) va kislorod aralashmasidan foydalaniladi. Kuchli inert gaz bilan aralashtirilgan silan(3-10 %) bilan keng oraliq temperaturada kremniy IV oksidning o'tirish tezligi (10-50 nm/min) ga erishish mumkin.

Kisloroddan tashqari oksidlovchi sifatida kislorodi mavjud birikmalar N_2O , CO_2 , H_2O lardan foydalanish ham mumkin.

Yuqoridagi usulda olingan SiO_2 parda plastinka sharti bo'ylab qalinligi bo'yicha tekis, kimyoviy tarkibi, barqaror va diffuziya jarayonini o'tkazishda yaxshi niqob xossaga ega. Bu usulda olingan SiO_2 parda asosiy xossalariidan biri ularda yedirish tezligining ancha yuqoriligidir.

15.6. Kremniyni anod oksidlash

Anod oksidlashning ikki xili mavjud: suyuq elektrolitda kremniy sirtini oksidlash va gaz plazmada oksidlash. Birinchi hol uchun jarayon elektrolitik anodlash, ikkinchisi uchun gazli anodlash deyiladi.

1. **Elektrolitik anodlash.** Ma'lumki, oddiy sharoitda kremniy doimo oksid qatlami bilan taxminan 3 nm qalinlikda qoplangan, kremniy va muhit oralig'ida oksidlovchi agent mavjud. Shuning uchun anod oksillashda oksid o'sishi faqat shu parda orqali reagentlarning diffuzion yoki dreyf ko'chishi hisobiga ro'y berishi mumkin.

Anod oksidlashning xususiyati yarimo'tkazgich —elektrolit chegara qismi orqali o'tuvchi ion tokining parametri bilan aniqlanadi. Anod oksidlash asosan o'zgarmas tok rejimida o'tkaziladi. Bu rejimni amalga oshirish uchun kerakli sharoitni yaratish kerak. Bunda parda qalinligi o'sishi bilan oksidga qo'yilgan kuchlanish U chiziqliy ortadi. Agar oksidga E maydon bir jinsli bo'lsa, uning qiymati vaqtga bog'liq bo'lmaydi, unda

$$\frac{dV}{dt} = E \frac{dx}{dt} = \frac{JEM}{aF\rho} \quad (\text{III.101})$$

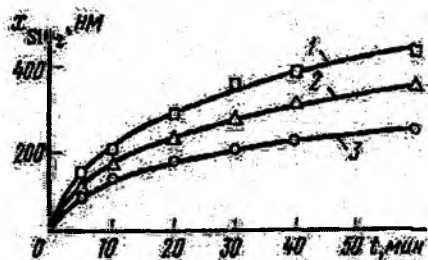
bo'ladi. Bunda J -chegara qismida ion tok zichligi; M -oksidning gramm-mollardagi miqdori; ρ -uning zichligi; aF -bir gramm-mol oksid hosil qilish uchun kerakli elektr miqdori; $F=9,65$ KJ/mol-Faradey soni.

(III.101) formuladan ko'rinib turibdiki, kuchlanishning o'zgarish tezligi ion toki zichligiga proporsional. Demak, tok zichligi qancha kichik bo'lsa, oksidlanish shuncha sekin o'sadi. Anod oksidlash xususiyati elektrolit tarkibiga ham bog'liq. Elektrolitlar sifatida odatda suv miqdori oz bo'lgan organik eritmalaridan foydalaniladi va undan tashqari oliy spirt yoki glitserindan ham foydalanish mumkin. Elektrolit o'tkazuvchanligini boshqarish uchun HNO_3 , H_3PO_4 , NaOH , NaNO_2 va boshqalarni kiritish mumkin. Bu birikmalarning anionlari oksidlovchi rolida elektrokimyoviy jarayonlarda qatnashadi.

2. **Kremniyni gazli anodlash.** Bu usul elektrolitik anodlashga o'xshaydi, farqi elektrolit o'rniga gazdan foydalaniladi. Gazli anodlash qalin oksid pardalar olish uchun qo'llaniladi. Yuqori chastotali maydon bilan qo'zg'atilgan kislorod plazma, manfiy zaryadlangan kislorod ionlari manbayi vazifasini bajaradi. Plazmadagi kislorod ionlari kremniy plastinkalar bilan ta'sirlashadi. Oksidning o'sishi anod oksidlash o'tkazish rejimiga, ya'ni ishchi kameraning bosimiga, temperaturaga va plazma zichligiga bog'liq

15.7. Kremniyni past temperaturali ion-plazma oksidlash

Kremniyni ion-plazma oksidlash, boshqa yarimo'tkazgichlar singari taglikda, hatto, xona temperaturasida yuqori tezlikda pardalar olish imkonini beradi. Bu jarayon yaxshi boshqariladi. Olingan pardalar yuqori elektr tavsifnomaga ega.



III.43-rasm. O'ta yuqori chastotali qo'zg'atilgan $P=600$ W da, bosimi $p=20$ Pa va taglikning turli potentsiali $1>2>3$ da kislorod plazmada kremniyning oksidlanishi.

hisobiga bo'ladi. Bu ikki omil kislorod tarkibli plazmada oksidning o'sish mexanizmiga ta'sir qiladi.

Kislorod plazmada oksidlanish 50 – 200 Pa bosimda olib boriladi. Razryadni qo'zg'atish yuqori chastotali maydon (2,5 GHz gacha) bilan amalga oshirilib, razryadda quvvat 200 dan to 1000 W gacha o'zgarishi mumkin. Qurilma uzluksiz nazoratda bo'lib, chiqindilar hajmdan chiqarilib turiladi. Reaksion chiqindilarni hajmdan uzluksiz chiqarishni pret-sizion jo'mrak-yig'uvchi yordamida nazorat qilinib, kislorod oqimida plazma dinamik rejimda ushlab turiladi. Plazmaning o'rtacha parametri quyidagicha: elektron temperatura $5 \cdot 10^4$ K, taglikka nisbatan anod potentsial + 35 V, plazma zichligi $\sim 10^{13}$ el/sm³, ionlanish darajasi $(5-6) \cdot 10^{-2}\%$. Kremniy plastinka yerga ulangan katodga nisbatan musbat potentsial (+50÷+400V) ostida turadi. Kremniyning oksidlanishida oksidning o'sish tezligi 8-10 nm/min ni tashkil qiladi.

Oksid o'sish kinetikasi (III.43-rasm) parabola qonuniga bo'ysunadi. Pardani katta qalinliklarda paraboladan ozgina og'ishi katta energiyali kislorod ionlari bilan oksidning changlanishidir.

Oksid o'sish tezligini oksid orqali yarimo'tkazgich atomlari yoki oksidlovchi agent zarrachalar diffuziyasi yoki dreyfi belgilaydi. Past temperaturalarda diffuziya tezligini ortishi o'suvchi qatlamda diffuziyalanuvchi zarrachalar konsentratsiyasi gradienti o'sishi hisobiga; yarimo'tkazgich sirt qismi-oksidi va oksid-tashqi muhit orasidagi tezlashtiruvchi maydon o'sishi bilan dreyf tezlikning ortishi

15.8. Kremniy nitridi qoplamalarini olish. Aralash qoplamalar

Kremniy IV oksididan olingan himoya qatlamlarini ba'zi hollarda qo'llash mumkin bo'lmay qoladi. Bunga Al, Ga, In kirishmalarini diffuziyasiga nisbatan niqob vazifasini bajara olmasligi, oksid qatlami 0,1 – 0,15 mkm dan kam bo'lgan holda B va P lar uzoq vaqt diffuziyasini niqoblash qiyinligi, ularning elektr mustahkamligi nisbatan yuqori emasligi va nihoyat, natriyning diffuziya koeffitsienti yuqoriligi kiradi.

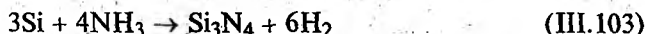
Ba'zi hollarda niqoblash uchun kremniy nitridi Si_3N_4 yoki kremniy nitridi va kremniy IV oksidi kombinatsiyasi qo'llaniladi.

Kremniy nitridi ancha yuqori kimyoviy-issiqlik barqarorlikka, elektr chidamiylikka, dielektr singdiruvchanlikka, niqoblash xossasiga ega. Natriy ionlarining diffuziya koeffitsienti kremniy nitridida kremniy IV oksidiga nisbatan bir tartibga kam. Si_3N_4 – SiO_2 tizimda keng sonli kimyoviy birikmalar – kremniy oksinitridlar hosil qilish mumkinki, ularning turli ko'rinishllarini olib, xossalarini u yoki bu tomonga surish mumkin. Keng tarqalgan kremniy oksinitridlaridan biri Si_2ON_2 .

Kremniy nitridi qoplamalarning kamchiligiga Si– Si_3N_4 tizimda Si– SiO_2 tizimga nisbatan zaryad zichligi yuqori va nusxani yedirishda vujudga keladigan qiyinchiliklar kiradi. Bu ikkala kamchilikni kombinatsiyalashgan qoplamalar SiO_2 – Si_3N_4 yoki SiO_2 – Si_3N_4 – SiO_2 qo'llash bilan yo'q qilish mumkin.

Kremniy nitridi qatlamini yana kremniy sirtida ham vujudga keltirish mumkin. Buning uchun azot yoki uning aktiv birikmalari bilan kremniy sirti nitritlaniladi.

Sirtni to'g'ridan-to'g'ri nitridlash quyidagi reaksiyalar bo'yicha kechadi:



(III.102) reaksiyaga asosan, kremniy nitridi pardasini ochiq nay usulida olish mumkin. Ishchi kameraga kremniy plastinkalari joylashtiriladi va u orqali azot oqimi o'tkaziladi. Temperatura 1200°C va azot oqim tezligi $300 \text{ sm}^2/\text{min}$ da kremniy plastinka sirtida kremniy nitridi pardasi hosil bo'ladi. (III.103) reaksiyaga asosan, kimyoviy reaksiya bo'lishi uchun temperatura yanada yuqoriroq bo'lishi mumkin.

Olingan qatlamlar bir jins emasligi va temperaturaning yuqori ekanligi bu usulning texnologiyada kam qo'llanilishiga olib keldi.

Silanni ammiak bilan azotlashning kimyoviy reaksiyasini qo'llash past temperaturalarda, ya'ni $700 - 1100^{\circ}\text{C}$ da kremniy nitridini olish imkonini beradi. Bunda 1 :20 nisbatda silan va ammiak (3+5) $10^3 \text{ sm}^3/\text{min}$ tezlikda vodorod oqimi bilan birgalikda kremniy plastinkalar joylashtirilgan ishchi kamera orqali o'tkaziladi.

Odatda, gaz tashuvchi va reagentlar: silan (1% gacha) va ammiak (3% gacha) lar sifatida foydalaniluvchi, vodorod yoki argondan tashkil topgan ishchi aralashmadan foydalanilib $800-900^{\circ}\text{C}$ da taglikda kremniy nitridini ham o'tqazish mumkin. Bu usulda ishchi aralashma sarfi $1000 \text{ sm}^3/\text{min}$ bo'lib, jarayon vaqti parda qalinligiga qo'yilgan talabdan kelib chiqadi.

15.9. Himoyaviy dielektrik pardalarning sifatini nazorat qilish

Planar texnologiya jarayonida kremniy IV oksid va kremniy nitridi himoyaviy dielektr parda sifatida foydalanilganda uning uchta asosiy ko'rsatgichlari nazorat qilinadi: 1) parda qalinligi; 2) qalinlikdagi ochiq tirqishlar; 3) kremniy-himoyaviy parda chegara qismidagi nuqsonlar miqdori.

Himoyaviy dielektr parda qalinligi — planar texnologiyada diffuziya jarayonini o'tkazishda kristallarga legirlovchi kirishmalarning eng ko'p kirish chuqurligini aniqlovchi bosh mezon.

Himoya pardalarda ochiq tirqishlar bo'lishi kristall taglikning zararli legirlanishiga va tranzistor tuzilmalari aktiv sohalari diffuziya jarayonida qisqa ulanib qolishiga olib keladi.

Kremniy—parda chegarasidagi nuqsonlar miqdori chegaradagi zaryadlar zichligi bilan bog'langan. Zaryadlar zichligining ortishi yarimo'tkazgichli asboblarda va IMS elektr parametrlarini yomonlashtiradi.

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida dielektr parda qalinligi mikrotortish, interferometr va ellipsometr usullari bilan aniqlanadi.

Mikrotortish usuli namuna taglikka dielektr pardani qoplamasdan va qoplagandan so'ng mikrotortishga asoslangan.

Parda qalinligini quyidagi ifoda bilan aniqlanadi.

$$H = \frac{P_2 - P_1}{sd}, \quad (\text{III.104})$$

bu yerda R_1 —pardasiz taglik massasi; R_2 —pardali taglik massasi; s —parda maydoni; d —parda zichligi.

Bu usulda aniqlangan parda qalinligining aniqlilik darajasi tarozining sezgirligiga, tortishning aniqligiga, parda maydoni va parda zichligini o'ldhashlardagi xatoliklarga bog'liq.

Kremniy 4-oksidi (SiO_2) va kremniy nitrid (Si_3N_4) dielektr pardalar qalinligini aniqlashni ancha sodda usularidan biri rang usulidir. U himoyaviy parda taglik sirtiga tushuvchi oq nurning so'ndiruvchi interferensiyasiga asoslangan. Oq yorug'likning ma'lum bir qismi so'ndiruvchi interferensiyada qatnashib, parda sirti bir xil rangda ko'rinadi. Oq nurning ma'lum spektral tarkiblovchilarining qaytgan to'qlinda bo'lmasligi tufayli himoyaviy pardani ko'z bitta rang sifatida qabul qiladi.

Oq yorug'lik nurini himoyalangan parda plastinka sirtiga normal tushishi natijasida so'nuvchi interferensiya sharti quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$2dn = \frac{2k-1}{2} \lambda, \quad (\text{III.105})$$

bu yerda d — dielektr pardalarning qalinligi; n —pardalarning sindirish ko'rsatgichi; λ —tushuvchi yorug'lik to'liq uzunligi; $k=1, 2, 3$ — interferensiya tartibi.

Shunday qilib, himoyaviy parda rangi uning qalinligiga to'g'ri kelib, bunda parda qalinligi oshishi bitta o'sha rang interferensiya tartibini o'zgarishi bilan qaytariladi.

Kremniy to'rt oksidi va kremniy nitridi dielektr pardalarning qalinligini aniqlash uchun 1-jadvalda ko'rsatilgan rang turlari to'plamidan foydalanish mumkin. Rang usuli bilan parda qalinligini aniqlashda nisbiy xatolik 10% dan oshmaydi.

1-jadval

Rang	Parda qalinligi, mkm							
	1-tartib		2-tartib		3-tartib		4-tartib	
	SiO_2	Si_3N_4	SiO_2	Si_3N_4	SiO_2	Si_3N_4	SiO_2	Si_3N_4
Kulrang	0,01	-	-	-	-	-	-	-
Jigarrang	0,05	-	-	-	-	-	-	-
Ko'k	0,08	-	-	-	-	-	-	-
Binafsharang	0,1	0,9	0,28	0,21	0,46	0,34	0,65	0,52
Havorang	0,15	0,12	0,30	0,23	0,49	0,36	0,68	0,53
Yashil	0,18	0,13	0,33	0,25	0,52	0,38	0,72	0,57
Sariq	0,21	0,15	0,37	0,28	0,57	0,42	0,75	0,61
Zarg'aldoq	0,22	0,18	0,40	0,3	0,60	0,47	0,78	0,65
Qizil	0,25	0,19	0,44	0,33	0,62	0,51	0,81	0,68

Ellipsometrik usulda SiO_2 va Si_3N_4 pardalarning qalinligini o'lchash chiziqliy qutblangan nurning himoyaviy parda sirtidan qaytishiga asoslangan. Ma'lum burchak ostida tushgan nurni qaytishida elliptik qutblangan to'liqin hosil bo'ladi. Odatda, qalinlikni aniqlash uchun tushuvchi va qaytuvchi to'liqlar fazalar va amplitudalar orasidagi munosabatlardan foydalaniladi. Yorug'lik manbai sifatida lazer nurlaridan ham foydalanish mumkin.

Ellipsometrik usul yordamida yupqa (0,1...10 mkm) va o'ta yupqa (0,1 nm dan 10 nm gacha) pardalar qalinligi va sindirish ko'rsatgichlarini o'lchash mumkin.

Dielektr pardalarni tayyorlash jarayoni paytida vujudga kelib qolishi mumkin bo'lgan g'ovaklarni aniqlash uchun misning elektrolitik o'tirishi, diffuzion legirlash va elektrograf usullari qo'llaniladi.

Misni elektrolitik o'tqazish usuli quyidagilardan iborat. Sirtida kremniy IV oksidi vujudga keltirilgan kremniy plastinka mis ionli elektrolitga joylashtiriladi. Bu plastinkaga manfiy potensial beriladi. Ikkinchi elektrod vazifasini bajaruvchi va elektrolitga o'rnatilgan mis plastinkaga musbat potensial beriladi. Elektroliz jarayonida mis ionlari qayerda g'ovaklar bor bo'lsa, o'sha yerga o'tiradi. Mis o'tirgan orolcha miqdoriga qarab parda sifati to'g'risida xulosa chiqariladi. Mikroskop yordamida tirqishlar miqdori va ularning geometrik o'lchami aniqlanadi.

Diffuzion legirlash usuli taglik yarimo'tkazgich materialga diffuziya jarayonida kirishmalar kirib material elektr o'tkazuvchanligini o'zgartirishiga asoslangan. Diffuziya jarayoni o'tkazilgandan so'ng pardaning qayerida tirqishlar bor bo'lsa o'sha yerdan diffuziya ketib, mahalliy $p-n$ o'tishlar hosil qiladi. Keyin himoyaviy parda taglikdan ketkaziladi va mahalliy $p-n$ o'tishlar pardalardagi g'ovaklar miqdori to'g'risida ma'lumot beradi.

Ancha sodda va yetarlicha samarali usullardan biri elektrografik usul bo'lib, uni yordamida diametri 0, 1 mkm gacha bo'lgan tirqishlarni aniqlash imkoniyati bor. Undan tashqari, bu usulda pardani buzmaganda holda pardadagi tirqishlar joylashgan o'rnini, geometrik o'lchami va zichligini aniq va tez aniqlash imkoniyati bor.

Elektrografik usulda pardalardagi g'ovaklarni nazorat qilish quyidagicha boradi. Gidroxinonning 3-4% li eritmasida ho'llangan

fotoqog'ozlar plastinalar sirtiga joylashtiriladi. Fotoqog'ozli plastinkaga ikkita metall-disk elektrod qisib, ular orqali tok o'tkaziladi. Hidroxinon eritmada ho'llangan fotoqog'oz o'tkazuvchan bo'lganligi uchun pardaning qayerida tirgish bo'lsa, o'sha yeridan tok o'tadi. Mahalliy o'tgan toklar fotoqog'oz emulsiyasiga xuddi yorug'lik oqimiga o'xshab ta'sir qiladi va qora nuqtalar, hamda orolchalar ko'rinishidagi ta'svirlar hosil qiladi.

Pardadagi nuqsonlar miqdori va o'lchami mikroskop bilan aniqlanadi. Dielektr-yarimo'tkazgich chegara qismi holati dielektr osti zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, sirt potentsiali, dielektrdagi qo'zg'almas zaryadlar, sirt holatlar zichligi, qo'zg'almas zaryadlar turg'unligi, sirt holatlarning relaksatsiya vaqti bilan baholanadi. Bu parametrlarni nazorat qilish uchun MDYa (metall-dielektr yarimo'tkazgich) tuzilmalar tayyorlash va ularning volt-farada tavsifidan sirt holatlar zichligi va pardadagi zaryadlarni aniqlanadi. Dielektr-yarimo'tkazgich chegara qismi parametrlarini avtomatik qurilmalarda MDYa tuzilma volt-farada tavsiflarini o'lchash bilan ham nazorat qilish mumkin.

Nazorat savollari

1. Planar texnologiya deganda qanday texnologiyani tushunasiz?
2. Termik oksidlanish nima?
3. Kremniy 2-oksidi qanday usullarda olinadi?
4. Oksidlanish kinetikasini tushuntiring.
5. Oksid qalinligi ifodasini yozing.
6. Piroliz usuli qanday usul?
7. Anod oksidlanishni tushuntring.
8. Ion-plazma oksidlanish-chi?
9. Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida SiO_2 va Si_3N_4 pardalar nima maqsadlarda ishlatiladi?
10. Dielektrik pardalar qalinligi qanday nazorat qilinadi?

16-BOB. FOTOLITOGRAFIYA

16.1. Umumiy ma'lumotlar

Fotolitografiyani o'tgan asrning 50-yillarida yarimo'tkazgichlar sanoatida qo'llanilishi elektronikaning keyingi rivojlanishini belgilab berdi va diskret yarimo'tkazgichli asboblarda ishlab chiqarishdan integral mikrosxemalar (IMS) ishlab chiqarishga o'tildi.

Fotolitografiya planar texnologiya jarayonining ajralmas qismidir. Uning yordamida niqobli pardalarda o'ta kichik tirqishlar ochilib, ular orqali diffuziya o'tqaziladi. Natijada, o'ta kichik tuzilmalar hosil qilinadi. Undan tashqari, aluminiy pardada metallashgan rasmlar olishda ham qo'llaniladi. Meza texnologiyada chuqur mahaliy yedirish uchun kontakt niqoblar olinadi.

Hozirgi paytda fotolitografiyaning qo'llanilish sohalari kengaydi. Yarimo'tkazgichli asboblarda va IMS ishlab chiqarishda fotolitografiya har tomonlama qulay texnologik jarayon. U turli materiallarda element o'lchamini bir mikrometr va undan kichik murakkab rasmlarni takroriy va katta aniqlikda bajarish imkoniyatini beradi. Fotolitografiya yarimo'tkazgichli va pardali tuzilmalar tayyorlashda yarimo'tkazgich va boshqa materiallarda turli ko'rinishdagi nafis ariqchalar va chuqurliklar olish uchun qo'llaniladi. Uning yordamida andozalar (shablonlar) tayyorlanib, fotolitografiya jarayonida yarimo'tkazgichli asboblarda va IMS tayyorlashda zar qog'ozda ochiq teshiklar olishda qo'llaniladi. Fotolitografiya tayyor tuzilmali plastinka yoki tagliklarni kristallarga bo'lishi, pretsizion qismlar tayyorlashi, aniq shkalalar tayyorlashi va boshqalarni bajarishi mumkin.

Yarimo'tkazgichli tuzilma va IMSlarni tayyorlashda fotolitografiyaning asosiy vazifasi texnologik qatlamlarda vujudga keltiriladigan topologiyaga mos plastinka sirtida tirqishli kontakt niqob olish va keyinchalik niqobli topologiyani taglikning berilgan qatlamiga uzatishdir. Buni amalga oshirish uchun maxsus ishlovdan o'tgan plastinkalar sirtiga yupqa, yorug'likka sezgir material-fotorezist qoplanadi. Plastika sirtida fotorezist qurigandan so'ng, unda mustahkam parda hosil bo'ladi. Bu fotorezist parda fotoandoza orqali aktinik yorug'lik bilan nurlantirilishi uning xossasi o'zgarishiga olib keladi. (Aktinik nurlanish-fotosezgir materiallarga fotolitografik ta'sir o'tkazish qobiliyatiga ega bo'lgan nurlanish). Fotorezist pardani ochiltirish va polimerlash unda kerakli rasmdagi shaklni olish imkonini beradi, ya'ni pardani ochiq (fotorezist pardadan ozod) va yopiq (fotorezist parda bo'lishi) qismlari bo'ladi. Fotorezist pardada hosil bo'lgan rasmning shakli taglikka o'tadi.

Fotorezist pardada hosil bo'lgan «oyna»-tirqish bir qancha zaruriy texnologik amallar bajarish imkonini beradi: yarimo'tkazgich materil qatlamini ketkazish maqsadida mahaliy yedirish bajariladi va mezatuzilma yaratiladi, diffuziya ostida oyna ochish uchun dielektrik himoya qatlamlar (SiO_2 va Si_3N_4) ketkaziladi hamda omik kontaktlar va murakkab ko'rinishdagi tok o'tkazuvchi metall qatlamli yo'nlchalar yediriladi va h.k. amallar bajariladi.

Fotolitografiya keng sinfdagi yarimo'tkazgichli asboblardan biri mikrosxemalarni umumiy holda tayyorlashda asosiy jarayonlardan biri sifatida, diffuziya, ion legirlash, epitaksiya va oksidlash, kimyoviy ishlav berish jarayonlari bilan bir qatorda turadi.

Fotolitografiya jarayonining afzalliklariga uning ommaviyligi, universalligi, texnologik qulayligi va avtomatlashtirish imkoniyatlari kiradi.

Fotolitografiyaning imkoniyatlardan yana biri, bitta taglikda bo'lajak asbob va mikrosxema ko'p sonli elementlarini olish mumkin. Bu esa, oldindan tayyorlangan texnologik marshrut bo'yicha tagliklarni guruhlab ishlav berish imkoniyatini beradi.

Fotolitografiya o'ziga murakkab kompleks texnologik jarayonlarni jalb qiladi. Bular mexanik, optik, fizik, fizik-kimyoviy va kimyoviy jarayonlardir. Ravshanrog'li, tayanch yorug'likka sezgir materiallar (fotorezistlar), uni tozalash va ishlav berish, taglikni tayyorlash (kimyoviy-dinamik tozalov), taglik sirtida yorug'likka sezgir pardalarni yuzaga keltirish; termik ishlav, ochiltirish, ekspozitsiyalash, kimyoviy yedirish va boshqa amallar shular jumlasidandir.

16.2. Fotorezistlar

Fotorezist deb, avvalo eruvchanligi o'zgaruvchi va kislotali yoki ishqoriy yedirgichlarga chidamli aktinik nur ta'sirida o'z xossasini o'zgartiruvchi moddaga aytiladi.

Fotorezistlarning asosiy vazifasi ma'lum talabga javob beruvchi shakl, rasmning yupqa himoyaviy pardasini plastinka yoki qandaydir boshqa taglik sirtida yaratishdir. Fotorezist himoya pardasida rasm shakli pardaning alohida qismlarga yorug'lik ta'siri natijasida, yoritilgan va yoritilmagan qismlarining differensial eruvchanligi olinadi. Nurlantirilgan fotorezist parda ochiltirilgandan so'ng taglikda kerakli rasm qoladi va keyingi texnologik operatsiyalarda himoya niqobi vazifasini o'taydi, qolgan qismi esa ketkaziladi.

Fotorezistlar organik moddalarning murakkab monomer yoki polimer kompozitsiyalaridir. Yorug'likka sezgir monomerli birikmalardan tayyorlangan fotorezist pardalarning himoya xossalari uncha yuqori emas.

Shuning uchun fotolitografiyada monomer fotorezistlar polimerli asosga qo'shimcha sifatida foydalaniladi.

Fotorezistlarda yorug'lik nuri ta'sirida yuz beradigan jarayonlar fotokimyoviy qonunlarga bo'ysunadi: 1) yorug'likni fotorezist bilan o'zaro ta'sir reaksiyasida yorug'lik nuri yutilsa, unda reaksiya fotokimyoviy aktiv bo'ladi; 2) yorug'likning kimyoviy ta'siri yorug'lik jadaligining uning ta'sir vaqti ko'paytmasiga to'g'ri proporsional; 3) har bir yutilgan yorug'lik kvantiga bitta reaksiyaga kirishgan molekula to'g'ri keladi.

Shuning uchun fotokimyoviy jarayon tavsifnomalari uchun fotorezistda yuz beradigan kvant chiqish tushunchasidan, ya'ni reaksiyaga kirishgan molekularlar sonining yutilgan yorug'lik kvantlar soniga nisbatidan foydalaniladi.

Fotorezistda fotokimyoviy reaksiya yuz berishi uchun fotonlar energiyasi atomlarni ajratish yoki qayta birlashtirish uchun yetarli bo'lishi kerak.

Kvant chiqish fotokimyoviy reaksiya tezligi va ularni boshqarish ko'p jihatdan tushuvchi yorug'likni spektral tarkibi va jadalligiga, hamda nurlantiriluvchi moddaning kimyoviy tuzilishiga bog'liq. Fotorezist tarkibida spektral sezgirlikni boshqarish uchun maxsus moddalar—sensibilizatorlar kiritiladi, ular kerakli soha spektrida eng katta yutilishga siljyadi. Fotorezistorlarda yorug'lik energiyasini yutishi bilan yuz beradigan fotokimyoviy reaksiyalar murakkabligi va ko'p ko'rinishligi bilan farq qiladi. Ularda fotokimyoviy aylanishlar, moddaning kimyoviy tuzilishi va nurlantirish sharoitlari bilan aniqlanadi.

Fotorezistlarda fotokimyoviy reaksiya ketishi xarakteriga qarab fotorezistlar ikki guruhga bo'linadi: negativ va pozitiv fotorezistlar.

Negativ fotorezistlarda yorug'lik ta'sirida taglik sirtida fotopolimerlanish yoki fotokondensatsiya hisobiga erimaydigan parda qismlari hosil bo'ladi va ochiltirilgandan so'ng sirtida qoladi.

Pozitiv fotorezistlarda esa uning teskarisi, yorug'lik ta'sirida fotoyemirilish hisobiga eriydigan qismlar hosil bo'ladi va ochiltirilgandan so'ng taglik sirtida qolmaydi. Sirtida qolgan fotorezist qatlam original rasmini yuqori aniqlikda takrorlaydi.

Fotorezistlarni maxsus sharoitlarda qo'llash uchun ularni tavsifiy parametrlari mavjud va ulardan asosiylari quyidagilar.

Yorug'likka sezgirlik—ekspozitsiyaga teskari, fotorezistni eruvchanlik (pozitiv) yoki erimaydigan (negativ) holatga o'tkazish uchun talab darajasidagi kattalik. Yorug'lik sezuvchining ko'p jihatdan fotorezistda yuz beradigan fotokimyoviy reaksiya kvant chiqishi bilan aniqlanadi.

Zarur tomoni talabdagi to'liq uzunlik diapazonida yorug'lik sezgirlik eng katta bo'lishi kerak. Ko'pchilik hozirgi zamon fotorezistlari ultrabinafsha nur soha spektri yaqinida maksimal sezgirlikka ega.

Ajrata olish qobiliyati. Fotorezistning ajrata olish qobiliyati deganda, fotolitografiya jarayonida tekis qilinlikda 1 mm plastinka sirtida tutashmagan mumkin bo'lgan maksimal chiziqlar soni tushuniladi. Demak, ajrata olish qobiliyati

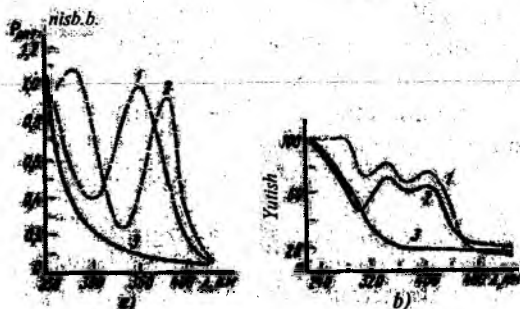
$$R = \frac{1}{2\lambda} \quad (\text{III.106})$$

bilan aniqlanadi. Bu yerda λ — fotorezistda chiziq kengligi. Agar yarimo'tkazgichli asbob tayyorlash uchun rasm shakli eng kichik o'lcham $\lambda = 1$ mkm bo'lsa, unda fotorezistning ajrata olish qobiliyati

$$R = \frac{1}{2 \cdot 0,001} = 500 \text{ chiziq/mm bo'ladi.}$$

Fotorezistni ajratish alohidalik qobiliyati, ya'ni alohida elementlar tasvirini eng kichik o'lchamlarda uzatish qobiliyati bilan xarakterlash mumkin. Ajrata olish qobiliyati chegarasi fotorezistning polimer molekullari o'lchami bilan aniqlanadi. Asosiy texnologik muammo fotorezistni yoritilgan va yoritilmagan qism orasidagi differensiallashgan yaxshi chegarani olishdan iborat bo'lib, bu chegara ishlovning barcha bosqichlarida eng kichik o'zgarishi kerak.

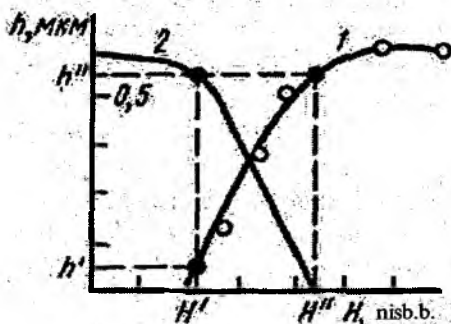
Agressiv muhit ta'siriga chidamlilik. Bu parametрни miqdoriy aniqlash qiyin. Ba'zan bu kattalik fotorezist parda qatlamini olish standart yedirgichda ishlov berish vaqtiga proporsional bo'ladi. Keyingi vaqtda fotorezistning kimyoviy barqarorligi shakli yedirganda taglikka beruvchi nuqsonlar zichligi bilan xarakterlanadi. Bunday baholashda olingan ma'lumotlar aniq bo'lmashligi mumkin. Chunki, nuqsonlar fotolitografiya jarayoni ta'siridagina kelib chiqmaydi. Chidamlilik asosiy sharti — taglikka nuqsonsiz yaxshi yopishgan bir jins parda olish, kimyoviy reagentlarga mumkin qadar passiv (yedirgichlar va boshqalar) bo'lishi kerak.



III.44-rasm. Pozitiv va negativ fotorezistlar yutish spektrlari

Fotorezistlar turg'unligi vaqt o'tishi bilan ma'lum saqlash sharoitlarida va foydalanishda ularning tavsifnomalarini o'zgarishsizligi bilan aniqlanadi.

Pozitiv fotorezistlarni fotokimyoviy xossalari turg'unligini nazorat qilish uchun ma'lum qalindagi qatlam zichligini optik usulda o'lchanadi, u



III. 45-rasm. Fotorezist ochiltirilgandan keyin qatlam qalinligi o'zgarishlari

bilan xarakterlanadi. Polivinilsinnamat PVS (2) turidagi fotorezistlarning ikkita yutish kengligi bor, ulardan biri sensibilizator molekulari yorug'lik yutishi (360-370 nm) bilan, boshqasi polivinilsinnamat molekulasining yorug'lik yutishi (280 nm) bilan bog'langan.

Pozitiv fotorezistlar yutish spektrida ikkitadan eng katta qiymatga 350 va 400 nm larda erishadi (III.44-rasm, 1 va 2-chiziqlar). Bu ikkala eng katta qiymatlar naftoxinondiazid molekularining yorug'likni yutishi bilan bog'langan. Yoritiladigan (yorug'lik tushirilgandan so'ng) rezistlar yutish spektrlari etarli o'zgarib ketadi (III.44-rasm, a-chiziq 3; b-chiziq 3).

Fotorezist ochiltirilgandan keyin qatlam qalinligi o'zgaradi. Bu o'zgarishlarni tavsifiy egri chiziqlardan aniqlanadi (III. 45-rasm). Rasmdan ko'rinib turibdiki, yoritilish vaqti ortishi bilan negativ rezist qalinligi ortadi, pozitivda esa kamayadi.

Tavsifiy egri chiziqlarda fotorezistni yorug'likka sezgirligini $S=1/H''$, bu yerda H'' -pozitiv rezistda (polimer to'la buzilgan) ekspozitsiya; kontrast $\lambda=(h''-h')/(H'-H)$ va fotografik kenglik $L=H'-H'$, bu yerda H' -qatlamlar qo'shilishi boshlanadigan ekspozitsiya.

Fotorezistlar to'g'risidagi ma'lumotlarga asosan, ularga qo'yilgan bir qator talablarni ko'rsatib o'tamiz:

1. To'liq uzunlik oralig'i talabida yuqori yorug'likka sezgirlik.
2. Yuqori ajrata olish qobiliyati (hozirgi zamon talabi 0,1 mkmgacha fotorezist qatlam qalinligida bir millimetrga 1000-2000 chiziq to'g'ri keladi).
3. Taglikka yuqori yopishqoqligi (yarimo'tkazgichga, oksidga, nitridga yoki metallga).

darvoqe yorug'likka sezgir markazlar konsentratsiyasiga proporsional bo'ladi. Fotorezist tuzilmaning vaqt o'tishi bilan o'zgarishlari qaytmas kimyoviy aylanishlar yuz berayotganligini bildiradi. III.44-rasmda pozitiv va negativ fotorezistlar yutish spektrlari berilgan bo'lib, ularni amalda qo'llash uchun zarurdir.

Sensibilizatorli siklo-kauchuk asosidagi bis-azid (1) turidagi rezistlar $\lambda=350$ nm da eng katta yutish kengligi

4. Yuqori kontrast (ekspozitsionlashgan va noekspozitsionlashgan qismlar orasidagi keskin differentsiallashgan chegaralarni olish).

5. Kimyoviy agressiv muhitlarda yuqori turg'unlik.

6. Qatlam sirti bo'yicha bir xil xossaga ega bo'lish.

7. Vaqt o'tishi bilan xossalarni turg'unligi.

8. Kimyoviy aylanishlarda mahsulotlar bilan ifloslanish bo'lmashligi.

9. Materiallarning nisbatan sodda, mustahkam va qo'llashga havfsizligi, turli usullarda o'tqazish va boshqa qulayliklar.

III.7-jadvalda ba'zi fotorezistlarning asosiy tavsiflari berilgan.

III.7-jadval

Fotorezist turi	1 mkm qalinlikda ajrata olish qobiliyati, chiz. L/mm	Nuqsonlar zichligi bo'yicha kislotaga chidamliligi, mm ⁻²	Ochiltirishda chidamlilik, s	Kinematik qovushoqli-gi 20°C da sSt
FP-307	500	0,35	90	6
FP-309	400	0,5	-	6
FP-330	400	0,75	60	5,9
FP-333	500	0,2	180	6
FP-617	500	0,5	30	21-26
FN-106	200	0,4	-	7
FN-108	400	0,25	-	3,5

FP-pozitiv fotorezist, FN-negativ fotorezist

16.3. Fotoandozalar

Fotoandozalar—aktinik nurlanishni o'tkazmaydigan, material sirtida sxema elementlarining rasmlari vujudga keltirilgan shisha plastinkalar yoki polimer pardalar. Fotoandozadagi elementlar tuzilishi asbob tuzilma qatlamidan birining geometrik shaklini hosil qiladi.

Fotoandozalar asosiy instrument bo'lib, uning yordamida taglikga o'tqazilgan fotorezist qatlamda ancha murakkab bo'lgan mikrotasvirni shaklga keltiriladi.

Fotoandozalar optik shishadan tayyorlanadi, shisha sirtidagi rasm esa, fotografiya usulida o'tqaziladi. Shisha plastinkada rasmni vujudga keltirish usuliga qarab, fotoandozalar emulsiyali, metallashgan va ranglilarga bo'linadi.

Emulsion fotoandozalarda rasm qismi oddiy fotografiya usuli bilan emulsiya qatlamda eng katta va eng kichik optik zichlikda vujudga keltiriladi. Bu turdagi fotoandozalar uchun shaffof elementlar (rasm qismi) zichligi shisha taglik va kumush zarrachalari bo'lmagan emulsion qatlamining optik zichliklari yig'indisiga teng.

Metallashgan fotoandozalarda yupqa xrom qatlam hisobiga rasm qismlari vujudga keltiriladi. Bu fotoandozalarda shaffof sohaning eng kichik optik zichligi shisha optik zichligiga teng, eng katta zichlik esa amaliy jihatdan shaffof bo'lmagan xrom metall qatlama mos keladi.

Metallashgan fotoandozalar afzalliklari yuvilishga yuqori chidamliligi bo'lib, u bir necha yuz marta kontakt ko'chirma qilish imkonini beradi. Kamchiligi xrom pardaning ko'zga ko'rinadigan nurlar uchun yuqori qaytaruvchanligi (50-60 %) va uning to'la shaffof emasligidir. Xromlashgan fotoandozalar xrom metall pardada mikroshaklni yedirish bilan chekka notekisliklari kamligi hisobiga ancha yuqori ajrata olish qobiliyatiga ega. Xrom pardaning yuqori qaytarish xossasi fotoandoza shaffof elementlari ostida joylashgan fotorezistnining chekka qismlaridagi nurlanishlarining haqiqiy rasm shakli va o'lchami o'zgarishiga olib keladi.

Rangli fotoandozalarda naqsh (shakl) temir oksidli parda yordamida bajariladi. Eng kichik optik zichlik metallashgan fotoandozalar singari shishaning optik zichligiga teng, eng katta zichlik esa, amaliy jihatdan temir oksid pardaning ultrabinafsha diapozanda shaffofmas eng katta zichligiga mos keladi.

Rangli fotoandozalarning metallashgan fotoandozalarga nisbatan afzalligi uncha yuqori emas. Ularda ko'rinadigan nurni qaytarish imkoniyati (10-15%) va shaffof.

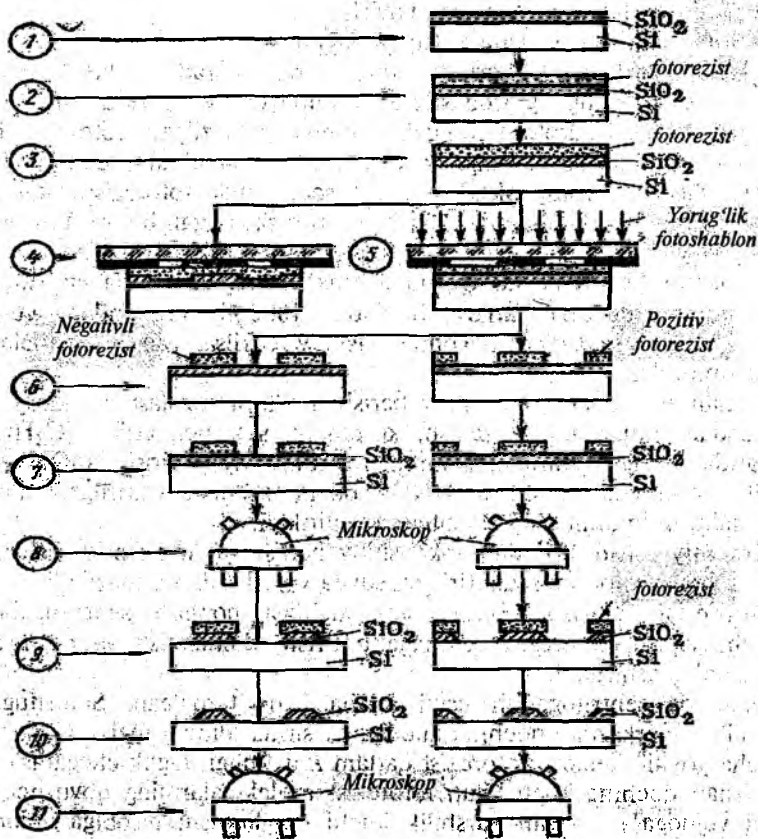
Rangli fotoandozalardan foydalanish kontakt nusxa olishda yorug'likning qaytish samarasini kamaytirib, olinadigan mikrotasvirlarning sifatini yaxshilaydi. Temir oksid pardaning ko'rinadigan nurlar uchun shaffofligi rangli fotoandozadagi shakln tayanch plastinkadagi naqsh bilan birga sodda va sifatli qo'shilishiga olib keladi.

Fotoandozalarga quyidagi asosiy talablar qo'yiladi: naqsh elementlarining geometrik o'lchamlarining yuqori aniqligi, qismlar orasidagi qadam o'lchamlarining aniqligi, vaqt bo'yicha naqsh va uning o'lchami turg'unligi, yuvilishga chidamliligi, ishchi sirtlari yassi parallelligi, fotoandozalar to'plamining bir-biriga qo'shilishi talablari qo'yiladi.

16.4. Kontaktli fotolitografiya

Kontaktli fotolitografiyada texnologik jarayon sxemasi III.46-rasmda ko'rsatilgan. Barcha amallarni uchta guruhga bo'lish mumkin.

1. Fotorezist qatlamini shakllantirish; taglik sirtini qayta ishlash; fotorezist qatlamini o'tqazish va birinchi quritish.
2. Himoya shaklini vujudga keltirish; qisqa vaqt yoritish va birga qo'shish; shaklni ochiltirish; hamda suvda yuvish, quritish.
3. Taglikka tasvirni uzatish; shaklni yedirish; fotorezistni ketkazish.



III. 46-rasm. Kontaktli fotolitografiya jarayoni sxemasi.

Endi bu har bir bosqichning texnologik xususiyatlarini ko'rib chiqamiz.

Taglik sirtiga ishlov berish fotorezist qatlamni taglikka yaxshi yopishqoqligini ta'minlash maqsadida amalga oshiriladi. Fotorezistlar kremniy, polikristall kremniy, kremniy ikki oksid, kirishma-silikatli shisha, kremniy nitridi, turli metall qatlamlar sirtiga o'tqaziladi. Sirtga ishlov berishning xarakteri har bir berilgan hol uchun har xil.

Kremniy sirtini tayyorlash quyidagi ko'rinish bo'yicha olib boriladi.

1. Nabatma-navbat 5 daqiqadan, toluolda, asetonda va etil spirtida yuvib tozalash, ultratovush bilan tozalash va nihoyat qaynoq nitrat kislotada yuvish.

2. Ionsizlantirilgan suvda 5 daqiqa qaynatish.

3. Vodorod fluoridida 5 daqiqa yuvish.

4. Ionsizlantirilgan suvda 5 daqiqa qaynatish.

Oksid pardani tayyorlash boshqacha boradi. Oksid parda o'stirilgandan so'ng gidrooksidlar bo'lmaydi va oksid sirti suv yuqtirmaydigan (gidrofob) bo'ladi. Bunda o'tqazilgan fotolitografiya jarayonida olingan parda yuqori sifatga ega bo'ladi. Reaktordan chiqarib olingan plastinkalarning oksid sirtiga 1 soat ichida fotorezistni surkash maqsadga muvofiqdir. Agarda, taglik ko'proq saqlangan bo'lsa, uni oksid sirtini suv yuqmas holga kelitirish maqsadida fotorezist surkashdan oldin termik ishlov berish kerak. Quruq azotda 1 soat davomida eng kiehik temperatura 700°C da ishlov beriladi. 1000°C va undan yuqori temperaturada 5 daqiqa davomida ishlov berilsa, yaxshi natijalarga erishish mumkin.

Metalli qatlamlarni ilk ishlov berishda ularni tozalash va kimyoviy yedirishdan o'tqaziladi. Tozalash, ko'pincha xlor uch etilen (C_2HCl_3) bug'larida amalga oshiriladi. Aluminiyni kimyoviy yedirish NaOH yoki Na_3PO_4 eritmada, so'ngida HNO_3 bilan, xrom suyultirilgan xlorid kislotasida, oltin ammoniy persulfatda yediriladi.

Kremniy nitrid sirti dastlabki ishlov berish qaynoq fluorid kislotada (HF), so'ng qaynoq ionsizlantirilgan suvda yuvish bilan o'tqaziladi.

Fotorezist qoplash. Fotorezistni taglikga qoplash sentrifugalash, purkash, sepush, fotorezist eritmaga botirish, dumalatish va boshqalar bilan amalga oshiriladi.

Sanoatda sentrifugalash usuli ancha keng tarqalgan. Sentrifugani ulash bilan markazdan qochma kuchlar ta'sirida tomchi rezist taglik sirti bo'yicha yoyilib ketadi. Fotorezist qatlam h qalinligi, taglik chegarasidagi markazdan qochma kuch bilan fotorezist molekulalarining qovushoqligi tufayli vujudga keladigan qarshilik kuchi tenglashishi hisobiga vujudga keladi:

$$h = \frac{ac^2}{\sqrt{\omega}}, \quad (\text{III. 107})$$

bu yerda a -sentrifuga doymiyisi, $\text{min}^{0.5}$. mkm; s -fotorezistda quruq modda miqdori, og'irlik %; ω -sentrifuga burchak tezligi, min^{-1} .

Qatlam qalinligini o'zgartirish uchun fotorezist qovushoqligi o'zgartiriladi. Qalinlikni yupqa boshqarishga sentrifuga aylanish burchak tezligi ω ni tanlash bilan erishiladi, bu odatda $2000-10000 \text{ ayl/min}$ oralg'ida bo'ladi.

Sentrifugalash jarayonida plastinkalar qirg'oqlarida fotorezist ko'tarilishlari hosil bo'ladi va qalinlik

$$\Delta h = \sqrt{\frac{2\delta}{d\omega^2 R}} \quad (\text{III. 108})$$

bo'ladi. Bunda δ —fotorezist sirt tarangligi; R —plastinka-taglik radiusi; d —fotorezist zichligi.

Tayyorlangan har bir fotorezist uchun sentrifuganing kritik aylanish tezligi mavjud. Bu tezlikdan oshgandan so'ng fotorezist qatlam qalinligi kamayishi yuz bermaydi.

Fotorezist parda qalinligini tanlash chegarasi bir tomondan nuqsonsizligi bo'lsa, ikkinchi tomondan yuqori ajrata olish qobiliyatidir.

Fotorezist pardasining qalinligi 0,2 mkm dan kam bo'lsa, undan amalda foydalanib bo'lmaydi. Parda qalinligi 1 mkm dan katta bo'lsa, ajrata olish qobiliyati shunday kamayadiki, kichik o'lchamdagi shakl elementlarni olib bo'lmaydi. Shuning uchun fotorezist parda qalinligi 0,3 dan 0,8 mkm gacha tanlanadi.

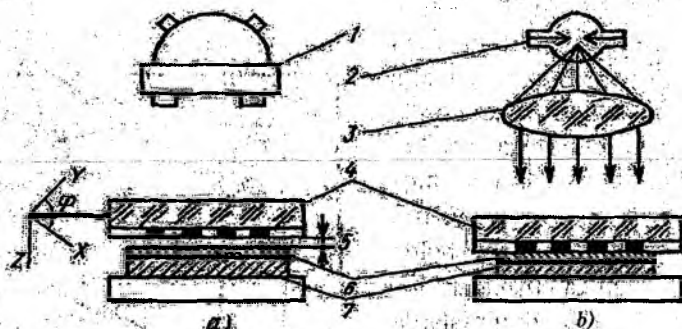
Fotorezistni quritish. Birinchi quritish fotorezist qatlamni hosil qilish jarayoni bilan tugaydi. Bu operatsiya fotorezist qatlamdan eritmani ketkazish va mustahkam, bir jinsli pardani hosil qilish uchun o'tkaziladi.

Polimer pardani quritish eng asosiy operatsiyalardan biri bo'lib, pardadagi yopishqoqlik va ichki mexanik kuchlar unga bog'liq.

Yopishqoqlik yaxshi bo'lishi, ichki mexanik kuchlanishlar pardada kam bo'lishi uchun quritish ikki pog'onali temperatura siklidan foydalaniladi.

Quritish temperaturasini tanlash uchun chegara fotorezist parda polimerlanishi yuz beradigan temperatura hisoblanadi. Har xil turdagi fotorezistlar uchun polimerlanish temperaturasi 140°C dan 200°C gacha mos keladi. Shuning uchun birinchi quritish jarayoni odatda polimerlash temperaturasidan ancha kichik temperaturalarda o'tkaziladi.

Yuqori sifatli fotorezist pradalarni olish uchun ularni ikki bosqichda



III. 47-rasm. Kontakli fotolitografiyada birga qo'shish (a) va ko'chirish (b) amali sxemalari:

1-mikroskop, 2-simobli lampa, 3-kondensor, 4-fotoandoza, 5-andoza bilan fotorezist oralig'i, 6-fotorezist, 7-plastinka.

oldin 18°C - 20°C temperaturada 15-30 daqiqa, keyin 90°C - 100°C temperaturada 30-60 daqiqa quritiladi.

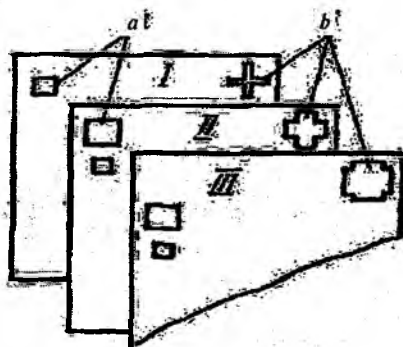
Quritish jarayonini inert gaz muhitida o'tkazish maqsadga muvofiqdir. Aks holda, havoda fotorezist oksidlanishi mumkin. Fotorezistlarni quritishda infraqizil qizdirishdan ham foydalaniladi.

Ekspozitsiya va birga qo'shish. Bu amal fotoandozadan tasvirni plastinkaga ko'chirishni ta'minlaydi va ular bir-biri bilan bog'langan (III.47-rasm).

Fotoandoza tasvir o'lchamlarini aniq uzatish uchun shaklni ko'chirish vaqti va ochiltirish vaqtini bir vaqtda va o'zaro bog'langan holda o'zgartirish kerak. Tanlangan ko'chirish tajribalar orqali aniqlanadi. Ko'chirish ortiqcha va kam bo'lsa, fotorezist qatlamlarida shakl o'lchamlarida o'zgarishlar yuz berishi mumkin. Ko'chirishda yorug'lik nuri sifatida odatda spektri qisqa to'liqlik sohada jadal nurlanuvchi quvvati 100-500 W li yuqori va o'ta yuqori bosimli simob lampadan foydalaniladi. Qisqa to'liqlik spektr sohasi ko'pchilik fotorezistlar eng katta sezgirli (300-450 nm) ga mos keladi. Bu nur kondensor 3 orqali fotoandozaga tushadi. Kontaktli fotolitografiyada ajrata olish qobiliyati ko'chiruvchi plastinka 7 bilan fotoandoza 4 orasidagi kontaktning mustahkamligiga bog'liq. Andoza 5 bilan fotorezist 6 oralig'i hisobiga frenel difraksiyasi paydo bo'lib, tasvir konturini buzadi. Oraliqni kamaytirish uchun vakuum yoki pnevmatik ushlagich bilan andozani plastinkaga qisiladi.

Hozirgi zamon aniq qurilmalari yordamida birga qo'shish va ko'chirishda ikkita birga qo'shish - vizual va fotoelektrik usullardan foydalaniladi. Aniqlik, ajratib olish va jarayon unumdorligi usulni tanlab olinishiga bog'liq. Birga qo'shishning qurilma aniqligi $\pm 0,1$ mkm ga yetishi mumkin. Biroq, haqiqiy holda $\pm(0,7\div 0,8)$ mkm ga erishilgan.

Avtomatik qurilmalarda ishlaganda fotoandozada maxsus belgilar: shaffofmas shtrixlar va taglikda yedirilgan ariqchalar qo'yiladi. Ariqcha kengligi shtrix kengligidan 2-4 marta katta



III.48-rasm. Birga qo'shish figuralarining I, II, III turlari: a)plastinkada; b)fotoandozada

bo'lishi kerak.

Operator oldin mikroskop 1 yordamida xomaki birga qo'shishni amalga oshiradi, so'ng aniq birga qo'shishni amalga oshiruvchi fotoelektrik sistemani ulaydi. Birga qo'shish belgilari jarayon aniqligini ta'minlashda asosiy rol o'ynaydi.

Shuni esda saqlash kerakki, yedirishda birga qo'shish figuralarining o'lchami o'zgaradi. Kontaktli fotolitografiya uchun birga qo'shish figuralarining turlari III.48-rasmda ko'rsatilgan.

Fotorezistlarda yashirin tasvirni ochiltirganda qatlamning kerakli qismlari ketkaziladi, undan so'ng plastinka sirtida himoyalangan shakl qolib, u fotoandozadagi rasmga mos keladi.

Negativ rezistlarni ochiltiruvchilar sifatida dioksan

$O\left(\begin{matrix} CH_2 & CH_2 \\ CH_2 & CH_2 \end{matrix}\right)O$; xlorbizol C_6H_5Cl ; trixloretilen C_2HCl_3 ; toluol

$C_6H_5CH_3$ va boshqalardan foydalanish mumkin.

Pozitiv rasmlarni ochiltirish uchun ishqoriy eritmalar: 0,3%-0,5% li KOH eritma; 1%-2% li trinitriyfosfat Na_3PO_4 eritma; organik

ishqorlar-etanolaminlar $C_2H_4\left(\begin{matrix} NH_2 \\ OH \end{matrix}\right)$ qo'llaniladi.

Ochiltirish jarayonida ochiltirgich temperaturasi va pH qiymatini nazorat qilish katta ahamiyatga ega. pH ning 0,1 ga o'zgarishi element o'lchamlarini yaxlitlashdan 10% og'ishiga olib keladi.

Negativ rezistlardan ko'chiriladigan qismlarni ketkazish organik eritmalar yordamida olib boriladi. Ochiltirilgan qatlamni quritish ochiltirgich qoldiqlarini ketkazish va taglikda shaklni yedirish jarayonida uning himoya xossasini yaxshilash maqsadida fotorezistni qo'shimcha termik polimerlash uchun o'tkaziladi. Quritish $120^{\circ}C-180^{\circ}C$ temperaturada olib boriladi.

Zadublash. Fotorezistning kislotaga chidamliligini zadub qilish bilan amalga oshiriladi, ya'ni bunda niqob to'la polimerlanadi. Zadublash jadal ultrabinafsha nur bilan nurlantirish yoki termik ishlov berish bilan olib boriladi. Ko'pincha, ikkinchi usul qo'llaniladi. Oldin $100^{\circ}C-120^{\circ}C$ da quritish, keyin $200^{\circ}C-220^{\circ}C$ temperaturada 30-40 daqiqa zadublash amalgam oshiriladi.

Yedirish. Taglikdagi shakl turli tarkibdagi yedirgichlarda turli rejimda yediriladi. Umumiy holda, fotorezistni himoya niqobi orqali yedirganda yedirgichlar mahalliy ta'sir qilishi, gaz ajralib chiqmasligi, fotorezist niqob va taglik yaxshi ho'llanilishi kerak. Endi ancha keng tarqalgan taglik materiallar Si, SiO_2 , kirishmasilikatli shishalar Si_3N_4, Al, Au, Mo larni yedirish xususiyatlarini ko'ramiz.

Monokristall kremniy yedirish suv qo'shilgan sistemali $HNO_3 - HF$ ko'p qo'llaniladigan yedirgichda olib boriladi. Fotorezistni kuchli buzuvchi HF oz bo'lgan yedirgichdan foydalanish maqsadga muvofiq. Polikristall kremniy yedirish uchun sekin yedirgichlardan foydalangan ma'qul, chunki u tez yediriladi. MOYa-tuzilishli zatvorlar sifatida qo'llaniladigan yupqa polikristall-kremniy qatlamini yedirish uchun eritma tarkibi: eritma A-40 qismli HNO_3 , 1 qismli HF , 1 qism 1%li eritma $AgNO_3$; eritma B-2 qism propilenlikol, 2 qism ionsizlantirilgan suvni qo'llash yaxshi natijalar beradi.

Yedirishdan oldin ikkala eritma 1:1 nisbatda aralashtiriladi va 5 daqiqa xona temperaturasida ushlab turiladi.

Kremniy to'rt oksidi (SiO_2) $HF - NH_4F$ tizimli yedirgichlarda yediriladi. Ancha keng tarqalgan yedirgich tarkibi: 7 qism 40% suvli NH_4F eritmasi va 1 qism HF dan iborat.

Aralashmasilikatli shishalarni yedirish yuqoridagi kabi yedirgichlarda amalga oshiriladi. Kremniy to'rt oksidga nisbatan shisha tezroq yediriladi. Shuning uchun fluorid kislotasi (HF) kichik tarkibda qo'llaniladi.

Kremniy nitridi fluorid yoki ortofosfat kislotada qizdirish bilan yediriladi.

Aluminiyga ortofosfat kislotasi (H_3PO_4) asosidagi yedirgichlarda 60°C-70°C gacha qizdirish bilan ishlov beriladi. H_3PO_4 kislotani qovushoqligi yuqori bo'lganligi uchun taglikdan gaz ajralishi qiyinlashadi. Shuning uchun yedirilmagan qismlar ham bo'lishi mumkin. Shu sababli eritma 30-50 GHz chastotada silkinib turishi tavsiya qilinadi. Oltinga ishlov berish uchun zar suvidan foydalaniladi. Tarkibi $KI : I_2 : H_2O$ bo'lgan yedirgich yaxshi natijalar beradi.

Fotorezistni ketkazish. Fotolitografiya texnologik jarayonining oxirgi amali fotorezistni ketkazish keyingi bosqichlarning sifatli bajarilishiga olib

keladi. Bu bosqichlarga diffuziya, oksidlash, metallash kiradi. Fotorezistni sulfat kislotada qaynagan tuzilishi buzilgan polimerda; organik eritmalarida ishlov berish yo'li bilan; plazma-kimyoviy, termik yoki fototermik usullarda ketkaziladi. Sulfat kislotada fotorezist erishi ancha yuqori, lekin metallashgan tagliklarda fotorezistlarni ketkazish uchun organik eritmalar: aseton, metiletileton, selluloza ishlatiladi.

Plastinkalar eritmada 20-24 soat ushlab turiladi, keyin shishgan fotorezist doka bilan olib tashlanadi.

Xulosa qilib aytganda, kontakt fotolitografiyada texnologik jarayon borishini III.46- rasmdagi amallar orqali bajariladi.

Optik fotolitografiyada ajrata olish qobiliyatini oshirish ishchi maydon diametrini birdaniga oshirish hozirgi zamon texnologiyasi asosiy masalalaridan biridir. Turli materiallarda tasvirni barpo qilish usullari uch yo'nalishda: proyeksion fotolitografiya, rentgenolitografiya, elektronolitografiya yo'nalishlarida rivojlanib bormoqda.

Bu usullarni kontaktli fotolitografiyadan farqi, birinchidan, fotoandozaning taglikka surtilgan fotorezist bilan mexanik kontakti yo'qligi, ikkinchidan, iflosliklarga sezgir emasligi, rezist turiga bog'liq emasligi yuqoridagi ikki tur fotolitografiyada mavjud bo'lsa, rentgen fotolitografiyada yuqoridagi afzallikdan tashqari ajrata olish qobiliyati 1,5-2 barobar kattadir. Albatta, bu usullarning o'ziga yarasha kamchiliklari mavjud. Bulardan biri birga qo'shish operatsiyasini bajarish va murakkab fotokatodlar yaratish zarurligidir.

Nazorat savollari

1. Fotolitografiya jarayoni nima uchun zarur?
2. Fotolitografiya jarayonidagi amallar kema-ketligini ayting.
3. Fotorezistlar xossalari qanaqa va unga qanday talablar qo'yiladi?
4. Fotorezistni taglikka o'tqazish usullarini ayting.
5. Fotoandoza nima va qanday vazifani bajaradi?
6. Fotoandozalarga qanday talablar qo'yiladi?
7. Qanday usullarda fotorezist ketkaziladi?
8. Fotolitografiyaning asboblari texnologiyasidagi rolini ayting.

17-BOB. OMİK KONTAKTLAR VA KONTAKT TIZIMLAR

17.1. Umumiy ma'lumotlar

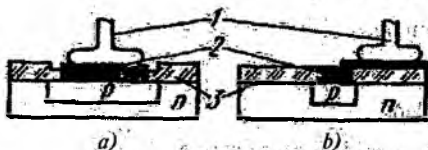
Omik kontakt deganda, unda asosiy bo'lmagan tok tashuvchilarning purkashi bo'lmay, volt-amper tavsifi chiziqli bo'lgan metall-yarimo'tkazgich kontakti tushuniladi. Omik kontakt har bir yarimo'tkazgichli asbob va IMS da elementlar va tashqi zanjirlar orasidagi elektr aloqani amalga oshirishni ta'minlaydi.

Planar asboblarda oddiy kontaktlar (III.50-rasm, *a*), dielektrik qatlam sirtida vujudga keltirilgan kontaktlar (III.50-rasm, *b*), tayyorlanadi. Keng tarqalgan kontaktlar qo'llanilishi faol soha o'lchami ancha kamaytiradi hamda tashqi muhitning yaqin bo'lmagan ta'sirlaridan saqlaydi.

Kontaktga bir qancha talablar qo'yilib, uning bajarilishi asbobning elektr va mexanik xossalari hamda qaysi shaklda tayyorlangani turg'unligini taqozo qiladi. Kontakt to'g'rilamaydigan (uning qarshiligi elektr tok yo'nalishi o'zgarishi bilan o'zgarmasligi), ya'ni volt-amper tavsifi chiziqli (ya'ni uning qarshiligi tokga bog'liq bo'lmasligi kerak); p - n o'tishning tik ham parallel yo'nalishlarida juda kichik qarshilikka ega bo'lishi, yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka va yarimo'tkazgichga yaxshi yopishqoqlikka (oksidga ham) ega bo'lishi, asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning purkalmasligi; yarimo'tkazgich va chiqqich materiallarning temperaturaviy kengayish koeffitsienti bir-biriga yaqin bo'lishi talab qilinadi.

Bu talablarning birortasi bajarilmasligi asbob tavsifini yomonlashtiradi. Agar omik kontakt nochiziqliy volt-amper tavsifiga ega bo'lsa, unda asbobning volt-amper tavsifi buziladi. Kontakt qarshiligi oshishi asbobni to'g'rilash va kuchaytirish xossalarini yomonlashtiradi. Agar kontakt purkovchi bo'lsa, u asbobning teskari toki oshishiga olib keladi.

Albatta, kontaktni barcha talablarga javob beradiganarini topish qiyin.



III.50-rasm. Planar asboblarning kontaktlari sxemalari.

1-chiqqich; 2-kontakt; 3-dielektrik qatlam.

17.2. Kontakt materiallar va kontakt tizimlarning ko'rinishlari

Metall-yarimo'tkazgichning kontakti o'mashganda hosil bo'lgan elektr to'siq elektronlarning metall φ_m va yarimo'tkazgich φ_{ya} chiqish ishlarining farqi bilan aniqlanadi. Shottki modeliga asosan, metall-yarimo'tkazgich kontakt, agarda $\varphi_m < \varphi_{ya}$ (n -turli yarimo'tkazgich uchun) va (p -tur yarimo'tkazgich uchun) bo'lsa, omik bo'ladi. Biroq, real sharoitlarda metall-yarimo'tkazgich $\varphi_m < \varphi_{ya}$ qismidagi energetik holatlarning ta'siri natijasida ko'p hollarda omik kontaktni olish qiyin bo'ladi. Yarimo'tkazgichda kontakt sohasi yaqinida yuqori legirlashni yaratish kontakt sifatini yaxshilaydi. Bunday soha yarimo'tkazgich qanday elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan bo'lsa, u ham shunday elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lib, natijada n^+-n yoki p^+-p turdagi tuzilmalar hosil bo'ladi.

Yuqori legirlangan sohani eritish, diffuziya yoki ion kiritish usulida mos kirishmalar kiritish bilan hosil qiladi. Bunday sohalarni Ge, Si, GaAs va boshqa yarimo'tkazgichlarda omik kontaktlar yaratish bilan hosil qilinadi. Biroq, ba'zibir keng zonali yarimo'tkazgichlarda xususiy qarama-qarshi belgili nuqsonlar bilan kirishmalarning kompensatsiya effekti tufayli ular asosida kontaktlar olish qiyin. Kontaktning injeksion xossasini kamaytirish uchun rekombinatsiyaning effektiv markazlari bo'ladigan chegaraga kirishmalar kiritish kerak. Ikkinchi usuli yarimo'tkazgich sirtini qayta ishlash natijasida buzilgan qatlamni hosil qilish bilan kamaytirish mumkin.

Kontakt material talablariga ko'proq yaxshi javob beradigan aluminiydir. Aluminiy yuqori o'tkazuvchanlikka ega, u plastik, kremniyga yaxshi yopishadi, SiO_2 bilan o'zaro ta'sirlashmaydigan yedirgichlarni qo'llash bilan SiO_2 va Si_3N_4 da oson fotolitografik ishlovi beriladi. Aluminiy kremniy bilan turg'un metallurgik tizimni hosil qiladi. Aluminiy pardaga termobosim usulida chiqqichlarni oson kavsharlash mumkin.

Aluminiyni kontakt material sifatida quyidagi kamchiliklari: 700°C ga va undan yuqori temperaturada kremniy ikki oksidini himoya pardasi bilan faol tiklanish reaksiyasi natijasida $p-n$ o'tish qisqa tutashib qolishi mumkin; kavsharlash murakkabligi va elektrolitik o'tirishni amalga oshirib bo'lmasiligi; ikki qatlamli tuzilma oltin-aluminiy turg'un

intermetall birikma hosil qiladi, u keyinchalik kontakti izdan chiqardi va asbob umuman ishdan chiqadi (bu hodisa adabiyotlarda ma'lum «to'q qizil chuma»); zanglash va chekli mexanik mustahkamligi va boshqalar.

Aluminiydan kontakt material sifatida chastotasi 1 Ghz gacha bo'lgan kam quvvatli kremniy asboblari tayyorlashda foydalanish mumkin.

Yuqori sifatli kontaktlarni ko'p qatlamli tizimlar asosida olish mumkin. Unda o'tish qarshiligi kichik, oksid qatlamlar tiklanish imkoniyatiga ega, yarimo'tkazgichga kirgan kontakt sayoz chuqurlikni ta'minlaydi. Undan tashqari, metall kontakt qatlam va chiqqich metall bilan bir-biriga mos kelgan yuqori o'tkazuvchanlikka ega qatlam hosil qilish uchun foydalaniladi.

Kontakt qatlamlar olishda titan, xrom, vanadiy, molibden, volframdan foydalaniladi.

Titan yuqori zanglashga chidamliligi va mexanik mustahkamligi, hamda turg'un metallurgik tizimni hosil qilish qobiliyati sababli kremniy qatlami bilan pastki kontaktlashuvchi sifatida kremniyda kontakt tizimlarini yaratishda qo'llaniladi.

Bir qatlamli titan kontaktidan foydalanish mumkin emas, chunki titan solishtirma qarshiligi ($5,8 \cdot 10^{-7}$ Om·m) va tez oksidlanadi. Kremniy sirtiga o'tkazilgan titan qatlami to'g'rilanmaydigan kontakti vujudga keltiradi va keyingi metall qatlam uchun u yopishqoqdir.

Titan pardalar kremniyda ko'p qatlamli omik kontaktlarni vujudga keltirishda qo'llaniladi. Bularga Si-Ti-Au, Si-Ti-Mo-Au, Si-Ti-Mo-Cr-Au va boshqalarni ko'rsatish mumkin.

Kontakt qatlam sifatida foydalanadigan xrom pardalar kremniy bilan to'g'rilamaydigan kontakt hosil qiladi va undan keyin surkaladigan metallga yaxshi yopishqoqlikni ta'minlaydi. Xrom kamchiligi aluminiyga o'xshab SiO₂ bilan 470 K temperaturada faol o'zaro ta'sirlashmaydi. Undan tashqari, xrom odatda mexanik kuchlanish holatda turadi va yetarli darajada g'ovak.

O'tkazgich qatlam materiali sifatida aluminiy va oltin ancha ko'p foydalaniladi. Kumush va mis osongina oksidlanishi sababli bu maqsadlar uchun ancha kam qo'llaniladi.

Kontakt tizimlarda o'tkazuvchi qatlam vujudga keltirish uchun yuqori o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan va kimyoviy inert oltindan foydalanish mumkin. Biroq, bunday pardalarning kremniy va SiO₂ ga yopishqoqligi yomon. Shuning uchun oraliq qatlamlarni Al, Ti, Cr, Mo, Ta-lardan

yaratish zarurligini ko'rsatadi. Si-Ti-Au, Si-Cr-Au, Si-W-Au, Si-Mo-Au va boshqalar omik kontakt tuzilmalarda oltin tashqi o'tkazuvchi qatlamni vujudga keltirish uchun foydalaniladi.

Ajraturvchi, to'siq qatlamlarni yaratish uchun odatda platina, titan, molibden pardalar qo'llaniladi. Platina ancha yaxshi ajratuvchi xossaga ega bo'ladi, chunki qalinligi 0,05 mkm bo'lgan platina parda kontakt va o'tkazuvchi qatlamlarni vujudga keltirish uchun foydalanadigan ko'pgina metallar orasidagi o'zaro ta'sirni yo'qotadi.

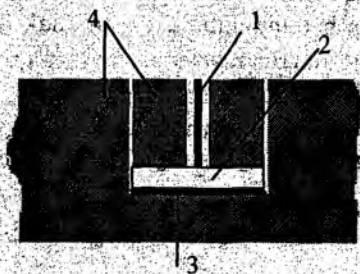
Ajraturvchi qatlamsiz kontakt tizim turg'un bo'lmaydi. Chunki, ikki qatlamli Cr-Au tizimda, metallar o'zaro diffuziyasi tufayli, kontakt qarshiligi oshishiga sabab bo'luvchi qattiq eritmalarning hosil bo'lishiga olib keladi.

17.3. Omik kontaktlar va kontakt tizimlarini vujudga keltirish usullari

Omik kontaktlar odatda qotishtirish, elektrokimyoviy yoki kimyoviy o'tqazish, bo'shliqda (vakuumda) bug'lantirish, termobosim yoki ultratovush usullarida tayyorlanadi.

Qotishmali usul bilan omik kontaktlarni olish jarayoni quyidagicha olib boriladi. Kristall plastinka sirtiga yupqa metall qatlam, metall sim yoki sharcha o'rnatilib, ularni suyulish temperaturasigacha qizdiriladi. Bunda yarimo'tkazgichda ozgina miqdorda suyulish bo'ladi. Sovishi natijasida eritma bilan yarimo'tkazgich tizimida legirlanuvchi kirishma metall bilan kristallanadi. Nati-

jada, yarimo'tkazgich o'tkazuvchanligiga mos kelgan yuqori legirlangan qatlam vujudga keladi va $Me-n^+-n$ yoki $Me-p^+-p$ turdagi tuzilma paydo bo'ladi. Qotishtirish jarayonida yarimo'tkazgichning metall bilan ho'llanuvchanligi katta ahamiyatga ega. Ho'llanuvchanlikni yaxshilash uchun yarimo'tkazgich sirti kirishmalardan va oksid qatlamlardan tozalanadi.



III.51-rasm. Qotishtirish usulida omik kontakt va $p-n$ o'tishni olish sxemasi.
1-aluminiy sim; 2-kristall; 3-omik kontakt;
4-moslama (grafitdan tayyorlangan).

Qoldiq sirt pardalarini ketkazish uchun flyuslar qo'llaniladi. Qotishtirish bilan olingan yarimo'tkazgich-metall kontakt xona temperaturasida katta qoldiq kuchlanish paydo bo'lmasligi uchun yarimo'tkazgich va metallar issiqlikdan kengayish koeffitsientlari qiymatlari bo'yicha bir-biriga yaqin bo'lishi kerak. Metall yetarli darajada plastik bo'lishi maqsadga muvofiq bo'ladi.

Sanoatda maxsus moslama yordamida omik kontakt bilan birlikda $p-n$ o'tish hosil qilinadi (III.51-rasm).

Omik kontaktlarni elektrokimyoviy usulda olish jarayoni elektrolitik vannada tuzlarni hosil qiluvchi elektrodlar orasidan oqayotgan tok o'tishi katodda metallni o'tqazish hisobiga ro'y beradi.

Kimyoviy va elektrokimyoviy o'tqazish asosan nikel va oltin kontaktlar olish uchun qo'llaniladi.

Kontaktni olishda kimyoviy o'tkazish jarayoni eritmada tiklanuvchi reagent yordamida tuzdan metallni tiklab yarimo'tkazgich sirtiga o'tkazish amalga oshiriladi.

Nikelni kimyoviy o'tqazish n -turdagi kremniy qarshiligini ancha kamaytirish imkonini beruvchi fosfat elektrolitlarida yuz beradi. Kremniyni nikellashda ancha keng tarqalgan eritmalaridan biri tarkibiga quyidagilar kiradi: 30 g/l nikel xloridi, 12 g/l natriy gipofosfit; 60 g/l limonno-kisliy natriy; 50 g/l aluminiy xloritdan foydalanish mumkin.

Har bir kvadrat santimetrga 2 sm^3 eritma olinadi va nikellash 92°C - 96°C da 10-12 min davom etadi. Nikelni o'tqazish ishqoriy eritmalarida pH -3÷10 da yuz beradi. Nikel bargaror bo'lishi uchun jarayon boshida eritmaga $2-4 \text{ sm}^3$ ammiak eritmasi qo'shiladi. Bunda elektrolit yashil rangdan ko'k rangga aylanadi. Nikellash temperaturasida ammiak tezda uchib ketadi. Shuning uchun eritmaga davriy ravishda ammiak qo'shib turiladi, bunda rang doimo ko'k bo'lishi kerak.

Oltinni o'tqazish jarayoni asosan elektrokimyoviy usullarda, ya'ni oltin xlor yoki kaliy ditsianoaurat $\text{KAu}(\text{CN})_2$ asosidagi ishqoriy elektrolitlarda o'tkaziladi. Ishqoriy elektrolitlarda tok zichligi $20-40 \text{ A/m}^2$ va temperaturasi $300-340\text{K}$ bo'lganda oltinni o'tqazish tezligi $0,025-0,05 \text{ mkm/min}$ dan oshmaydi.

Planar texnologiya rivojlanishi bilan omik kontaktlarni tayyorlash uchun vakuumda purkash usuli qo'llanila boshlandi. Bu usul hozirgi paytda mikrosxemalar tayyorlash uchun keng qo'llanilmoqda. Vakuumda purkash metallni qizdirilgan chulg'am yordamida bug'lantirish bilan

amalgam oshiriladi. Chulg'amlar yoki kichik qayiqchalar yordamida qizdirishda yarimo'tkazgich sirti turli kirishmalar bilan ifloslanishi mumkin. Undan saqlanish uchun jarayon boshida to'siqlardan foydalanish mumkin. Ikki yoki undan ortiq metall qatlamlarni olishda, odatda bir-biri bilan bog'liq bo'lmagan qizdirgich tizimlari bilan ta'minlangan qurilmalar qo'llaniladi.

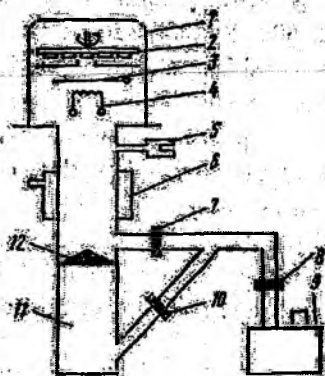
Termik bug'lantirish chuqur vakuumda o'tkaziladi. Metall kontaktlarni olishda vakuumda purkashning turli qurilmalari mavjud. Biz bu yerda sanoatda keng qo'llaniladigan vakuumda purkash qurilmasini (III.52-rasm) ko'rsatamiz.

Qurilmaning ishchi 1 kamerasiga yarimo'tkazgich 2 plastinkalar, 4 bug'lantirgich va 3 to'siq joylashtirilgan. Ishchi hajmdagi bosim 5 asbob yordamida o'lchanadi.

Boshlang'ich vakuumni hosil qilish uchun 9 forvakuum nasos yordamida 11 diffuzion nasos 12 klapani va 10 kran yopiq holga o'tkaziladi. 7 va 8 kranlar ochiq. Ishchi hajmda bosim 10 Pa bo'lganda 7 kran yopilib, 10 kran va 12 klapan ochiladi. Natijada, diffuzion nasos orqali vakuum olinadi. Qoldiq gazlar va yog' bug'larini kondensirlash uchun suyuq azot bilan to'ldirilgan 6 tuzoq xizmat qiladi.

Termik bug'lantirishda materiallarni bug'lantirish uchun W, Ta simli, Mo, Ta tasmasi yoki kvars, grafit, keramika qizdirgichlardan foydalaniladi. Bu materiallar bug'lantiriluvchi juda ko'p materiallar bilan o'zaro ta'sirlashmaydi.

Metall pardalarni qoplashda katod changlanish usuli bug'lantiriluvchi metallni qizdirish o'rniga uni inert gaz ionlari bilan, ko'pincha argon



III.52-rasm Vakuumda purkash qurilmasining sxemasi:

- 1-ishchi kamera (qalpoq),
- 2-yarimo'tkazgich plastinka,
- 3-to'siq,
- 4-bug'lantirgich,
- 5-manometr,
- 6-ushlagich,
- 7-kran,
- 8-kran,
- 9-forvakuum nasos,
- 10-kran,
- 11-diffuzion nasos,
- 12-ochuvchi-yopuvchi moslama.

ionlari bilan bombardimon qilinadi. Katod changlanish usuli oldin biz ko'rgan yedirish usuliga o'xshaydi va bunda katod-nishon metallardan tayyorlanib, uning asosida parda hosil bo'ladi. Katod changlanish usuli bilan har qanday metallardan pardalar olish mumkin. Parda qalinligi va sifati katod tokining qiymati va inert gaz bosimi bilan aniqlanadi. Katod chaglanish tezligi chaglanish koeffitsienti katodni tashlab chiquvchi metallar atomlari miqdorining uni bombardimon qiluvchi ionlar soniga nisbati bilan aniqlanadi. Changlanish koeffitsienti changlanuvchi metall ionining energiyasiga va tushish burchagiga bog'liq. Katod chaglanish qurilmalarida yarimo'tkagich sirtini boshlang'ich tozalash imkoniyati ham mavjud.

Bu katod changlanish usulining kamchiligi shuki, uning apparaturasi murakkab va metall pardalarda gaz molekularidagi kirishmalarning bo'lib qolishidir.

Aluminiy asosida omik kontaktlar tizimini yaratish.

Aluminiy pardalarni qoplash uchun vakuumda ($5 \cdot 10^{-3}$ Pa) termik bug'lantirish usuli keng qo'llaniladi.

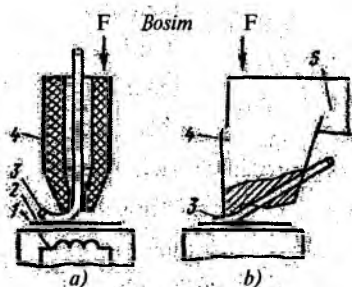
Sifatli pardani elektron-nur qizdirgichda aluminiy simlarini qizdirish bilan olish mumkin. Bunda aluminiyda bug'lanish tezligini elektron oqim quvvatini o'zgartirish bilan keng oraliqda o'zgartirish mumkin.

Quvvat oshishi bilan metall kondensirlash tezligi chiziqli o'sadi. Elektron nur quvvati 6 kW va taglik bilan osilgan sim orasidagi masofa 0,25 m bo'lganda kondensatsiya tezligi taxminan 0,15 mkm/s ni tashkil qiladi.

Ma'lumki, hosil bo'lgan parda tuzilmasi va kontakt sifati taglik sirti sifatiga va temperaturaga bog'liq. Shuning uchun aluminiy pardani kremniy taglikka o'tqazishda temperatura 600 K dan 820 K gacha bo'lgan oraliq tanlanadi. Bu temperaturalar oshishi aluminiy pardani ancha katta donadorlikka olib keladi. Undan tashqari, 770 K-820 K oraliq temperaturada aluminiyning kremniyga yopishqoqligi ancha oshib ketadi. Kristall bilan parda o'rtasida suyulma bo'lishidan saqlanish uchun, taglik temperaturasi 950 K dan oshmasligi kerak.

Pardani qoplashdan oldin taglik yuqori darajada tozalangan bo'lishi kerak. Buning uchun ular fluorid kislotasi (HF), aseton bilan (1:10) aralashmada va toza asetonda uch martaba yuvish bilan yedirishdan o'tkaziladi.

Elektr o'tkazuvchanligi n -tur bo'lgan kremniyda omik kontakt qarshiligini kamaytirish uchun oltindan parda qoplanadi. Buning uchun



III.53-rasm. Termobosim (a) va ultratovush payvandlash (b) usullarida kontaktni hosil qilish: 1-qizdirgich, 2-kristall, 3-chiqqich, 4-sim dozatori, 5-ultratovush tebranishlar konsentratori.

saqlash uchun ishchi kamerada bosim 10^{-9} Pa sathida ushlab turiladi. Titan qatlam qoplanganidan so'ng molibdenli yoki tantal qayiqchalardan termik bug'lantirish usuli bilan unga oltin parda qoplanadi. Kremniy to'rt oksidiga (SiO_2) titanning yaxshi yopishqoqligi tufayli, keng tarqalgan SiO_2 pardaga kontakt tizimlarni yaratish mumkin. Oltin o'rniga o'tkazgich qatlam sifatida nikel yoki kumush qoplamalardan ham foydalanish mumkin.

Molibden yoki tantal qozonchalarda ingichga simlarni ketma-ket issiqlik bug'lantirish usuli bilan xrom va oltin qoplamalar o'tkazish bilan Cr-Au kontakt tizimi yaratiladi. Xrom parda qoplangandan so'ng, xrom va oltin tarkibli qatlam qoplanadi, keyin toza oltin parda qoplanadi. Xrom parda qalinligi ~100 nm, oltin parda esa ~300 nm ni tashkil qiladi. $T=1170$ K da beriladigan termik ishlov Cr-Au omik kontakt tizimning xossalarini yaxshilaydi.

Kontakt qatlam sifatida molibdendan ham foydalanish mumkin. Molibden pardani odatda elektron nur yordamida o'tkaziladi.

Metall pardaga ingichka metall simlar kontakti.

Yarimo'tkazgich sirtiga qoplangan metall pardaga ingichka metall simlar kontaktini termobosim yoki ultratovush payvand usullarida olish

vakuumda molibdenli tigeldan termik bug'lantirish usulidan foydalaniladi. So'ng 640 K-670 K temperaturada termik ishlov beriladi.

Boshqa materiallar asosida kontakt tizimlarini yaratish.

Kremniyga Ti-Au tizimli ikki qatlamli omik kontaktni yaratish uchun issiqlikdan bug'lantirish yoki katod o'tqazish usulidan foydalaniladi. Oldin volfram spiraldagi titan termik bug'lantirib titan parda qoplanadi. Titanni oksidlanishdan

mumkin (III.53-rasm). Ingichka metall simlarni (ko'pincha oltin yoki aluminiy) termobosim usulida ham qizdirish, ham bosim ostida olinadi.

Termobosim usulidan farqli ravishda bosim ostida ultratovush payvandlashda ultratovush tebranishlarda ishqalanishlar hisobiga yupqa sirt pardalar buziladi va u materiallarning o'zaro zich kontaktini ta'minlaydi. Mexanik bosim va ishqalanish kontaktini hosil qiluvchi materiallar aralashishini va simlarning sirt bilan mustahkam kontaktini hosil qiladi. Shu usulda yarimo'tkazgichniing plastinkasi yoki kristalida talab darajadagi qalinlikda n^+ - yoki p^+ - turdagi yuqori legirlangan, kichik qarshilikli omik kontaktlarni osongina olish mumkin.

Nazorat savollari

1. Omik kontakt qanday kontakt?
2. Omik kontaktga qo'yiladigan talablarni ayting.
3. Elektrod materiallar qanday tanlanadi?
4. Omik kontaktlar qanday usullarda olinadi?
5. Omik kontaktni elektrolitik o'tqazish usulini ayting.
6. Kontakt tizimi nima?
7. Purkab qoplash uchun vakuum qurilmasini tushuntiring.
8. Metall pardaga ingichka simlar qanday ulanadi?

18- BOB. YARIMO'TKAZGICHLI ASBOBLAR SIRTINI MUSTAHKAMLASH VA HIMOYA QILISH

18.1. Umumiy ma'lumotlar

Hozirgi zamon radioelektronikasida asosiy bosh talablaridan biri butun apparatlar va bloklar, alohida elementlar ishinig mustahkamligi va chidamliligidir. Aniqlanganki, yarimo'tkazgichli asboblari va IMS turg'un va mustahkam ishlashi yarimo'tkazgich sirt holati va uning tashqi muhit bilan o'zaro ta'siri xususiyatlari bilan bog'langan. Asbobning berilgan ishlatish sharoitlari natijasida sirt holatlari turg'un bo'lishi, ayniqsa $p-n$ o'tish chiqqan joylarini tashqi muhit ta'siridan mustahkam himoyalash kerak.

Keyingi yillarda himoya qatlamlari sifatida kremniy IV oksidi SiO_2 , kremniy nitridi Si_3N_4 , aluminii oksidi Al_2O_3 yoki shu materiallarning kombinatsiyasi asosidagi qatlam materiallarni qo'llash kengaymoqda. Ba'zi hollarda tez eriydigan silikatli yoki xalkogenidli himoya pardalar muvaffaqiyat bilan foydalanilmoqda.

Himoya qoplamalari boshqa vazifalarni ham bajarishini 17-bobda izohlab bergan edik. Biroq hozirgi zamon konstruksiyalarida himoya pardalar sifatida kremniyorganiklar: lak, kompaund va boshqalar keng qo'llanilmoqda.

18.2. Asbobning elektr parametrlariga $p-n$ o'tish sirt holati ta'siri

Elektron-kovak o'tish sirti deganda, yarimo'tkazgich kristall yoki yarimo'tkazgich plastinka sirtiga chiqqan qism tushuniladi. $p-n$ o'tishi chiqqan yarimo'tkazgich material sirt holati, $r-p$ o'tishdan tashqari qolgan yarimo'tkazgich hajmining fizik xossasiga nisbatan asbobning elektr parametrlariga ancha kuchli ta'sir qiladi. Agar yarimo'tkazgich kristall ichidagi $p-n$ o'tish tashqi ta'sirlardan mustahkam himoyalangan bo'lsa, kristall sirtiga chiqqan $p-n$ o'tish esa qo'shimcha himoyalinishi kerak.

Undan tashqari, yarimo'tkazgich material sirtining tuzilishi cheksiz uzun kristallning energetik zonasidan boshqacha bo'ladi. Sirt tuzilishi

qisman uzilgan atomlardan tashkil topadi. Chunki, har bir atomga kovalent bog'lanish uchun juftliklar yetishmaydi, unda bu bog'lanishlar to'yinmagan bo'lib qoladi va u energetik holatga ekvivalent bo'lib, sathlar man qilingan zona ichida yotadi.

Shunday qilib, elektronlarni egallab olish yo'li bilan atomlar o'z aloqalarini to'ldirishga intiladi. Natijada yarimo'tkazgich material turiga qaramay akseptor sathlar hosil bo'ladi.

Shu bilan birga yarimo'tkazgich materialda gaz va suyuqlik ko'rinishdagi o'gay modda atomlarining adsorbsiyasi natijasida yuqoridagi sathlardan tashqari qo'shimcha sirt holatlari hosil bo'lishi mumkin. Adsorbsiyalashgan atomlarining xossalriga bog'liq ravishda yana hosil bo'lgan sathlar akseptor yoki donor bo'lishi mumkin.

Agar yarimo'tkazgich material sirtiga elektronlarni egallab oladigan atom yoki molekula adsorblashsa, unda akseptor sathlar hosil bo'ladi. Agar bu holda yarimo'tkazgich material elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lsa, unda elektronlar o'tkazuvchanlik zonasidan yoki donor sathdan Fermi sathida pastda yotuvchi akseptor sathni to'ldirishga intiladi. Bu esa, kristall sirtiga to'g'ridan-to'g'ri joylashgan elektronlar bilan kambag'allashgan yupqa yarimo'tkazgich qatlam hosil bo'lishiga olib keladi. Bu yerda musbat zaryadlangan donor markazlar hosil bo'ladi. Hosil bo'lgan elektr maydon shunday yo'nalganki, yarimo'tkazgich material hajmidan kelayotgan elektronlarni itaradi va energetik to'siqni vujudga keltiradi.

Bunda yarimo'tkazgich-muhit chegarasida energetik zona va yarimo'tkazgich material sirtida inversion qatlam vujudga kelishi mumkin.

Gaz molekulari yoki bug'lari adsorbsiyasi fizik yoki kimyoviy bo'lishi mumkin. Fizik adsorbsiya holida bug'lar va gazlar qattiq jism ionlari ta'sirida yarimo'tkazgich sirtida ushlanib qoladi.

Kimyoviy adsorbsiyada molekularlar atomlarga dissotsiyanadi, yarimo'tkazgich materialning sirt atomlari bilan ular orasida turg'un kimyoviy aloqalar hosil bo'lishi bilan valent elektronlar qayta taqsimlanishi yuz beradi. Shunday, suv bug'lari ikkiala mexanizmlar yordamida yarimo'tkazgich material sirtiga adsorbsiyanadi, bunda dastlabki ikki-uch qatlam yarimo'tkazgich panjara atomlari bilan kuchli

bog'langan bo'lib, qo'zg'almas bo'lib qoladi, qolgan qatlamlarda (fizik) suv molekulari yarimo'tkazgich material sirti bo'ylab ko'chishi mumkin.

Shunday qilib, turli gazlar va bug'lar adsorbsiyasi yarimo'tkazgich sirt yaqin sohasida fazoviy zaryadlarning hosil bo'lishiga olib keladi. Ancha faol kimyoviy yutiluvchi gazlarga kislorod va suv bug'lari kiradi. Kislorod, azon hamda xlorning o'tirishi manfiy ishorali sirt zaryadlarni paydo bo'lishiga olib keladi. Suv bug'lari, spirt, asetonlarning o'tirishi musbat zaryadlarni hosil qiladi.

Yarimo'tkazgich materialning nam sirtiga o'tirgan metall ionlari (masalan, natriy miqdori 10^{14} sm^{-2} gacha) bo'ladi va ionli o'tkazgich bo'lib qolishi mumkin. Shunday yarimo'tkazgich sirtiga chiqqan p - n o'tishga tashqi elektr maydon qo'yilishi sirtiy ion tokini hosil qiladi va bu tok p - n o'tishning hajmiy tokidan bir necha marta yuqori bo'ladi.

Bundan tashqari, asboblarning elektr parametrlari o'zgarishida inversion qatlamlarning hosil bo'lishi bilan bog'liq bo'lgan sirqish toki ancha katta rol o'ynaydi.

Chunki, p - n o'tishga yaqin yarimo'tkazgich sohasida paydo bo'lgan inversion qatlam yarimo'tkazgich sirtiga chiquvchi p - n o'tishga tutashgan inversion kanal p - n o'tish samaraviy maydonini oshiradi va asbobning teskari toki oshishiga olib keladi. Shunday qilib, ion yoki kanal o'tkazuvchanlik hisobiga asbob teskari toki ancha oshadi.

Teskari tokning o'zgarish xususiyati bo'yicha qaysi mexanizm asosiy rol o'ynashini bilish mumkin. Ionlar toklarning kuchlanishga bog'lanish chiziqli, kanal toki esa kuchlanishning kvadrat ildiziga proporsional o'zgaradi.

Elektron-kovak o'tishlarda teshilish kuchlanishi kamayishi ham kanallarning mavjudligi bilan bog'langan. Teshilish kuchlanishi p - n o'tishning kanal sohasida hajmga nisbatan kichik, chunki kanal o'tkazuvchanligi taglik material- baza o'tkazuvchanligidan kattadir.

Asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar sirt rekombinatsiya tezligi yarimo'tkazgich material sirt holatiga ta'sir qiluvchi zaruriy parametrlardan biridir.

Sirt rekombinatsiya tezligi yuqorida ko'rilgan yarimo'tkazgich qatlam sirtidagi buzilishlar va adsorbsiya mexanizmlari hisobiga hajmiy rekombinatsiyaga nisbatan ancha yuqori bo'ladi. Shuning uchun asosiy

bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti faqat hajmiy nuqsonlar orqali aniqlanadigan vaqtdan ancha kichik.

Tranzistorlarda sirt rekombinatsiyasi oshishi zaryad tashuvchilar ko'chishi koeffitsienti kamayishiga va kuchaytirish koeffitsienti pasayishiga olib keladi. Asboblarning uzoq vaqt ishlashi davomida ularning elektr parametrlari yomonlashadi. Bunga asosiy sabab, birinchi o'rinda $p-n$ o'tishli yarimo'tkazgich kristall sirt holatining o'zgarishidir. Yarimo'tkazgich kristall sirt holati o'zgarishi tashqi muhitning o'zgarishi va uni yarimo'tkazgich materialga ta'siri tufayli sodir bo'ladi. Shu sababli $p-n$ o'tishli yarimo'tkazgich kristall sirtining himoyasi sifatiga faqat tayyor asbob elektr parametrlariga emas, balki ularning mustahkamligi va xizmat vaqti ham kiradi.

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida $p-n$ o'tishli yarimo'tkazgich kristall sirtiga tashqi agressiv muhit ta'sirini yo'qotish uchun turli usullardan foydalaniladi. Bu esa, asbobning elektr parametrlarini ish davomida turg'un va uzoq vaqt saqlash imkonini beradi.

18.3. Organik qoplamalar yordamida sirtni himoyalash

Elektron-kovak o'tishlar sirtini tashqi atmosfera ta'siridan himoyalash uchun namga chidamli lak yoki kompaund qoplamalardan hozirgacha foydalanilib kelinmoqda. Bu usul birinchi navbatda planar bo'lmagan asboblari, ya'ni qotishmali, qotishma-diffuzion, meza-qotishmali va meza-diffuzion asboblarni tayyorlashda qo'llaniladi.

Laklar va kompaundlar bilan himoyalash eng sodda texnologik usuldir. Ularni o'tish sirtiga oddiy shiprits bilan surkaladi, bunda albatta sirtga chiqqan o'tishgina qoplanmasdan uning atrofi va chiqqichning ma'lum qismi ham laklanadi. Kremniy organik kompaundlar tiristor tuzilmalardagi yoqlarni himoyalash uchun keng qo'llaniladi. Aytib o'tish keraki, sirtni laklash yoki kompaund bilan qoplashdan oldin, qoida bo'yicha, uni oksidlanadi yoki boshqa ancha mustahkam vositalar bilan himoyalaniadi.

Elektron-kovak o'tishlarni himoya qilish uchun materiallar sifatida turli kremniy-organik laklar va kompaundlardan foydalaniladi. Ular

nisbatan namga yuqori chidamli va yaxshi dielektr xossalarga ega ekanligi bilan ajralib turadi (III.8-jadval).

III.8-jadval

Turi	Quritish rejimi		Solishtirma qarshiligi ρ , Om·sm	
	vaqti, soat	Temperaturasi, °C	20°C da	200°C da
Lak				
MK-49	5	200	10^{14}	10^{12}
K-55	3	150	10^{13}	10^{12}
K-1	4	150	10^{12}	10^{10}
ПЕ-518	3	200	10^{14}	10^{12}
KO-961	1	20	10^{14}	10^{12}
Emal ППЕ-401	5	200	10^{14}	10^{12}
Kompaund	12	100	10^{13}	10^{12}
Emal ЭС-50	2	180	10^{14}	10^{11}

Elektron-kovak o'tishli yarimo'tkazgich kristall sirtini himoyalash uchun laklar va kompaundlar bilan birgalikda kremniy organik vazelinlar qo'llanilmoqda. Vazelinlar asosan mayda dispersion to'ldirgich qo'shilgan kremniy-organik suyuqliklardan olinadi. Ular yuqori izolatsion xossaga ega (20°C temperaturada solishtirma qarshiligi 10^{14} Om·sm, 150°C da esa 10^{12} Om·sm, elektr mustahkamligi 15 kV/m).

Vazelinlarning laklar va kompaundlardan afzallik farqi shundan iboratki, ular yarimo'tkazgich kristallga surkalgandan so'ng mexanik kuchlanishlarni hosil qilmaydi.

Organik himoya qoplamalarining boshqacha qiziq ko'rinishlaridan biri silanlash usuli bo'lib, unda yarimo'tkazgich sirtida kremniy organik polimer pardalar olinadi. Bu holda parda to'g'ridan-to'g'ri yarimo'tkazgich sirtida monomer gidroliz jarayonida hosil qilinadi. Masalan, organogaloidosilan R_4-iSiX_i ($i = 1, 2, 3$), gidrolizini reaksiyasi hisobiga parda vujudga keladi. Bu yerda R-organik radikal, bular sifatida metil CN_3 , etil S_2N_5 , fenil S_6N_6 ; X-monomerni gidrolizlovchi qismi, masalan, galoid Cl, Br ishlatiladi.

Gidroliz-polimerlash reaksiyasi oldindan suyuq metilxlorsilan yoki silanli eritma va ularning karbon vodorod aralashmalarida namlangan

namunalari, silanlar va ularning aralashma bug'larida ma'lum vaqt ushlab turilib o'tkaziladi.

Botirish usuli yuqori himoyali xossaga ega bo'lgan pardani (ayrimlari yaxshi yopishqoqlikni va suv o'tkazmaslikni) ta'minlaydi, biroq galoidosilan gidrolizi paytida ancha miqdorda vodorod xlorid paydo bo'ladi. Bu esa, aluminiy kontaktlarni yemirishi mumkin. Biroq, silanli eritmalarga vodorod xloridni neytrallovchi kiritish mumkin. Eritmada galoidosilan konsentratsiyasini boshqarish hisobiga botirish jarayoni boshqariluvchidir. Parda qalinligi 0,3 mkm dan oshmaydi.

Sirtini silanlash usulining, polimer laklar va kompaundlarni mexanik qoplash usuliga nisbatan, asosiy afzalligi yarimo'tkazgich sirti bilan himoya pardasi orasidagi kimyoviy bog'lanishning mavjudligidir. Bu faqat sirtga yuqori yopishqoqlikni ta'minlamasdan, nuqsonlarni kamaytirib, o'tishlarni teskari tavsifnomasini yaxshilaydi. Undan tashqari, eritmalarda silanlash usuli murakkab uskunalar talab qilmagan holda himoya pardalari gomogen o'sishi uchun sharoit yaratadi.

18.3. Kremniy oksid va nitridlar bilan himoyalash

Yarimo'tkazgichli asboblarda va IMSlar ishlab chiqarish texnologiyasida kremniy IV oksidi SiO_2 va kremniy nitridi Si_3N_4 keng qo'llanilmoqda. Asboblarni planar tayyorlashda himoya pardalar SiO_2 va Si_3N_4 boshlang'ich taglikka *p-n* o'tishlarni hosil qilishdan oldin qoplanadi.

Himoya pardalar SiO_2 va Si_3N_4 orqali mahalliy diffuziya o'tkazilishi yarimo'tkazgich kristall sirtiga chiqqan *p-n* o'tishni tashqi ta'sirdan himoyalagan holda ajratish inkonini beradi.

Dielektr SiO_2 va Si_3N_4 himoya pardalarni olish usullari 17-bobda batafsil berilgan. Bu yerda biz qotishmali, qotishma-diffuzion va meza-qotishmali usullarda olingan *p-n* o'tishlarni himoyalash usullari haqida to'xtalamiz. Bu turdagi asboblarga himoya pardalari SiO_2 va Si_3N_4 *p-n* o'tishlar va omik kontaktlar olingandan so'ng qoplanadi.

Elektron-kovak o'tishli kremniy kristall sirtida oksidli himoyaviy pardalarini kuchli kimyoviy oksidlovchilarda ishlov berish yo'li bilan olinadi. Ko'pincha oksidlovchi sifatida nitrat kislotadan foydalaniladi.

Kremniy sirtida hosil bo'luvchi himoya pardasining bir jinsliliigi va qalinligi ko'pincha kimyoviy oksidlanish rejimiga bog'liq.

Elektron-kovak o'tishli yarimo'tkazgich plastinkalar sirtiga oksidli himoyaviy pardalar qoplash uchun kislorod tarkibli birikmalarning suvli eritmalaridan ham foydalanish mumkin. Bu birikmalar kremniy bilan o'zaro ta'sirlashib kislorod ajraladi va sirtini oksidlaydi. Natijada, yupqa himoya pardasini hosil qiladi. Bunday eritmalar sifatida quyidagi aralashmalarni ko'rsatishi mumkin: 100 ml suv va 50 mg natriy asetati; 200 ml suv va 70 ml ortofosfat kislota; 100 ml suv va 50 ml sulfat kislota; 150 ml suv va 10 g dvunatriyfosfat va boshqalardan foydalanish mumkin. Bu aralashmalarda 250-350° C temperaturada 10-15 soat ishlov beriladi.

Kremniy plastinkalar va *p-n* o'tishli kristallarni katalizator qatnashgan is gaz muhitida ishlov berish bilan bir jinsli SiO₂ himoya pardalarini olish mumkin. Katalizator sifatida metan yoki etilen ishlatiladi. Bu usul qotishmali yoki diffuzion tuzilmalarda himoyaviy pardalarini olish imkoniyatini beradi.

18.5. Metall oksidi pardalari bilan himoyalash

Metall oksidi pardalari yarimo'tkazgich material sirtida himoya qoplamasini hosil qiladi. Bu pardalar solishtirma qarshiligi 10¹⁴ - 10¹⁵ Om-sm bo'lib, namga barqaror va issiqqa chidamlidir.

Yarimo'tkazgichli asboblarda ishlab chiqarishda *p-n* o'tishli kristallarni himoyalash uchun aluminiiy, titan, berilliy, sirkoniy va boshqalar oksidlari asosidagi himoya pardalari qo'llaniladi. Namunaviy material qum ko'rinishida olinadi. Tashuvchi agent sifatida esa galogen yoki vodorodning galoid birikmalaridan foydalaniladi. Himoya pardalarini o'tqazish reaksiya kameralarda olib boriladi, unda manba va yarimo'tkazgich material orasiga gradientli temperatura o'rnatiladi. Manba (qum) temperaturasi yarimo'tkazgich temperaturasidan yuqori bo'ladi, chunki reaksiya mahsulotlari *p-n* o'tishlar sirtiga o'tirishi kerak.

Manba va yarimo'tkazgich material orasidagi temperatura gradienti oshishi natijasida himoya pardasining hosil bo'lish tezligi o'sadi. Al₂O₃, BeO, TiO₂, ZrO₂ himoya pardalarni o'tqazish uchun manba

temperaturasini 800-1200°C diapazonda, *p-n* o'tishli kristall temperaturasini 350-500°C diapazonda ushlab kerak. Manba va yarimo'tkazgich kristall orasidagi masofa temperatura gradientiga bog'liq ravishda 10-20 sm bo'lishi kerak.

Elektron-kovak o'tishli yarimo'tkazgichli plastinkada himoya pardasi hosil bo'lishning texnologik jarayoni kvarts nayda olib borilib, uning bir uchiga manba, masalan, Al_2O_3 li tigil va ikkinchi tomoniga *p-n* o'tishli kristallar joylashtiriladi. Kvarts naydan oldin havo chiqarilib, keyin kerakli miqdorda tashuvchi reagent kiritiladi.

III.9-jadvalda metall oksidli himoya pardalarini qoplash rejimi berilgan.

III.9-jadval

Manba materiali	Tashuvchi reagentlar	Manba temperaturasi °C	Plastinka temperaturasi °C
Al_2O_3	HCl, HBr	800-1200	400-500
BeO	HCl, HBr	900-1200	450-500
TiO_2	HCl, HBr, Cl_2	800-1000	480-500
ZrO_2	HCl, HBr	1000-1200	490-800

Yuqorida ko'rilgan metall oksidli himoya pardalaridan tashqari, *p-n* o'tishli yarimo'tkazgich materiallarni himoyalash uchun 7,5% polietilen va 92,5% polibutilendan tashkil topgan aralashmada erigan qo'rg'oshin surikdan manba sifatida foydalanish mumkin. Bu aralashma aralashtiriladi va *p-n* o'tish sirtiga surkaladi. Quritish temperaturasini 120-140°C deb tanlanadi. Manba sifatida rux xromat $ZnCrO_4$, hamda $ZnCO_4$, $SrCrO_4$ va Pb_3O_4 lardan iborat aralashmadan ham foydalanish mumkin. Bunday aralashmada suspenziya uchuvchi eritmalarni aralashtirib hosil qilinadi va *p-n* o'tishli kristall sirtiga surkaladi. Shundan so'ng 200°C temperaturada termik ishlov berish natijasida metall oksidli himoya pardasi hosil bo'ladi.

Himoya pardalari manbalari sifatida ishqoriy yer metallari: titanatlar, sikonatlar va stannatlardan foydalanish ham mumkin.

III.10-jadvalda yarimo'tkazgichlar texnologiyasida himoyalovchi, ajratuvchi va niqob qatlamlari sifatida keng foydalaniladigan materiallarning solishtirma tavsifnomalari berilgan.

Material tavsifnomasi	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃
Taqlangan zona, eV	8,0	4,5	5,0
Nisbiy dielektr singdiruvchanligi (past chastotali)	4,0	6-9	8-9
Singdirish ko'rsatkichi	1,4-1,5	2,0	1,7-1,8
Eng katta solishtirma qarshiligi, Om·sm	10 ¹⁵ -10 ¹⁶	10 ¹⁵ -10 ¹⁶	10 ¹⁴ -10 ¹⁵
Kremniy bilan eng kichik sirt zaryad zichligi, sm ⁻²	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹¹ -10 ¹²
Elektr mustahkamligi, V/sm	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁶
Termik kengayish koef. 200°C da, K ⁻¹ (Si uchun 4,5·10 ⁻⁶)	0,4·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁶	4·10 ⁻⁶
Nisbiy radiatsiyaga chidamligi	1	10	100

18.6. Shisha pardalar bilan himoyalash

Shisha pardalar bilan himoyalash ko'pchilik turdagi yarimo'tkazgichli asboblarda va IMSlar uchun qo'llaniladi. Shisha bilan himoyalash asboblarda elektr parametrlarini yaxshilaydi. Chunki, shisha qatlami *p-n* o'tishda ko'chuvchi ionlar bilan bog'lanadi va elektr parametrlarini yaxshilaydi. Shishali himoyaviy parda asbobning turg'unligini, mustahkamligini va ishlash muddatini o'ttiradi.

Shisha to'g'ridan-to'g'ri yarimo'tkazgich sirtiga yoki himoya qatlami ustiga surkalishi bilan birga chiqqichlarining ma'lum qismiga ham qoplanishi mumkin.

Kremniyli asboblarni himoyalash uchun bor-silikatli, fosfor-silikatli va qo'rg'oshin-silikatli shishalar, mos ravishda: $m \cdot B_2O_3 \cdot n \cdot SiO_2$; $m \cdot P_2O_5 \cdot n \cdot SiO_2$; $mPbO \cdot n \cdot SiO_2$ lar qo'llaniladi, albatta ancha murakkab tarkibli shishalar: alumin-bor-silikatli $m \cdot Al_2O_3 \cdot n \cdot B_2O_3 \cdot p \cdot SiO_2$, rux-bor-silikatli $m \cdot ZnO \cdot n \cdot B_2O_3 \cdot p \cdot SiO_2$ va boshqalardan ham foydalanish mumkin. Undan tashqari, shisha tarkibiga modifikatorlar: Li_2O ; K_2O ; Na_2O ; CaO ; BeO va noyob yer metallarning oksidlari qo'shiladi.

Ko'p hollarda shishani organik erituvchilar (masalan, spirt)da kolloid eritma ko'rinishida olinadi.

Olingan eritma yoki suspenziya sepish usulida taglik sirtiga o'tqaziladi va 600-700°C da sirtni eritgandan so'ng bir jinsli yupqa qatlam (0,1 mkm gacha) olinadi.

Kremniy asosidagi *p-n* o'tishlarni himoyalashda alumosilikat shishalar keng qo'llanilmoqda. Chunki, bu shishalarning termik kengayish koeffitsienti kremniyning termik kengayish koeffitsientiga deyarli yaqin. Oksidlangan kremniy sirtiga shishani o'tqazish himoyalaniishni yanada yaxshilaydi. Bunga asosiy sabab, kremniy oksid qatlam shisha bilan kremniy orasidagi yopishqoqlikni oshiradi.

III.11-jadvalda ko'p qo'llaniladigan alumosilikat shishalar tarkibi keltirilgan.

III.11-jadval

Shisha birikma nomeri	Tarkiblar, %				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	BeO	CaO	Na ₂ O
1	35	35	29,9	-	0,1
2	10	55	34,9	-	0,1
3	45	20	34,9	-	0,1
4	10	60	-	29,5	0,5
5	5	45	-	49,5	0,5

Alumosilikatli shisha odatda oksid pardasi 0,2 mkm dan yupqa bo'lmagan qatlamli kremniy kristaliga surkaladi. Agar oksid qatlami undan kam bo'lsa, oksid qatlam orqali yarimo'tkazgich materialga natriy ionlari kirib borishi mumkin. Bu esa, *p-n* o'tish elektr parametrlarini yomonlashtiradi. Shuning uchun alumosilikatli shishalar asosan SiO₂ qatlami mavjud yarimo'tkazgichli kristallarda qo'llaniladi.

Himoya pardalari sifatida xalkogenid shishalar va murakkab tarkibli shishalar ham qo'llaniladi.

Nazorat savollari

1. Kremniy *p-n* o'tishlarni qanday himoyalash usullari bor?
2. Laklar va kompaundlar nima maqsadlarda ishlatiladi?
3. Silanli himoyalash deganda nimani tushunasiz?
4. Metall oksid pardalar xossalari ayting?
5. Shisha pardalar *p-n* o'tishlarni qanday himoyalaydi?

19-BOB. YARIMO'TKAZGICHLI ASBOBLAR TUZILMALARINI OLISH TEXNOLOGIYASI

19.1. Umumiy ma'lumotlar

Turli yarimo'tkazgichli asboblarning ajoyib fizik xossalarini tushunish va ularning loyihalash prinsiplarini egallash uchun texnologik tayyorlash yo'llarini va yarimo'tkazgich tuzilmalarni olish usullarini bilish zarur. Yarimo'tkazgichli asboblarning ishlab chiqarish texnologiyasiga qo'yilgan talablar asboblarning foydalanish tavsiflari va iqtisodiy ko'rsatkichlari: takroriylik oralig'i va tezkorligi, quvvati, mustahkamligi, o'lchami, massasi, tayyorlashning qiyinligi va tannarxi bilan aniqlanadi.

Texnologik marshrut. Har xil yarimo'tkazgichli asboblarni tayyorlash usullari turli ko'rinishdadir. Biroq, barcha hollarda yarimo'tkazgich kristall umumiy texnologik amallardan ketma-ket o'tkaziladi. Buning uchun texnologik marshrut tuziladi. Namuna marshrutga ilk yarimo'tkazgich quymaning kirish nazorati, plastinkalarga mexanik va kimyoviy ishlov berish, epitaksial qatlam o'stirish, dielektrik himoyaviy parda olish, bu pardaga fotolitografik ishlov berish, $p-n$ o'tish olish uchun kirishma mahalliy diffuziyasi, omik o'tishlar olish uchun yupqa metall pardalar va integral mikrosxemalarning passiv tarkiblarini o'tqazish, rezistorlar va ulash o'tkazgichlari, plastinkalarni kristallarga ajratish, yig'ish, himoyalash, elektr parametrlarini o'lchash va asboblarni turli rejimlarda chidamliligini sinashlar kiradi.

Ishlab chiqarishda loyihalangan yarimo'tkazgichli asbob namuna marshrut asosida tayyorlanadi.

Elektr o'tish turlari. Ko'pchilik yarimo'tkazgichli asboblarning tuzilmasining asosiy elementi elektr o'tish bo'lib, ularga turli solishtirma qarshilikka, turli o'tkazuvchanlik sohasiga ega bo'lgan yarimo'tkazgichning ikkita sohasida vujudga kelgan o'tish qatlami va metall-yarimo'tkazgich kontakti natijasida ham vujudga kelgan o'tishlar kiradi. Agar yarimo'tkazgich ikki sohasining biri n -tur, ikkinchisi p -tur bo'lsa, bunday o'tishni elektron-kovak o'tish yoki $p-n$ o'tish deyiladi. Ko'pchilik keng tarqalgan asboblarning xossalari $p-n$ o'tishlarda yuz beradigan jarayonlar bilan aniqlanadi. Masalan, n -tur soha va p -tur sohalarda kirishmalar konsentratsiyasi ancha yuqori bo'lsa, unda $p-n$ o'tish volt-ampere tavsifnomasining ko'rinishi oddiy $p-n$ o'tish tavsifnomasidan

keskin farq qilib, tavsifnoma N ko'rinishda bo'ladi. Bunday $p-n$ o'tishlardan tayyorlangan diodlarni tunnel diodlari deyiladi.

Elektron-kovak o'tishlar simmetrik va nosimmetrik bo'lishi mumkin. Simmetrik va nosimmetrik bo'lishi tok tashuvchilar konsentratsiyasining $p-n$ sohalarda kirishmalar taqsimoti bilan aniqlanadi. Simmetrik $p-n$ o'tishlarda $n_n + p_p$ shart bajariladi, bu yerda $n_n - n$ turdagi yarimo'tkazgichdagi elektronlar konsentratsiyasi; $p_p - n$ turdagi yarimo'tkazgichdagi kovaklar konsentratsiyasi. Shunday qilib, simmetrik $p-n$ o'tishning ikkiala sohasidagi asosiy tok tashuvchi zaryadlar konsentratsiyasi bir-biriga teng bo'lar ekan. Biroq, amalda nosimmetrik o'tishlardan foydalaniladi. Nosimmetrik o'tishlar ikki xil ko'rinishda hosil bo'lishi mumkin, ya'ni $n_n > p_p$ yoki $p_p > n_n$, bunda farq 100-1000 marta bo'lishi mumkin. Kirishmalar bilan yuqori legirlangan (masalan, $p_p > n_n$ o'tishda p soha) kichik omli soha emitter deyiladi. Kirishmalar bilan kichik legirlangan ($p_p > n_n$ o'tishda n soha) yuqoriomli soha baza deyiladi.

Agar nosimmetrik $p-n$ o'tishning p sohasi ancha yuqori o'tkazchanlikka, ya'ni kirishmalar ancha yuqori legirlangan bo'lsa, bunday o'tishlarni $p^+ - n$ o'tishlar deyiladi. Xuddi shunday n soha ancha yuqori o'tkazuvchanlikka ega bo'lsa $n^+ - p$ o'tish deyiladi.

Elektr o'tishlarni hosil qilish uchun qo'llaniladigan yarimo'tkazgichli material modda xiliga qarab, gomogen va geterogen o'tishlarga bo'linadi. Bir jinsli yarimo'tkazgich materialda hosil qilingan o'tishlarni gomogen o'tish yoki gomoo'tishlar deyiladi. Bunga kremniy, germaniy, galliy arsenidi va boshqalar kiradi. Geteroo'tishlar esa, turli yarimo'tkazgichlar orasida vujudga kelgan o'tish bo'lib, ularga germaniy-kremniy, germaniy-galliy arsenidi va boshqalar kiradi. Yarimo'tkazgich sirtiga metallni o'tqazish bilan olingan o'tishni Shotki o'tish deyiladi. Agar n - va p -sohalar oralig'ida xususiy elektr o'tkazuvchanlik i -soha vujudga keltirilgan bo'lsa, bunday tuzilmalar $p-i-n$, $p^+ - i - n^+$ va shunga o'xshash belgilanadi. Bulardan tashqari, yarimo'tkazgichli tuzilmalarga tranzistorlarni $p-n-p$ yoki $n-p-n$, tiristorlarni $n-p-n-p$ tuzilmalarni va boshqalarni misol qilib ko'rsatish mumkin.

Elektr o'tishlar keskin va tekis $p-n$ o'tishlarga bo'linadi. Keskin o'tishda kirishmalar konsentratsiyasini o'zgarish sohasi qalinligi fazoviy zaryad sohasi qalinligidan yetarli darajada kichik bo'ladi. Soha qalinligi deganda, kirishma konsentratsiyasi gradienti yo'nalishidagi o'lcham tushuniladi. Tekis elektr o'tishlarda kirishma konsentratsiyasining o'zgarish sohasi qalinligi fazoviy zaryad sohasi qalinligiga yaqin bo'ladi.

O'tish maydoniga qarab nuqtaviy va yassi elektron-kovak o'tishlarga ham bo'linadi. Yassi o'tishlar tayyorlanish usullariga qarab qotishmali, diffuzion, ion, planar, epitaksial, planar-epitaksial va shu kabilarga bo'linadi.

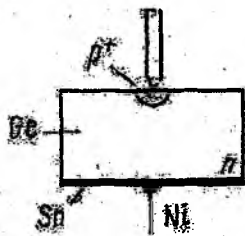
19.2. Elektron-kovak o'tishlarni tayyorlash texnologiyasi

Yarimo'tkazgichli asboblarni ishlab chiqarish texnologiyasi juda tez rivojlanib bormoqda. Biz bu yerda yarimo'tkazgichli asboblarni ishlab chiqarish va tayyorlash asoslarini tashkil qiluvchi bosh texnologik usullarga to'xtalamiz.

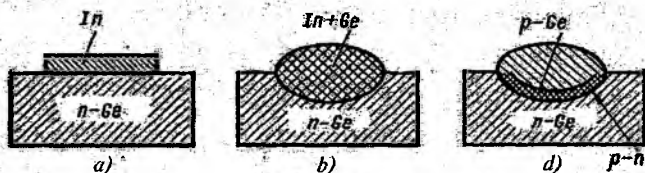
Nuqtaviy o'tishlar. Nuqtaviy p - n o'tishlarni tayyorlash uchun n -turdagi germaniydan foydalaniladi. Oldindan silliqlangan plastinkaga diametri 20–30 mkm bo'lgan berilliy bronzadan qilingan nina-zond mahkamlanadi. Keyin elektrokavsharlash usulida zond orqali qisqa vaqtli impulsli quvvatli tok o'tkaziladi. Kontakt joy zond materialni erishigacha qizdiriladi va mis germaniy ichi tomon diffuziyalanib, zond ostida uncha katta bo'lmagan hajmda p -tur sohani hosil qiladi, chunki mis germaniy uchun akseptor kirishma vazifasini o'taydi (III.54-rasm). Ba'zan p -sohada konsentratsiyani oshirish uchun nina uchiga akseptor kirishma (In yoki Al) o'tqaziladi. Bunda kontaktning o'tkazuvchanligi 100 mA/V ga yetadi.

Nuqtaviy o'tishlarning kontakt maydoni juda kichik bo'lganligi uchun p - n o'tish sig'imi kichik bo'ladi. Shuning uchun ulardan yuqori va o'ta yuqori takroriylikli diodlar tayyorlashda foydalaniladi.

Qotishmali p - n o'tishlar. Qotishmali usulni qo'llaganda, silliqlangan va yedirilgan monokristall germaniy n -tur plastinkaga uch valentli kichkina metall parcha indiy o'rnatilib (III.55-rasm, *a*), keyin inert gaz muhitida yoki vakuumda 550–600°C temperaturagacha qizdiriladi. Bunda indiy shu temperaturada eriydi va hosil bo'lgan tomchi germaniyni o'zida eritadi (III.55-rasm, *b*). Ma'lum vaqt o'tgandan so'ng pechka o'chiriladi. Sovuq indiyda germaniyning eruvchanligi kam, shuning uchun sovish natijasida germaniy qayta kristallana boshlaydi va tomchi



III.54-rasm. Nuqtaviy p - n o'tish tuzilmasining ko'rinishi.

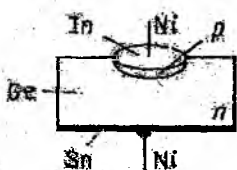


III.55-rasm. Qotishmali p - n o'tish tuzilmasining hosil bo'lishi

tubida p -turdagi qayta kristallangan yupqa qatlam hosil bo'ladi.

Qayta kristallanish paytida germaniy indiy atomlarini egallab oladi. Sovigan tomchining qolgan qismi yyetarli tozalikdagi indiy bo'lib, omik kontakt vazifasini bajaradi. Unga tashqi chiqqich, odatda, ingichka nikel simi kavsharlanadi.

Germaniy pastki qismiga qalay o'tqazilib, u n - germaniy uchun omik kontakt vazifasini o'taydi. Bu yerda ham tashqi chiqqich sifatida nikel

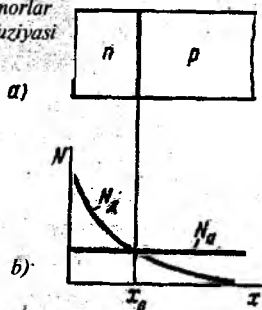


III.56-rasm. Qotishmali p - n o'tish tuzilmasi

simidan foydalanish mumkin (III.56-rasm). Hosil bo'lgan p - n o'tishlar keskin o'tishlar bo'lib, ularning maydoni nuqtaviy p - n o'tishlarga nisbatan katta bo'lganligi uchun sig'imi ancha katta. Shuning uchun bunday o'tishlar asosan quvvatli diodlar va tranzistorlar tayyorlashda qo'llaniladi.

Diffuzion p - n o'tishlar. Diffuzion p - n o'tishni yaratish uchun yarimo'tkazgichga kirishmalarning gaz ko'rinishida, suyuq va qattiq fazadagi diffuziyasidan foydalaniladi. Usullardan biri gaz muhitda diffuziyani ko'ramiz. Bu holatda yupqa yarimo'tkazgich plastinka, masalan, kremniy n -tur akseptor bug'i bilan to'ldirilgan modda (bor) bug' pechkaga kritiladi va yuqori temperaturagacha qizdiriladi. Kristallga kirgan kirishma diffuziya chuqurligi texnologik rejimga (temperatura va diffuziya vaqti) bog'liq va oson bajariladi. Diffuziya tugagandan

Donorlar
diffuziyasi

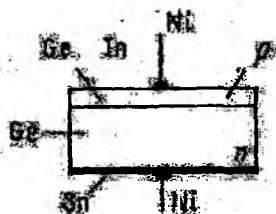


III.57-rasm. Diffuzion p - n o'tishning hosil bo'lishi.

so'ng plastinkaning bir tomoni va to'rt yoqlari boshlang'ich n -turgacha yediriladi va qolgan bir tomonida p -tur diffuzion qatlam qoladi. III.57-rasmda diffuzion p - n o'tishni hosil bo'lishi, III.58-rasmda diffuzion p - n o'tish tuzilmasi ko'rsatilgan.

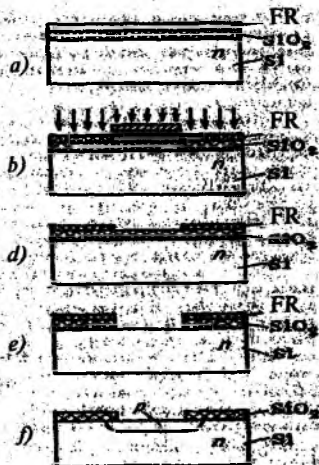
Diffuzion usul tekis p - n o'tishlarni olishni ta'minlaydi. Undan tashqari, bu usul bitta plastinkada ko'plab o'tishlarni olish imkonini beradi.

Planar p - n o'tishlar. Bu usulning kelib chiqishi barcha p - n o'tishlar asosidagi diod, tranzistor va kontaktlar tayanch yarimo'tkazgichining kichik qalinlik sirt tekisligida joylashgan. Planar texnologiya (ingilizcha *planar*—yassi so'zidan olingan) diffuzion texnologiyaning rivojlanish mahsulidir. Yarimo'tkazgich sirtida o'tqazilgan himoya qatlam tirgishi orqali kirishma diffuziyasi natijasida olingan o'tish planar o'tish deyiladi. Kremniyda himoya qatlami sifatida kremniyning o'zida vujudga keltirilgan kremniy oksididan foydalaniladi. Planar p - n o'tishning vujudga kelish texnologik jarayoni bosqichlari III.59-rasmda ko'rsatilgan. Planar texnologiyaning asosini fotolitografiya tashkil qiladi. Oksidlangan



III.58-rasm. diffuzion p - n o'tish tuzilmasi

monokristall kremniy plastinka sirtiga fotorezist (FR) yupqa qatlam o'tqaziladi (III.59-rasm, a). Fotorezist parda niqob orqali ultrabinafsha nur bilan yoritiladi (III.59-rasm, b). Fotorezist ekspozitsiyalangan joyi polimerlanadi va erimaydigan bo'lib qoladi. Natijada, yedirgichda yedirilgan, polimerlanmagan joyi yuvilib ketadi (III.59-rasm, d). Keyin oksid qatlam ochilgan joy yedirgichlar bilan yediriladi, fotorezist bilan himoyalangan joy esa qoladi (III.59-rasm, e). Bu amaldan keyin, taglik kremniy plastinkaga diffuziya o'tqaziladi. Kirishma diffuziyasi faqat tirgish orqali o'tkaziladi. (III.59-rasm, f).



III.59-rasm. Planar p - n o'tishning vujudga kelish texnologik jarayoni bosqichlari

Diffuziya yuqori temperaturada o'tkazilganligi uchun sirt yana oksidlanib qoladi. Fotolitografiyadan foydalangan holda oksidlanib qolgan joy yediriladi va ochilgan joyga metall kontakt o'tqaziladi. Bu amallar natijasida bitta plastinkada bir necha o'n va hatto yuzlab bir xil diod tuzilmalarni olish mumkin. Olingan bu planar $p-n$ o'tishlar tuzilmasi kristallarga kesiladi. Ba'zan, diodlarni yig'ish ishini osonlashtirish uchun plastinka ikkinchi tomoniga omik kontaktlar o'tqazilishi mumkin. Planar $p-n$ o'tish tuzilmasining umumiy ko'rinishi III.60-rasmda ko'rsatilgan.

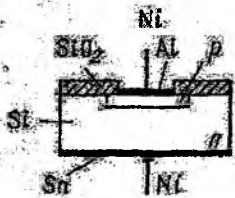
Planar texnologiyani germaniyda ham qo'llash mumkin. Bu holatda, kremniy oksid parda germaniy sirtiga kremniy-organik birikmalarni termik bug'latish bilan o'tqaziladi. Planar usulda olingan asboblarning guruhining elektr parametridagi farqlar eng kichik. Chunki, bu asboblarning yarimo'tkazgichli bitta plastinkadan birlik texnologiyada olinadi. Shuning uchun ham planar texnologiya mikroelektronikaning asosini tashkil qiladi.

Epitaksial $p-n$ o'tishlar. Epitaksial usulda elektron-kovak o'tishlarni olish turli tagliklarda yarimo'tkazgichli epitaksial pardalarni o'stirishga asoslangan. Agar o'sgan yarimo'tkazgich epitaksial qatlam o'tkazuvchanligi taglik o'tkazuvchanligiga qarama-qarshi bo'lsa, unda $p-n$ o'tish hosil bo'ladi (III.61-rasmda taglik sifatida p -germaniy bo'lib, unga n -turdagi epitaksial germaniy parda o'tqazilgan).

Hozirgi vaqtda turli tagliklarda epitaksial pardalarni o'stirish usuli ishlab chiqilishi impulsli diodlar, yuqori takroriylikli tranzistorlar va boshqa yarimo'tkazgichli asboblarni ishlab chiqarishda keng qo'llanilmoqda. Epitaksial usul integral mikrosxemalar tayyorlashda keng qo'llaniladi.

Ion legirlash bilan $p-n$ o'tishlar olish.

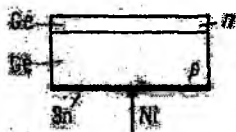
Keyingi yillarda ion legirlash usulida $p-n$ o'tishlarni olish samarali o'rganilmoqda va amaliyotda keng qo'llanilmoqda. Ion manbalarda akseptor yoki donor zarrachalar ion optik tizimda oqimni hosil qilib uni 40-800 keV energiyagacha tezlashtirilib yarimo'tkazgich plastinka — nishonga tushiriladi. Ionlarning yarimo'tkazgich plastinka chuqurligiga kirib borishi ularning energiyasiga bog'liq bo'lib,



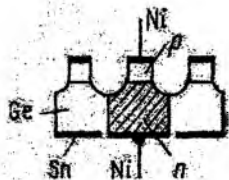
III.60-rasm. Planar $p-n$ o'tish tuzilmasining umumiy ko'rinishi

legirlanish darajasi ionlar oqimi bilan nishonni nurlantirish vaqtiga bog'liq.

Meza-o'tishlar. Birlik texnologik jarayonlarda yarimo'tkazgichli asboblarni katta guruhda tayyorlashda meza-o'tishlar olinadi. Bunda n -turdagi kremniyda diffuzion usulda p -qatlam olinadi (III.62-rasm). Ma'lum chuqurlikda tekis p - n o'tish olingandan keyin niqob orqali ushbu o'tishga lak surkaladi. Yedirish amali bilan niqob olinadi. Shundan keyin plastinka p - n o'tishlarga kesiladi. Alohida olingan element yoki kristallcha stulchaga o'xshab ketganligi uchun bunday tuzilmalarni meza-o'tishlar (ispancha *mesa-stolcha*) deyiladi va bu texnologiyani meza-texnologiya deyiladi. Meza-texnologiya bo'yicha olingan bir guruh o'tishlarning parametrlarida farq kam bo'ladi. Bu texnologiya yaxshi o'rganilgan va yuqori takroriylikli tranzistorlarni ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi.



III.61-rasm. Epitaksial p - n o'tish.



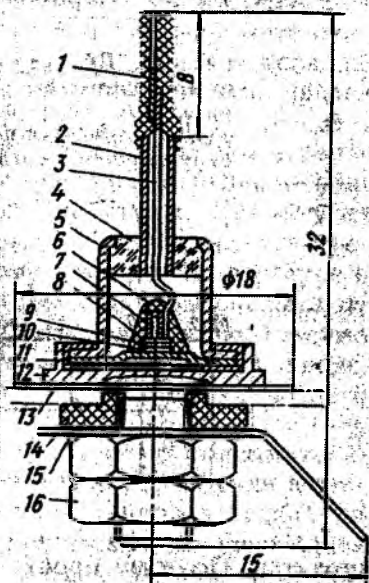
III.62-rasm. Meza-o'tishlar

19.3. Diodlar olish texnologiyasi

Yarimo'tkazgichli diodlar tayyorlash haqida ba'zi ma'lumotlarni keltiramiz. Diodlar p - n o'tish yoki metall-yarimo'tkazgich kontakti zaminida tayyorlanadi va turli-tuman vazifalarni bajaradi.

19.3.1. Past chastotali to'g'rilovchi diodlar

Bunday diodlardan odatda sanoat chastotasidagi (50 GHz) o'zgaruvchan toklarni to'g'rilash uchun foydalaniladi. Ular bundan ham yuqoriroq chastotalarda ishlay oladi. Yo'l qo'yiladigan eng katta to'g'ri tok kattaligiga qarab mazkur diodlarni uch turga ajratiladi: kichik quvvatli diodlar (to'g'ri tok 0,3 A gacha), o'rta quvvatli diodlar (to'g'ri tok 0,3 A dan 10 A gacha), katta quvvatli diodlar (to'g'ri tok quvvati 10 A dan yuqori). Hozirgi vaqtda to'g'rilovchi diodlar kremniy asosida tayyorlanadi. Keyingi paytda bunday diodlar galliy arsenidi asosida ham tayyorlanadigan bo'ldi.



III.63-rasm. Kremniy yassi diodining tuzilishi chizmasi:

1-tashqi chiqish; 2-naycha; 3-ichki chiqish; 4-izolator; 5-korpus; 6-himoyalovchi qatlam; 7-yarimo'tkazgich kristali ustidagi tashqi elektrod; 8-*p-n* o'tishli kremniy kristali; 9-diod tuzilmaning asosiy sohasi; 10-kavshar qatlam; 11-kristall tutgich; 12-korpus oyoqchasi; 13-izolatsiyalovchi shayba; 14-izolatsiyalovchi vtulka; 15-tok ketadigan yaproqcha; mahkamlovchi gaykalar.

Yassi (planar) kremniy to'g'rilovchi diodlarning *p-n* o'tishi *n*-tur elektrik o'tkazuvchanlikli kremniy plastinkasiga aluminiy yoki borni kiritish, *p*-tur kremniy kristalli plastinkasiga fosforni diffuziyalash usulida shakllanadi. *p-n* o'tishning yuzini yo'l qo'yiladigan (ruxsatlanadigan) to'g'ri tok qiymatiga qarab aniqlanadi: kremniy *p-n* o'tishlari uchun ruxsatlanadigan to'g'ri tok zichligi 200 A/sm^2 , kremniy kristalining dastlabki qalinligi 0, 2-0, 4 mm.

Haqiqiy *p-n* o'tishlarning teshilishi ko'pincha yarimo'tkazgich sirti yaqinida, ya'ni *p-n* o'tishning sirtga chiqishi joyida ro'y beradi. Shuning uchun *p-n* o'tishning sirtga chiqadigan qismi uning markaziy qismidan qalinroq qilinadi.

To'g'rilovchi yassi (planar) diodlarning chastotaviy xossalari diod bazasida noasosiy zaryad tashuvchilarning jamg'arilishi va so'rilishi jarayonlariga bog'liq. Shuning uchun dastlabki kremniy kristalliga oltin diffuziyalanadi, u noasosiy zaryad tashuvchilar vaqtini kamaytiradi va ishlash chastotalarini ko'taradi. Bunday chastotaviy diodlar 100 kHz chastotali o'zgaruvchan toklarni to'g'rilay oladi.

Tashqi ta'sirlardan himoyalash va issiqlikni tez olib ketishni ta'minlash maqsadida $p-n$ o'tishli kristallni korpusga joylanadi.

Kam quvvatli diodlarni odatda egiluvchan tashqi chiqishlari bor plastmassa korpusda, o'rta quvvatli diodlar qattiq tashqi chiqishlari bor metall-shisha korpusda, katta quvvatli diodlar esa metall-shisha yoki metall-keramika korpusda shakllanadi. To'g'rilovchi diodning qiyofasi III.63-rasmda ko'rsatilgan.

Ayrim diod uchun ruxsat etiladigan kuchlanishdan yuqori kuchlanishli o'zgaruvchan toklarni to'g'rilash uchun sanoat to'g'rilovchi yarimo'tkazgich ustunlar ishlab chiqaradi. U ketma-ket ulangan to'g'rilovchi diodlar birlashmasidan iborat va ikkita chiqishga (elektrodga) ega. Kremniy to'g'rilovchi ustunlar uchun eng katta ruxsat etiladigan teskari kuchlanishlar bir necha kilovolt bo'ladi.

Kremniy to'g'rilovchi diodlarning ishlash temperaturalar oralig'i 60°C dan $+125^{\circ}\text{C}$ gacha.

Germaniy, gally arsenidi, selen asosidagi to'g'rilagichlar ham mavjud.

19.3.2. Impulsda ishlaydigan diodlar

Impulsda ishlaydigan diod o'tma jarayonlar davomiyligi kichik bo'lgan va impulsli rejimda ishlay oladigan yarimo'tkazgichli dioddir. Dastlab nuqtaviy impuls diodlari ishlab chiqilgan edi. Keyinchalik beqiyos sifatli impuls diodlarini planar texnologiya bo'yicha tayyorlanadigan bo'ldi. Asosiy modda-kremniy, ba'zan gally arsenidi ham qo'llaniladi. Oldin aytganimizdek, bu diodlarda teskari qarshilikni tezroq tiklash uchun kremniyga oltin kiritiladi.

Planar impuls diodlarni tayyorlashda krishmalar diffuziyasi kremniy oksidi SiO_2 qatlamidagi darchalar orqali amalga oshiriladi. Bunday diodlarning $p-n$ o'tishi yuzi yetarli kichik qilinishi mumkin, binobarin, $p-n$ o'tishning elektr sig'imi kichik bo'ladi.

Planar texnologiya nisbatan sodda ravishda bir kristallda ko'p diodlar shakllantirish imkonini beradi. Shu yo'sinda impuls diodlari to'plamini hosil qilinadi, bunda bir tuzilmaga yig'ilgan, lekin elektrik ulanmagan

yoki bir ismli elektrodlar bilan ulangan impuls diodlari to'plami hosil bo'ladi. Ulardan hisoblash texnikasida foydalanish qulay bo'ladi.

19.3.3. Shotki diodlari

Bu diodlarning asosini to'g'rilovchi metall-yarimo'tkazgich kontakti tashkil qiladi.

Metall-yarimo'tkazgich to'g'rilovchi kontakti asosida to'g'rilovchi, impulsda, o'ta yuqori chastotalarda ishlaydigan yarimo'tkazgichli diodlar tayyorlanadi. Ular $p-n$ o'tishli diodlardan o'zining yuqoriroq chastotalarda ishlay olishi bilan farq qiladi.

To'g'rilovchi Shotki diodlari. Metall-yarimo'tkazgich kontakti C_k sig'iminining qayta zaryadlanishi vaqti Shotki diodlari chastotaviy xossalriga asosiy ta'sir ko'rsatadi. Qayta zaryadlanish vaqti τ baza qarshiligiga ham bog'liq: $\tau = r_b C_k$. Shuning uchun Shotki kontaktini p -tur o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yarimo'tkazgich kristalida hosil qilish maqsadga muvofiq, chunki bu kristallda elektronlar harakatchanligi kovaklarnikidan katta. Shu sababdan yarimo'tkazgich kristalida kirishmalar konsentratsiyasi kattaroq bo'lishi kerak. Ammo, Shotki potensial to'sig'i (kontakt) kengligi yetarli katta bo'lishi kerak. Bu ikki qarama-qarshi talab optimal ravishda hal qilinadi.

Mulohazalar ko'rsatishicha, past chastotali to'g'rilovchi diodlar $p-n$ o'tishlar asosida tayyorlanishi ma'qul. Ammo, yuqori chastotali katta amplitudali o'zgaruvchan toklarni to'g'rilashda Shotki diodlari afzalroqdir.

Masalan, Shotki diodlarining bir namunasi uchun ruxsat etiladigan to'g'ri tok 10 A, unga mos to'g'ri kuchlanish 0,6 V dan oshmaydi, ruxsatlanadigan teskari kuchlanish 20 V. Bu diod to'g'rilanadigan tokning 0, 2 MHz chastotasiga mo'ljallangan.

Impuls Shotki diodlari. Bu diodlar uchun galliy arsenidi afzalroq material hisoblanadi, chunki unda noasosiy zaryad tashuvchilar vaqti 10^{-9} s dan ham kichik bo'lishi mumkin. Sanoat ishlab chiqaradigan bunday diodlar piko- va nanosekund oraliqda ishlashga mo'ljallangan.

To'g'rilovchi diodlar farqli ravishda impuls diodlar kontakti yuzi ancha kichik bo'ladi. Bu diodlarning sig'imi 10 pf dan oshmaydi.

19.3.4. O'ta yuqori chastotaga mo'ljallangan diodlar

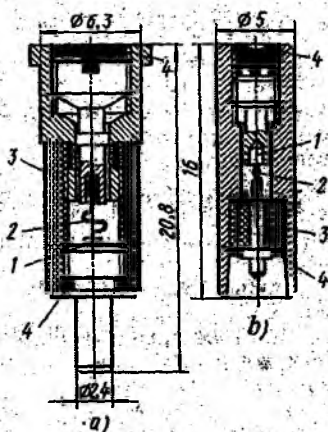
Bunday diodlar yordamida o'ta yuqori chastotali (O'YCh) signal o'zgartiriladi va ishlanadi. Ular 300 MHz dan yuqori chastotalarda turli radioelektron asboblarda va o'lchash texnikasida ishlatiladi, O'YCh sohadagi elektromagnit tebranishlarni vujudga keltirish (generatsiyalash) va kuchaytirish, chastotani ko'paytirish, signallarni modullash, boshqarish, cheklash va h.k. vazifalarni bajarish imkonini beradi. O'YCh diodlar xillari: tunnel va qaytarma diodlar, varikaplar, ko'chki- uchma diodlar, Gann genaratorlari, impuls diodlar, aralashtirgich diodlar, detektorlar, qayta ulagich diodlar va boshqalar.

Aralashtirgich diodlar. Yuqori chastotali (elektromagnitik) signallarni pastroq (oralig) chastotali signallarga aylantiruvchi yarimo'tkazgich diodlar aralashtirgich diodlar deyiladi.

O'YCh-diodlarning chastotaviy xossalari istalgandek bo'lishi uchun ularning bazasiga noasosiy zaryad tashuvchilar kiritilmasligi, bazada ularning yashash davri, potensial to'siq sig'imining qayta zaryadlanish vaqti kichik bo'lishi, baza qarshiligi past bo'lishi (diodda quvvat kam isroflanishi) kerak.

O'YCh diodlar ishonchliligini oshirish uchun ularning teshilishi ko'chkisimon bo'lishi kerak.

Bu talablardan kelib chiqadigan xulosa shuki, O'YCh diod uchun dastlabki yarimo'tkazgich moddani



III.64-rasm. Ba'zi O'YCh diodlar tuzilishlari:

- 1-yarimo'tkazgich kristali;
- 2-kontakt prujinasi;
- 3- keramik vtulka;
- 4- jips yopuvchi quyma.

taqiqlangan zonasi kengroq bo'lishi, noasoiy zaryad tashuvchilar yashash vaqti kichik bo'lishi, asosiy zaryad tashuvchilar harakatchanligi katta bo'lishligi (solishtirma qarshilik ρ kichik bo'lishi) kerak. Bu talablarni galliy arsenidi kristali yaxshiroq qanoatlantiradi.

Aralashtirgich O'YCh diodlar sifatida Shotki diodlari ancha keng qo'llaniladi. To'g'rilovchi o'tishning o'lchamlari diodning qanday chastotalar oralig'ida ishlashiga bog'liq ravishda tanlanadi. Masalan, juda yuqori chastotalar (o'nlarcha va yuzlarcha GHz chastotalar, ya'ni millimetr oraliqdagi to'lqin uzunlikli signallar) uchun Shotki o'tishi 2-3 mkm diametrda bo'ladi. Bu o'lcham oddiy fotolitografiya uchun chegaraviy bo'lib, bunda fotorezist kimyoviy yedirish o'rniga ion-plazma yedirishdan foydalaniladi.

O'YCh zanjirlariga kiritish qulay bo'lishi uchun O'YCh- diodlarni turli tuzilishli korpuslarga joylashtiriladi (III.64-rasm). III.64, *a*-rasmda tasvirlangan diodlar 12 GHz gacha chastotalarda, III.64, *b* - rasmdagilari esa 30 GHz gacha qo'llaniladi.

Integral O'YCh mikrosxemalar uchun yo kichik korpusli, yoki korpussez (sirti dioksid pardasi bilan qoplangan) O'YCh diodlardan foydalaniladi.

Detektor diodlar. Bu diodlar (elektromagnitik) signalni oshkorlash (qayd qilish) uchun qo'llaniladi.

Qayta ulagich diodlar. Bunday diod O'YCh quvvat kattaligini boshqaruvchi qurilmalarda qo'llaniladi.

19.3.5. Stabilitronlar

Yarimo'tkazgichli stabilitron kuchlanishni barqarorlash uchun xizmat qiladigan diod bo'lib, unda teskari yo'nalishda elektrik teshilish sohasida kuchlanish tokka juda sust bog'langan, ya'ni tok o'zgaradi-yu, ammo kuchlanish deyarli o'zgarmay qolaveradi. Elektrik teshilish ko'chkisimon yoki tunnellanish teshilish bo'ladi.

Stabilitronning eng asosiy parametri stabillash (barqarorlash) kuchlanishi U_{st} bo'lib, u p - n o'tishning kengligi yoki diod bazasining solishtirma qarshiligiga bog'liq. Shuning uchun turli stabilitronlar turli U_{st} ga (3 dan to 400 V gacha) ega bo'ladi.

Yana bir muhim parametr stabillash kuchlanishi U_{st} ning temperaturaviy koeffitsienti α_{st} dir:

$$\alpha_{st} = \frac{1}{V_{st}} \frac{\Delta V_{st}}{\Delta T} I_{st} = const.$$

Bu koeffitsientning qiymati turli stabilitronlar uchun turlicha.

Past voltli stabilitronlarni kuchli legirlangan kremniy asosida tayyorlanadi. Ularda $U_{st} < 6$ V bo'lib, tunnel teshilish sodir bo'ladi, $\alpha_{st} < 0$.

Yuqori voltli stabilitronlarda p - n o'tish kengroq bo'lishi kerak. Shuning uchun ularni kuchsiz legirlangan kremniy asosida tayyorlanadi, ular ko'chkisimon teshilish tufayli kuchlanishni barqarorlaydi, $\alpha_{st} > 0$.

Ko'pchilik stabilitronlar ana shu turga mansub. Stabilitronlar parametrlari istalganicha yaxshilashning texnologik choralari ishlab chiqilgan.

Stabilitronlarni ham, to'g'rilagich va boshqa diodlar singari, korpuslarga joylanadi yoki himoyaviy qoplamali korpusiz ko'rinishda ishlanadi.

Stabilitronlarni tayyorlashda p - n o'tishlarni qotishtirish va diffuzion usullar qo'llaniladi. Bunda bir vaqtda kirishmani kremniy kristallining ikki tarafidan kiritilsa, bu taraflar orasiga kuchlanish berilganda bir-biriga qarshi ulangan ikkita p - n o'tish hosil bo'ladi. Bunday stabilitronlarni ikki anodli stabilitronlar deyiladi. Ular turli qutbli kuchlanishlarni stabillash uchun qo'llaniladi.

19.3.6. Stabistorlar

Yarimo'tkazgichli stabistor kuchlanishni barqarorlashga mo'ljallangan diod bo'lib, unda muayyan oraliqda to'g'ri kuchlanish tokka juda sust bog'liq bo'ladi. Ularda $U_{sm} \sim 0,7$ V. Bir necha siabistor ketma-ket ulansa, ancha katta U_{sm} olish mumkin. Stabistorlarning asosiy qismi- $p-n$ o'tishi past omli kremniyda hosil qilingan kremniy diodlaridir.

Stabistorlar uchun $\alpha_{st} < 0$. Bu temperatura oshganda $p-n$ o'tishdagi potensial to'siq balandligi pasayishi va shu to'siqdan ko'proq zaryad tashuvchilar o'tishi sabablaridandir.

Stabistorlarni musbat α_{st} li stabilitronlarga ketma-ket ulab, stabilitronlar U_{st} larini temperatura bilan o'zgarishini bartaraf qilinadi.

Kremniy stabistoriaridan boshqa, sanoat yana selen polikristallari asosidagi stabistorlar ishlab chiqaradi. Ularni tayyorlash sodda, narxi past. Biroq, selen stabistorlarning ishlash muddati kamroq (1000 soat) va ishlash temperaturalar oralig'i torroq ($-25 \div +60^\circ\text{C}$).

19.3.7. Tunnel diodlar

Bu diodlar legirlovchi kirishmalar zichligi yetarlicha katta bo'lgan (aynigan) yarimo'tkazgichda shakllangan $p-n$ o'tish asosida tayyorlanadi. Elektron va kovak sohalar o'tkazuvchanligi katta bo'lganligi sababli $p-n$ o'tish kengligi kichik (10^{-2} mkm chamasida) bo'ladi, ya'ni boshqa diodlardagidan ikki tartib (~ 100 marta) yupqa bo'ladi. Bunday yupqa qatlam potensial to'sig'idan zaryad tashuvchilar tunnellanib (sirqib o'ta oladi).

Teskari kuchlanishlar sohasida ham tunnel diodda tunnellanish sodir bo'ladi. Sanoat galliy arsenidi va germaniy asosida tunnel diodlar ishlab chiqarib kelgan.

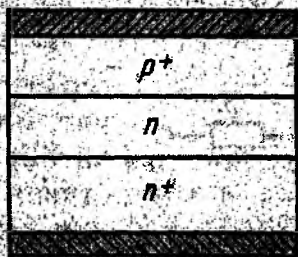
19.3.8. Varikaplar

Vari (*vary*-o'zgarish), kap (*capacitance*-sig'im ma'nosini anglatadi). Varikap- o'zgaruvchan sig'imli dioddir. *p-n* o'tish (yoki metall-yarimo'tkazgich kontakti) elektr sig'imi qo'yiladigan tashqi kuchlanishga bog'liq ekanligi ma'lum. Varikap diodlar ana shu xossaga asoslanib va muayyan maqsadlarga mo'ljallanib tayyorlanadi. Uning bir turi tuzilishi III.65-rasmda ko'rsatilgan. Uning asosiy parametrlari: varikap sig'imi S_v , sig'im bo'yicha usma-ust tushish koeffitsienti K_s , varikap aslligi Q_v .

p-n o'tishda kuchlanish o'zgarganda sig'im o'zgarishi va bu sig'imning qayta zaryadlanishi *p-n* o'ishi yaqinidagi sohalarida asosiy zaryad tashuvchilarning ko'chishi bilan bog'liq. Bu jarayonning vaqtiy doimiysi $\tau = \varepsilon \varepsilon_0 \rho$.

Past chastotalarda ishlatiladigan varikaplarda *p-n* o'tishning differensial qarshiligi va sig'imi ko'paytmasi $r_{p-n} C_v$ katta bo'lishi kerak. Shuning uchun keng taqiqlangan zonali yarimo'tkazgich moddalardan (kremniy, galliy arsenidi va boshqalar) foydalanish maqsadga muvofiq.

Varikaplar asosan yuqori va o'ta yuqori chastotalarda qo'llaniladi. Bunday varikaplarda bazaning r_b differensial qarshiligi kichik bo'lishi kerak, buning uchun esa dastlabki yarimo'tkazgich moddada zaryad tashuvchilar harakatchanligi katta bo'lishi zarur (gally arsenidi, n-Ge va boshqalar).



III.65-rasm Bazasi qarshiligi kichik bo'lgan varikap tuzilishi.

19.3.9. Diodlarning ishonchliligi

Diodlarning ishonchliligi radioelektron tuzilmalarning boshqa qismlari ishonchliligidan ancha yuqori bo'ladi.

Ishonchlilikning miqdoriy bahosini asboblarning muayyan muddatda ishlash qobiliyatining buzilishi, ya'ni ishdan chiqishlar soni bilan aniqlanadi.

Ishdan chiqishlarning ikki ko'rinishi bor:

1) Halokatli, ya'ni to'satdan bir yoki bir necha asbobning keskin ishdan chiqib qolishi;

2) Shartli, yoki asta-sekin asbobning asosiy parametrlarining o'zgarishi oqibatida ishdan chiqib qolishi.

Ishdan chiqib qolishlarning sababi asbobni shaklantirish yoki texnologiya jarayonida yo'l qo'yilgan kamchiliklar, noto'g'ri foydalanish bo'lishi mumkin.

Masalan, temperatura o'zgarganda tutashgan qismlarning issiqlikdan kengayishi koeffitsientlari har xil bo'lishidan kontakt mexanik ravishda buziladi yoki yarimo'tkazgich kristalli qovjirab kyetishi mumkin. Elektrodslarning ichki chiqiqlari ba'zi sabablardan kuyib qolishi mumkin.

Ko'pincha asbobdan noto'g'ri foydalanish halokatli ishdan chiqishga olib keladi. Masalan, diodni sxemaning qiziydigan elementlari yaqiniga joylansa, diodni atrof bilan issiqlik almasha olmaydigan qilib mahkamlansa ham diod qizib ketadi.

Shartli ishdan chiqishlarning sababi yarimo'tkazgich kristali sirtida va hajmida yuz berib turadigan ba'zi fizik va mexanik jarayonlar bo'ladi. Yarimo'tkazgich sirtida barqarorligini buzuvchi sabab namlik bo'lib, uni bartaraf qilish uchun asbob korpusiga namni yutuvchi modda joylanadi. Ammo, izolatorlarda mikrodarzlar bo'lsa, ko'p vaqt davomida diod korpusi ichiga diod sifatini buzadigan ancha nam kirib olishi mumkin.

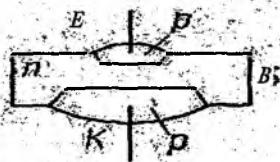
Ishdan chiqishlarning yana ko'p sabablari mavjud va asboblarni tayyorlashda ularning oldini olish choralari o'rganib boriladi.

19.4. Tranzistorlarni olish texnologiyasi

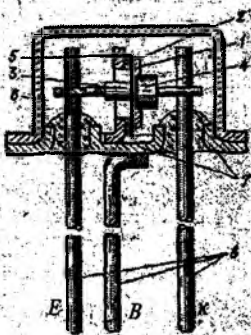
Qotishmali tranzistorlar. Tranzistor texnikasining boshlang'ich rivojlanish davrida tranzistorlarni faqat germaniya qirishmalarni qotishma usulida kiritib olganlar. Ikkita bir-biriga yaqin joylashgan $p-n$ o'tishli tranzistor tuzilmasi III.66-rasmda ko'rsatilgan. Qotishmali tranzistorlarning keng tarqalgan konstruksiyalaridan biri III.67-rasmda ko'rsatilgan.

Qotishmali tranzistorlarda juda yupqa baza olish qiyin, shuning uchun ular past va o'rta takroriyliklar uchun mo'ljallangan. Ularni quvvatli qilib ham tayyorlash mumkin. Bunday tranzistorlar olish uchun $p-n$ o'tishlar yuqori maydonga, kollektor chiqqich esa korpusga ulangan bo'ladi. Korpus asosi mis plastinkadan qilinadi. Qotishmali tranzistorlarning kamchiligiga chegara takroriyligining ($f_a \leq 20 \text{ MHz}$) uncha katta emasligi va texnologik tayyorlashda parametrlarda ancha katta farqlar mavjudligini ko'rsatish mumkin.

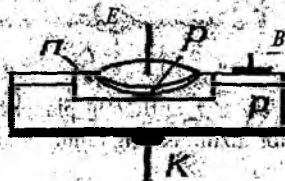
Qotishma-diffuzion tranzistorlar. Bu tranzistorlar qotishmali texnologiyani diffuzionga qo'shish bilan tayyorlanadi. Eritiladigan donor (surma) va akseptor (indiy) qotishmaning kichik bo'lagi taglik plastinkaga o'rnatiladi va qizdiriladi. Qotishmani suyultirish natijasida emitter o'tish hosil bo'ladi. Biroq, yuqori temperaturalarda bir vaqtning o'zida suyulish bilan birga kristall ichi tomon suyulmadan kirishmalar diffuziyasi ro'y beradi. Donor va akseptor kirishmalar kristall qalinligi bo'yicha notekis taqsimlanadi, chunki bu kirishmalar har xil chuqurlikka diffuziyalanadi (masalan,



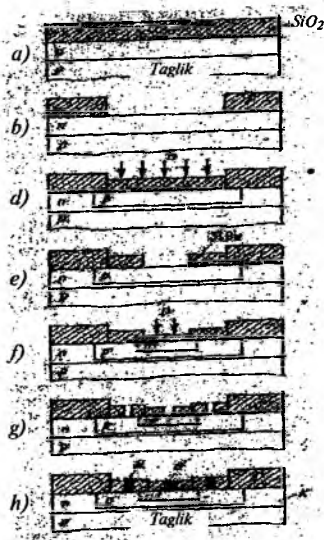
III.66-rasm. Qotishmali tranzistor tuzilmasi



III.67-rasm. 1-Ge kristali, 2-kristall ushlagich, 3-emitter elektrodi, 4-kollektor elektrodi, 5-baza xalqa, 6-korpus, 7-taglik, 8-chiqqich 9-asosi.



III.68-rasm. Qotishma-diffuzion tranzistor tuzilmasi



III.69-rasm. Diffuzion-planar tranzistorning olinishi.



III.70-rasm. Diffuzion-planar tranzistor tuzilmasining umumiy ko'rinishi

oldin suv bug'i yoki kislorod muhitiga joylashtirilib sirtida zich parda SiO_2 hosil qilinadi (III.69-rasm, a). Fotolitografiya usulida parda tirqish (III.69-rasm, b) hosil qilinib, u orqali akseptor-bor diffuziya qilinadi (III.69-rasm, d). Bunda, plastinkada p -tur baza qatlami hosil bo'ladi. Shu vaqtning o'zida oksidlanish yuz beradi. Hosil bo'lgan oksid pardadan yana tirqish (III.69-rasm, e) ochilib, u orqali donor-fosfor kamroq chuqurlikka diffuziya qilinadi. Natijada n^+ -turdagi emitter qatlam hosil bo'ladi (III.69-rasm, f).

surma diffuziyasi indiyga nisbatan tez). Natijada, kristalldan notekis taqsimlangan kirishmali n -turdagi diffuzion qatlam hosil bo'ladi. Kollektor vazifasini taglik plastinka p -turdagi germaniy bajaradi (III.68-rasm).

Baza soha orqali asosiy bo'lmagan zaryadlarning ko'chishi, asosan, elektr maydon dreyfi bilan amalga oshirilgani uchun, bunday tranzistorlarni dreyf tranzistorlari deyiladi. Dreyf tranzistorlarning baza qalinligi 0,5 – 1 mkm. Shuning uchun ham, ishchi takroriylik 500-1000 MHz etadi. Bu tranzistorlarning kamchiligi emitterda teskari kuchlanishining kichikligi hamda yuqori kuchlanish va katta quvvatli tranzistorlarni ishlab chiqarishning qiyinligi.

Diffuzion planar tranzistorlar. Bu ko'rinishdagi tranzistorlarni tayyorlash kremniy oksidini olib unda ochilgan pardada tirqishlar orqali kirishma atomlarining diffuziya usulidan foydalaniladi. Texnologik amallar ketma-ketligi III.69-rasmda ko'rsatilgan. Planar tranzistorni tayyorlash uchun n -turdagi kremniy olinib nihoyasida kollektor vazifasini o'taydigan plastinka

Keyin yana hosil bo'lgan SiO_2 qatlam yedirilib (III.69, g), tirqishga alumiiniy kontaktlar purkaladi va termobosim usulida chiqqichlar ulanadi (III.69, h). Nihoyat, diffuzion-planar tranzistor tuzilmasining umumiy ko'rinishi III.70-rasmda ko'rsatilgan.

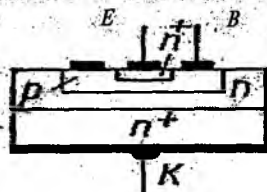
Meza-planar tranzistorlar. Tranzistorlarning aktiv qismini meza-tuzilma ko'rinish emitter va bazaning ma'lum qismlarini ikkilama yedirish bilan olinadi (III.71-rasm). Bu tranzistorlarni bitta yarimo'tkazgich plastinkada bir texnologik siklda ko'plab miqdorda tayyorlash mumkin, shuning uchun parametrlarida farqlar kam.

Meza-planar tranzistorlardagi o'tishlar kichik sig'imga va uncha katta bo'lmagan baza qarshiligiga ega. Bu tranzistorlarning chegara takroriyliigi bir qancha yuz megagersga boradi.

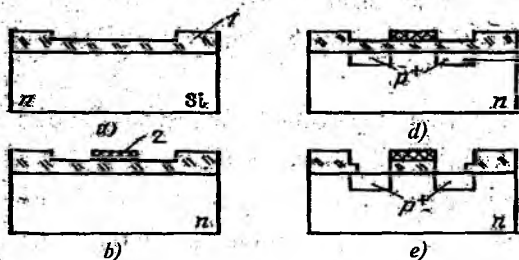
Epitaksial-planar tranzistorlar. Bunday tranzistorlarda kollektor ikki qatlam: yuqori omli bazaga tutashuvchi va kichikomli kontaktga tutashuvchi bo'ladi. Tranzistorlarda kichik omli, elektron o'tkazuvchanligi monokristall taglik yarimo'tkazgichga yuqori omli, epitaksial qatlam o'stirish bilan olinadi. Kichik omli, taglik n^+ kollektor sohasini hosil qiladi. Baza va emitter sohalar SiO_2 larda tirqish orqali ikkilama diffuziya usulida tayyorlanadi. Natijada, $n^+-p-n-n^+$ hajmiy qarshiligi kichik epitaksial kollektor, kollektor sohasining kichik C sig'imi va kollektor o'tishi yetarli darajada yuqori teshilish kuchlanishga ega bo'lgan dreyf tranzistor olinadi (III.72-rasm).



71-rasm. Meza-planar tranzistor tuzilishi



III.72-rasm. Epitaksial-planar tranzistor tuzilishi



III.73-rasm. MDYa tranzistorning olinish texnologiyasi 1- SiO_2 -qatlam, 2-polikremniy, 3-legirlangan paynov va manba sohalar

Hozirgi vaqtda ishlab chiqarishda asosan qo'sh qutbli tranzistorlarni meza-planar va epitaksial-planar texnologik usullaridan foydalanilmoqda. Mikroelektronikada tranzistor tuzilmalarini olishning oxirgi texnologiyasi keng qo'llanilmoqda.

MDYa-tranzistorlar. Bunday tranzistorlarni olish uchun taglik n -turdagi kremniy sirtiga qalin SiO_2 o'stiriladi, keyin alohida qismlardan oksid ketqazilib, o'rniga yana yupqa SiO_2 qatlam o'stiriladi (III.73-rasm, *a*). Shu yupqa SiO_2 sirtiga polikristall kremniy parda o'tqaziladi va fotolitografiya olib boriladi (III.73-rasm, *b*). Keyin paynov va manba sohalari ustidagi oksid yedirilib tirqishlar hosil qilinadi. Keyingi bosqichda manba va paynov sohalari diffuziya usulida legirlanadi (III.73-rasm, *d*). Yuqori temperaturada o'tkazilgan diffuziya natijasida manba va paynov sirti oksidlanib qoladi. Shuning uchun oxirgi amalda oksid qatlam yedirilib (III.73-rasm, *g*) metall elektrodlar o'tqaziladi.

Zatvor sifatida polikristall kremniyning qo'llanilaishi chegara kuchlanishini 0,5-1,0 V gacha kamaytiradi. Bu esa, IMS larda katta afzalliklarni keltiradi.

19.5. Integral mikrosxemalar olish texnologiyasi

Elektronika elektronlar va boshqa zarrachalarning turli muhitda (vakuumda, gazda, qattiq jismda), shuningdek, atomlar, molekulalar, kristall panjaralari ichida elektromagnit maydonlar bilan o'zaro ta'sirini o'rganadigan fan sohasidir. Uning amaliy vazifalari mazkur o'zaro ta'sirdan foydalanib elektromagnitik energiyani boshqa energiya turlariga aylantiradigan va aksincha ish bajaradigan elektron asboblari yaratish usullarini, elektron asboblari ishlab chiqarish texnologiyasining ilmiy asoslarini ishlab chiqishdir.

XX asr boshida paydo bo'lgan elektronika bir necha taraqqiyot bosqichlarini bosib o'tdi, bu jarayonda uning element bazasining bir necha avlodi o'zgardi: elektrovakuum asboblarning diskret elektronikasi, yarimo'tkazgichli asboblarning diskret elektronikasi, mikrosxemalar

integral elektronikasi (mikroelektronika), funksional mikroelektron sxemalarning integral elektronikasi (funksional mikroelektronika).

Biz bu joyda mikroelektronika haqida qisqacha asosiy ma'lumot beramiz.

Mikroelektronika elektronikaning ilmiy-texnik yo'nalishi bo'lib, fizik, kimyoviy, sxemotexnik va boshqa usullar turkumi yordamida yuqori darajada ishonchli va tejimli mikrominiatur elektron sxemalar va qurilmalarni tadqiqlash, loyihalash, ishlab chiqarish muammolarini qamrab oladi.

Mikroelektronikaning birinchi vazifasi eng ishonchli elektron sxemalar va qurilmalar yaratishdir. Bu masalani elektron apparatlari tayyorlashning eng sifatli yangi usullaridan foydalanib yechiladi, elektron apparaturaning diskret elementlaridan foydalanishdan voz kechib, integral mikrosxemalar yaratishi yo'lidan boriladi. Bunda elektron sxemaning aktiv elementlari (rezistorlar, kondensatorlar) va ulovchi elementlari yarimo'tkazgich kristallining sirtida yoki hajmida, yoiniki dielektrik taglik sirtida yagona texnologik davrada (siklda) shakllantiriladi. Sxema ichidagi ulushlarning eng kam bo'lishligi mazkur qurilmalarning ishonchlilik darajasini oshiradi.

Mikroelektronikaning ikkinchi vazifasi elektron sxemalar va qurilmalar narxini pasaytirishdir. Integral mikrosxemalar texnologiyasi amallari ketma-ket olib borilganda ba'zi keraksiz amallar qoldiriladi, sxemalar takomillanib, qurilmalar narxini kamaytiradi.

Mazkur ikki vazifaning yechimi bilan birgalikda elektron asboblarning massasi va hajmi keskin kamayadi.

Integral mikrosxema (mikrosxema)-mikroelektron mahsulot bo'lib, elektromagnitlik va boshqa signalni o'zgartirish, unga ishlov berish yoki axborotni jamg'arish vazifalarini bajaradi, unda bir butun sifatida elektrik ravishda ulangan elementlar yuqori darajada zich taxlangan bo'ladi.

Integral mikrosxemani qisqacha IM yoki IMS ko'rinishida belgilanadi.

IMning taxlanish zichligi undagi elementlar sonining hajmiga nisbatidir. IM dagi elementlar soni integratsiya darajasini aniqlaydi.

10 tagacha elementli IMni birinchi, 10 tadan 100 tagacha elementli IMni ikkinchi, 100 dan 1000 tagacha elementli IMni uchinchi integratsiya darajali deyiladi. 1000 dan ortiq elementli IMni katta integral sxema (KIS) deyiladi. Bundan ancha katta sondagi elementlarga ega bo'lgan o'ta katta integral sxemalar (O'KIS) ham ishlab chiqariladi.

19.5.1. Integral mikrosxemalarni tayyorlash texnologiyasining asosiy bosqichlari

Har qanday mikrosxemani ishlab chiqarishda quyidagi bosqichlardan o'tishga to'g'ri keladi.

Yarimo'tkazgich plastinalarini yoki dielektrik taglikni tayyorlash va tozalash; yig'ish, sinash va o'lchash, oxirgi amallar. Agar mikrosxemani korpusga joylanadigan bo'linsa, yig'ish tayyorgarligi korpuslar detallari (qismlari) va tugunlarini tayyorlashdan iborat bo'ladi, agar IM ni korpusiz qilinadigan bo'lsa, yig'ishdan oldin jipslovchi tarkiblar va armatura (chiqish ramkalari, tasmalar va b.) tayyorlanadi.

Har qanday IM ishlab chiqarilganda ham nazorat amallari bajariladi va yakuniy sinovlar o'tkaziladi. Undan keyin bo'yash, laklash, markalash, taxlash amallari bajariladi.

Plastinalar, tagliklarni tayyorlash. Yarimo'tkazgich plastinalar va dielektrik tagliklar mikrosxemalar tuzilmalarini tayyorlash uchun asosiy tayyorlama bo'ladi. Hozirgi vaqtda sanoatda ko'pchilik yarimo'tkazgichli mikrosxemalarni ishlab chiqarishda kremniy ishlatiladi, chunki u yaxshi o'rganilgan va sanoatda o'zlashtirilgan germaniyga nisbatan bir qator afzalliklarga egadir: kremniyning taqiqlangan zonasi kengroq, bu esa ishlash temperaturalari oraligi kattaroq bo'lishligini, teskari toklar kichik bo'lishligi va temperaturaga kamroq bog'liq bo'lishligini, kattaroq qarshilikli rezistorlar tayyorlash imkonini ta'minlaydi. Kremniy asosidagi $p-n$ o'tishlarning teshilish yuqoriroq temperaturalarda sodir bo'ladi.

Kremniyning zichligi germaniynikidan taxminan 2 marta kam, kremniy asosidagi tuzilmalar massasi nisbatan shuncha marta kam bo'ladi.

Boshqa yarimo'tkazgichlarga nisbatan kremniyda dislokatsiyalar hosil bo'lishning kritik kuchlanishi ancha kattakim, bu 150 mm gacha bo'lgan diametrli va 100 kgdan ortiq massali dislokatsiyasiz monokristallar o'stirish imkonini beradi. Yana bir afzalligi: kremniy plastinkalari sirtiga yaxshi dielektrik va himoyaviy xossali SiO_2 oksid pardalarini o'tqazish oson.

Mikroshemalar ishlab chiqarishda galliy arsenidi va boshqa yarimo'tkazgich birikmalar ham qo'llanadi.

Mikroshemalar parametrlariga qo'yiladigan talablarga mos ravishda muayyan markali va muayyan kristallografik yo'nalishli yarimo'tkazgich tanlanadi. Gibrid va pardaviy mikroshemalar uchun shisha, sital, fotosital, keramik tagliklar qo'llaniladi. Keyingi vaqtlarda polimer tagliklar, dielektrik qatlamli metall tagliklar ($\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$), sapirning monokristall dielektrik tagliklari qo'llanilmoqda.

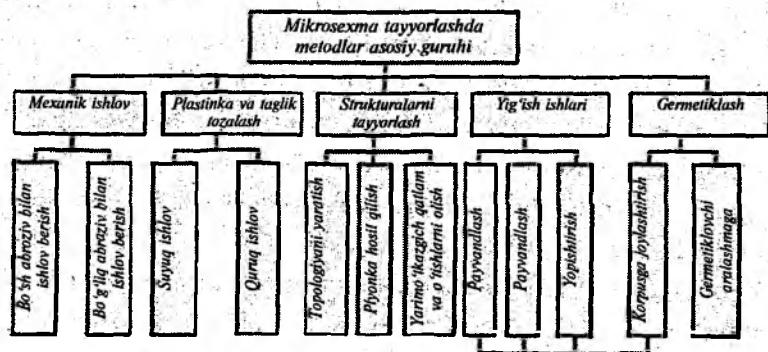
Oldingi boblarda bayon qiliganidek, plastinalar va tagliklarga mexanik ishlov beriladi va ular keraksiz kirishmalardan tozalanadi, bunda zaruriy kimyoviy ishlov ham bajariladi. Tuzilmalar olishdan oldin quruq tozalash amalga oshiriladi.

Tuzilmalar tayyorlash. Bu bosqichda plastinkalar va tagliklarning gorizontal tekisligida kerakli shakldagi, o'lchamdagi, tayinli o'zaro joylashishli va vertikal tekisligida keraklicha qalinlikdagi, kirishmalar kirishi chuqurligiga ega bo'lgan elementlar (mikroshema qismlari) hosil qilinadi. Tuzilmalar tayyorlashning barcha usullari uchta guruhga bo'linishi mumkin: 1) topologiya (qiyofa)ni shakllantirish usullari; 2) pardalar hosil qilish usullari; 3) plastinalarni legirlash va yarimo'tkazgich qatlamlar o'tqazish usullari. Mikroshemalar tuzilmalari faqat guruh usulda tayyorlanadi. Plastinalar yoki tagliklar guruhi bir vaqtda ishlovga duchor qilinadi va ularning har birida bitta emas, balki ko'p tuzilmalar shakllantiriladi. Tuzilmalar hosil qilish usullari oldingi boblarda batafsil ko'rilgan edi.

Mikrosxemalarni yig'ish. Yig'ish deganda qismlar va tugunlarni ulash jarayoni tushuniladi, uning oqibatida tayyor mahsulot (buyum) olinadi. Korpusli IM larni yig'ish uchun tuzilmalarni tayyorlash bilan bir vaqtda korpuslarning qismlari va tugunlari, korpussez IM larni yig'ish uchun esa jipslovchi tarkiblar va tuzilmalar qismlarini ulovchi armatura tayyorlanadi. IM larni yig'ish quyidagi amallardan iborat: tuzilmalar korpuslar asoslariga, chiqish ramkalariga yoki qo'shimcha tagliklarga o'rnatiladi; osma kristallar, tarkiblovchilar taxtalar (platalar)ga o'rnatiladi; elektrodlar uchlari kontaktlovchi yuzachalar va IM ning tashqi uchlari ulanadi, jipslash amalga oshiriladi.

Sinovlar va o'lchashlar. Jipslash (germitizatsiya)dan keyin yashirin nuqsonlarga ega bo'lgan IMlarni aniqlash uchun texnologik sinovlar va o'lchashlar bajariladi. Texnologik sinovlar iqlimiy, mexanik va elektrik sinovlarga bo'linadi. Iqlimiy sinovlarda IMning namlikka, issiqlikka, sovuqqa chidamligi tekshiriladi. Mexanik sinovlarda tuzilmaning va IM ichidagi ulanmalarning mexanik mustahkamligi tekshiriladi. Elektrik sinovlarda esa IMning tok o'tkazishi va barqaror ishlay olishi tekshiriladi, shuningdek, IM parametrlari o'lchanadi.

Oxirgi amallar. Oxirgi amallarga bo'yoq berish, laklash, galvanik qoplamalar qilish, markalash, IMni apparaturaga ulaydigan chiqqichlar qilish va nihoyat, taxlash ishlari kiradi.



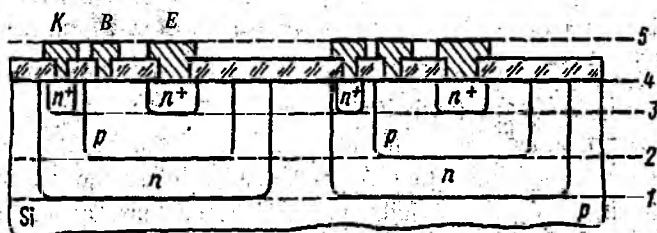
III.74-rasm. IM larni tayyorlash usullari asosiy guruhlari

Endi ba'zi masalalarga to'xtalib o'tamiz.

IMlarni tayyorlash usullarining asosiy guruhlarini III.74-rasmda ko'rsatilgan.

Mikroshemalar elementlari birin-ketin ko'p marta mahalliy ishlov berish oqibatida olinadigan texnologik qatlamlar tarzida hosil qilinadi. Masalan, III.75-rasmda tasvirlangan qo'sh qutbli tranzistorlar asosida tayyorlanadigan yarimo'tkazgichli IM holida mahalliy ishlov besh marta amalga oshirilgan.

Bunday texnologiyada har bir keyingi qatlam oldingisiga aniq mos tushishi zarur.



III.75-rasm. Qo'sh qutbli tranzistor asosidagi IM tuzilmasi kesmi qisimi: 1- birinchi texnologik qatlam- yakka o'tishlarni hosil qilish; 2- ikkinchi qatlam - baza - kollektor o'tishlarni hosil qilish; 3- uchinchi qatlam - emitter - baza va kontakt yaqinida n⁺- sohalarini hosil qilish; 4- to'rtinchi texnologik qatlam- metall qatlam o'tqazish; 5- beshinchi qatlam - kontaktlar topologiyasi, tok keltiruvchi yo'llar, kontakt maydonchalar hosil qilish.

19.5.2. Integral mikroshemalar turlari

Integral mikroshemalarni tayyorlash texnologiyasi, qanday vazifalarni bajarishi va boshqa belgilari bo'yicha turli siniflarga bo'linadi.

Tuzilish-texnologik belgi bo'yicha yarimo'tkazgichli, gibrid IM lar farq qilinadi.

Yarimo'tkazgichli IM-bu barcha elementlari va elementlararo ulanmalari yarimo'tkazgich hajmi va sirtida hosil qilingan integral mikroshemadir.

Gibrid IM—bu bir qismi muayyan yarimo'tkazgich texnologiyada bajarilib, so'ng pardali texnologiya bo'yicha tayyorlangan mikro-sxemaning umumiy tagligiga joylashtiriladigan integral mikrosxemadir.

Yana moslashtirib joylangan integral sxemalar ham mavjud, ularda ba'zi elementlar (odatda passiv elementlar) kristall plastinasi sirtiga pardali texnologiya usullarida o'tqazilgan.

Bajaradigan vazifalari bo'yicha analogli IM, raqamli IM lar bo'ladi

Analogli IMLar uzluksiz funksiya qonuni bo'yicha o'zgaruvchi signalni o'zgartirish va ishlov berish uchun mo'ljallangan integral mikrosxemadir.

Raqamli IM lar diskret funksiya qonuni bo'yicha o'zgaruvchi signalni o'zgartirish va ishlov berish uchun mo'ljallangan integral mikrosxemadir.

Raqamli IM lar diskret ishlov berish qurilmalarida (EHM, avtomatika tizimlari va h. k. da) qo'llaniladi.

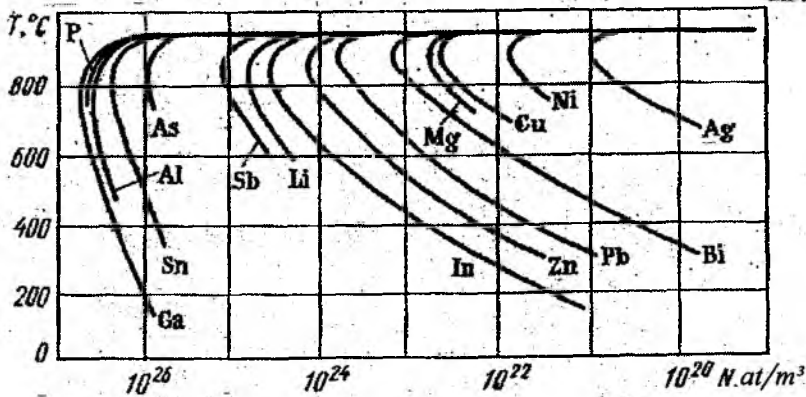
Mikroelektronika fan, texnika va texnologiyaning eng tez rivojlanayotgan sohasidir. Bu soha bo'yicha ko'p tadqiqotlar, texnik va texnologik ishlanmalar mavjud, bu yo'nalishda nazariy va tajribaviy izlanishlar katta ko'lamda davom ettirilmoqda. Mikroelektronikaning tobora taraqqiy qilib borishiga shubha yo'q.

Mikroelektronika asoslarini hatto qisqacha bayon qilish uchun butun bir kitob hajmi ham kamlik qiladi. Shu boisdan va o'quv qo'llanma oldiga qo'yilgan vazifalarni nazarda tutib, bu ulkan soha haqida qisqacha ma'lumot berish bilan cheklanamiz.

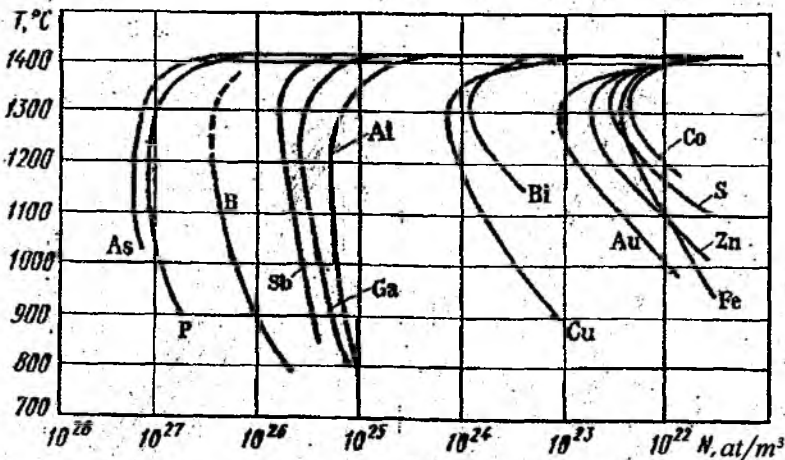
Nazorat savollari

1. Elektron-kovak o'tishlar olishning qanday texnologik usullari bor?
2. Epitaksial-planar o'tish tuzilmasini chizing va tushuntiring.
3. Planar texnologiyaning ahamiyati qanday?
4. Diodlar qanday tayyorlanadi?
5. Diodlarning qanday xillari bor?
6. Tranzistorlar olishning qanday usullari bor?
7. MDYA-tranzistor qanday tayyorlanadi
8. Tranzistor parametrlarini yaxshilashda epitaksiyaning roli qanday?
9. Integral mikrosxema deganda nimani tushunasiz?

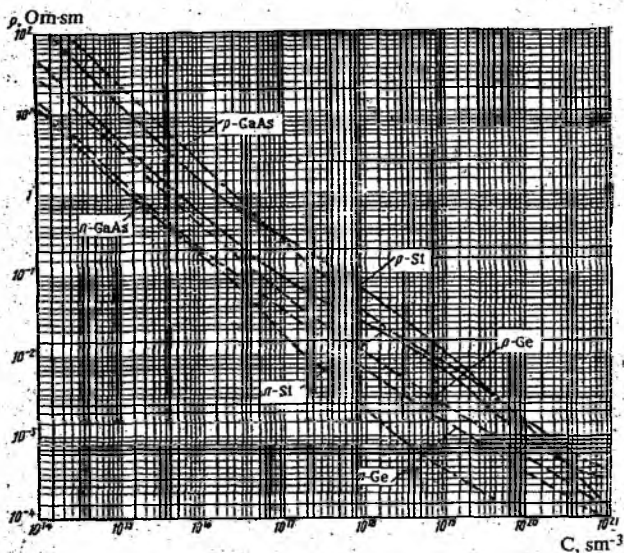
Qo'shimchalar



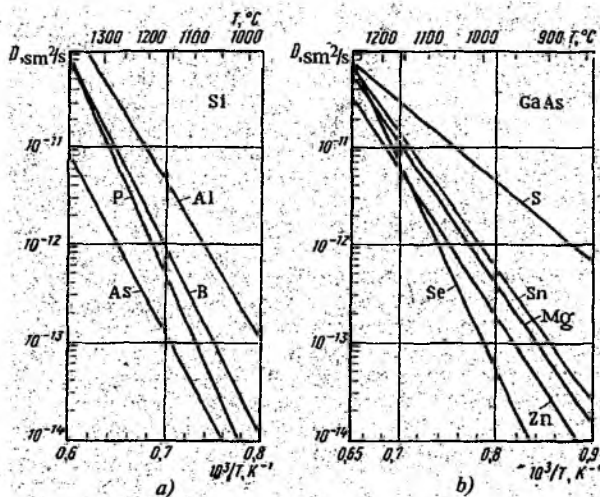
1-rasm. Germaniyda kirishmalar eruvchanligining temperaturaga bog'liqligi.



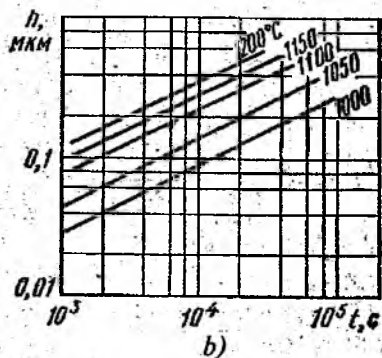
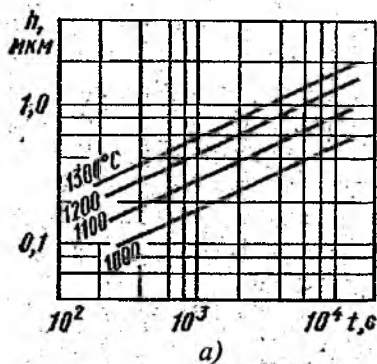
2-rasm. Kremniyda kirishmalar eruvchanligining temperaturaga bog'liqligi.



3-rasm. Si, Ge va GaAs lar solishtirma qarshiliklarining kirishmalar konsentratsiyasiga bog'liqligi.



4-rasm. Kremniyda (a) va galliy arsenidida (b) kirishmalar diffuziya koeffitsientlarining temperaturaga bog'liqligi.



5-*rasm*. Turli temperaturalarda kremniyni niqoblash uchun kerakli bo'lgan SiO_2 oksidi qalinligining diffuziya vaqtiga bog'liqligi: a) fosfor diffuziyasida; b) bor diffuziyasida.

Yarimo'tkazgichlarning elektr xossalari

1-jadval

Xossasi	Kremniy	Germaniy	Galliy arsenidi	Galliy fosfidi
Taqlangan zona kengligi, eV da				
0 K da	1,21	0,756	1,52	2,34
300 K da	1,10	0,66	1,43	2,26
Taqlangan zona kengligining temperatura koeffitsienti, 10^{-4} , eV/K	-4,1	-4,4	-5,0	-3,67
Xususiy solishtirma qarshiligi, $\Omega \cdot \text{sm}$ 300 K da	$2,5 \cdot 10^5$	47	$3,7 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{16}$
Kirishmasiz yarimo'tkazgich zaryad tashuvchilarning harakatchanligi, $\text{sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 300 K da:				
elektronlar	1450	3900	10500	300
kovaklar	480	1900	425	100
Zaryad tashuvchilarning xususiy konsentratsiyasi, sm^{-3} , 300 K da	$1,45 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{13}$	10^7	10^5
Kirishmasiz yarimo'tkazgichda zaryad tashuvchilar harakatchanligining temperaturaga bog'liqligi, $\text{sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$:				
elektronlar	$1300(T/300)^{-2}$	$4500(T/300)^{-1,6}$	$8500(T/300)^{-1}$	$110(T/300)^{-1,5}$
kovaklar	$500(T/300)^{-2,7}$	$3500(T/300)^{-2,33}$	$420(T/300)^{-2,1}$	$75(T/300)^{-1,5}$

Yarimo'tkazgichlarda keng tarqalgan kirishmalarning elektr tabiati

2-jadval

Yarimo'tkazgich	Neytral kirishma	Donorlar	Akseptorlar	Chuqur sath hosil qiluvchi 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, Mg, Zn, Cd, C	Cu, O, Ge, Co, Fe, Cr, Mn

Ba'zi elementlarning suyuqlik va bug'lanish temperaturalarini

3-jadval

Element	Atom massasi	T _{suyu} °C	T _{bug} °C	Tavsiya qilingan bug'latgich moddalar	
				Sim. lenta	Tigil
Ag	107,9	961	1047	Mo, Ta	Mo, C
Al	27	660	1150	W	C, BN, TiB ₂ -BN
Au	197	1063	1465	W, Mo	Mo, C
Bi	209	271	698	W, Mo, Ta, Ni	Metallar, oksidlar
Cd	112,4	321	264	W, Mo, Ta, Ni, Fe	Metallar, oksidlar
Co	58,9	1490	1650	W	Al ₂ O ₃ , BeO
Cr	52	1800	1205	W, Ta	-
Cu	63,5	1083	1273	W, Mo, Ta	Mo, C, Al ₂ O ₃
Ge	72,6	959	1251	W, Mo, Ta	W, C, Al ₂ O ₃
Mg	24,3	651	443	W, Mo, Ta, Ni	Fe, C
Mn	54,9	1244	980	W, Mo, Ta	Al ₂ O ₃
Mo*	95,9	2622	2533	-	-
Ni	58,7	1455	1510	W	Oksidlar
Pd	106,4	1555	1566	W	Al ₂ O ₃
Pt	195	1774	2090	W	ThO ₂ , ZrO ₂
Sb	121,8	630	678	Mo, Ta, Ni	Metallar, oksidlar
Si	28	1415	1342	-	BeO, ZrO ₂ , ThO ₂
Ta*	181	2996	3070	-	-
Ti	47,9	1725	1546	W, Ta	C, ThO ₂
W*	183,9	3382	3309	-	-
Zn	65,4	419	343	W, Ta, Ni	Fe, Al ₂ O ₃ , C, Mo

*Elektron-nurli bug'lantirish yoki ion bombardirmoni tavsiya etiladi.

Polikristall kremniy pardalarida aktiv kirishmalar diffuziyasi parametrlari

4-jadval

Element	Diffuziya doimiyi D ₀ , sm ² /s	Kirishma faol energiyasi ΔE, eV	Diffuziya koeffitsienti D, sm ² /s	Temperatura T, °C
As	8.6·10 ⁴	3.9	2.4·10 ⁻¹⁴	800
As	0.63	3.2	3.2·10 ⁻¹⁴	950
B	(1.5...6)·10 ⁻³	2.4...2.5	9·10 ⁻¹⁴	900
B	-	-	4·10 ⁻¹⁴	925
P	-	-	6.9·10 ⁻¹³	1000
P	-	-	7·10 ⁻¹³	1000

Elektrod qotishma uchun qo'llaniladigan ba'zi elementlar

5-jadval

Element	Suyulish temperaturasi T, °C	Bug'lanish temperaturasi T, °C	Zichligi d, g/sm ³	IKK·10 ⁶ , 1/K
Al	659.7	996	2.7	23.8
Ag	961.0	1047	10.5	18.7
As	817.0	280	5.7	3.8
Au	1063.0	1465	19.3	14.2
B	2300.0	1365	2.5	8.0
Bi	271.3	698	9.8	14.0
Ga	29.7	1093	5.9	18.0
Ge	936.0	1251	5.4	5.3
In	156.4	952	7.3	33.0
Mo	2620	2533	10.2	5.1
Ni	1455	1510	8.9	13.0
Pt	1773.5	2090	21.4	9.0
Pb	327.4	718	11.3	29.5
Si	1420.0	1343	2.32	4.2
Sb	630.5	678	6.6	10.9
Sn	231.9	1189	7.3	26.7
W	3370.0	3310	19.3	4.5
Zn	419.4	343	7.1	26.3

ADABIYOTLAR

1. Ю.М.Таиров, В.Ф.Цветков Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. Москва, «Высшая школа», 1990.
2. А.Я.Нашельский. Производство полупроводниковых материалов. Москва, «Металлургия», 1982.
3. С.Зайнобидинов, А.Тешабоев. Яримўтказгичлар физикаси. Тошкент, «Ўқитувчи», 1999.
4. А.Тешабоев, С. Зайнобидинов, Ш. Эрматов. Қаттиқ жисм физикаси. Тошкент, «Молия», 2001.
5. А.Тешабоев ва бошқалар. Яримўтказгичли асбоблар физикаси. Андижон, «Хаёт», 2002.
6. Б.И.Болтакс. Диффузия в полупроводниках. Москва, «Физматгиз», 1961.
7. В.И.Фистуль. Физика и химия твердого тела. Москва, «Металлургия», часть 1, 1995.
8. В.И.Фистуль. Физика и химия твердого тела .Москва, «Металлургия», часть 2, 1995.
9. В.В.Пасынков, Л.К. Чиркин. Полупроводниковые приборы. М., «Высшая школа», 1987.
10. И.А.Малышева. Технология производства интегральных микросхем. «Радио и связь», 1991.
11. А.И.Куornosов, В.В.Юдин. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М., «Высшая школа». 1986.
12. Е.И.Верховский. Лазерная технология в производстве интегральных микросхем. М. «Высшая школа», 1990
13. О.Д.Парфенов. Технология микросхем. М., «Высшая школа», 1986.
14. Плазменная технология в производстве СБИС. Под ред. Н.Айнспрука и Д.Брауна Москва, «Мир», 1987.
15. И.Г.Пичугин, Ю.М.Таиров Технология полупроводниковых приборов. М., «Высшая школа», 1984.
16. В.И.Фистуль. Новые материалы. Москва, «МИСИС», 1995
17. М.Г.Мильвидский. Поупрводниковые материалы в современной электронике. Москва, «Наука», 1986.

MUNDARIJA

So'zboshi.....	3
BIRINCHI QISM.....	5
YARIMO'TKAZGICHLAR HAQIDA UMUMIY MA'LUMOT	5
1-BOB. QATTIQ JISMLAR FIZIKASINING ASOSIY TUSHUNCHALARI ..5	
1.1. Kirish.....	5
1.2. Kristall va amorf qattiq jismlar.....	5
1.3. Miller indekslari	7
1.4. Olmos va sfalerit tuzilmalari.....	8
1.5. Metallar. Yarimo'tkazgichlar. Dielektriklar	8
1.6. Kristall yarimo'tkazgichlarda nuqsonlar	11
2-BOB. YARIMO'TKAZGICHLARDA KIRISHMALAR	22
2.1. O'rinbosar va suqilma qattiq eritmalar	22
2.2. Diffuziya usuli bilan kirishmalar kiritish.....	23
2.3. Ionlar kiritish usuli	24
2.4. Epitaksiya usuli.....	25
2.5. Transmutatsion legirlash usuli	26
2.6. Kirishmalarning energiya sathlari	28
IKKINCHI QISM	31
YARIMO'TKAZGICH MODDALAR OLISH TEXNOLOGIYASI	31
Kirish.....	31
3.1. Texnologik jarayon. Asosiy tushunchalar.....	31
3.2. Geterogen kimyoviy-texnologik tizimlarning asosiy jarayonlari	33
3.4. Gaz fazasi orqali haydash jarayonlari	40
3.5. Moddalarni ajratish va tozalashning boshqa jarayonlari	47
4-BOB. KRISTALLAR O'SISHI KINETIKASI.....	50
4.1. Kristallanish markazlari hosil bo'lishi.....	50
4.2. Kristallar o'sishi mexanizmlari va kinetikasi.....	56
4.3. Kristallar o'sishining sirtiy kinetikasi	58
4.4. Kristallar o'sishida ko'chish jarayonlari.....	60
5-BOB. YARIMO'TKAZGICHLAR ISHLAB CHIQRISHDA FOYDALANILADIGAN MODDALAR	63
5.1. Toza modda tushunchasi. Toza moddalar bilan muomala qilish qoidalarlari	63
5.2. Asosiy va yordamchi moddalar.....	64
Konteyner moddalari.....	69
Reagentlar	72
Gazlar.....	74
6-BOB. POLIKRISTALL VA AMORF YARIMO'TKAZGICHLAR TEXNOLOGIYASI	76

6.1. Polikristallarni sintez qilish.....	79
6.2. Ajratish jarayonlari	83
6.3. Tiklash jarayonlari	90
6.4. Polikristall yarimo'tkazgichlar olish	92
6.4.1. Trixlorasilanni tiklash usulida polikristall kremniy olish.....	92
6.4.2. Monosilandan kremniy polikristallarini olish	97
6.4.3. Germaniy polikristallarini olish	98
6.4.4. Galliy arsenidi kristallarini olish	101
6.4.5. Indiy va galliy fosfidlarini olish	103
6.5. Amorf yarimo'tkazgichlarni olish va qo'llash	105
7-BOB. MONOKRISTALLAR O'STIRISH	112
TEKNOLOGIYASI ASOSLARI.....	112
7.1. Kristallarni qattiq fazadan hosil qilish	112
7.2. Kristallarni suyuq fazadan hosil qilish	113
7.2.1. Kristallarni suyulmalardan hosil qilish.....	113
7.2.2. Suyulmalarning normal yo'nalgan kristallanishi usullari.....	114
7.2.3. Suyulmadan kristallni tortib olish usullari	115
7.2.4. Zonaviy suyultirish usullari.....	117
7.3. Kristallarni eritmadan o'stirish	118
7.3.1. Temperatura gradientli zonaviy suyultirish usuli.....	120
7.3.2. Kvars monokristallarini o'stirish	121
7.4. Kristallarni gazsimon fazadan o'stirish	122
7.5. Kerakli shakldagi monokristallarni o'stirish.....	126
8-BOB. YARIMO'TKAZGICH MONOKRISTALLAR O'STIRISH.....	129
8.1. Kirishmalar hisobi	129
8.2. Komponovka	129
8.2.1. Dastlabki xomashyoni maydalash	130
8.2.2. Oraliq texnologik bosqichlar	130
8.2.3. Kimyoviy yedirish.....	130
8.2.4. Birikmalar sintezi hisobi	131
8.2.5. Tovar monokristallarini o'stirish komponovkasi	131
8.3. Kirishmalar tekis taqsimlangan monokristallar olish	132
8.3.1. Bir tekis taqsimlanishni (bir jinslilikni) baholash	132
Kristallanish jarayonini programmalash hisobi	136
8.4. Mukammal tuzilishli monokristallar o'stirish	140
8.4.1. Choxralskiy usulida monokristallar o'stirish	141
8.4.2. Suyuqlik germetizatsiyasi usuli.....	145
8.4.3. Tigelsiz zonaviy suyultirish usuli.....	147
8.4.4. Brijmen gorizontal usuli	149
8.5. Yuqori darajada toza monokristallar o'stirish	150
8.5.2. Elementar yarimo'tkazgichlar (Ge, Si, Te, Se)da uglerod.....	152
8.5.3. Yarimo'tkazgich birikmalarda kremniy.....	153

8.5.4. Yarimo'tkazgich birikmalarda kislorod	155
8.6. Yarimo'tkazgichlarning lazer texnologiyasi.....	156
8.6.1. Sirtni tozalash va relyefini yaxshilash	156
8.6.2. Kirishmalar kiritish va ularni qayta taqsimlash usulari	157
8.6.3. Nuqsonlarni kuydirish	158
8.6.4. Kirishmalarni getterlash.....	159
8.6.5. Polikristall kremniy qarshiligi o'zgarishi	160
8.6.6. Amorf va polikristall qatlamlarning qayta kristallanishi	161
8.6.7. Polikristall kremniy tasmlarini kristallash	162
8.6.8. «Dielekt ustidagi kremniy» qatlamini qayta kristallash.....	162
8.6.9. Yedirish	163
UCHINCHI QISM	164
YARIMO'TKAZGICHLI ASBOBLAR TAYYORLASH	
TEKNOLOGIYASI	164
9-BOB. YARIMO'TKAZGICH MATERIALLARGA MEXANIK	
ISHLOV BERISH	164
9.1. Umumiy ma'lumotlar.....	164
9.2. Plastinka va kristallarga qo'yiladigan talablar	164
9.3. Monokristallarni yo'naltirish usullari	165
9.4. Quyma monokristallarni plastinka va kristallarga kesish usullari	167
9.5. Plastinkalarni tekislash va silliqdash	171
9.6. Mexanik ishlovdan so'ng plastinkalar va kristallar sifatini nazorat qilish	173
10-BOB. YARIMO'TKAZGICH PLASTINKALAR VA KRISTALLARGA	
KIMYOVIY VA ELEKTROKIMYOVIY ISHLOV BERISH	175
10.1. Umumiy ma'lumotlar.....	175
10.2. Yarimo'tkazgich plastinkalarni organik eritmalarda tozalab yuvish	176
10.3. Kislotalarda yuvib tozalash	177
10.4. Suv bilan yuvib tozalash	178
10.5. Yedirish	180
10.6. Yarimo'tkazgich plastinka va kristallarni yedirish usullari	184
10.7. Sirtga elektrokimyoviy ishlov berish	186
10.8. Bug'- gazli yedirish.....	188
10.9. Tagliklarga ion-plazma ishlov berish	190
10.10. Tagliklarga plazma-kimyoviy ishlov berish	191
10.11. Galvanik qoplamalarni o'tqazish	193
10.12. Termik ishlov berish (kuydirish).....	195
11-BOB. QOTISHMALI USULDA TUZILMALAR OLISH	197
11.1. Umumiy ma'lumotlar.....	197
11.2. Qotishmali $p-n$ o'tish hosil bo'lishining fizik-metallurgik asoslari.....	197
11.3. Elektron-kovak o'tishning hosil bo'lishi va uning geometriyasi.....	198
11.4. Elektrod materiallarga talablar.....	200
11.5. Qotishmali tuzilmalarning sifatini nazorat qilish	202

12-BOB. EPITAKSIAL O'QSTIRISH USULIDA TUZILMALAR OLISH	203
12.1. Umumiy ma'lumotlar	203
12.2. Epitaksial o'tqazishning asosiy usullari	204
12.3. Kremniy va germaniy epitaksiyasi	207
12.4. Epitaksial qatlamlar olish qurilmalari	210
12.5. Epitaksial tuzilmalarni legirlash	213
12.6. $A^{III}B^V$ turdagi yarimo'tkazgich birikmalar epitaksiyasining texnologik xususiyatlari	215
13-BOB. DIFFUZIYA USULIDA TUZILMALAR OLISH	224
13.1. Umumiy ma'lumotlar	224
13.2. Diffuziyada kirishmalar taqsimoti	225
13.3. Planar texnologiyada diffuziya	228
13.4. Diffuzion tuzilmalarni hisoblash usullari	230
13.5. Diffuzion tuzilmalar parametrlarini nazorat qilish	237
14-BOB. IONLAR KIRITIB LEGIRLASH USULIDA TUZILMALAR OLISH	240
14.1. Umumiy ma'lumotlar	240
14.2. Ionlar kiritilgan tuzilmalarni hisoblash usullari	241
14.3. Yarimo'tkazgichli asboblarni texnologiyasida ion kiritib legirlash jarayonlaridan foydalanish	246
15-BOB. PLANAR TEXNOLOGIYADA HIMYOVIY DIELEKTRIK PARDALAR	249
15.1. Umumiy ma'lumotlar	249
15.2. Kremniyni termik oksidlash kinetikasi	249
15.3. Suv bug'ida kremniyni termik oksidlash	254
15.4. Quruq kislorodda kremniyni termik oksidlash	256
15.5. Kremniy oksid pardalarini pirolitik o'tqazish	257
15.6. Kremniyni anod oksidlash	258
15.7. Kremniyni past temperaturali ion-plazma oksidlash	259
15.8. Kremniy nitridi qoplamalarini olish. Aralash qoplamalar	261
15.9. Himyoviy dielektrik pardalarning sifatini nazorat qilish	262
16-BOB. FOTOLITOGRAFIYA	266
16.1. Umumiy ma'lumotlar	266
16.2. Fotorezistlar	267
16.3. Fotoandozalar	271
16.4. Kontaktli fotolitografiya	272
17-BOB. OMIK KONTAKTLAR VA KONTAKT TIZIMLAR	280
17.1. Umumiy ma'lumotlar	280
17.2. Kontakt materiallar va kontakt tizimlarning ko'rinishlari	281
17.3. Omik kontaktlar va kontakt tizimlarini vujudga keltirish usullari	283

18- BOB. YARIMO'TKAZGICHLI ASBOBLAR SIRTINI	
MUSTAHKAMLASH VA HIMOYA QILISH.....	289
18.1. Umumiy ma'lumotlar	289
18.2. Asbobning elektr parametrlariga $p-n$ o'tish sirt holati ta'siri.....	289
18.3. Organik qoplamalar yordamida sirtni himoyalash	292
18.3. Kremniy oksid va nitridlar bilan himoyalash	294
18.5. Metall oksidi pardalari bilan himoyalash	295
18.6. Shisha pardalar bilan himoyalash	297
19-BOB. YARIMO'TKAZGICHLI ASBOBLAR TUZILMALARINI OLISH	
TEKNOLOGIYASI	299
19.1. Umumiy ma'lumotlar	299
19.2. Elektron-kovak o'tishlarni tayyorlash texnologiyasi.....	301
19.3. Diodlar olish texnologiyasi	305
19.3.1. Past chastotali to'g'rilovchi diodlar.....	305
19.3.2. Impulsda ishlaydigan diodlar	307
19.3.3. Shotki diodlari	308
19.3.4. O'ta yuqori chastotaga mo'ljallangan diodlar	309
19.3.5. Stabilitronlar	310
19.3.6. Stabistorlar	312
19.3.7. Tunnel diodlar	312
19.3.8. Varikaplar	313
19.3.9. Diodlarning ishonchliligi	314
19.4. Tranzistorlarni olish texnologiyasi	315
19.5. Integral mikrosxemalar olish texnologiyasi	318
19.5.1. Integral mikrosxemalarni tayyorlash texnologiyasining asosiy bosqichlari	320
19.5.2. Integral mikrosxemalar turlari.....	323
Adabiyotlar.....	330

Teshaboyev Alisher,
Zaynobidinov Sirojiddin,
Musayev Ergash Ashurovich

YARIMO‘TKAZGICHLAR VA YARIMO‘TKAZGICHLI ASBOBLAR TEXNOLOGIYASI

Oliy o‘quv yurtlari uchun o‘quv qo‘llanma

Toshkent—«Talqin»—«Qaldirg‘och»—2006

Muharrirlar : *L.A‘zamov, O.Roziqov*

Musahhih *R.A‘zamova*

Dizayner *A.G‘ulomov*

Original-maketdan bosishga 2006. 24. 03. da ruxsat etildi. Bichimi 60x90 ¹/₁₆.
Ofset bosma usulida bosildi. Nashr. t. 21,0. Shartli kr. ott. 21,0. Adadi 1000.
Shartmoma N 23/05-2005. Bahosi shartnoma asosida.

«Noshir-fayz» MChJ bosmaxonasida bosildi. Toshkent tumani, K. Gofurov
ko‘chasi, 97.