

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

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI
TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

Umirzaqov B.E.

**NANOEPITAKSIAL QATLAMLAR VA
GETEROTIZIMLAR**

O'quv qo'llanma

2-qism

Toshkent 2009

Nanoepitaksial qatlamlar va geterotizimlar: O'quv qo'llanma.
Umirzaqov B.E. – Toshkent, ToshDTU, 2009. – 102 b.

Ushbu o'quv qo'llanma “Elektron texnika komponentlari va materiallari fizikasi va texnologiyasi” mutaxassisligi bo'yicha tahsil olayotgan magistrlar uchun mo'ljallangan. Qattiq jismlar fizikasi, yupqa qatlamlar fizikasi va fizikaviy elektronika sohalari bo'yicha ishlaydigan o'qituvchilar, aspirantlar va ilmiy xodimlar uchun ham ushbu o'quv qo'llanma foydalidir.

Abu Rayhon Beruniy nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti ilmiy - uslubiy kengashi qaroriga muvofiq chop etildi.

Taqrizchilar:

N. N o r q u l o v - O'zMU

«Fizikaviy

elektronika» kafedrası mudiri, dosent;

B. E g a m b e r d i e v - ToshDTU

«Elektronika va mikroelektronika»

kafedrasining professori

III. YUQORI VAKUUM SHAROITIDA EPITAKSIAL PLYONKALARNI HOSIL QILISH USULLARI

3.1. Molekulyar-nurli epitaksiya

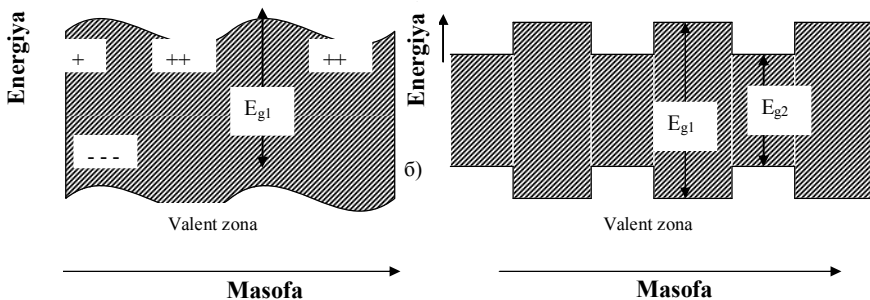
MNEda hosil bo'layotgan plyonka berilgan asosning **yuzasida o'sadi** va u bu yuza bilan **aralashib ketmaydi**. MNEda kerakli atomlar asosning yuzasiga kelib o'tiradi va yuzada **qatlamma-qatlam** o'sib boraveradi.

Yupqa qatlamlar olish va yupqa qatlamlar asosida ko'p komponentli tizimlar hosil qilishning eng zamonaviy usullaridan biri molekulyar nurli **epitaksiyadir**. MNE usulini qo'llash plyonkalar va ular orasidagi qatlamlarning eng yuqori sifatda tayyorlash imkonini beradi. Bu esa o'z navbatida mukammal yarim o'tkazgichli geterotizimlar (yakka geteroo'tishlar, yakkalangan potensial o'ralar, davriy va ko'p qatlamli tizimlar) hosil qilishning barcha talablarini bajaradi. Purkaladigan (yuzaga o'tqaziladigan) materiallarning o'ta toza manbalaridan foydalanish, o'ta yuqori vakuum ($P \leq 10^{-7}$ Pa), asos haroratini xatosiz nazorat qilish, o'sish jarayonlarini komp'yuterli boshqarish tizimini qo'llagan holda turli usullar bilan o'rganish (diagnostika qilish) hammasi birgalikda sifat jihatdan yangi texno logiyani vujudga keltirdi.

Keyingi 40 yil ichida qattik jism elektronikasida ishlatiladigan aktiv elementlarning o'lchamlari $\sim 10^4$ marta kamaydi: yuzlab mkm (birinchi tranzistorlarda) dan yuzlab angstremlargacha (kvant o'rali geterotizim). Bunday o'lchamli tizimlarni suyuq fazali epitaksiya yoki gazlarni tashish hamda boshqa usullar bilan olish juda qiyin va amalga oshirib bo'lmaydigan vazifadir. MNE esa har qanday qalinlikdagi (1 nm dan to yuzlab mkm gacha) plyonkalarni kerakli kimyoviy tarkib va kerakli konsentrasiyalari aralashmalar bilan tayyorlash imkonini beradi. Ko'p komponentli, bir o'lchamli o'ta yupqa plyonkalar davriy tizimlarining yuqori panjarasini hosil qilish g'oyasi 1969 yilda Esaki va Su tomonidan ishlab chiqilgan. Bunda yuqori panjara olishning ikki xil turi taklif qilingan: o'zgaruvchan

legirlangan va o'zgaruvchan tarkibli (3.1 - rasm). Quyida o'ziga xos noyob xususiyatli epitaksial plyonkalar olish uchun xal qilinishi kerak bo'lgan vazifalarni sanab o'tamiz. O'ta yuqori vakuum va o'ta yuqori tozalikdagi modda atomlari oqimidan foydalanish hisobiga yuqori tozalikdagi monokristallar olish. Nisbatan kichik haroratda o'stirish hisobiga o'zaro diffuziyani keskin kamaytirib, chegarada tarkibi keskin o'zgaradigan o'ta yupqa qatlamli tizimlarni hosil qilish; kichik-kichik markazlar hosil bo'lishini yo'qotadigan pog'onali o'sish mexanizmidan foydalanish hisobiga geteroepitaksiya uchun silliq nuqsonsiz sirtlarni (yuzalarni) olish; o'sish jarayonini nisbatan kichik tezlikda olib borish hisobiga olinayotgan o'ta yupqa qatlamlarning qalinligini nazorat qilish (boshqarish); murakkab tarkibli profilga yoki legirlanishga ega bo'lgan tizimlar olish; kerakli (boshqariladigan) zonaviy tizimga ega bo'lgan tizimlar hosil qilish; hozirgi paytda geteroo'tishlar va yuqori panjaralar $\text{GaAs-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ tizimi uchun to'laroq o'rganilgan. Amaliy ahamiyatini hisobga olgan holda quyidagi tizimlar ham har tomonlama o'rganilmoqda: InAs-GaSb , InAs-AlSb , InAlAs-InGaAs , Ge-CaAs , Ge-CaAs , CdTe-HgTe va ko'pgina har xil panjara doimiysiga ega bo'lgan $\text{A}^{\text{III}}\text{V}^{\text{V}}$ birikmalari.

Yarim o'tkazgichlarning geterochegaralarida lokal zonaviy tuzilishlari keskin uzilishga ega. Real holda fazaviy zaryadlarning effektlari hisobiga uzilish sohasida zonalarning bir tekis egilishi ro'y beradi. Uzilishlarning xarakteriga qarab geterochegaralarni to'rtta turga ajratish mumkin. 3.2-rasmda ideal va real hol uchun hamda yuqori panjara uchun geterochegaralardagi zonalar yo'llari ko'rsatilgan.

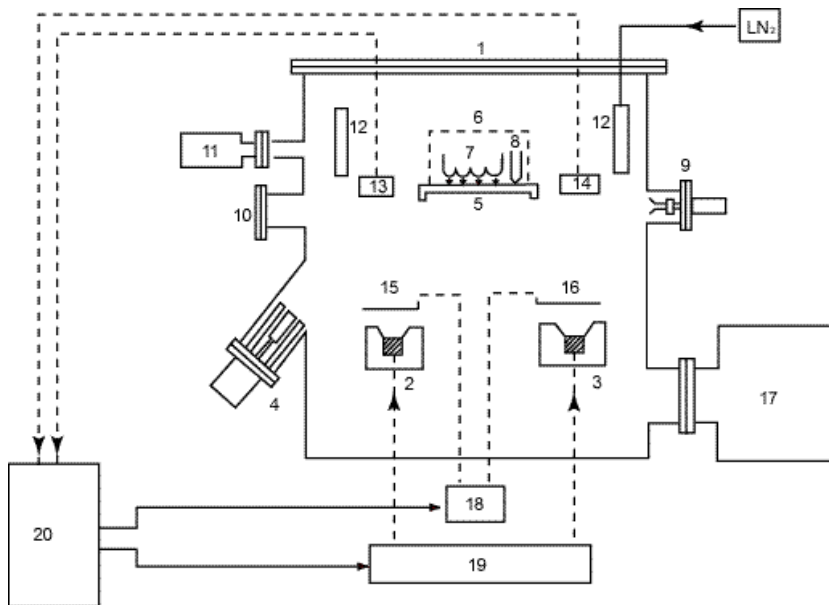


3.1 – rasm. Ikki turdagi o'ta yuqori panjaralarda zonalar chegaralari fazoviy yo'lining ko'rinishi; a) ketma-ket n va p qatlamli legirlangan o'ta yuqori panjara; b) o'zgaruvchan tarkibli yarimo'tkazgich npozitsion o'ta yuqori panjarasi. T

3.2-rasm. Geterochegaralarning to'rtta turi uchun zonalar chegaralarining yo'li o'zgarishi: zonalarining uzilishi (chapda), zonalarining egilishi va zaryad tashuvchilarning lokalizasiya sohalari (o'rtada), yuqori panjara (o'ngda): a-I turdagi geteroo'tish, b Elektronlar rdagi o'teroo'tish: zonalarining pog Elektronlar v Kovaklar eroo'tish taqiqlangan zonolari kesishmaydigan; 2- III tur geteroo'tish.

Molekulyar nurli epitaksiya u " " emniyning yuzasida kobal't kremniy (CoSi₂) plyv Kovaklar osil qilish jaray 3.1-pasm Elektronlar shar mon

manbalaridan ularning atomlari kelib o'tira boshlaydi. Bunda effuzion manbalarining rejimi har bir momentda yuzaga bitta kobal't atomi kelib o'tirsa, ikkita k Kovaklar omi kelib o'tiradigan qilib tanlab olinadi.



3.3-rasm. MNE o'stirish qurilmasi: 1-vakuum kamerasi; 2,3-elektron nurli bug'latgich (ENB); 4-effuzion manba; 5-namuna; 6-manipulyator; 7-qizdirgich; 8-termojuft; 9-katta energiyali elektronlar to'pi; 10-lyuminessentli ekran; 11-gazoanalizator; 12-kriopanel'; 13,14-o'sish tezligini aniqlovchi kvarsli datchiklar; 15,16-yopqich (zaslonka); 17-ion nasosi; 18-yopqichni boshqarish tizimi; 19-ENB manbai; 20-EHM.

Asosning harorati shunday tanlanadiki, yuzaga kelib o'tirayotgan atomlar CoSi_2 birikmasini hosil qiladi va ularning plyonkasi epitaksial o'sa boshlaydi.

Hosil qilinayotgan plyonkalarining qalinligi va o'sish tezligi kvarsli datchiklar yordamida aniqlanadi. Plyonkalarining kristall tuzilishi, panjaraning turi va parametrlari katta energiya elektronlarning difraksiyasi usuli bilan aniqlanadi. O'sish jarayoni EHM yordamida boshqarib boriladi.

3.2. Qattiq fazali va reaktiv epitaksiya

Qattiq fazali epitaksiya ham MNE kabi o'ta yuqori vakuumda amalga oshiriladi. QFEni uchta bosqichga ajratish mumkin:

1) asos yuqori darajada aralashmalardan tozalanada va yuzasi silliqlanadi, kelib o'tiradigan atomlar manbai ham qizdirish yo'li bilan aralashmalardan tozalanadi;

2) xona haroratida (yoki past haroratlarda) asos yuzasiga kerakli atomlar purkalib (o'tqazilib) qatlamlar hosil qilinadi.

3) asos sekin-asta kerakli haroratgacha qizdiriladi, bunda yuzadagi qatlam atomlari asos ichiga va asosdagi atomlar qatlam ichiga kirib boradi, ular orasida kimyoviy reaksiya yuz beradi va birikmalar hosil bo'ladi.

Shunday qilib, QFEda avvaliga asosning yuziga kerakli atomlar (molekulalar) o'tqaziladi, so'ng asos kerakli haroratgacha qizdirish yo'li bilan o'tqazilgan atomlar va asos atomlari aralashtirilib yupqa epitaksial qatlam olinadi.

QFEda hosil bo'ladigan plyonkaning tarkibi va qalinligi o'tkazilayotgan atomlarning konsentrasiyasiga, haroratiga va ma'lum paytgacha vaqtga bog'liq bo'ladi.

QFE usulida kerakli atomlar yuzaga o'tqazilib, amorf plyonka hosil qilinadi va qizdirish natijasida plyonka-asos chegarasida atomlarning bir-biriga aralashib ketib birikma hosil bo'lishi va uning kristallanishi ro'y beradi. Natijada yangi tarkibli epitaksial plyonka hosil bo'lishi mumkin. Bu plyonkaning tarkibi va qalinligi o'tqazilgan atomlarning konsentrasiyasiga, asos haroratiga, yuzaga qanday monokristallning qaysi qirradi orientatsiyalanganligiga (yo'nalganligiga) va sirtning tozaligiga bog'liq bo'ladi.

QFE usulini $\text{CoSi}_2/\text{Si(III)}$ plyonkasini hosil qilish jarayoni orqali ko'rib o'tamiz. QFE bilan bunday plyonka hosil qilishning ikki usuli mavjud. Birinchi usulga binoan Si ning toza yuzasiga Co atomlarining qatlamlari xona haroratida o'tqaziladi va keyin qizdirila boshlanadi. Natijada Co va Si atomlari aralashib, birikmalar hosil bo'ladi. $T = 300^\circ\text{C}$ gacha qizdirilganda CoSi_2 ning poliamorf plyonkasi, $T = 400 - 450^\circ\text{C}$ ning polikristall plyonkasi va $T = 500 - 550^\circ\text{C}$ - CoSi_2 ning monokristall plyonkasi hosil bo'ladi. Bu usulda hosil qilingan plyonkada quyidagi nuqsonlar mavjud: mikroteshiklar vujudga keladi; yuza notekis va kam zichlikka

ega bo'ladi; CoSi_2 ning monokristali ikkita orientatsiyaga ega bo'lishi mumkin.

Ikkinchi usulda Si(III) yuzasiga Co va Si atomlari bir xil miqdorda ketma-ket o'tqaziladi va bu tizimni $400\text{ }^\circ\text{C}$ qizdirilganda CoSi_2 epitaksial plyonkasi hosil bo'ladi. Bu plyonka atom darajasida silliq minimal mikroteshiklarga ($\sim 10^5\text{ sm}^{-2}$) ega, tekis va bir xil tarkibli mukammal bo'ladi.

Ayrim xollarda 2 yoki 3 komponentli plyonkalar olishda QFening boshqacha usuli ham qo'llaniladi. Masalan, kobal't-kremniy (CoSi_2) hosil qilish uchun kremniyning yuzasida kremniy plyonkasi hosil qilinib, uning yuzasiga kobal't o'tqaziladi, yoki kremniyning yuzasiga kobal't o'tqazilib, uning yuzasiga kremniy o'tqaziladi, keyin kerakli darajada qizdiriladi.

Bu usul bilan hosil qilingan plyonkada quyidagi nuqsonlar vujudga keladi:

- a) plyonkada har xil kanallar hosil bo'lishi mumkin;
- b) plyonkaning hamma joylarida tarkib bir xil bo'lmasligi mumkin;
- v) plyonka atomlarining aralashib ketishi hisobiga hosil bo'lgani uchun uning qalinligini to'g'ri nazorat qilish qiyin;
- g) plyonkaning asos bilan chegarasi bir tekis bo'lmaydi va xokazo.

Qaysi usul qo'llanishidan qat'iy nazar QFE da quyidagi kamchiliklar mavjud:

- a) haroratni xona haroratidan sekin-asta $500\text{-}600\text{ }^\circ\text{C}$ gacha oshirib borish kerak bo'ladi;
- b) plyonka asos chegarasida atomlarning aralashuvida asos atomlari ham qatnashadi.

Natijada hosil bo'layotgan plyonka qalinligini boshqarish va nazorat qilish juda qiyin bo'ladi. Bu ayniqsa $\text{Si-CoSi}_2\text{-Si}$ kabi ko'p qatlamli tizimlar olish imkoniyatlarini cheklab ko'yadi.

QFening xususiy holi reaktiv epitaksiyadir (RE). *Reaktiv epitaksiya deb asosning yuzasiga atomlarning kelib o'tirishi jarayonida asosni epitaksial plyonka hosil bo'lish haroratigacha qizdirib turish yo'li bilan asos va kelib o'tirgan modda atomlari birikmasidan tashkil topgan plyonka hosil qilish jarayoniga aytiladi.* Masalan, CoSi_2 olish uchun

Co atomlari asos yuzasiga 600-650 °C haroratda o'tqaziladi. Bunda Co atomlari Si ning ichiga diffuziya tufayli kirib boradi va CoSi_2 plyonkasini hosil qiladi. Bu usulda ko'pincha orolchali o'sish kuzatiladi.

3.3. Ionli aktivlashtirish usuli bilan qattiq jism yuzalarida yupqa plyonkalar hosil qilish

QFE yoki RE usuli bilan umuman, qattiq jism yuzasiga atomlarni o'tqazib keyin ishlov berish usullari yupqa plyonkalar hosil qilishda ko'p ishlatiladi. Ammo ko'p hollarda o'tqazilgan plyonka atomlari va asos atomlari bir-biriga aralashib, yangi plyonka hosil bo'lishida ayrim qiyinchiliklar vujudga keladi. Masalan: hosil qilishimiz kerak bo'lgan plyonkaning qalinligini oshirish uchun haroratini ko'tarish kerak bo'ladi. Haroratini ko'tarish esa quyidagi asosiy muammolarni vujudga keltiradi:

- plyonkaning qalinligini nazorat qilib bo'lmaydi va tekis chegaraviy qatlam olib bo'lmaydi;

- kerakli bir jinsli tarkibni hosil qilish qiyin bo'ladi;

- yuqori haroratlarda plyonkaning ustki qatlamlari bug'lanib ketishi mumkin;

- yuqori haroratlarda asosning tarkibidagi chetki aralashmalar aktivlashishi mumkin. Ular diffuziya hisobiga plyonka ichiga yoki chegaraviy qatlamga to'planadi.

Bu muammolarni ma'lum bir miqdorda hal qilish uchun ion-aktivasion usul ishlatiladi. Bu usulga asosan asosning yuzasi plyonka o'tqazishdan oldin ionlar bilan uriladi. Bunda ikki holni ko'rib chiqish mumkin:

1. Agar ionlar energiyasi uncha katta bo'lmasa ($E_i \leq 400 \div 500$ eV) ular asosning yuzasida ko'plab kristallanish markazlarini hosil qiladi. Bu markazlar nisbatan kichik haroratlarda asos yuzasida mukammal plyonkalar olish imkonini beradi.

2. Agar ionlarning energiyasi katta bo'lsa ($E_i > 500 \div 1000$ eV), bu ionlar kristallarning ichida yurib borib, atomlarning harakati uchun ma'lum bir yo'llar ochadi (kovaklar hosil qiladi), keyin bu yuzaga kerakli materialning

atomlari o'tqaziladi. Uncha katta bo'lmagan ma'lum bir haroratda yuzaga o'tqazilayotgan atomlar bu kovaklar orqali asosning ichki qismiga kirib boradi va uning atomlari bilan intensiv aralashadi. Demak, bu usul bilan kichik haroratlarda asos va plyonka atomlarining aralashib ketishini va kerakli birikma hosil qilinishini ta'minlash mumkin. Ionlarning energiyasini o'zgartirish yo'li bilan hosil qilinishi kerak bo'lgan plyonkaning qalinligini kerakli miqdorda o'zgartirishimiz va nazorat qilishimiz mumkin.

Ionli aktivlashtirish usulining xususiy holi ion – molekulyar usul deb ham yuritiladi. Bu usulga asosan, yuzaga tushirilayotgan atomlarning ma'lum bir qismi ionlashtiriladi va ularga energiya beriladi. Bu tushayotgan ionlar asos va o'tqazilgan atomlarning aralashib ketishini tezlashtiradi va nisbatan kichik haroratlarda kerakli plyonkalar olishni ta'minlaydi.

Plyonkalarni ionli o'tqazish jarayonini umumiy izohlash uchun energetik **aktivatsiya (faollik) darajasini baholash** kerak bo'ladi. Ionlar ta'siri bilan bog'liq bo'lgan energetik aktivatsiya **energiya koeffisienti** (ε) deb ataluvchi kattalik bilan aniqlanadi:

$$\varepsilon = \frac{E_i + E_n}{E_n} = 1 + \frac{n_i \cdot e_i}{n_n \cdot e_n}.$$

Bu erda $E_i + E_n$ – ionlar ta'siri bor paytda asos yuzasiga tushib kondensasiyalanayotgan barcha zarralarning kinetik energiyasi; E_n – ionlar ta'siri yo'q paytida barcha zarralarning kinetik energiyasi; n/n_n – ionlar tezligining o'tqazish tezligiga nisbati; e/e_n – ionlar oqimi energiyasining ionlar ta'siri yo'q paytidagi zarralar oqimi energiyasiga nisbati.

Ionli aktivatsiya usuli bilan plyonkalar olishda asos yuzasida ro'y beradigan jarayonlar ionlarning energiyasiga bog'liq bo'ladi. Ionlar energiyasining kattaligiga qarab ionlar ta'siri effektini shartli ravishda beshta oraliqqa bo'lishimiz mumkin:

1. $E_i \approx 10^{-2} \div 10$ eV. Bu oraliqda ionlar kondensasiyani termik aktivlashtiradi va migrasiyani kuchaytiradi.

2. $E_i \approx 10^{-1} \div 5 \cdot 10^2$ eV. Asos yuzasidagi chetki atomlar uchib ketadi, adgeziya yaxshilanadi va ancha mujassam qatlamlar hosil bo'ladi.

3. $E_i \approx 5 \div 5 \cdot 10^3$ eV. Zaryadlangan nuqsonlarning markazlari vujudga keladi, kristall tuzilishda nuqsonlar hosil bo'ladi.

4. $E_i \approx 5 \cdot 10^1 \div 10^4$ eV. Kristall tuzilish buzila boshlaydi, ikkilamchi emirilish ro'y beradi.

5. $E_i \approx 5 \cdot 10^3 \div 10^5$ eV. Ionlarning va ketma-ket atomlarning asosning ichki qatlamlarida joylashib qolishi (implantasiyasi) ro'y beradi.

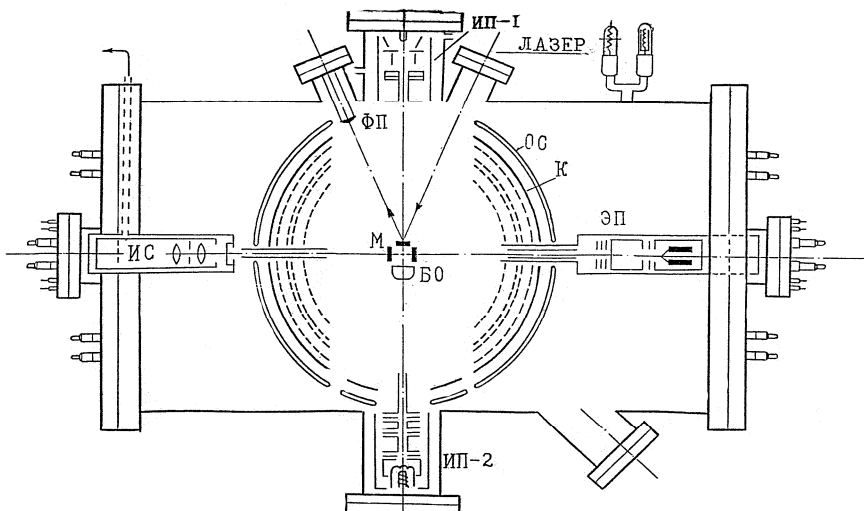
3.4. Ion implantasiya usuli bilan yuzalarni modifikasiya qilish va yupqa plyonkalar olish istiqbollari

Ionlar implantasiyasi bu – kerakli atomlarni ionga aylantirib, uni elektr maydoni ta'sirida qattiq jismning yuza va yuza osti qatlamlariga joylashtirish usulidir. Bunda diffuziya va boshqa usullardan farqli o'laroq har qanday namunaning istagan atomlarini kerakli miqdorda kiritib olish imkoniyatiga ega bo'linadi. Qattiq jismga chetki qo'shimcha atomlarni qattiq nazorat asosida kiritish usuli 1970 yillardan rivojlana boshladi. Bu usul avvaliga Si (va boshqa yarim o'tkazgichlar) yuzasiga katta energiyali B^+ va P^+ kabi katta energiya bilan (50 – 300 keV) ionlarni tushirib (bombardirovka qilib) uning yuza osti qatlamlarida B^+ va P^+ atomlarini joylashtirishdan boshlangan. Bu sohada Mayer, Erikson va Devi kabi olimlar juda katta ishlar olib bordilar. Ularning tajriba va boshqa Amaliy hamda nazariy ilmiy ishlari asosida har qanday namunaga (yarim o'tkazgich, dielektrik) kerakli ionlarni zarur miqdorda kiritib, keyin qizdirish yo'li bilan turli p va n sathlarni hosil qilish mumkin ekanligi isbotlandi. Bu hodisa tezda ishlab chiqarishga joriy qilina boshladi. 70-yillardan boshlab ionlar energiyasini 5-10 keVga keltirib qattiq jismning yuza va yuza osti qatlamlari fizik xususiyatlari keskin o'zgarishi mumkin ekanligi aniqlandi. Bunday tajribalarni birinchilar qatorida Ubay Arifov boshchiligidagi o'zbekistonlik olimlar amalga oshira boshladi jumladan, A.X.Qosimov

rahbarligidagi olimlar tomonidan kichik energiyali ionlar implantasiyasi qattiq jismning emissiya xususiyatlari 2-3 marta yaxshilanishi 1970-72 yillarda aniqlangan. Umuman ionlarning energiyasiga qarab implantasiyani 3 turga shartli ravishda ajratiladi:

1. Kichik energiyali $E_N \leq 5-10$ keV.
2. O'rta energiyali $E_N = 5-10$ keV.
3. Katta energiyali $E_N \geq 5-10$ keV.

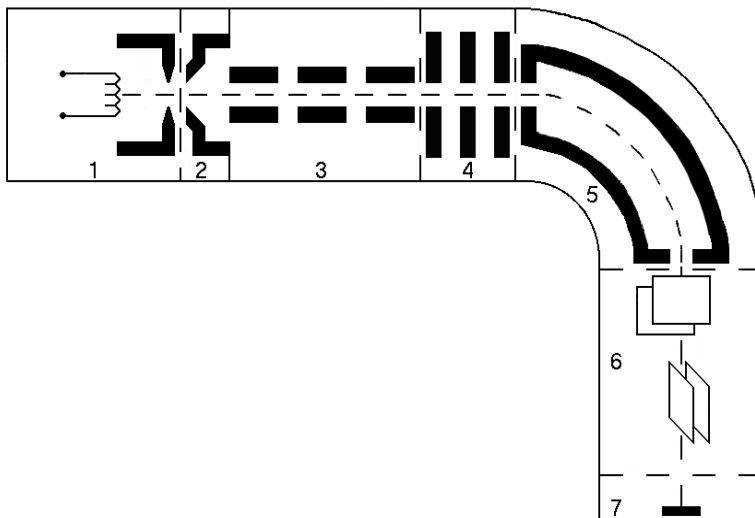
O'rta va katta energiyali ionlar implantasiyasidan asosan yarim o'tkazgichlarda har xil n va p o'tkazuvchanlik hosil qilish, qattiq jismlar sirt osti qatlamlarida kerakli birikmalar hosil qilish, ularning boshqa fizik - kimyoviy xususiyatlari, hattoki mexanik xususiyatlarini o'zgartirish maqsadida foydalanib kelinmoqda. Biz quyida kichik energiyali ionlar implantasiyasi usuli ustida to'xtalamiz. Bu usul bilan qattiq jismning yuza va yuza osti qatlamlarining xususiyatlarini o'zgartirish va ayrim hollarda yangi ko'p komponentli birikmalar holidagi yupqa plenkalari olish mumkin. Ion implantasiyasi o'ta yuqori vakkum sharoitida olib boriladi. Qurilmaning asosini 3 ta element tashkil qiladi: namuna, ionlar manbai (to'p) va ikkilamchi zarralarni registrasiya qilish kollektori. Bundan tashqari qattiq jism yuzasi tarkibi, tuzilishi va xususiyatlarini aniqlash tizimi ham qurilmada ko'zda tutiladi. Bunday qurilmaning bizda ishlatilayotgan ko'rinishi quyidagi tasvirda keltirilgan (3.4 – rasm).



3.4-rasm. Eksperimental qurilma: IS-yorug'lik manbai; EP-elektron to'p; M-nishon; ИП-1 - gaz (Ar^+ , O_2^+ , N_2^+) ionlarning manbai, ИП-2 - hosil qilinadigan plyonka atomlari va molekulalarining manbai; FP-foto qabul qilgich; OS-ekran; BO-qizdirilish qurilmasi.

Ion implantasiya qurilmasining asosiy qismi bu ionlar manbai – to'pidir (3.5 – rasm). Ionlar to'pining juda ko'p turlari mavjud. Lekin ularning asosiy prinsipi kam farq qiladi. Misol sifatida sirtiy potensial ionlanishga asoslangan ion to'pining ishlash prinsipini ko'rib o'tamiz.

Trubkacha kerakli ion olish uchun uning atomlari hosil qilish kerak bo'lgan birikma solinadi. Masalan Va ionini olish kerak bo'lsa, BaTi yoki $BaCl_2$ tuzidan foydalanish mumkin. Trubkacha qizdirilsa, $BaCl_2$ bug'lanib Ba va Cl_2 atom va molekulalari ajraladi. Cl_2 vakuum nasosi yordamida so'rib olinadi. Atomlar qattiq qizib turgan – cho'g'langan tolaga uriladi va uning bir qismi Ba^+ ioniga aylanadi.



3.5 - rasm. Metall ionlari to'pining qurilmasi: 1-ionlar manbai; 2-ionlarni tortib chiqaruvchi diafragmalar tizimi; 3-fokuslovchi linza; 4-ionlarni tezlatish tizimi; 5-ionlarni neytral zarrachalardan ajratish qurilmasi; 6-ionlarni skanlash (yoyish) tizimi; 7-nishon

Bunda sirtiy ionlashishda faqat bir zaryadli ion hosil bo'ladi. Ionlar elektr maydoni ta'sirida harakatlanadi. Ular fokuslanib keyin separatorida neytral atomlardan ajralib tezlashtirilgan hollarda shishaning yuzasiga tushadi. Oxirgi elektrod va nishon orasiga qo'shimcha manba ulab, ionlarning energiyasini istalgan miqdorda o'zgartirish mumkin. Ion yuzaga tushayotgan paytda qanday jarayonlar ro'y berishi mumkin? Ionlar implantatsiyasi jarayonida ular (atomlar) yuza va yuza ostiga joylashishi, orqaga energiyasini yo'qotmasdan (elastik) va energiyasini qisman yo'qotib (plastik) qaytishi mumkin. Bu jarayonda kirayotgan atomlar panjara orasiga joylashishi; tugunda joylashishi, tugundagi atomlarni surib qo'yishi yoki ularni urib chiqarishi mumkin. Bu aytilayotgan jarayonlar birlik yuzaga tushayotgan ionlarning miqdori (dozasi) nisbatan kichik bo'lgan hol uchun to'g'ridir.

Empirik hisob kitoblar va tajribalar ko'rsatadiki, agar matrisa va kiritilayotgan atomlarning elektro-kimyoviy aktivligi bir-biridan kam farq qilsa va ularning radiuslari farqi 15 % dan oshmasa, unda kiritilayotgan atomlar asosan tugunlarda joylashadi va qattiq eritma (qotishma) hosil bo'ladi. Agar matrisa yoki chetki atomlarning elektr aktivligi keskin farq qilsa, ularning tugundagi atomlari kimyoviy birikma hosil qilishi mumkin. Agar chetki atom diametri matrisa atomi diametrining 60% va undan kam foizini tashkil qilsa, bu atomlar asosan tugunlar orasiga joylashadi va qattiq eritma hosil qiladi. Tugunlar orasida joylashgan atomlarning tugundagi atomlardan farqi shundaki, ular atrofidagi tugun atomlari bilan valent bog'lar hosil qilmaydi. Shuning uchun ham ularning donor yoki akseptor xarakteridagi sath hosil qilishi uning faqatgina valentligi bilan emas, balki elektromanfiylik darajasi bilan ham aniqlanadi. Agar uning elektromanfiyligi matrisa atominikidan katta bo'lsa, u akseptor xususiyatiga ko'prok moyil bo'ladi, aks holda - donor.

Shunday qilib, qattiq jism yuzasida yangi birikma olish uchun kichik energiyali ionlar implantasiya usulidan foydalanish mumkin. Tajribalar va hisob-kitoblar ko'rsatadiki, bunda ionlar energiyasi taxminan 0,5÷5 keV bo'lsa, eng optimal hisoblanadi.

Quyidagi rasmda Si ga har xil energiyada kiritilgan Ba atomlarining taqsimlanishi ko'rsatilgan (3.6-rasm). Rasmdan ko'rinadiki, energiya 5 keV dan katta bo'lsa, yuza hamda yuza osti Ba atomlari kamayib ketadi hamda yangi birikma hosil bo'lish energiyasi kamayadi. Energiya 0,5 keV dan kichik bo'lsa, Ba atomlari asosan yuzada adsorbsiyalan-gan bo'ladi.

Ion implantasiya jarayonida avvaliga juda kichik dozalarda ($D \leq 10^{14} \text{ sm}^{-2}$) alohida – alohida nuqtalardagi ionlar joylashishi ro'y beradi. Bu nuqtalar yangi birikmalar hosil bo'lish markazlari bo'lib xizmat qiladi. Tushayotgan ionlar miqdori (yangi doza) oshgan sari bu markaz kattalashib boradi. Bu bilan bir vaqtda yuzaning kristalligi ham buzila boshlaydi. Katta dozalarda yuza to'liq qattiq jism atomlari va tushayotgan atomlar aralashmasidan

iborat bo'lgan amorf plyonkaga aylanadi (3.7 va 3.8 - rasmlar).

Kerakli birikmani hosil qilish va qayta kiristallanish uchun implantasiyadan keyin plyonkani qizdirish yoki unga lazer nurlari bilan ishlov berish kerak. Quydagi rasmda qizdirishdan keyingi holat keltirilgan.

3.6-rasm. Har xil energiya bilan kiritilgan Ba atomlarining Si yuza va yuza ostidagi qatlamlarining chuqurlik bo'yicha taqsimlanishi

3.7-rasm. 1 keV energiyali Ba⁺ ionlari implantasiya qilingan Si(100) yuzasining har xil dozadagi elektron mikroskopdagi tasviri.

3.8- rasm. Ba⁺ ionlari bilan legirlangan Si(100) yuzasining har xil haroratda qizdirilganidan keyingi elektrono-grammalar: a – T = 300 K (amorf sirt); b – T=700 K (polikristall); c – T = 900 K (teksturalangan); d – T=1100 K (monokristall)

Har xil birikma uchun o'ziga xos harorat mavjud. Masalan, BaSi₂ birikmasi uchun 950 K, CoSi₂ uchun 950 K. Keyingi rasmda NaSi₂ birikmasi hosil qilingandan keyingi yuza va yuza osti qatlamlari energetik – zonaviy tuzilishining sxematik tasviri keltirilgan.

Demak, ion-implantasiya va keyingi qizdirish usuli bilan hosil qilingan plyonkalarda ham qattiq fazali va molekulyar-nurli epitaksiya usullari kabi plyonka va matrisa orasida o'tish qatlami vujudga kelar ekan. O'tish qatlamining kengligi plyonka qalinligidan 1,2-2 marta katta bo'ladi.

Matrisa yuzasida kerakli plyonka hosil qilishda matrisa kristall panjarasi va plyonka panjarasining bir xil bo'lishi muhim ahamiyatga ega. O'ta katta integral sxemalar olish, kuchli esda saqlash qobiliyatiga ega bo'lish tizimlarini olishda ishlatiladigan qatlam-qatlam hosil qilinadigan epitaksial tizimlarda panjara parametrlarining bir-biridan farqi 0,7% dan oshmasligi kerak. 3.9-rasmda BaSi₂/Si va CoSi₂/Si epitaksial plyonkalarining elektronogrammalari keltirilgan. Si

uchun panjara doimiysi $a=5,43 \text{ \AA}$, BaSi plyonkasi uchun esa $a=5,62 \text{ \AA}$.

3.9-rasm. $BaSi_2$ va $CoSi_2$ plyonkalarining elektronogrammalari

Shuning uchun elektronogrammalarda ikkilangan reflekslar hosil bo'ladi. $CoSi_2$ uchun $a=5,39 \text{ \AA}$ va kremniylikidan juda kam farq qiladi. Natijada ikkilanishlar ro'y bermaydi.

Panjara doimiylari farq qilgan matrisa va plyonka orasida maxsus o'tish qatlami hosil qilinadi. Bunda « a » ning qiymati sekin-asta o'zgarib boradi.

IV. YUPQA QATLAMLARNI O'STIRISH BOSQICHLARI

4.1. Yupqa qatlamlarda markazlar (o'simtalar) hosil bo'lish nazariyasi

O'simtalar hosil bo'lishining har qanday nazariyasida ham bug'langan molekula (atom)larning asos yuzasi bilan to'qnashuvi birinchi bosqich deb hisoblanadi. Bog'langan atomlar asos yuzasiga o'tirib soviydi, ya'ni kondensasiyalanadi. Ular qaytadan yana uchib chiqishi yoki o'tirib qolishi mumkin. Yuzaga kelib tushayotgan atomlarning energiyasi kT dan (T -asos haroratisi) juda katta. Bu atomlar qanchalik tez, ya'ni asos bilan unga o'zining barcha zaxira energiyasini berib ulgurmasdan muvozanatga kelishi ahamiyatlidir. Bunday muvozanatda atom adsorbsiyalanishi yoki qayta bug'lanishi mumkin. Bu hodisa termik **akkomodasiya** koeffisienti bilan ifodalanadi.

$$\alpha_T = \frac{E_V - E_R}{E_V - E} = \frac{T_V - T_R}{T_V - T}, \quad (4.1)$$

bu erda E_V - asosga tushirilayotgan bug' holdagi atomlarning energiyasi; E_R - desorbsiyalangan atomlarning asos bilan muvozanat ro'y berishidan oldingi energiyasi; E - desorbsiyalangan atomning asos bilan muvozanat ro'y berganidan keyingi energiyasi; T_V , T_R , T - mos holdagi haroratlar.

Bundan $\alpha_T < 1$ ekanligi ko'rinadi.

Nazariy tadqiqotlar asosida Kabreri, Svansig, Mak Kerori va Erlix kabi olimlar "issiq" atom bir o'lchamli panjara bilan to'qnashganda $\alpha_T < 1$ shart bajarilishi uchun $E_v \geq E$ bo'lishi kerakligini aniqlaganlar. Bu olimlar kelib o'tirayotgan atomlarning massasi kristall panjaradagi atomlarning massasidan qancha katta bo'lsa, to'liq termik akkomodasiya ($\alpha_T = 1$) hodisasi ro'y berish ehtimolligi shuncha katta bo'lishini ham aniqlaganlar. Uch o'lchamli panjaralar uchun termik akkomodasiya to'liq ro'y berishi uchun $E_v \leq E$ bo'lishi etarli ekanligini Gudmant aniqlagan.

Masalan, atom desorbsiyalanishi uchun kerak bo'ladigan aktivasiya energiyasi 0,5 eV bo'lsa, termik aktivasiya to'liq bo'lmasligi uchun, kelib tushayotgan atomning energiyasi harorat orqali ifodalanganda 6500 K dan katta bo'lishi kerak.

Mak-Fi va Lennard-Djons tushayotgan atom o'zining ortihcha kinetik energiyasini yo'qota borib, asosga o'rnamshib holishi uchun $2/Y$ vaqt kerakligini aniqlagan. Bu erda Y - asos kristall panjarasining tebranish chastotasi. Demak, kristallga kelib tushgan atom bir necha tebranish jarayonida o'zining barcha ortiqcha energiyasini deyarli yo'qotadi. Shuning uchun ham juda ko'p hollarda muvozanat juda tez (oniy vaqtda, birdaniga) ro'y beradi deb qarash mumkin (juda engil atomlar va juda katta energiyali atomlar bundan mustasno).

Asosga kelib o'tirayotgan atomlar soni ma'lum miqdorga etgandan keyin, agar markazlar hosil bo'lishi ro'y bermasa, **stasionar (muvozanat)** holat vujudga keladi, ya'ni tushayotgan va qaytadan uchib chiqayotgan (bug'lanayotgan) atomlar soni aynan teng bo'ladi.

Bu holda asos yuzasini to'ldirayotgan atom (adatom) lar soni n_1 atom kelib o'tirish tezligi R ga bog'liq bo'ladi.

$$n_1 = \frac{R}{Y_0} \exp \frac{\Delta G_{des}}{kT} \quad (4.2)$$

bu erda, Y_0 - adsorbsiyalangan molekullarning desorbsiyalanish chastotasiga ($\sim 10^{14} \text{ c}^{-1}$) teng bo'lgan

tebranish chastotasi; ΔG_{des} - desorbsiyani aktivasiya qilish erkin energiyasi.

Agar atomlarning yuzaga kelib o'tirishi to'xtasa va $R \rightarrow 0$ bo'lsa, u holda asosning adsorbatlar bilan to'lishi ham nolga intiladi. Adsorbatning qayta bug'lanishiga qadar yuzada o'tirish vaqti (τ_n).

$$\tau_n = \frac{1}{Y_0} \exp \frac{\Delta G_{des}}{kT} \quad (4.3)$$

Umuman, bir tekis plyonkalar atomlar tushish tezligi katta bo'lganda hosil bo'ladi. Yupqa plyonkalarda markazlar hosil bo'lishining ikki xil nazariyasi (modeli) mavjud: 1) kapillyar model' va 2) atom modeli. Bu modellar bir - biri bilan markazlar hosil bo'lish energiyasini hisoblash usuli bilan farq qiladi.

Kapillyar model

Bug' fazasidan geterogen ravishda markazlar hosil bo'lishining bir necha ta'riflari mavjud. (4.1 – rasm). Xirs va Paund monografiyasi, Zigzbi va Paundning keyingi maqolalari bu jarayonlarga bag'ishlangan.

Asosning ta'siri mavjudligini hisobga olish uchun Fal'mer va Veber, Bekker va Dyoring tomonidan yaratilgan bug' fazasidan gomogen ravishda markazlar hosil bo'lish klassik kapillyar modelini biroz o'zgartirishga zaruriyat tug'iladi. Bu model' to'yingan bug'dan kondensirlangan faza hosil bo'lishi uchun (kondensirlangan fazaning turg'un orolchalari) aktivasion to'siqni eng oladigan (ba'zan u «markaz hosil bo'lish to'sig'i» deb ataladi) erkin energiyaning musbat fluktuasiyalari zarur degan fikrga asoslangan. Bunday to'siq mavjudligi sababli kondensasiya ro'y berishi uchun to'yinishning qiymati birdan katta bo'lishi kerak.

4.1 – rasm. Yuqori vakuum sharoitida o'stirilgan oltin plyonkasining yoritilgan (chapda) va yoritilmagan (o'ngda) holatlardagi tuzilishi: a – 24 Å; b-108 Å; v-300 Å.

1) **Kritik markaz.** Kapillyar modelga asosan markaz hosil bo'lish paytida erkin energiyaning o'zgarishi maksimumga ega bo'ladi, ya'ni markaz o'sib, "kritik" o'lchamdan o'tishida uning turg'unligi bug' fazasiga dissosiasiyalanishga nisbatan minimumga ega. Erkin energiyaning maksimumi ikki parametrning raqobati natijasida vujudga keladi: a) kichik markazlarda yuzaning hajmga nisbatining juda kattaligi tufayli ularning turg'unligi kamayadi b) markazlar o'lchamlari kattalashgan sari kondensasiyalanish energiyasi ko'payadi va natijada markazlarning turg'unligi oshadi.

Bunday markazning kritik radiusi r^* ni xisoblash uchun biz bug' fazasi bilan chegaralanuvchi sirt yuzini $a_1 r^2$ ga markazning asos bilan kontakt yuzini $-a_2 r^2$ ga va hajm $-a_3 r^3$ ga teng deb faraz qilamiz, bu erda a - konstanta, r - markazning o'rtacha chiziqli o'lchami. Markaz hosil bo'lish erkin energiyasining o'zgarishi (ΔG) uning bug' fazasiga dissosiasiyalanishidagi erkin energiyasiga nisbatan o'zgarishi markaz o'lchamiga bog'liq ravishda quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$\Delta G = a_3 r^3 \Delta G_v + a_1 r^2 \sigma_{v-c} + a_2 r^2 \sigma_{s-s} - a_2 r^2 \sigma_{s-v} \quad (4.4)$$

Bu erda $\Delta G_v (< 0)$ – ayni to'yinish sharoitida berilgan materialning massiv kristalldagi erkin energiyasining o'zgarishi; u erg/sm^3 larda ifodalanadi va quyidagi formula bilan hisoblanadi:

$$\Delta G_v = (kT/V) \ln[R/R_c(b)]. \quad (4.5)$$

$\sigma_{v-c} (> 0)$ va $\sigma_{s-c} (> 0)$ – mos holda, markazdagi kondensat – bug' va kondensat – asos chegaralari yuzalarining erkin energiyalari, σ_{s-v} – asosning yuza energiyasi; bu kattaliklarning hammasi erg/sm^2 da ifodalangan. V - plyonka materiali bitta molekulasi hajmi. $a_2 r^2 \sigma_{s-v}$ ifoda kattaligi $a_2 r^2$ ga teng bo'lgan asosning erkin sirt yuzasi markaz hosil

bo'lishida yo'qolib ketganligi uchun (4.4) tenglamaga kiradi. Markaz o'lchami bo'yicha (4.4) tenglamani differensiallab quyidagini olamiz:

$$\delta\Delta G/\Delta r = 3a_3r^2\Delta G_v + 2a_1r\bar{\delta}_{v-c} + 2a_2r\bar{\delta}_{s-c} - 2a_2r\bar{\delta}_{s-v} \quad (4.6)$$

Bunda, markazning shakli uning o'lchami o'zgarishi bilan o'zgarmaydi va ΔG_v , $\bar{\delta}_{v-c}$ va $\bar{\delta}_{s-c}$ markaz o'lchamiga bog'liq emas.

Markazning erkin energiyasi u kritik o'lchamga ega bo'lganda maksimal bo'ladi, ya'ni

$$r^* = [-2(a_1\bar{\delta}_{v-c} + a_2\bar{\delta}_{s-c} - a_2\bar{\delta}_{s-v})]/3a_3\Delta G_v \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = 0$$

bo'ladi. Bu o'lchamga mos keluvchi erkin energiya.

$$\Delta G^* = [4(a_1\bar{\delta}_{v-c} + a_2\bar{\delta}_{s-c} - a_2\bar{\delta}_{s-v})^3]/27a_3^2\Delta G_v^2 \quad (4.8)$$

Markaz erkin energiyasining uning o'lchamiga bog'liqlik grafigi 4.2 - rasmda keltirilgan.

4.2-rasm. Plyonkada markaz hosil bo'lish erkin energiyasining uning o'lchamiga bog'liqlik grafigi

Erkin energiya maksimumi markazning turg'unlik minimumiga mos keladi va uning r^* o'lchamida o'rinli bo'ladi. Agar $r > r^*$ bo'lsa, a (4.4) ifodaga asosiy hissani r^3 ga proporsional bo'lgan xad qo'shadi. Bu manfiy erkin energiyaning vujudga kelishiga, ya'ni katta radiusli markazlarning turg'unligiga olib keladi. Agar kritik radiusli markazga (kritik markaz deb nomlanadigan) yana bir atom qo'shilsa, u biroz turg'unroq bo'lib qoladi va o'rtacha alohida atomlarga bo'linmaydi, balki o'sishda davom etadi va turg'un orolcha hosil bo'ladi. Boshqa tomondan, agar kritik markazdan bir atom ketsa, markaz bo'linib ketadi.

Shuning uchun, turg'un plyonka kondensasiyalanishi uchun birinchi navbatda kritik o'lchamdagi yoki undan katta markazlar hosil bo'lishi shart. Agar markaz r radiusli sfera shaklida bo'lib uning kontakt burchagini $\equiv$ deb belgilasak, (4.7) va (4.8) tenglamalar quyidagi ko'rinishga o'tadi:

$$r^* = -2 \bar{\delta}_{v-c} / \Delta G_v \quad (4.7a)$$

$$\Delta G^* = (4 \pi \sigma_{u=s}^3 / 3 \Delta G_u^2) (2 + \cos \alpha) (1 - \cos \alpha) \quad (4.8a)$$

Agar markazning sirt erkin energiyasi anizotrop bo'lsa, ΔG^* balandligi h bo'lgan doiraviy disk shakliga ega bo'ladi. Kritik markazdagi atomlar soni quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$i^* = \pi h \bar{\delta}_{e-v}^2 / v (\Delta G_u + \sum \bar{\delta}/h)^2, \quad (4.7b)$$

bu erda $\bar{\delta}_{e-v}$ -diskning chegaraviy solishtirma energiyasi, $\sum \bar{\delta} = \bar{\delta}_{c-v} + \bar{\delta}_{s-c} - \bar{\delta}_{s-v}$.
(4.8) tenglama yumaloq disk uchun quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\Delta G^* = -\pi h \bar{\delta}_{v-c}^2 / (\Delta G_v + \sum \bar{\delta}/h) \quad (4.8b)$$

2) Markaz hosil bo'lish tezligi. Markaz uning yuzasiga bevosita gaz fazasidan tushayotgan atomlar bilan birikishi hisobiga yoki asos yuzasidagi diffuziyanayotgan adatomlar bilan to'qnashishi hisobiga o'ta yuqori kritik o'lchamlargacha o'sishi mumkin.

Agar kritik markazlar asos yuzining kichik qismini qoplasa, ikkinchi mexanizm muhimroq hisoblanadi va u adatomlar diffuziyasi koeffisienti-ga bog'liq bo'ladi. Bu holda kritik markazning o'sish tezligi yuza birligidagi dastlabki markazlar sonining ularga adsorbsiyalangan atomlarning biri-kish tezligi ko'paytmasiga teng bo'ladi. Adatomlar va turli o'lchamlardagi markazlar orasidagi metabarqaror muvozanat mavjud deb faraz qilib, kritik

markazlarning konsentrasiyasi uchun quyidagi ifodani hosil qilamiz:

$$n^* = n_1 \exp(-\Delta G^*/kT) \quad (4.9)$$

Adatomlarning markazga birlashish tezligi j yuza birligiga adsorbsiyalangan atomlar soniga hamda diffuzion sakrashning chastotasi va uzunligiga bog'liq bo'ladi:

$$j = C n_1 v_0 \exp(-\Delta G_{sd}/kT) \quad (4.10)$$

bu erda S - kritik markaz o'lchami va boshqa geometrik omillarni o'z ichiga oluvchi doimiy; ΔG_{sd} -adsorbsiyalangan atomlarning sirtiy diffuziyasi aktivasion erkin energiyasi (>0) (4.2), (4.9) va (4.10) tenglamalarni birlashtirib, birlik vaqt ichida yuza birligida hosil bo'lgan o'ta yuqori kritik markazlar sonini (chastotasini) quyidagi ko'rinishda ifodalaymiz:

$$I^* = j n^* = C R \exp I(\Delta G_{des} - \Delta G_{sd} - \Delta G^*) / kT \quad (4.11)$$

(4.11) tenglamadan ko'rinadiki, markaz hosil bo'lish chastotasi I^* markaz hosil bo'lish jarayoni energetikasiga, ya'ni atomlarning yuzaga o'tqazish parametrlariga bog'liq. Misol sifatida 4.3-rasmda markaz hosil bo'lish chastotasining qayta to'yinish darajasiga juda kuchli bog'lanishi ko'rsatilgan.

4.3-rasm. Markaz hosil bo'lish chastotasining to'yinish darajasi bilan sifat bog'lanishi.

Boshqa tomondan (4.11) tenglamadan ko'rinadiki, ma'lum miqdordagi markazlarning mavjud bo'lish ehtimolligi plyonkani ixtiyoriy chekli o'tkazish tezligida, u qanchalik kichik bo'lmasin, nolga teng bo'la olmaydi. Biroq bu markazlarning soni shunchalik kam bo'lishi mumkinki, uni

tajribada ko'rishning iloji yo'q. Markaz hosil bo'lish tezligi o'tkazish sharoitlariga juda kuchli bog'liq bo'lgani uchun, ko'pincha kondensasiyaning "chegaraviy sharti" qilib **sekundiga 1 sm² da bitta markaz hosil bo'lish tezligi qabul qilinadi.**

Sferik gumbaz shaklidagi markaz uchun S doimiy

$$S = \sqrt{\frac{\Delta G^*}{3kT_i}} a_0^2 \pi^* \sin \Theta N_0 \quad (4.12)$$

bu erda i^* - kritik markazdagi atomlar soni; a_0 - adsorbsiyalangan atomning diffuzion sakrash uzunligi (taxminan asosning panjara doimiysiga teng); N_0 - atomlar adsorbsiyalanishi mumkin bo'lgan joylar zichligi (10^{15} sm²). Kvadrat ildiz ostidagi ifoda kichik muvozanatlanmagan tuzatma (Zel'dovich omili).

Atom modeli

Uolton va Rodinning kichik markazlar modeli.

Birlamchi markazlarning o'lchamlarini kapillyar model' doirasida hisoblaganda ko'pincha ularning radiuslari uchun $\leq 5 \text{ \AA}$ qiymatini beradi, ba'zida esa bir yoki ikki atom radiuslaridan kichik qiymatni beradi. Uolton va Rodin ishlarida kichik o'lchamdagi tomchilar uchun, qat'iy aytganda, massiv namunalar uchun o'rinli bo'lgan yuza energiyalari qiymatlarini qo'llash mumkin emasligi ko'rsatilgan. Agar markaz hosil bo'lish jarayonini statistik fizika usullari yordamida talqin qilinsa va har xil markazlardan tarkib topgan adsorbsiyalangan gazning taqsimlanish funksiyasi markazlar va alohida adsorbsiyalangan va atomlarning potensial energiyalariga bog'liq holda hisoblansa, bu qiyinchiliklarni bartaraf qilish mumkin. Bu usul taqribiy ravishda Uolton tomonidan yoritilgan. Bunday talqin qilishning asosiy o'ziga xosligi unga potensial (ichki) energiya E_i kiritilishidir. E_i - i atomlardan iborat markazning dissosiasiyalanib, i ta alohida

atomlarga ajralib ketish energiyasi. Bu energiya kapillyar modeldagi ΔG ga mos keladi, ammo bu erda ΔG markaz hosil bo'lishi va gaz fazasiga disosiasiyalanish energiyalarining nisbatiga bog'liq bo'lgan erkin energiyaning o'zgarishidir. Kritik markazning dissosiasiya energiyasini – E_i^* ga teng deb olsak, kritik markazlarning hosil bo'lish tezligi (Zel'dovich omilini hisobga olmagan holda) quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$I^* = R a_0 u N_0 \left(\frac{R}{v_1 N_0} \right)^{i^*} \exp \left\{ \frac{(i^* + 1) E_a + E_i^* - E_d}{kT} \right\} \quad (4.13)$$

bu erda u-bug' fazasidan atomlar kelib qo'shilishi mumkin bo'lgan **markazni** chegaralovchi aylananing uzunligi; v_1 -adsorbsiyalangan atomning desorbsiya chastotasi; i^* -kritik markazdagi atomlar soni; E_a -desorbsiyalanish aktivasiya energiyasi; E_d -diffuziyalanish aktivasiya energiyasi ($E_a, E_d > 0$). Kichik markazlar modelida erkin energiya o'rniga potensial energiya qo'llanilishi (4.13) tenglamada entropik a'zo $e^{\Delta S/k}$ mavjudligini nazarda tutadi (Gibbs-Gel'mgol's tenglamasi). Bu eksponentani kiritish uchun kichik markazlar modelida desorbsiya chastotasini v_1 kapillyar modeldagi desorbsiya chastotasi v_0 orqali ifodalash kerak:

$$1/v_1 = (1/v_0) \times e^{\Delta S/k}.$$

Kapillyar modelda markazlarning sirt energiyasi noaniqligi endi i^* va E_i dagi noaniqliklar bilan almashtiriladi. (4.13) tenglamani eksperiment bilan solishtirishda odatda i^* ning eng kichik qiymati qaraladi. Masalan, juda katta to'yinishlarda kritik markazda faqat bir atom bo'lishi mumkin (bu esa ikki atomdan tuzilgan markaz (o'simta) turg'unligi eng kichik bo'lgan birikma ekanligini bildiradi), biroz kichikroq to'yinishlarda $i^*=2$ (uch atomli markaz eng kichik turg'unlikka ega bo'lgan markaz hisoblanadi), keyin $i^*=3$ va hokazo. Bu kritik markazlarga mos keluvchi markaz hosil bo'lish tezligi quyidagilarga teng:

$$i^*=1; \quad I_1^* = R a_0 y N_0 \frac{R}{v_1 N_0} \exp\left(\frac{2E_a - E_d}{kT}\right); \quad (4.14a)$$

$$i^*=2; \quad I_2^* = R a_0 y N_0 \left(\frac{R}{v_1 N_0}\right)^2 \exp\left(\frac{3E_a + E_2 - E_d}{kT}\right) \quad (4.14b)$$

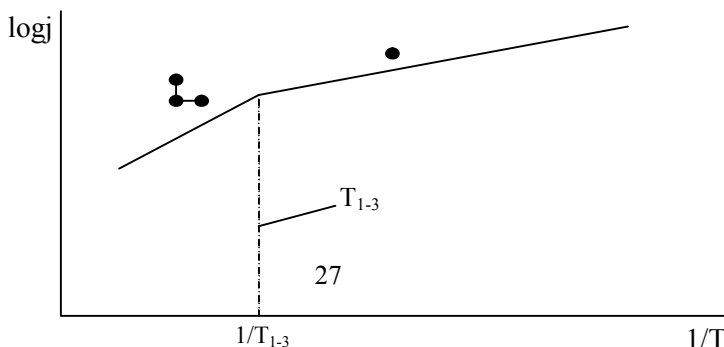
$$i^*=3; \quad I_3^* = R a_0 y N_0 \left(\frac{R}{v_1 N_0}\right)^2 \exp\left(\frac{4E_a + E_3 - E_d}{kT}\right) \quad (4.14v)$$

bu erda E_2 va E_3 – mos holda ikki va uch atomli markazlarning dissosiasiya energiyalari.

Agar to'yinish darajasi o'zgartirilsa, masalan, asos haroratini o'zgartirib, bir kritik markazdan boshqasiga o'tish haroratini aniqlash mumkin. Masalan, ikki atomli markaz kritik holatga o'tish harorati (4.14a) va (4.14b) tenglamalardan aniqlanadi va quyidagiga teng:

$$T_{1-2} = -(E_d + E_2) / k \ln(R / v_1 N_0) \quad (4.15)$$

4.4-rasmda markaz hosil bo'lish tezligining teskari haroratga bog'liqlik grafigi sinishga egaligi ko'rsatilgan, bunda kritik markazning o'lchami $i^*=1$ dan $i^*=3$ gacha o'zgaradi. Markaz hosil bo'lish jarayonining juda kichik o'lchamlari kritik markazlar yordamida yoritish kichik markazlar modelining asosiy yutug'i hisoblanadi.



4.4-rasm. Markaz hosil bo'lish tezligining haroratga sifatiy bog'lanishi.

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

4.2. Epitaksial plyonkalar olishning bosqichlari o'sish kinetikasi

Yupqa plyonkalar hosil qilish, avval aytilgandek, imkoni boricha yuqori vakuum sharoitida (10^{-6} Pa) amalga oshiriladi.

Faraz qilaylikki, kremniy monokristalining yuzasida kremniy plyonkasini hosil qilish kerak bo'lsin, bunday plyonka hosil qilish uchun asosning yuzasi yuqori darajada silliqilanadi. Buning uchun asos avval shishada jilvirlanadi, keyin esa yumshoq material yuzasida har xil diametrli zarralarga ega bo'lgan pastalar (goya, olmos) yordamida jilolanadi. Qo'shimcha ravishda ozgina elektrjilolanishi xam mumkin, keyin esa distillangan suvda bir necha marta qayta-qayta qaynatilib, spirt bilan tozalanadi va yuqori vakuumli qurilmaga joylashtiriladi. Bunday qurilma taxminan quyidagi qismlardan tashkil topadi: yuqori

- 1 – ion to'p
- 2 – fotonlar dastasini hosil qiluvchi qurilma
- 3 – elektron to'p
- 4 – vakuum hosil qiluvchi tizim
- 5 – atom, molekulalar manbai
- 6 – asos
- 7 – ochib-yopish qurilmasi

Elektron to'p yordamida yuzaning morfologiyasi va kristall tuzilishi o'rganiladi. Ion to'p yordamida esa yuzaga ionlar bilan ishlov beriladi yoki plyonka tuzilishi o'rganiladi. Atom va molekulalar manbai yordamida nishonning yuzasida kerakli materialning (masalan Si ning) plyonkasi hosil qilinadi. Ayrim hollarda bu atom va molekulalar ionlashtiriladi.

Asosga yuqori vakuum ($P \leq 10^{-6}$ Pa) sharoitida ishlov beriladi, ya'ni imkon qadar u yuqori haroratgacha qizdiriladi. Natijada yuza qo'shimchalardan tozalanadi va silliqatlanadi. Bu qizdirish vodorod oqimi ostida amalga oshirilsa, yuza yanada yaxshiroq natijalar beradi. Juda toza yuzalar hosil qilish uchun ayrim hollarda qizdirish jarayoni yuzalarga gaz ionlari bilan ishlov berish bilan navbatma-navbat olib boriladi. Bunday usullar bilan yuzadagi notekisliklarning o'lchamlari 30 – 50 Å gacha keltiriladi. Umuman, kremniyni oltingugurtdan mutlaqo tozalash mumkin (qayd qiluvchi asboblarning imkoniyati qadar), uglerod va kisloroddan esa to'la tozalab bo'lmaydi. Asos bilan bir qatorda manba ham yuqori darajada tozalanadi. Shunday tozalashlardan keyin manbalar ishga tushiriladi va atomlarning uchib chiqish rejimlari tanlanadi. Manbadan uchib chiqqan atomlar asosning yuziga kelib o'tira boshlaydi. O'sish jarayoni taxminan quyidagicha ro'y beradi:

1) Asosning har joy – har joyiga alohida atomlar kelib o'tiradi (adsorbsiyalanadi).

2) Asosning har joyidagi alohida atomlar bir – biriga kelib qo'shilib, kichik to'plamlar hosil qiladi va bularning ayrimlari kritik o'lchamgacha kattalashib plyonka hosil **qilish markazlari bo'lib** xizmat qilishi mumkin. Bunda ularning o'lchamlari 20 – 30 Å gacha boradi.

3) Keyingi atomlar kelib tushishi va atrofdagi ayrim atomlarning kelib qo'shilishi hisobiga bu markazlar yoniga va balandligi bo'yicha kritik o'lchamgacha o'sa boshlaydi va orolchalar hosil bo'ladi.

4) Yonma – yon turgan kichik orolchalarning qo'shilishi natijasida o'lchami kattaroq bo'lgan orolchalar paydo bo'la boshlaydi. Bu hodisa **koalessensiya** deb ataladi. Orolchalar kichik bo'lgan paytda ularning ko'rinishi uchburchaksimon bo'ladi, ular kattalashganda ko'pincha oltiburchak ko'rinishiga ega bo'ladi. Bu oltiburchaklarning o'lchamlari taxminan 100 – 1000 Å bo'ladi. Orolchalar qo'shilishi natijasida yuzada bo'sh joylar ko'payadi, chunki ikkita kichik orolchani umumiy yuzi har doim ular qo'shilgan keyingi yuzadan katta bo'ladi.

5) Orolchalarning orasida yangi markazlar hosil bo'lib, ular xam o'sa boshlashi mumkin. Ma'lum vaqtdan keyin hamma orolchalar bir-biriga chegaradosh bo'lib qoladi va ular chegaralarida kanallar hosil bo'ladi.

6) Kanallar va ochiq qolgan joylarga yana atomlar o'tira boshlaydi va **ikkilamcha markazlar** hosil bo'ladi, natijada notekis bo'lsa ham uzluksiz plyonka o'sa boshlaydi.

Yuqorida ko'rib o'tilgan bosqichlarning ayrimlari chizma tarzida 4.5 – rasmda keltirilgan. **Peshli o'sish jarayonini 4 ta bosqichga ajratadi:** markazlar va orolchalar tizimining hosil bo'lishi; orolchalarning o'sishi va koalessensiyasi (qo'shilishi); kanallarning vujudga kelishi; uzluksiz plyonkaning hosil bo'lishi.

Ko'pincha bu plyonkalar polikristall holda bo'ladi. Ulardagi orolchalarni yo'qotish uchun “plyonka – asos” tizimi yuqori haroratgacha qizdiriladi.

4.5-расм. Yupqa plyonkalar hosil bo'lishining sxematik tasviri: a) ayrim atomlarning yuzaga o'rtnashib qolishi; b) markazlar hosil bo'lishi; v) markazlar o'sib alohida orolchalarning hosil bo'lishi; z) orolchalarning bir-biriga qo'shib ketishi.

4.3. Polikristall plyonkalarining o'sish jarayonida nuqsonlarning vujudga kelishi

O'sish jarayoni va nuqsonlarning hosil bo'lishi har xil asos va plyonkalar uchun o'ziga xos holda har xil bo'lsa ham, bu jarayonlarda umumiylik mavjud. Quyida polikristall plyonkalar o'sishi jarayonida nuqsonlar hosil bo'lishining asosiy hollarini ko'rib o'tamiz. Nuqsonlarni aniqlashda katta va kichik energiyali difraksiya hamda rastri elektron mikroskopiya usullari ko'p qo'llaniladi.

1. **Dislokasiyalar.** Dislokasiyalar (chiziqli nuqsonlar) o'sish jarayonida eng ko'p uchraydigan nuqsonlardan hisoblanadi. Ularning zichligi ko'pincha 10^{10} sm^{-2} dan 10^{11} sm^{-2} gacha bo'ladi. Kub panjarali metall va boshqa plyonkalarni o'stirishda dislokasiya hosil bo'lishining besh turdagi mexanizmi mavjudligi aniqlangan:

1. Yonma – yon o'sayotgan ikkita orolchaning kristall panjaralari bir-biriga nisbatan kichikroq burchak hosil qilsa, ular orasida **dislokasiyadan iborat** chegara hosil bo'ladi.

2. Plyonka va asosning panjara doimiylari ko'pincha bir-biridan farq qiladi. Natijada plyonka va asos atomlarining bir-biriga nisbatan siljishi ro'y beradi. Hatto orolchadagi atomlarning siljishi ikkinchisidan farq qilganligi uchun orolchalarning o'sish jarayonida **dislokasiyalar** vujudga kelishi mumkin.

3. Plyonkalar hosil bo'lishining boshlang'ich jarayonlarida vujudga keladigan teshik va oraliq (bo'sh joy) larning qirralarida yuzaga keladigan kuchlanishlar uzluksiz plyonkalarda **dislokasiya** hosil qiladi.

4. Asosning yuziga chiqqan dislokasiyalar plyonkada ham davom etishi mumkin.

5. Uzluksiz plyonkada orolchalarning bir-biriga qo'shilish jarayonida orolchalarning yuzasiga chiqqan nuqsonlarning bir-biriga qo'shib ketishi natijasida dislokasiyalar vujudga kelishi mumkin.

Ko'p hollarda plyonka-asos chegarasidagi mexanik kuchlanishlarni kamaytirish uchun **dislokasiyalar zanjiri** vujudga keladi.

Dislokasiyalar zichligini o'rganish shuni ko'rsatadiki, plyokalarda eng ko'p dislokasiyalar **kanallar zanjiri** va **teshiklar** hosil bo'lishi jarayonida paydo bo'ladi (4.6 – rasm).

4.6 - rasm. Xona haroratida MoS_2 o'stirilaytgan oltin plyonkadagi dislokatsiyalar zichligining plyonka qalinligiga bog'liqligi.

Tadqiqotlar ko'rsatadiki, kanallar to'lgandan keyin ham o'sayotgan plyonkada juda kichkina teshiklar (diametri 100 – 200 Å) mavjud bo'ladi. Deyarli hamma teshiklar dielektriklar markazi bo'lib xizmat qiladi.

2. Donalar (bo'lakchalar) chegarasi. Har qanday plyonka ko'pgina alohida – alohida bo'lakchalar – kristallitlarning yig'indisidan tashkil topadi. Kristallitlarning o'lchamlari asosning haroratiga, plyonkaning qalinligiga, o'stirish tezligiga va toblash haroratiga bog'liq bo'ladi (4.7 – rasm).

4.7 – rasm. Kristallar o'lchamlarining o'sish sharoiti va toblash haroratiga bog'liqligi: d– kristallarning o'lchami

4.7 – rasmning tahlili shuni ko'rsatadiki, kristallitlarning o'lchamlari avvaliga plyonka qalinligiga bog'liq ravishda kattalashib boradi, plyonka ma'lum bir qalinlikka etgandan keyin o'zgarmay qoladi. Asosning haroratini oshirish va plyonkalarga keyingi haroratli ishlov berish (toblash) ham kristallitlarning o'lchamlarini sezilarli darajada kattalashtirish imkonini beradi. Plyonkalarni o'tqazish tezligi kichik bo'lganda (masalan, kremniy kremniy yuzasida o'tqazishda $\sim 2\div 5$ Å/s gacha) kristallit o'lchamlari o'tqazish tezligiga bog'liq bo'ladi, keyin esa o'tqazish tezligi oshgan sari kristallit o'lchamlari kichrayib boradi. Umuman kristallitlarning bir – biriga tegib turadigan sohalaridagi chegaralar plyonka uchun nuqsonlar hisoblanib, uning fizik-kimyoviy xususiyatlariga ta'sir qiladi.

3. Sirtning yuzasi va g'adir – budurligi. Plyonkaning to'la energiyasi eng kichik qiymatga ega bo'lishi uchun, uning sirti mumkin qadar kichik yuzaga ega bo'lishi, ya'ni sirt ideal tekislikdan iborat bo'lishi kerak. Plyonka qalinligi oshgan sari uning sirt yuzasi mos ravishda oshib borishi, ya'ni g'adir-budurlikning ko'payib borishi tajribalardan aniqlangan. Plyonkalardagi bu kabi nuqsonlarni kamaytirish uchun uni qizdirish, elektronlar, ionlar yoki lazer nurlari bilan ishlov berish usullari qo'llaniladi.

4.4. Monokristall plyonkalardagi nuqsonlar

Monokristall plyonkalar o'stirishda vujudga keladigan asosiy nuqsonlar va ularning yuzaga kelish sabablari (mexanizmlari) haqida qisqacha to'xtalib o'tamiz. Tuzilishga bog'liq bo'lgan asosiy nuqsonlar quyidagilardan iborat:

1. Joylashishga bog'liq bo'lgan nuqsonlar. 2. Ikkilanuvchi. 3. Kichik burchakli chegara. 4. Nuqtaviy nuqsonlarning to'planishiga bog'liq bo'lgan nuqsonlar (masalan, dislokasiya sirtmog'i). 5. Dislokasiyalar.

Panjaraning bunday nuqsonlari har qanday materialni (metall, qotishma, yarim o'tkazgich, dielektrik) epitaksial o'stirishda kuzatiladi.

Nuqsonlarning hosil bo'lish mexanizmlarini quyidagicha talqin qilish mumkin:

2. Asos sirtidagi defektlarning plyonkada ham davom etishi. Bu mexanizm juda katta rol o'ynamaydi, chunki ko'pincha epitaksial o'sayotgan plyonkadagi nuqsonlarning zichligi asos sirtidagi nuqsonlar zichligidan o'nlab, hatto yuzlab marta katta bo'ladi. Asos sirtidagi dislokasiyalar plyonka amorfsimon o'stirilsa, sezilarli ta'sir qilishi mumkin.

3. Markazlar yo'nalishlarining akkomodasiyasi va mos kelmaslik kuchlanishi. Kichik orolchalarning o'sishi va bir-biriga qo'shib plyonka hosil qilish jarayonida kristall tuzilishining har xil nuqsonlari vujudga keladi. **Dislokasiyalar** yo'nalishlarining bir xil emasligi maxsuli

bo'lganligi uchun koalesensiya (qo'shilish) jarayonida yo'nalishlar-ning razorientasiya (mos kelmaslik) darajasi **dislokasiyalar sonini belgilaydi.**

Uchta markaz o'sib, bir-biriga qo'shilishida ularning yo'nalishlari har xilligi tufayli **mos kelmaslik kuchlanishi** vujudga keladi va ular orasidagi maydonda ham dislokasiya vujudga keladi.

4. **Nuqtaviy nuqsonlarning to'planishi.**

5. Nuqtaviy nuqsonlarning dislokasiyalarni vujudga keltirishdagi roli yaxshi o'rganilmagan. Plyonkalarni o'tqazish jarayonida bug'lanish tufayli ko'plab bo'sh joylar vujudga kelishi mumkin. Bu ayniqsa, kichik harorat va katta tezlikli o'stirishda sezilarli bo'ladi. Bo'sh joylarni to'ldirib borish jarayonida hosil bo'ladigan nuqtaviy nuqsonlar to'plami dislokasiya sirtmog'i va boshqa nuqsonlar zanjirini vujudga keltiradi.

6. **Plastik deformasiya (shakl o'zgarish).** Plastik deformasiya hisobiga epitaksial plyonkalar yuqori kuchlanishli holatda bo'ladilar. Plastik deformasiyalar hisobiga o'sayotgan orolchalarning qirralari har xil ko'rinishdagi dislokasiyalarni vujudga keltirishi mumkin.

7. **Sirtning toza emasligi.** Chet elementlar atomlarining mavjudligi joylashishga bog'liq bo'lgan nuqsonlarni vujudga keltiradi. Hozirgi paytda monokristall plyonkalarni o'stirish jarayonida hosil bo'lishi mumkin bo'lgan nuqsonlar va ularning mexanizmlari to'liq o'rganilgan emas. Bu bo'limda berilgan axborotlar umumiy tushunchalar majmuidan iboratdir.

V. KREMNIY YUZASIDA EPITAKSIAL PLYONKALAR O'STIRISH

5.1. Kremniy yuzasida kremniy o'stirish (avtoepitaksiya)

Kremniy va germaniy epitaksiyasining texnologik xususiyatlari. Kremniy va germaniyni epitaksiyali qatlamlarini o'stirishda eng ko'p qo'llaniladigan usul bu bug'-gaz fazasidan epitaksiya qilish bo'lib, eng asosiylari ularning tetraxloridlarini vodorod bilan tiklash va monosi-lan

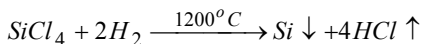
SiH_4 va monogerman GeH_4 larni termik ajratish usullaridir. Bunda qizdirilgan taglik ustidan xlorid yoki gidrid va legirlovchi kirishmalar-ning bug'lari bilan birgalikdagi vodorod gazi o'tkazilishi natijasida qaytarilgan kremniy yoki germaniyni monokristall qatlamlari shu taglik ustiga o'tiradi.

Epitaksial o'stirishning tipik jarayonlari quyidagi operatsiyalardan tashkil topadi:

1. Reaktorga plastinalarni yuklash.
2. Reaktorni inert gazlar va vodorod bilan puflash.
3. Plastinani qizdirish va ularni tozalash maqsadida gazsimon yemiruvchi reagentlarni yuborish.
4. Yemirishni to'xtatish va o'stirish uchun kerakli bo'lgan haroratni o'rnatish.
5. Epitaksial qatlamlarni o'tqazish va legirlash uchun reagentlarni (xloridning bug'lari yoki gidridlar va legirlovchi kirishmalarni vodorod bilan birgalikda) berish.
6. Reagentlar berishni to'xtatish va vodorod bilan qisqa muddatli puflash.
7. Qizdirishni to'xtatish, vodorod va inert gazlar bilan puflash.
8. Reaktordan plastinalar olish.

Kremniy epitaksiyasining xloridli usuli

Bu usul soddaligi va boshlang'ich materiallarning bemalolligi tufayli keng tarqalgan. Bunda kremniy tetraxlorid - SiCl_4 bug'i va vodorod H_2 reaktorga beriladi va u erda kremniy tiklanishining asosiy reaksiyasi yuz beradi:



Ba'zan tetraxlorid SiCl_4 o'rniga uchxlor bilan SiHCl_3 dan foydalaniladi. Bunda kremniyning tiklanish reaksiyasi quyidagicha bo'ladi:



Agar xlorli vodorod HCl ortiqcha bo'lsa, unda ikkita reaksiya ham o'ngdan chapga boradi. Bunday holdan tagliklarni gazli yemirish usuli bilan tozalash sifatida foydalaniladi. SiCl_4 ning kichik konsentrasiyalarida o'sish

tezligi konsentrasiyaga chiziqli bog'langan bo'ladi. $SiCl_4$ ning katta konsentrasiyalarida o'sish tezligi kamayadi va taglikni kimyoviy yemirish jarayoni boshlanadi. Odatda vodorodda $SiCl_4$ ning konsentrasiyasi 1% gacha bo'lgandagina o'sish reaksiyasi yuz beradi (5.1 – rasm).

5.1 – rasm. Kremniy epitaksial plenkasini $SiCl_4$ bug'idan hosil qilish sxemasi.

Kremniy quyidagi sharoitda o'tqazilishi mumkin:

1. Harorat intervali $1150 \div 1250$ °C atrofida bo'lishi kerak.
2. Vodorodda $SiCl_4$ ning konsentrasiyasi $0,5 \div 1\%$ sathda ushlab turiladi.
3. Gaz oqimining tezligi $0,1 \div 1$ m/s ni tashkil qilishi kerak.

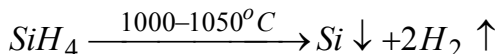
Mana shu shartlar bajarilganda o'sish tezligi 1 mkm/min ga yaqin bo'ladi.

Kremniy epitaksiyasining gidrid usuli

Epitaksiya jarayonini xlor usuli yordamida o'tkazilganda taglikning harorati 1200 °C atrofida bo'ladi. Bunday haroratda kuchli legirlangan taglikdan kirishmalar kuchsiz legirlangan epitaksial qatlamga sezilarli diffuziyalanadi. Bu hodisa avtolegirlash deyiladi va u kirishmalar taqsimotiga salbiy ta'sir qiladi. Bu ta'sirni kamaytirish maqsadida yo diffuziya koeffisienti kichik bo'lgan kirishmalardan foydalaniladi, masalan: fosfor P o'rniga sur'ma Sb yoki margimush As , yo jarayon haroratini kamaytirish kerak bo'ladi.

Kremniy epitaksiyasi jarayonida haroratni 1000 °C gacha kamaytirish imkoniyati gidrid usulidan foydalanilganda amalga oshadi. Gidrid usulining mohiyati monosilan SiH_4 ni piroliz qilishdir. Shu sababli bu usul silan usuli ham deyiladi.

Gidrid usulida monosilan SiH_4 harorat ta'sirida parchalanadi va bu reaksiya



ko'rinishga ega bo'ladi va erkin kremniy harorati 1000 °C gacha kamaytirilgan taglikka o'tiradi. Bu esa taglikdan kirishmalar diffuziyasini amalda yo'q qiladi va legirlovchi kirishmalari bir xil taqsimlangan epitaksiyali qatlam o'sishini ta'minlaydi.

Gidrid usuli quyidagi sharoitda o'tkaziladi:

1. O'tqazishning optimal harorati 1050÷1100 °C.
2. Manba sifatida 4 ÷ 5 % SiH₄ va 95 ÷ 96 % yuqori tozalikdagi inert gazlari yoki vodoroddan tashkil topgan manba qo'llaniladi.
3. O'tqazish vaqtida vodoroddagi monosilan SiH₄ ning konsentratsiyasi 0,05 ÷ 0,1 %.

4. Gaz oqimining tezligi 30 ÷ 50 sm/s.

Bu shartlar bajarilganda o'sish tezligi 0,2 dan 2 mkm/min gacha o'zgaradi.

Epitaksiyali qatlam o'stirish qurilmalari (reaktorlari). Epitak-siyali qatlam o'stiriladigan qurilmalar - reaktorlar konstruktsiya jihatidan asosan 2 turli bo'ladi: *gorizontal* va *vertikal*.

Gorizontal reaktorlar eng oddiy konstruksiyaga ega. Bug'- gaz aralashmasining oqimi taglik ushlagichga parallel harakatlanib, plastina ustidan oqib o'tadi va bunda oqimning konsentratsiyasi borgan sari kamayib boradi. Tagliklarda hosil bo'lgan zpitaksiyali qatlamlarning qalinligi va solishtirma qarshiligi vaqtga bog'liq holda o'zgarib boradi. Hamma tagliklarda epitaksiyali qatlamlar bir xil qalinlikda o'sishi va bir xil solishtirma qarshilikka ega bo'lishi uchun ikkita usuldan foydalaniladi: taglik ushlagich gaz oqimi yo'nalishiga ma'lum bir burchak ostida o'rnatiladi, yoki taglik ushlagichning uzunligi bo'yicha gaz taqsimlagichdan foydalaniladi (5.2-rasm).

Gorizontal reaktorlarda kerakli sharoitlarni hosil qilib parametrlari bir xil bo'lgan epitaksial qatlam o'stirish ancha murakkab. Vertikal reaktorlar konstruksiyasi o'q simmetriyali bo'lganligi sababli bug'-gaz aralashmasini qizdirish va oqimi uchun eng yaxshi sharoit yaratib beradi. Vertikal reaktorlarda tagliklar o'q simmetriyasiga asosan aylantirib turiladi. Bu esa

issiqlik va gazdinamikali maydonlarni bir xil ushlab turishga yordam beradi.

5.2-pacm. Si ga erpitaksiya o'tqazishning gorizontaal reaktor sxemasi

5.3-rasmda mana shunday qurilmaning prinsipial sxemasi ko'rsatilgan.

5.3-rasm. Kremniyni epitaksiya qilish uchun vertikal qurilma sxemasi.

Tetraxlorid kremniyli yoki legirlovchi qo'shimchalar bilan birgalikdagi – $SiCl_4 + BBr_3$ yoki $SiCl_4 + PCl_3$ aralashmali idish $SiCl_4$ ning haroratini o'ta yuqori aniqlikda ushlab turadigan termostatga joylashtiriladi. Odatda bu harorat $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ atrofida bo'ladi, chunki $SiCl_4$ – o'ta uchuvchan suyuqlikdir. Kislorod va namlikdan tozalash maqsadida platina yoki palladiy diafragmalari orqali o'tkazilgan vodorod sistemaga 1 kran va uning sarfini o'lchab turuvchi rotametr orqali beriladi. 2, 3, 4 - kranlar yopiq turadi. Kremniyli tagliklar $1000 - 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha qizdiriladi va vodorod oqimida sirlari tozalanadi. 1 kran yopiladi va 2, 3 - kranlar ochiladi. Vodorod $SiCl_4$ idishi orqali o'tkazilib, $SiCl_4$ bug'i bilan to'yintiriladi va u reaktorda elementar kremniygacha tiklanadi. Reaksiya mahsulotlari - $SiCl_4$, H_2 , HCl va boshqalar ochiq 5 kran orqali skrubberga chiqarib yuboriladi. U erda zaharli gazlar ajratib olinib, vodorod alangasida yoqib yuboriladi.

Zamonaviy sanoat qurilmalarida, masalan UNES-2P-KA da epitaksiya jarayoni asosan EHM yordamida boshqariladi, operator faqat plastinalarni yuklash va olish bilangina shug'ullanadi.

Kremniyni yuqori vakuum sharoitida MNE usuli bilan o'stirish

Bu usul zamonaviy mikroelektronikaning rivojlanishi va nanoelektronikaning qaror topishida eng asosiy usul bo'lib xizmat qilmoqda. Bu usulda o'ta yuqori vakuum sharoitida kremniy atomlari bug'lattirgichdan uchib chiqib, kremniy

plastinkasining yuzasiga tushadi. Asos-kremniy plastinkasi 900 – 950 K haroratda ushlab turiladi. Vaqt va o'zgarish tezligiga bog'liq ravishda kerakli qalinlikdagi epitaksial plyonka olinadi.

5.2. Kremniy epitaksial qatlamlarida kristallografik nuqsonlar

Kremniyning epitaksial qatlamlarini har xil monokristallarning yuzasida hosil qilish mumkin. Kremniyning panjarasi kub shaklida bo'lga-ni uchun asosning panjarasi ham kub bo'lishi kerak. Bunday kub panjaraga ega bo'lgan materiallar quyidagilar: Si, CaF_2 , CoSi_2 , GaAs va boshqalar.

Agar kremniy plyonkasi kremniy yuzasida hosil qilinsa, *avtoepitaksiya* deyiladi, ya'ni bunda *gomogen sistema* hosil bo'ladi.

Kremniyning epitaksial plyonkasi boshqa materialning (CaF_2 , GaAs) yuzasida hosil qilinsa, *geteroepitaksial plyonka* deyiladi.

Kremniy plyonkasini yoki umuman har qanday epitaksial plyonkalarni olganda unda nuqsonlar kamroq hosil bo'lishida quyidagi omillar asosiy rol o'ynaydi:

- 1) juda yuqori vakuumda o'stirish,
- 2) asosning yuqori darajada silliqlanganligi va tozaligi,
- 3) atomlar manbaining tozaligi.

Agar vakuum yuqori bo'lmasa, kamerada mavjud bo'lgan gaz atomlari kremniy bilan birga o'tirib (SiC , SiO_2 , SiS), kremniynikidan farq qiladigan markazlar hosil qilishi mumkin. Xuddi shu kabi nuqsonlar kremniy manbai toza bo'lmasa ham paydo bo'lishi mumkin.

Asosning yuqori darajada silliq va toza bo'lishidan tashqari unga yana quyidagi talablar qo'yiladi:

- kristall tuzilishining mosligi, panjara kattaliklarining yaqinligi;
- yuzada notekisliklarning yo'qligi, ya'ni yuzada kristall panjara buzilishi yo'q bo'lishi;

- harorat kengayish koeffisientlari deyarli bir xil yoki juda yaqin bo'lishi kerak.

Demak, yuqoridagi shartlarning bajarilishi nuqsonlarni imkoni boricha kamaytirishga yordam beradi. Umuman, epitaksial plyonkalarda quyidagi turdagi nuqsonlar mavjud bo'lishi mumkin:

- a) joylashishga bog'liq bo'lgan nuqsonlar,
- b) ikkilanishlarning paydo bo'lishi,
- v) orolchalarning chegaralari qo'shilganda hosil bo'ladigan kichik burchaklarning paydo bo'lishi,
- g) nuqtaviy nuqsonlarning to'planishi,
- d) dislokasiyalar.

5.3. Kremniy monokristali yuzasida CoSi_2 ni epitaksial o'stirish

Hozirgi paytda katta va o'takatta integral sxemalar olishda metall bazali tranzistorlarning yangi turlarini yaratish alohida ahamiyatga ega. Ammo kub panjarali va parametri kremniynikiga yaqin bo'lgan metall plyonkalarni amalda hosil qilish mumkin emas. SHuning uchun ham xususiyatlari metallnikiga yaqin bo'lgan silisidlarni (kremniyning biron bir metall bilan birikmasini) ishlatish maqsadga muvofiqdir. Bunday silisidlar 2 ta: NiSi_2 va CoSi_2 .

Ammo CoSi_2 panjara doimiysi kremniynikiga juda yaqin bo'lgani uchun metall bazali tranzistorlarda uni ishlatish qulayroq bo'ladi. Shunday qilib, metall bazali tranzistorlarda Si - CoSi_2 - Si tizimi ishlatilishi mumkin. Si va CoSi_2 larning fizik parametrlari va kristallografik parametrlari 5.1 - jadvalda keltirilgan.

CoSi_2 ni MNE va QFE usullari bilan olishni yuqoridagi papagpaflapda ko'rib chiqqanmiz.

5.1-jadval

Si va CoSi_2 uchun kristall panjara parametrlari

Kristall, plyonka	Panjara turi	Panjara doimiysi, Å	ρ , mkOm·sm
CoSi ₂	kubik	5,38	20 – 50
Si	kubik	5,43	$\geq 10^6$

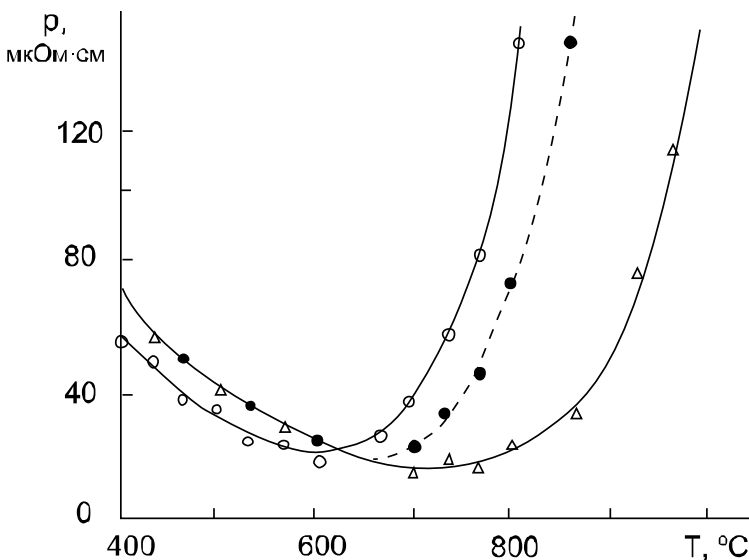
CoSi₂ plyonkasining fizik xususiyatlari plyonkaning qalinligiga kichik qalinliklarda bog'liq bo'ladi, chunki kichik qalinliklarda plyonkaning xususiyatlariga asosning ta'siri katta bo'ladi. Masalan, 5.4-rasmda solishtirma qarshilikning plyonka qalinligiga bog'liqligi keltirilgan. Demak, plyonka qalinligi 400 – 500 Å dan katta bo'lganda unga asosning ta'siri deyarli sezilmaydi.

Plyonka mukammalligi (bir jinsliliigi, silliqliigi, kristall panjarada nuqsonlarning kamligi) o'stirish haroratiga juda xam bog'liq bo'ladi. 5.5-rasmda solishtirma qarshilikning haroratga bog'liqlik grafigi keltirilgan. Ilmiy tadqiqotlarning ko'rsatishicha, solishtirma qarshilik eng kichik bo'lganida plyonka epitaksial va eng mukammal bo'lar ekan. 300 – 350 °C gacha hosil qilingan plyonka amorf bo'ladi; 450 – 500 °C da polikristall bo'ladi; 500 – 600 °C oralig'ida monokristall bo'ladi-yu, ammo orientatsiyasi bir xil bo'lmaydi (tekstura) va unda har xil nuqsonlar ko'p bo'ladi; 600 – 700 °C da plyonka monokristall va nuqsonlari eng kam holda bo'ladi; 700 – 750 °C dan keyin asosdan kremniy atomlari plyonka tarkibiga kirib boradi va stexiometrik tartib buziladi, bu esa qarshilikning ortishiga olib keladi; 800 – 900 °C va undan katta haroratlarda plyonkalar orolcha-orolcha bo'lib ajralib ketadi; keyingi qizdirishlar CoSi₂ ning parchalanib ketishini va yuzadan Co hamda Si atomlar holida uchib chiqishini vujudga keltiradi.

5.4-rasm. CoSi₂/Si tizimi uchun solishtirma qarshilikning plyonka qalinligiga bog'liqligi

Epitaksial qatlamlarning profil bo'yicha kimyoviy tarkibi

Biror monokristallning yuza qismida plyonkalar hosil qilganimizda ma'lum bir optimal haroratgacha qizdirmaguncha plyonkaning chuqurlik bo'yicha tarkibi har xil bo'ladi. Masalan, QFE usuli bilan CoSi_2 plyonkasini hosil qilish uchun Si ning yuzasiga Co o'tkaziladi. Ammo, xona haroratidayoq diffuziya xisobiga plyonkada xam, asosning yuza va yuza osti qismlarida xam elementar hamda kimyoviy



tarkib har xil bo'lishi mumkin.

5.5-rasm. MNE usuli bilan o'stirilgan $\text{CoSi}_2/\text{Si}<100>$ plyonkasi solishtirma qarshiligining haroratga bog'liqligi.

5.6-rasmdan ko'rinadiki, ideal xolda 500 Å gacha faqat Co bo'lib, keyin uning konsentrasiyasi tezda 0 ga teng bo'lishi kerak. Real xolda esa plyonkadagi Co atomlari o'rning bir qismini Si atomlari egallaydi, asosning bir qismini esa Co atomlari egallaydi. Bunda atomlar aralashib ketgan qismda kimyoviy tarkib ham har xil bo'lishi mumkin. Masalan, Co_3Si , Co_2Si , CoSi , CoSi_2 , CoSi_3 ,

Qizdirilgan holda esa, kimyoviy birikmalarning hosil bo'lishi ko'payadi. Faraz qilaylik, ma'lum haroratda

epitaksial plyonka xosil bo'lsin. Masalan, CoSi_2 uchun epitaksial plyonka hosil qilish uchun optimal harorat 650°C bo'ladi.

5.7-rasmdan ko'rinadiki, eng idealga yaqin holatda kimyoviy tarkib uch qismdan iborat bo'ladi:

1) ma'lum bir qalinlikdagi mukammal epitaksial plyonka,

2) o'tish qatlami (u xam epitaksial, ammo tarkibi o'zgarib boradi),

3) asos, ya'ni Si.

Plyonkalarining kimyoviy va elementar tarkibini chuqurlik bo'yicha aniqlash uchun ko'p hollarda Oje-elektronlarning spektroskopiyasi (OES) usuli yuzalarni ionlar bilan edirish usuli bilan birga ishlatiladi.

5.6 – rasm. *Xona harorati sharoiti uchun Co/Si chegaraviy qatlami Co atomlari konsentrasiyasining chuqurlik (profil) bo'yicha o'zgarishi.*

5.7-rasm. *$\text{CoSi}_2/\text{Si}<100>$ uchun C_{Co} va C_{Si} konsentrasiyalarning profil' (chuqurlik) bo'yicha joylashishi.*

Bu usulda ionlar bilan yuza ediriladi, buning uchun qancha vaqtda qancha edirish oldindan kalibrovka qilinadi, edirilgan joyga elektron dastasi tushirilib, OES usuli yordamida elementar va kimyoviy tarkib aniqlanadi. Bu holda to'g'ri axborot olish uchun edirilgan yuzaning kattaligi elektron dastasining diametridan kamida 5 – 6 marta katta bo'lishi kerak.

5.4. MNE va QFE usullarining afzalliklari va kamchiliklari

MNE usuli o'tgan asrning 70-yillaridan boshlab yo'lga qo'yila boshladi. Bu vaqtga kelib, yuqori vakuum olish (10^{-8} – 10^{-10} Pa) va yuzalarni yuqori darajada tozalash (ionlar bilan, lazerlar yordamida) imkoniyatlari paydo bo'ldi.

MNE usuli juda toza va yuqori vakuum sharoitida o'tkazilishi tufayli oldingi usullardan farq qiladi. MNEning o'ziga xos xususiyatlarga ega bo'lishini ta'minlash uchun

bajarilishi kerak bo'lgan vazifalarni yana bir bor sanab o'tamiz:

a) Juda yuqori tozalikdagi va mukammal tuzilishdagi monokristallardan foydalanish. O'tkaziladigan molekulalarning juda yuqori tozaligini ta'minlash. Bular O'YuV (10^{-8} Pa dan yuqori) da olib boriladi.

b) Nisbatan kichik haroratda o'ta yupqa va tarkibi jihatdan keskin farq qiladigan plyonka o'stirish, bu diffuziyaning oldini olish uchun qilinadi.

v) Qatlamma-qatlam o'stirish hisobiga silliq va nuqsonsiz sirtlarni hosil qilish.

g) Molekulalarning tushishini kerakli yo'nalishda boshqarish va molekulalarning oqimi tezligini kamaytirish hisobiga qalinligini nazorat qilib bo'ladigan yupqa plyonkalar olish.

d) Murakkab tarkibli plyonkalarining qatlamma-qatlam tizimlarini hosil qilish.

Boshqa (QFE, RE, ion-aktivasiya, ion implantasiya) usullarga nisbatan, avval qayd qilganimizdek, MNE usuli quyidagi asosiy afzalliklarga ega:

1) asos va atom (molekula) lar manbalarini yuqori darajada tozalash va eksperimentni juda yuqori vakuumda o'tkazish xisobiga epitaksiya haroratni juda pastga tushirish mumkin ($500 \div 600$ K);

2) har xil turdagi (metall, yarim o'tkazgich, dielektrik) materiallarni bir birining ustiga qatlamma-qatlam kerakli qalinlikda o'tqazish mumkin;

3) bunday qatlamlarni (masalan: metall-dielektrik-yarim o'tkazgich, metall-oksid-yarim o'tkazgich, yarim o'tkazgich-dielektrik-yarim o'tkazgich ...) davriy ravishda bir xil ustma-ust o'tkazib borish, ya'ni hajmiy strukturalar olish mumkin;

4) bunday o'stirishda bitta turdagi qatlam ikkinchi turdagi qatlam bilan keskin chegara hosil qilishi mumkin;

5) plyonkalar hosil qilish jarayonida uni legirlash uchun legirlovchi moddaning tarkibini va konsentrasiyasini o'zgartirish yo'li bilan xususiyati o'zgarib boruvchi tizimlarni hosil qilish mumkin.

Yuqorida ko'rsatilgan afzalliklar tufayli MNE plyonkalar mikroelektronikaning rivojlanishida asosiy rol o'ynagan bo'lsa, nanoelektronikaning paydo bo'lishiga sabab bo'ldi.

Umuman yupqa epitaksial plyonkalar alohida, o'ziga xos bo'lgan xususiyatlarga ega bo'ladi. Bunday xususiyatlarning paydo bo'lishida asosning ta'siri ham, plyonka o'sish davomida legirlanish darajasi ham, plyonkaga tushgan, undan o'tayotgan va chiqayotgan elektronlar va fotonlarning ta'sirlari ham massiv plyonkalardan ko'ra farq qilishlari asosiy rol o'ynaydi.

VI. UCH QATLAMLI METALL-YARIM O'TKAZGICH-DIELEKTRIK GETEROEPITAKSIAL TIZIMLAR

6.1. Kubik panjarali materiallarni epitaksial o'stirish

Kubik panjarali materiallarning plyonkalarini birlarining ustiga o'stirish hozirgi zamon elektronikasida juda keng qo'llaniladi. Masalan MDYa, (M-metall, D-dielektrik, Yarim o'tkazgich) tizimlarning asosiy qismini kubik panjarali plyonkalar tashkil qiladi. Ko'p qatlamli (hajmiy) mikrotizimlar hosil qilishda metall xususiyatga ega bo'lgan CoSi_2 va NiSi_2 kabi silisidlar, Si, Ge, GaAs (va boshqa $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ birikmalar) kabi yarim o'tkazgichlar, CaF_2 , BaF_2 kabi dielektrik materiallar kubik panjaraga ega bo'lganligi uchun juda ahamiyatlidir.

Asosning yuzasida biror plyonkani o'stirishda ularning kristall tuzilishlari bir xil bo'lishidan tashqari plyonkaning va o'tish qatlaminin sifati quyidagi asosiy omillarga ham bog'liq bo'ladi:

1. Plyonka va asosning kristall panjaralari doimiylarining qiymatlariga. Ularning panjara doimiysi qiymatlari birlariga juda yaqin bo'lishi (farq $\sim 0,07$ % oshmasligi) kerak.

2. Plyonka va asosning chiziqli kengayish harorat koefficientlariga (ChKHK). Ular ham katta farq qilmasligi kerak.

3. Yuzalarning va chegaraviy qatlaminin energetik parametrlariga.

4. O'tqazilayotgan atomlarning diffuziya qobiliyatiga.

5. Asos va plyonkadagi atomlarning bog'lanish turiga.

6. Asos va plyonkaning o'zaro ta'sirlashuv xarakteriga.

6.1 – jadvalda geteroepitaksiya tizimlarida ishlatish mumkin bo'lgan materiallarning panjara doimiylari va fizik xususiyatlari keltirilgan.

Demak, plyonka o'stirishda $a_a \sim a_p$ bo'lishi asosiy shart ekan. Asos va plyonkaning panjara doimiysi va ChKHK lari bir-birlaridan sezilarli farq qilsa, epitaksial plyonka kristall tuzilishining mukammalligi kamayadi. Agar ularning energetik parametrlari farq qilsa, plyonkaning morfologiyasi va ko'p hollarda yuza qatlamlarning stexiometrik tarkibi buziladi.

O'sish mexanizmi epitaksial tizimning quyidagi termodinamik parametrlari orqali aniqlanadi: “plyonka - vakuum” sirtiy solishtirma erkin energiyalari – γ_{pv} ; “asos - vakuum” sirtiy solishtirma erkin energiyalari - γ_{av} ; “plyonka - asos” sirtiy solishtirma erkin energiyalari – γ_{pa} ; hamda “adsorbat - sirt (yuza)” tizimining kimyoviy potentsiali (Fermi sathi):

$$\mu = KT \ln(R_a/R_d)$$

bu erda R_a va R_d o'tqazilayotgan material zarrachalarining adsorbsiyalanish va desorbsiyalanish tezligi.

6.1-jadval

**Kubik panjarali materiallarning panjara doimiylari
qiymatlari**

Yarimo'tkazgichlar		
Dielektriklar		
Material	ϵ_a	Tuzilishi
Ge	5.646	0
Sn	6.489	0
C	3.387	0
Si	5.451	0

GaAs	5.653	A.s
InP	5.869	A.s
GaP	5.451 2	A.s
SiC	6.479	A.s
CdTe	6.482	A.s
CuCl	5.407	A.s
PdTe	6.462	T.t
PbSe	6.14	T.t

Material	a, Å	Tuzilishi
CdF ₂	5.388	F
CaF ₂	5.464	F
SrF ₂	5.789	F
BaF ₂	6.200	F
SrO	5.10	T.t
TiO	4.235	T.t

Metallar

Material	a, Å	Tuzilishi
CoSi ₂	5.365	F
NiSi ₂	5.406	F
ZnN	4.778	T.t

A.s – aldanma sinkli ((Z)-F43m),

O – olmos ((D)-Fd3m)

F – flyuorit ((F)-Fm3m),

T.t – tosh tuzi ((R)-Fm3m)

“Plyonka-asos” tizimining sirtiy solishtirma energiyasi quyidagiga teng:

$$\gamma_o = \gamma_{pv} + \gamma_{pa} - \gamma_{av}$$

Plyonka qanday rejimda o'sayotganligi quyidagi shartlar orqali aniqlanadi:

b) $\Delta\mu \leq 0$; $\gamma_o \leq 0$; $\Delta a = |a_n - a_a| \approx 0$ bo'lsa, qatlamma-qatlam (2D-) o'sish ro'y beradi. Bunday o'sish mexanizmi **Frank-van der Merve mexanizmi deb ataladi**.

c) $\Delta\mu > 0$; $\gamma_o > 0$; $\Delta a \neq 0$ bo'lsa, orolchali (3D-) o'sish ro'y beradi va **Fol'mer-Veber mexanizmi deb ataladi**.

d) $\Delta\mu \geq 0$; $\gamma \approx 0$; $\Delta a \neq 0$ bo'lsa, qatlamma-qatlam o'sishdan orolchali o'sishga (2D→3D) o'tib boradi. Bu mexanizm **Stranskiy-Krastanov mexanizmi deyiladi**.

Geteroepitaksial materiallar o'stirishda plyonka va asosning solishtirma sirtiy energiyalari katta farq qilsa, kerakli morfologiyali plyonka olish muammo bo'lib qoladi. Masalan $\gamma_a \ll \gamma_p$ bo'lsa, plyonka yakka-yakka orolchalar holida o'sa boshlaydi yoki plyonkada kanallar, chuqurliklar hosil bo'ladi. Bu holda ko'pincha fasetlangan (qirralari boshqa yo'nalishga orientirlangan) sirtlar hosil bo'lishi va stexiometrik tarkib keskin o'zgarishi mumkin.

Yuqorida ko'rsatib o'tilgan fizik jihatlar epitaksial o'sish jarayonida va yangi epitaksial tizimlarni hosil qilishda hisobga olish shart bo'lgan asosiy omillardir.

M-D-Ya tizimini hosil qilishda CoSi_2 (metall), Si (yarim o'tkazgich), CaF_2 (dielektrik) eng qulay materiallardir. CaF_2 -Si- CoSi_2 epitaksial qatlamlar "M-D-Ya" tizimi uchun panjara parametrlari juda yaqin bo'lgan va yaxshi sifatli geterotuzilma qatlamlar hosil qiladigan yagona tizimdir (6.1-jadval). Ikkinchi tomondan ularning fizik xususiyatlari noyob texnik ko'rsatkichga ega bo'lgan asboblarni yaratishga imkon beradi (6.2-jadval).

Si, CoSi_2 , CaF_2 (BaF_2 , SiF_2) kombinatsiyalarning qattiq jism epitaksial elektronikasida va mikroelektronikada mustaqil qo'llanilishi mumkin bo'lgan sohalari ustida qisqacha to'xtalib o'tamiz.

1. CaF_2 , SiF_2 , BaF_2 bufer qatlamlari bilan qoplangan kremniy monokristallari zamonaviy elektronikaning yarim o'tkazgichli materiallar epitaksiyasi uchun universal asos bo'lib xizmat qiladi. Hozirgi paytda A_3B_5 , A_2B_6 , A_4B_6 kabi birikmalarni o'stirishda asos eng asosiy muammo bo'lib qolmoqda. Asos sifatida ftoridlarning yupqa qatlamlari bilan qoplangan kremniydan foydalanish juda istiqbolli bo'lib, quyidagi afzalliklarga ega:

a) kremniyli monokristallar juda arzon, kristallik mukammalligi juda yuqori, yuqori mexanik mustahkamlikka ega, yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka ega (masalan, GaAs dan uch marta katta) bo'lib, hozirgi kunda diametri 200 mm gacha bo'lgan kremniyli asoslar olinmoqda;

b) kremniyli planar texnologiya – eng samarali bo'lib, uning bugungi kunda raqobatchisi yo'q;

v) 3 o'lchamli integral tizimlar olish imkonini beradi;

g) sezgir elementni yuqori epitaksial qatlamda monolit integrasiya qilish va signallarni qayta ishlash tizimini kremniyli asosda amalga oshirish imkoniyati mavjud.

6.2 – jadval.

CaF₂, Si va CoSi₂ ning kristall tuzilishi va fizikaviy xususiyatlari

Material	Si	CoSi ₂	CaF ₂
Nuqtaviy guruh	M3m	m3m	m3m
Fazoviy guruh	F α 3m	F m3m	F m3m
Tuzilishi	Olmos	Flyuorit	Flyuorit
a, Å t=20°C	5.431	5.365	5.464
(Δa/a _{Si}) %	-	-1.21	+0.61
ChKHK x10 ⁶ 1/grad	2.5	15.4	19.1
Erish h-ti, °C	1415	1326	1360
Fizik xususiyati	Ya	M	D
O'ziga xos kattaliklari	E _g =1.12 eV	ρ=15 mkOm·sm	E _g =12.1 eV

Ftoridlar ikkita maqsad bo'yicha bufer qatlamlar sifatida ishlatilishi mumkin:

- plyonkani elektr asosdan izolyasiyalash;
- plyonka va asos panjara doimiylarining mos kelmasliklarini kamaytirish, muvofiqlashtiruvchi o'tish qatlam hosil qilish. Shunday qilib, bufer qatlamli kremniylar uch o'lchamli IS olishda opto-va fotoelektron qurilmalarda, lazer asboblari va IK-detektorlar olishda qo'llaniladi.

2. Metall – epitaksial dielektrik – kremniy vertikal MDYa – tranzistorlar ishlab chiqarishning asosini tashkil qiladi. MDYa tizimi metall bazali va sizuvchi bazali tranzistorlarni ishlab chiqarish imkonini beradi. Bu tranzistorlar ayniqsa o'ta yuqori chastotalarda (150 GGs) barqaror ishlashi katta ahamiyatga ega.

3. **O'ta yuqori chastotali asboblarni yaratish.** Ko'p qatlamli $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ tizimlar quyun-prolet diodlar, Shottkning O'YuCh diodlarini olishda ishlatilmoqda.

4. **Umumlashgan monolit nurlanish detektorlarni yaratish.** Si, CoSi_2 , CaF_2 epitaksial kombinatsiyalari ul'trabinafsha va rentgen nurlari detektorlarining asosiy elementlari bo'lib xizmat qiladi.

5. **Qo'shimcha yo'nalishlar.** CoSi_2 Shottki bar'erli asboblarni, omik kontaktlar, o'zaro ulovchi tizimlar olishda keng qo'llaniladi. CoSi_2 ning Si dagi yupqa qatlamlari harorat datchiklarining aktiv qismi bo'lib xizmat qiladi. CaF_2 plyonkalari submikron litografiya (elektron rezistor sifatida), optik qabul qiluvchi qurilmalarda, opto- va fotoelektronika asboblari interferensiya manzara hosil qiluvchi qatlamlar sifatida ishlatiladi.

VII. IKKI KOMPONENTLI YARIM O'TKAZGICHLARNI EPITAKSIAL O'STIRISH

7.1. Molekulyar nurli epitaksiyasi (MNE) usuli bilan GaAs plyonkasini o'stirish

Ko'p komponentli yarim o'tkazgich plyonkalarni MNE usuli bilan o'stirish qurilmasi 7.1-rasmda keltirilgan. GaAs plyonkasini hosil qilish uchun o'ta yuqori vakuumda galliy va margimush atom yoki molekullari taglik yuzasiga o'tqaziladi. Qizdirilgan taglikning issiqlik energiyasi ta'sirida atomlar yoki molekullar harakatlanib taglik kristall panjarasining yuzasida tegishli holatlarni egallaydilar. Bunday jarayonda o'sadigan epitaksial plyonkalar katta yuzada bir xil buladi.

7.1-rasm MNE qurilmasi o'sish kamerasining sxematik ko'rinishi.

Qatlamlar sifatini yanada oshirish, jumladan qatlamning kimyoviy tarkibidagi kiritmaning katta yuzada (diametr 5 sm) bir xilligini ta'minlash, o'sish jarayonida taglikni uzluksiz aylantirib turish yo'li bilan amalga oshiriladi (7.2-rasm).

Murakkab $A^{III}B^V$ yarimo'tkazgichlarni o'stirishda o'sish tezligining cheklanishi asosan III guruh elementlarini yuzaga kelib o'tirish tezligi bilan bog'liqdir. Demak, uni o'zgartish orqali o'sish tezligini boshqarish mumkin, masalan kichik qiymatdan ($< 1 \text{ \AA/s}$) to o'ta katta qiymatlar ($35 \text{ \AA/s}$) oralig'ida. O'sish tezligining kichik qiymatlarida o'ta yupqa qatlamlarni o'stirishda qo'llanilib, qatlamning o'sish aniq nazorat qilishga erishish mumkin. Misol sifatida 7.2-rasmda GaAs va AlAs qatlamlarining ketma-ket MNE usulida o'stirilgan o'tapanjarasi keltirilgan. Bunda GaAs va AlAs qatlamlarini 10^4 marta ketma-ket o'stirishga erishilgan. Demak, yangi turdagi yarim o'tkazgich materiallarini sintez qilishning mutlaqo yangi usuli ishlab chiqilgan.

7.2-rasm. Kiritma konsentrasiyasining GaAs kristalining yuzasidan ichkari tomon yo'nalishiga bog'liqligi; kristall 4 ayl/min tezlikda Sn bilan legirlangan; konsentrsiya o'zgarishi tepada ko'rsatilganday besh nuqtada o'lchanilgan.

Atom va molekular oqimini boshqarish uchun mexanik to'siqlar ishlatiladi. Ular muayyan dastalarni o'tkazib yuborishadi yoki to'sishadi (beshinchi guruh elementlari dastalari bundan mustasno, chunki ularning bug'lari katta bosimga ega). Pnevmo-va elektromexanik boshqariladigan to'siqlar ishga tushish vaqti bir monoqatlam hosil qilish vaqtidan ancha kichik bo'lgani uchun geterochegaralar va legirlash profili keskin ko'rinishga ega bo'ladi, demak tarkib o'zgarishi va legirlash darajasi bir monoqatlam davomida amalga oshadi. Bunga isbot bo'lib 7.3-rasmda ko'rsatilgan o'zgaruvchan tartibli o'tapanjara va o'zgaruvchan legirlangan o'tapanjaralar xizmat qiladi. Keskin profilli legirlashni olish uchun legirlovchi kiritmani shunday tanlash kerakki, uning atomlari oqimini to'sish imkoniyati bo'lib, kiritma atomlari o'sayotgan qatlamga taglik yuzasida kondensasiyalanmasdan va segregasiyalanmasdan kirishi kerak.

7.3-rasm. O'tkazuvchi elektron mikroskopda olingan (100) GaAs taglikda o'stirilgan GaAs n ta yakka qatlamlari va AlAs m ta yakka qatlamlaridan

tashkil topgan $(\text{GaAs})_n(\text{AlAs})_m$ o'tapanjarasining ko'ndalang kesimi. Chapdagi qatlamlarda $n=8.0$ va $m=1.3$; o'ngdagi qatlamlarda $n=6.1$ va $m=3.4$. o'tapanjaraning chapdagi qismi uchun pastdan o'tuvchi elektronlar difraktogrammasi keltirilgan; asosiy (000) va (200) reflekslar GaAs panjarasidagi difraksiya natijasida vujudga kelgan, uning satellitlari esa o'tapanjarada ro'y beradigan difraksiyaga oid.

To'siqlarni ochish va yopish usulidan tashqari atom va molekular dastalarining intensivligini vaqtga bog'liq ravishda kerakli qonuniyat bo'yicha boshqarish mumkin. Birinchidan, dastalarning intensivligini manba xaroratini o'zgartirish yo'li bilan, ikkinchidan, o'zgartirmasdan, dasta o'tayotgan tirqish kattaligini o'zgartirish orqali o'zgartirish mumkin. Birinchi uslub afzalroq, chunki u aniqroq va ishonchliroqdir. Bu holda epitaksial qatlam o'sish tezligi sharoitga qarab tanlab olinadi: masalan, agar o'sish idishchasi (tigel') issiqlik inersiyasiga ega bo'lsa, unda idish harorati o'zgarishi vaqtida issiqlik kechikishidan qutilish uchun o'sish tezligini kamaytirish kerak. Bu kerakli oldindan ko'zda tutilgan profildagi o'zgaruvchan tarkibli va legirlash darajasiga ega bo'lgan epitaksial qatlamlar o'stirish imkoniyatini beradi. Molekulyar nurli epitaksiyasi mazmunan o'tayuqori vakuumda issiqlik changitish uslubi bo'lgani uchun, bu jarayonda oddiy niqoblarni ishlatish mumkin, ular taglikning ma'lum qismini yopib epitaksial qatlamlarni tanlangan yo'nalishda o'sishini ta'minlaydi. Bundan tashqari niqoblar yordamida taglik yuzasida turli ko'rinishdagi tuzilmalar yaratiladi. Boshqa epitaksial qatlamlar o'stirish uslublari, masalan, SFE yoki GFE oldida MNE uslubi yana bir muhim xususiyatga ega. Bu uslubda epitaksial qatlam o'stirish o'ta yuqori vakuumda amalga oshirilgani uchun bevosita o'stirish jarayonida yuzani tadqiq qilishning bir necha uslublarni bir vaqtda qo'llash mumkin. Bular orasida afzalrog'i yuzaga sirpanish burchagiga tushadigan 5 – 10keV energiyaga ega elektronlar difraksiyasi uslubidir. Olingan difraksiya tasvirlari qatlam yuzasining qayta tuzilishi va silliqiligi to'g'risida axborat beradi. Yuzaning kimyoviy

tarkibini oje-spektr tahlili orqali aniqlash mumkin, buning uchun o'stirish jarayonini qisqa vaqtga to'xtatish kerak. O'ta yuqori vakuum kamerasida qolgan gaz atmosferasini bilish uchun va epitaksial qatlamlar kimyoviy tarkibini aniqlash uchun mass-spektrometr hamda rastrlangan fotoluminessensiya uslublari qo'llaniladi.

7.2. GaAs va uning birikmalarini metalloorganik birikmalar asosida gaz fazali epitaksial o'stirish

Bu usulning eng asosiy afzalligi u qat'iy bir jinsli va keskin chegarali birikmalarining mukammal plyonkalarini olish imkonini beradi. Bu usul avvaliga Si va Ge larning epitaksial plyonkalarini hosil qilish uchun ishlatilgan, ammo asosan $A^{III}B^V$ turdagi birikmalarni va ularning boshqa atomlar bilan birikib, 3 – 4 komponentli plyonkalarini hosil qilishda ham ishlatiladi. Masalan, GaAs plyonkasini olish uchun galliyning metalloorganik birikmasi va arsin (AsH_3) bug'ga aylantiriladi va ular asos yuzasida o'zaro reaksiyaga kirishadi. 7.1 - jadvalda $A^{III}B^V$ misolida GaAs, InP va ularning qattiq fazali ko'p komponentli birikmalarini olish uchun ishlatiladigan materiallar keltirilgan.

7.1-jadval.

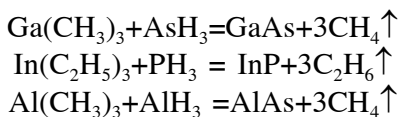
GaAs va InP xamda ularning birikmalarini olish uchun ishlatiladigan materiallar

O'stiriluvchi yarim o'tkazgach	Kerakli materiallar		Asos
	III guruh elementlari	V guruh elementlari	

GaAs GaAlAs GaInAs GaInAsP InP	Ga(CH ₃) ₃ Ga(CH ₃) ₃ , Al(CH ₃) ₃ Ga(C ₂ H ₅) ₃ In(C ₂ H ₅) ₃ Ga(C ₂ H ₅) ₃ , In(C ₂ H ₅) ₃ In(C ₂ H ₅) ₃	AsH ₃ AsH ₃ AsH ₃ AsH ₃ , PH ₃ PH ₃	GaAs GaAs InP InP InP
--	---	---	-----------------------------------

7.1 - jadvaldan A^{III}B^V hosil qilishda uning metall komponentini olishda organik birikmalar (tarkibida uglerod bo'lgan birikmalar, masalan: Ga(CH₃)₃ , In(C₂H₅)₃ , Al(CH₃)₃, ...) muhim ahamiyatga ega ekanligi ko'rinadi.

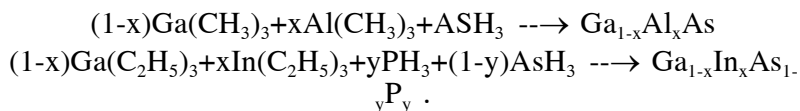
Masalan, GaAs, InP, AlAs yarim o'tkazgichli birikmalarni hosil qilish uchun quyidagi reaksiyalardan foydalanamiz:



Bu uchala reaksiyada ham ikki komponentli tizim hosil qilingan, bunda metalloorganik birikmaning yoki metalloid-vodorod birikmaning qay biri ko'p, qay biri ozligi katta ahamiyatga ega bo'lmasligi mumkin. Ammo metalloorganik birikmalarning parsial bosimini vodorodli birikma bosimidan 5 – 10 marta katta qilib olinsa, plyonkalar juda silliq va bir xil turda bo'ladi.

Ammo, 3 yoki 4 va undan ortiq komponentli birikmalar hosil qilishda yuzaga kelib reaksiyaga kirishayotgan moddalarning miqdori hosil bo'layotgan birikmaning tarkibiga, ulardagi konsentrasyon nisbatlarga juda katta ta'sir qiladi.

Quyida 3 va 4 komponentli sistemalar hosil bo'lish reaksiyalarining sxematik ko'rinishi ko'rsatilgan:



Plyonkalarni olish jarayonida ularni kerakli aralashma bilan legirlash mumkin. Buning uchun legirlovchi material bug'ga aylantiriladi va asosiy komponentlarning bug'lariga aralashtiriladi.

Metalloorganik birikmalarni gaz fazali epitaksiyasi usuli bilan olinadigan plyonkalarining asosiy ishlatilish sohalarini ko'rib o'tamiz:

1. GaAlAs/GaAs geterotizimi asosida kvant o'rali lazerlar olishda;
2. Modullashtirib legirlangan GaAlAs/GaAs geterotizimini olishda;
3. GaInAs/InP geterotizimi chegarasida ikki o'lchamli elektron gazini olishda;
4. 1,3 mkm to'lqin uzunligi kichik tok zichligida ishlaydigan geterolazerlar olishda;
5. GaInAs/InP ning kvant o'ramli geterotizimini olishda.

7.3. MNE usulida $A^{II}V^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ birikmalarni va ularning qattiq eritmalarini yaratish

MNE usulida $A^{II}V^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ birikmalarni va ularning qattiq eritmalarini yaratish – amaliy ahamiyatga ega bo'lishi bilan bir qatorda tor zonali kvant o'rali yarim o'tkazgichlar tizimlarini olish hamda ularning fizik xossalarini o'rganish imkoniyatini yaratib berish bilan juda ahamiyatli. Quyida MNE usulida ushbu materiallarni yaratish texnologiyasining zamonaviy holati va o'sish mexanizmi tushunchasi keng sharhlab beriladi. O'z sifati bo'yicha barcha talablarni qondiruvchi maxsus uskunalarning tarkibiy qismi bo'yicha epitaksial plyonkalarni olishdagi oxirgi yutuqlar yoritilib beriladi, shuningdek ushbu sohadagi mavjud bo'lgan ish yo'nalishlari va o'z echimini topa olmagan muammolar muhokama etiladi.

Kirish

Ushbu bo'limda texnik qo'llanilishi nuqtai nazaridan muhim bo'lgan yarim o'tkazgichli birikmalarning ikki xil sinfini yaratish uchun molekulyar – nurli epitaksiya usulini

qo'llash atroflicha ko'rib chiqiladi. Birinchi sinf ($A^{II}V^{VI}$ birikmalari) quyidagilarni o'z ichiga olgan: IIV va VIA guruhi elementlaridan tashkil topgan materiallar va qattiq eritmalar. Shu jumladan, Zn, Cd, Hg, S, Se, Te, turlicha ko'rinishdagi taqiqlangan zonali, yuzasi ruhlangan kristallik panjaraga ega bo'lgan yarim o'tkazgichlarni o'zida namoyon etadi. Ikkinchi sinf - $A^{IV}B^{VI}$ birikmalari – IVA va VIA elementlari guruhi, shu jumladan qo'rg'oshin va mis xal'kogenidlaridan yaratilgan qattiq eritmalar va xom ashyolardan tarkib topgandir. Ushbu materiallar va bir qancha erda kam uchraydigan elementlar xal'kogenidlari, turli xil taqiqlangan zona kengligiga ega bo'lgan tosh tuzi kristallik panjarali yarim o'tkazgichlarni o'zida namoyon etadi. $A^{II}V^{VI}$ birikmalarni o'rganishda va yaratishda MNE va unga yaqin bo'lgan texnologik usullarni qo'llash, jadal rivojlanuvchi yo'nalishdan ketish imkonini beradi.

Hozirgi kunda tor zonali qattiq eritmalarini yarim o'tkazgichlar $Hg_{1-x} - Cd_xTe$ larni olish va o'rganish tekshiruvning bosh tarmog'i deb hisoblanadi.

Quyida MNE usulida olingan $A^{II}V^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ birikmalari va ularning qattiq eritmalarini o'rganishga undovchi asosiy sabablar sanab o'tiladi.

A. Asboblarda qo'llash.

1. Issiqlik tasvirlarini olish uskunalarini uchun $Hg_{1-x}Cd_xTe$ asosidagi fotodetektorlar. $CdTe/Hg_{1-x}Cd_xTe$ asosida geteroo'tishli diodlar.

2. O'zgaruvchi infraqizil nur manbalari uchun $A^{II}V^{VI}$ birikmalari asosidagi lazerlar.

3. Elektrolyuminessent uskunalar – o'zgaruvchan va o'zgarmas tokda ishlovchi ZnS , $ZnSe$, $ZnTe_{1-x}Se_x$ birikmalari asosidagi panellar.

4. $A^{II}V^{VI}$: $CdTe$, CdS birikmalari asosidagi quyosh elementlari.

B. Tor zonali yarim o'tkazgichlar fizikasi.

1. $a=Sn$: $a=Sn$, $HgTe$, $HgSe$ turidagi tirqishsiz yarim o'tkazgichlar asosida ikki o'lchamli yonaki zonali kvant o'ralar tizimi.

2. $CdTe/InSb$, $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe$, $a=Sn/CdTe$, $a=Sn/InSb$ tizimida chegaraviy qatlamlarda kuchlanishlarni kamaytirish uchun panjaralar doimiysini moslashtirish.

3. HgTe – CdTe o'tapanjara. Infraqizil nurlanish detektori sifatida qo'llanilishi. Ushbu materialning xarorat ta'siriga chidamsizligi va qattiq eritmalarning katta maydonda doimiy yuqori darajada bo'lish zaruriyati, katta yuzali tagliklarni qo'llash imkoniyatini beruvchi past haroratda ishlovchi o'stirish texnologiyalarini ishlab chiqishni talab qiladi. Shu nuqtai nazardan MNE juda foydali texnologiyadir. Bundan tashqari, MNE qurilmalariga kiritilgan yuzani tahlillash usullari, in situ ga kontaktlash, ionli ta'sir etish va passivasiya – uskunalarini yaratishning bosh bosqichini o'rganish imkoniyatini yaratib beradi. Uskunalarda qo'llashdan tashqari ushbu texnologiya o'zining kvant o'rali tarkiblarni yaratish imkoniyatini bera olishi bilan ham o'ta qiziqarlidir. Chunki ularni yangi optik va elektrik jihatga ega bo'lgan materiallarning maxsus sinfi sifatida ham ko'rib chiqish mumkin.

O'sish mexanizmlari

MNE usulida o'sish mexanizmlarini tushunish va texnologik jarayonning muhim ko'rsatkichlarini aniqlash uchun quyidagilarni bilish zarur, qaysi boshlang'ich komponentlardan o'sish bo'lyapti va o'stirilayotgan birikmaning dissosiasiyasi qonunlari qanday. Masalan, epitaksial plyonka dissosiasiyasi tezligi, birlamchi cho'kma qoldiqlarining berilgan intensivligidagi harorat o'sishining qat'iy yuqori ko'rsatkichi o'rnatiladi. Bundan tashqari, agar alohida elementlar tuzilmalarida, ulardan bittasi dimer (yoki tetramer) bo'lgan holda, o'sish ro'y bersa, stexiometrik tarkibli birikmalar o'sishining eng past harorati ham o'sish yuzasidagi dimer dissosiasiyasi zaruriyatini o'rnatishi mumkin. Agar ikkala komponentning ham yopishqoqlik koeffisienti bir hil bo'lsa, bu holat esa taglikning (podlojka) past haroratida ro'y berishi mumkin, chiquvchi moddalar oqimini fluktuasiyasi stexiometrik bo'lmagan o'sishni keltirib chiqarishi mumkin. Agar manba sifatida olingan birikma kerakli haroratda Knudsen yacheykalaridan kongruent holda bug'lanib ketsa, oxirgi muammo echiladi.

A^{II} V^{VI} birikmalari

HgSe birikmalaridan tashqari (ular quyidagilarga ajraladi Hg va Se_m tipidagi yuqori tartibdagi polimer molekulalar) barcha $A^{IV}V^{VI}$ birikmalari quyidagi tenglamaga mos ravishda dissosiyalanadi.

$\text{MX}_{(tv)} \rightarrow \text{M}_{(gaz)} + 1/2\text{X}_{2(gaz)}$, bu erda M – metall, X esa – VI guruhidagi element. Biroq ajralish xarakteriga qarab Knudsen haroratida $A^{IV}V^{VI}$ birikmalarining bug'lanishi sharoitida quyidagi ikki guruhga ajratish mumkin.

1. $J_{X_2}/J_M = 1/2$ chiquvchi oqimlar bilan doimiy munosabatda kongruent bo'linishga uchrovchi birikmalar.

2. $J_{X_2}/J_M < 1/2$ chiquvchi oqimlar bilan vaqt munosabatlariga bog'liq bo'lgan nokongruent dissosiyalanuvchi birikmalar.

$\text{M}_X(mv)$ manbai sifatida qo'llaniladigan R_m P_{X_2} bug'lari bosimining kristallik solidus maydoni tarkibiga kuchli bog'liqligi natijasida $A^{IV}V^{VI}$ (Zn, Cd:S, SeTe) birikmalari 1 guruhga taalluqlidir. Agar solidus maydoniga tarkibning boyitilgan x qismi mos bo'lsa, $R_m > P_{X_2}$ va $J_{X_2} > 1/2 J_m$ bo'ladi. Agar boyitilgan M maydoniga tartib mos kelsa, teskari muammosi haqqoniy bo'ladi. Jamlanma tarkibi uchun ham, $J_{X_2}/J_M = 1/2$ ko'rinishdagi stasionar holat belgilab qo'yiladi. Bu xodisa CdTe holat uchun CdTe ko'rsatmalariga ega birikmalar uchun mass – spektrometrik izlanishlar natijalariga qarab tasdiqlanadi. Boshqa tarafdin esa $A^{IV}V^{VI}$ guruhidagi (Hg:S, Te) birikmalari ($< 200^\circ\text{C}$) past haroratlarda nokongruent bug'lanadi, Hg ning uchuvchanligi va Hg – x aloqasining zaifligi natijasida $M > J_{X_2}$ ko'rinishda bo'ladi. Bunday tez farqlanuvchi atvor CdTe va HgTe birikmalar ustida bug'lanishning Knudsen sharoitlarda ajralayotganda bug' komponentlarini bemalol ko'rish mumkin.

7.4-rasmda modullangan jamlanma mass – spektrometriyasi metodida olingan ushbu birikmalar tekshiruv natijalari keltirilgan. 400°C xaroratdan yuqori bo'lganda CdTe stasionar sublimasiyasi, bundan past bo'lganda xaroratlardagi HgTe ning nokongruent bo'linishidan keskin farqlanadi. HgTe ning ustida RN_G ning dreyfi va doimiy emasligi Te(tv) ustki qavatida umumlashgan Hg ning hosil bo'lishi oqibatida ro'y beradi. Keyingi Hg sarfi ushbu qavatning hajmda ustki qatlamga o'tish diffuziyasi tezligi

bilan chegaralanadi. Elementar Cd va Te – Cd va Te² manbai sifatida qo'llanilganda, MNE ning boshlang'ich rivojlanishi natijasida yaratilgan HgCdTe plyonkalarining yomon elektrik xislatlari va ustki qatlamining past sifatiga, ehtimol, qisman Hg oqimining ushbu doimiy emasligi sabab bo'lgandir. Hatto agar HgTe bug'lantiruvchi yacheyka J_{Mg} oqimini tekshiruvchi mass – spektorni o'z ichiga olgan, teskari aloqa sistemasi vositasida boshqarilsa-da, salmoqli va doimiy o'zgaruvchan de oqimi hajmi (HgTe bo'linishi oqibatida yuzaga kelgan), plyonkadagi tarkibning doimiy emasligiga olib kelishi mumkin (masalan, Te presipitatlari paydo bo'lishiga). Ustki qatlam Te sining boyitilgan strukturasi nostabilligi, Hg kabi oqimlarning qisqa fursatli otilish intensivligining kuzatilishi sababi hamdir. Bunga zid ravishda MNE usulida CdTe/Hg_{1-x}Cd_xTe fotodiodlarini va yuqori sifatli CdTe plyonkalarini yaratishda CdTe stasionar kongruent sublimasiyasi ustunlik qiladi.

7.4 – rasm. Bug'lanishning Knudseni sharoitlarida bosimning haroratga bog'liqligi tasvirlangan qiyshiq Arreniuslar. O'lchamlar modullangan jamlanma mass – spektrometriyasi yordamida amalga oshirilgan. HgTe juda past haroratlarda ajralishini belgilab qo'yamiz, $T < 200$ °C bo'lganda toza Hg ning manbaidir. Biroq bu nokongruent ajralma ajraluvchi moddaning simob bilan birikishiga va PHe ning kamayishiga olib keladi. Bunga teskari holatda, CdTe kongruent bo'linmalarga ajraladi va bu holat juda baland haroratlarda ro'y beradi.

Tor zonali materiallar Hg_{1-x}Cd_xTe ning nokongruent bo'linishi, shuningdek HgTe va CdTe dissosiasiyasi jarayonlaridagi katta farqni aks ettiradi. Bu holat ham o'sish jarayonini past haroratda o'tkazish zaruratini ko'rsatadi.

A^{II}V^{VI} birikmalarini va ularning qattiq eritmalarini yaratish uchun birikma elementlariga kiruvchi alohida manbalardan foydalaniladi. Biroq aniq ro'y beradigan fluktuasiya natijasida qoniqarli sifatli plyonkalarining birlamchi jamlanmasi intensiv muomalasi, o'z – o'zini

boshqarish mexanizmi ishlaganda va faqat baland haroratda o'sishida ro'y beradi. Ilk bor uchragan bunday tartib ikkala element uchuvchan bo'lsa va atomlar qurilishi uchun yagona imkoniyat $A^{II}V^{VI}$ turidagi birikmalarning ustki qatlamda paydo bo'lishi reaksiyasi bor bo'lsagina harorat o'sishida haqiqiydir.

7.4. MNE usulida $A^{II}V^{VI}$ birikmalarni va ularning qattiq birikmalarini yaratish

(Zn, Cd:Se, Te) sistemasi

Turli tagliklarda, shu xisobda GaAs, CdS, CdSe, CaF_2 va BaF_2 larda (Zn, Cd:Se, Te) birikmalarining geteroepitaksial etishtirish haqida, ilk bora 1975 yili axborot berilgan. Biroq bu izlanishlarda faqat ustki qatlam morfologiyasigina o'rganilgan, elektrik va optik o'lchamlar natijalari olib borilmagan. In bo'yicha qo'shimcha metallar bilan boyitilgan, ushbu plyonkalarining fotolyuminessent xossalari o'rganilgan va InSb tagliklarida etishtirilgan, kelishilgan parametrlar bo'yicha CdTe – I turidagi panjara plyonkalar avvalgilaridan yaqinda olingan. MNE usulida GaAs tagliklarida ZnSe qavatlarida boyitilgan Ga larni etishtirish tekshirilgan va o'sish shartlarining qulaylashtirilgan sharoitida etishtirilgan plyonkalarining intensiv ko'k fotolyuminessensiyasi kuzatilgan.

CdTe birikmalari. (111) va (001) orientasiyasi vositasida CdTe tagliklarida CdTe plyonkalarini MNE usulida etishtirish haqida 1981 yili axborot berilgan. CdTe ning bir manbasini qo'llagan holda podlojka (taglik) xaroratining xona xaroratidan to $250^{\circ}C$ gacha bulgan diapazonida usish jarayoni urganilgan. Izlanishda (111) orientasiyasiga ega podlojka(tagligi) ning kaysi tarafi karama-karshi (polyar) tomoni ekanligi belgilanmagan, birok barcha xarorat diapazonlarida bir polyar karama karshi-tomonidagi epitaksal usishi amalga oshirildi. Usish jarayoni vaktida utkazilgan, (DBE) aksida tezlashgan elektronlar difraksiyasi uslubidagi tekshiruvlar natijalari shuni kursatadiki, (111)

orientatsiyali podloshkalarda plyonkalarni ular ustki qavatini **At** ionlari bilan bombardirovkasi va keyingi 300 °C ostida kuydirishadan so'ng etishtirish (2x2) ustki qavat rekonstruksiyasi sharoitlarida ro'y beradi. Skanerlovchi elektron mikroskop vositasidagi tekshiruvlar shularni ko'rsatdiki, 200 °C da etishtirilgan qatlamlar usti silliq va nuqsonsiz bo'ladi. Plyonkalarni yuqoriroq bo'lgan xaroratlarda etishtirilganda DBE kartinasi yomonlashadi, ustki qatlam esa g'adir – budirlashadi. 200 °C xaroratda 3000 Å qalinlikdagi bufer qavatini etishtirilganda quyidagilar aniqlangan: xarorat xona xaroratigacha tushganda ham epitaksial o'sish davom etadi. (001) taglik orientatsiyasi xolatida epitaksial o'sish 80 – 200 °C xarorat diapozonida kuzatiladi. 80 °C dan pastlaganda polikristallik o'sishga o'tish ro'y beradi, bu holat DBE kartinasida ikkilanma dog'lar paydo bo'ladi. Biroq bu o'tish ro'y berayotgan o'sish tezligi ham, lyuminessent xossalar yoki elektrik xossalar tekshiruvi bo'yicha ko'rsatmalar ham, (diametri 5 sm) bo'lgan kata maydonli plastin ko'rinishida etarlicha emas. InSb ustki qavatida aks ettirilgan va ion bombardirovkasiga uchratilmagan panjara parametrlari bilan moslashgan xolatda etishtirilgan CdTe plyonkalari CdTe kengligi bilan taqqoslanganda juda qiyshiq tor tebranishga egadirlar.

7.5-rasmda 200 °C etishtirilgan, 0,8 mkm qalinlikdagi CdTe plyonkalari uchun ikki kristallik monoxromator yordamida olingan qiyshiq tebranish ko'rsatilgan; u CdTe hajmli namunasi uchun qiyshaytirib qo'yilgan. Bunday sifatdagi qavatlar samarali fotolyuminessensiya va n – tipdagi o'tkazuvchanlikga ega.

7.6 – rasmda 150 °C da etishtirilgan, doimiy panjara bilan moslashtirilgan 1,5 mkm qalinlikdagi CdTe plyonkasi fotolyuminessensiyasi spektri berilgan. Neytral akseptor (Ag) da bog'langa, ekiston rekombinatsiyasi bilan shartlangan, 1,88 eV intensiv cho'qqisi ko'rinadi. 1,543 eV dagi cho'qqi ehtimol, Li aralashmali plyonka mavjudligi bilan shartlangan, donoroakseptor juftligi rekombinatsiyasi bilan bog'liq. 1,434 eV maksimum yaqinlikdan nurlanishning keng chizig'i, chuqur akseptor majmua **VcdInca** dagi nurlanuvchan rekombinatsiya sifatida ro'yxatga olingan. Bu eng baland rivojlanish nuqtasi (pik) In ning CdTe dagi konsentratsiyasi

bilan o'zaro munosabatga kirishish (korreliuet) aniqlangan. Ehtimol, 1,469 eV dagi Cu ning donor – akseptor lyuminessensiyasi bilan bog'liq bo'lgan ulushini qo'shadi. Ayni vaqtda berilgan namunada (MBL 31) $((n_D - n_A) \approx 10^{17} \text{ sm}^{-3})$ erkin elementlarning yuqori konsentrasiyasi sabablari aniqlanmagan. Ikkilamchi ionlarning mass – spektriyasi yordamida In ning CdTe dagi chuqur diffuziyasi kuzatilmagan.

7.5-rasm. Ikki kristalli tebranish egri chiziqlari: 1 – CdTe ning massiv namunasi uchun, 2 - CdTe yuzasida 200⁰ C da o'stirilgan 0,8 mkm kalindagi CdTe plyonkasi uchun, 3 - CdTe plyonkasi Insb yuzasida o'stirilgan.

Bu va boshqa namunalarda ham shu aniqlanaganki, erkin elektronlar konsentrasiyasi doimo plyonka ustki qalinlik bo'yicha joylashadi. Bundan tashqari, keyingi CdTe ning o'sha avval boshi materiallardan etishtirishda RSRE, Mol'vern firmasi xodimi M. Vil'yamson ishlarida erkin elektron konsentrasiyasining $\leq 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ darajagacha salmoqli kamaytirishga erishildi. Bu boshlang'ich moddadan uchuvchan qo'shimchalar desorbsiyasi hisobiga manbani tozalash natijasi oqibati bo'lishi mumkin. MBL 31 namunasi uchun asosiy bo'lmagan tashuvchilar diffuziyasi uzunligini o'lchash shularni ko'rsatdiki, bu ko'rsatkichlar qavat qalinligidan ko'proq. Bu o'rganilgan, tekshirilgan plyonkalarining yuqori tarkibiy mukammalligidan dalolat beradi. Yuqori $\sim 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ darajalarda etishtirilgan qavatlar, shuningdek erkin elektronlar konsentrasiyasi $< 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ egadirlar va unga katta bo'lmagan biroq, o'sish xarorati ko'tarilishi bilan panjara ko'rsatkichlarining salmoqli o'sishi kuzatilgan. Ushbu effektini sinchiklab tekshirish uchun yanada katta vazifalarni amalga oshirish zarur bo'lsada, aniqlanishiga, o'sish xaroratlarida Cd ning Te ga qaraganda ko'proq uchuvchanligi natijasida, yuqori (200 $^{\circ}\text{C}$) o'sish xaroratlarida ustki qatlamning vaqtinchalik xolatlarida Cd disorbsiyasi ustunligi mavjud bo'lishi mumkin. Bu esa kadmiy vakansiyasini qatlamda joylashishiga va extimol, ortiqcha Te ga olib kelishi mumkin. Bu imkoniyatlarni

tekshirish uchun hozirgi kunda bo'lim chegarasining yaqin hududlari va shaffof elektron mikroskop ko'ndalang kesishuvchan qatlamlari yordamida o'rganish amalga oshirilmoqda.

7.6-rasm. MNE usulida 150 °C o'sish xaroratida (001) orientatsiyasida etishtirilgan InSb tagliklaridagi qalinligi 1,5 mkm bo'lgan CdTe ning 4 K qatlamidagi fotoluminessensiyasi spektri. Namuna MBL 31, NIT – $NA=1,7 \times 10^{17} \text{ sm}^{-3}$. Past xaroratda yaratilgan epitaksial plyonka uchun lyuminessensiyaning yuqori intensivligi katta yutug'i hisoblanadi.

(001) orientatsiyasiga ega InSb tagliklarida CdTe ni MNE usulida etishtirish (yaratish) o'rganilgan. Bunda CdTe qavati oldida bevosita InSb bufer qavati etishtirilgan. O'sishga qadar InSb ustki qavati rekonstruksiya «psevdo(1x3)» - stabillashgan Sb bo'lgan. 200 °C da CdTe o'sishi vaqtida ustki rekonstruksiya (2x1) kuzatilgan. Maxsus metallar bilan boyitilgan plyonkalar erkin tashuvchilar $10^{13} - 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyasida o'tkazuvchanlikka ega n – turida yaratilgan. Knudsen yacheikasini In manbasi sifatida qo'llanilganda $10^{16} - 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ diapozonida ustunlik darajasini boshqarish mumkin bo'lgan. Maksimum 1,43 eV yaqinlikdan fotoluminessensiyaning keng yuqori nuqtasi intensivligi, In ustunligi darajasi oshishi bilan to $\sim 5 - 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ qadar o'sgan va kelgusida boyitishga chiqarilgan. Bundanda yuqori ustunlik darajasida, 1,58 eV bo'lganda chetki lyuminessensiya intensivligi kamayganligi, ehtimol, In presipitatlarning paydo bo'lishi sababli plyonka sifatining yomonlashuvi natijasidir. Olingan plyonkalarda In ustunligi 10^{16} sm^{-3} dan past darajada bo'lgani haqida ma'lumotlar yo'q.

HgTe – CdTe ko'p qavatli tarkibini navbatdagi tekshiruvlarida quyidagilar aniqlandi: CdTe ning bir manbaidan foydalanganda plyonkalar sifati DBS kartinasidan kelib chiqqani kabi, 120 °C dan ko'ra 200 °C o'sish xaroratida yuqoriroqdir. Biroq 200 °C da yaratilgan, CdTe plyonkalari uchun rentgen qiyshiq tebranishlari, CdTe

tagliklari qiyshiq tebranmalari (3 – 4 burchak daqiqalari) bilan solishtirilganda juda keng (30 burchak daqiqalari) bo'lgan. Bu shuni anglatadiki, defektlar, masalan: zeren dislokasiyalari va ko'p qirrali chegaralari taglikdan qatlam ichiga o'tadi va unda ularning soni keskin o'sadi. Ushbu dalil CdTe taglikdagi gomo – va geteroepitaksial o'sishining eski muammolarini oldingi planga chiqaradi, aynan esa CdTe hajmli kristallarining juda past tarkibiy mukammalligi muammosini, demakki, ulardan yaratilgan tagliklarni ham. Bu muammo qo'shimchali eritmalarni yarata yotganda ko'p qirrali chegaralar shakillanishi va egizaklanishi mumkinligi haqidagi kuchli farazlar sbabli kelib chiqadi: CdTe bu xodisaga aynan ta'sirchan, chunki u juda yumshoq (300 K da Knup bo'yicha qattiiqligi 45) va juda past issiqlik o'tkazuvchanligiga ega ($0,07 \text{ Vt} \cdot \text{sm}^{-3} \sim \text{K}^{-1} \text{ s}^{-1} \sim 300 \text{ K}$ bo'lganda). Tekshiruvlar turli manbalardan olingan rentgen tipografiyasi ikki kristallik monoxramati yordamida yaratilgan CdTe plastinalarida bir – biridan orientasiyasi bo'yicha 10 – 20 burchak daqiqaga farqlanuvchi, bir necha yuz mikrometr xajmdagi zerenlarning mozeichnuyu strukturasiga duch kelinadi. Bunday plastinalarning ikki kristallik rentgen difraksiyasi rentgen qiyshiq tebranishlari, odatda eniga 180 – 200 burchak daqiqasida birinchi nur bilan kesishuvi, kam qirrali chegara sababli paydo bo'luvchi ko'plab yuqori nuqtalarga ega. Bunday ikki kristallik qiyshiq tebranish 7.5 – rasmda keltirilgan.

Mualliflar tomonidan taqdim etilgan bu muammoning yana bir echimi geteroepitaksial panjara parametrlarining bir xilligidir. Mukammal tarkibli CdTe plyonkalarini olish uchun, to'siq ko'rsatkichlari ($5 \cdot 10^4$) va InSb ($a = 6,4798 \text{ \AA}$, 25°C) hamda CdTe ($a = 6,4829 \text{ \AA}$, 25°C) lar orasi ideal mosligini mavjudligidir. InSb tagliklarida kam qirrali chegaralar yo'q, ular dislokasiyaning past jipsligiga ega (500 sm^{-2}).

Nuqsonlar bilan bog'liq keng polosalarga ega past intensiv fotolyuminessensiya spektrlari kuzatilgan. Bu esa plyonkalarining yomon strukturasi oqibati bo'lishi mumkin. Bu esa haqqatga yaqin, ma'lumki, tagliklarni qotirish uchun indiy pripoyini qo'llash kuchlanishga va tagliklar hamda

epitaksial qatlamlarning turli deformasiyalariga olib keladi. Uglerod uglerod asosidagi supsenziyalarini qo'llash tagliklarni qotirish muammosini echishi mumkin. CdTe ni MNE usulida InSb(111) ustki qatlamida etishtirish yaxshi natija beradi. Biroq ustki qatlamni tozalash uchun, 230 °C xaroratdan ancha katta bo'lgan xaroratgacha InSb tagliklarini qizdirishdan foydalanilgan. Bunda InSb (111) ustki qatlamidan Sb ning ko'plab bug'lanib ketishi boshlanadi. Ko'rinib turibdiki, bu InSb ustki qatlamida In mikroajrilmalarning shakllanishiga olib keladi. Bu esa plyonkalarining past kristallografik sifatining sababi bo'lgan, extimol, bu haqida esa rentgen difraksiyalari qiyshayishidagi kartina ossillyasiyalari yoylari dalolat berib turibdi. Dar haqiqat olingan CdTe plyonkalari, InSb tagliklarida cho'ktirilgan CdTe plyonkalari kabi yarim izolyasiyalovchi bo'lgan. Muallifning hamkorlar bilan aniqlanishicha, yomon kristallografik sifatli CdTe plyonkalari (ya'ni keng qiyshiq tebranmali) albatta yarim izolyasiyalovchi bo'lib chiqqan. Bu esa, extimol, zeren chegaralarida qopqonlar va boshqa nuisonlar paydo bo'lishi natijasidir.

7.5. Epitaksial qatlamlar yuzasida kontaktlar hosil qilish

Metall bilan yarim o'tkazgich o'zaro kontakt qilinganda ular orasida to'g'rilash xususiyatiga ega bo'lgan kontakt hosil bo'lishi 1874 yilda aniqlangan. 7.7–rasmda ideal hol uchun metall va yarim o'tkazgichning elektron tuzilishi, ular kontaktga kirmasdan oldingi va keyingi holati tasvirlangan.

Umuman olganda, har qanday to'g'rilovchi kontaktida ikki jism chegarasida to'siq xosil bo'ladi. Bu to'siq "Shottki to'sig'i" deyiladi. Uning kattaligi: $\varphi_B = \varphi_M - \chi$

φ_B - Shottki bar'erining kattaligi, φ_M - metallning chiqish ishi, χ - yarim o'tkazgichning elektron qabul qiluvchanligi, d – metall va yarim o'tkazgich kontakt qilingandan keyingi oraliq (kontakt kengligi), E_F – Fermi sathi.

7.7-rasm. Energetik diagramma: *a* – metall; *b* – yarim o'tkazgich; *c* – matall-yarim o'tkazgich kontakti.

Metall bilan yarim o'tkazgich qo'shilganda omik yoki to'g'rilovchi kontakt hosil bo'lishi yarim o'tkazgichning turiga xamda uning chiqish ishiga bog'liq bo'ladi (7.8-rasm).

Metall – yarim o'tkazgich kontaktida o'tish qatlami ichida termodinamik muvozanat Fermi sathlarining barobarlashishi tufayli o'rnatiladi. 30 – rasmdagi holni (ya'ni $\chi < \varphi_v$) ko'rib o'tamiz. Metall – yarim o'tkazgich kontakti vujudga kelgach elektronlar yarim o'tkazgichdan metallga o'ta boshlaydi. Natijada metallning sirti yarim o'tkazgichga nisbatan manfiy zaryadlana boshlaydi. Bu zaryadlanish d oraliqda elektronlarning o'tishini to'xtatadigan kuchlanish E ga teng bo'lgan elektr maydoni vujudga kelguncha davom etadi. Bunda metall – yarim o'tkazgich chegarasida hosil bo'ladigan kontakt potentsiallar farqi (KPF) $\Delta\varphi$ quyidagiga teng bo'ladi:

$$\Delta\varphi = \chi_m - \chi_{y/o'}$$

Bunda d oraliqda elektr maydonning kuchlanishi

$$E = \frac{\Delta\varphi}{ekd}$$

7.8-rasm. Har xil metall yarim o'tkazgich kontaktlarining energetik diagrammasi

ga teng bo'ladi: e – elektron zaryadi, k – oraliq d ning dielektrik doimiysi.

Materialdan ketgan yoki unga kelgan ortiqcha elektronlarning qanday qalinlikdan (L) chiqqanligini quydagi formuladan topamiz:

$$L = \frac{\chi_m - \chi_{y/o'}}{4\pi e^2 \kappa n d}$$

n – moddaning birlik xajmidagi elektronlar konsentrasiyasi.

Misol, $\chi_m - \chi_{y/o'} = 1 \text{ eV}$, $k=\omega$, $n_{ya}=10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $n_m=10^{22} \text{ sm}^{-3}$ va $d \approx 10^{-7} \text{ sm}$ bo'lsa, $L_{ya/o'}=5 \cdot 10^{-3} \text{ sm}$, $L_m \approx 5 \cdot 10^{-11} \text{ sm}$ bo'ladi. Demak metallda L qalinlik juda kichik bo'ladi, yarim o'tkazgichda esa u sezilarli kattalikka ega. Bunda yarim o'tkazgichdan metallga elektronlar chegaraga yaqin joydan eng ko'p o'tadi. Chiqib ketgan elektronlar soni

kontakt sohasidan (chegaradan) uzoqlashgan sari kamayib borib L qalinlikda 0 ga teng bo'ladi. Demak, yarim o'tkazgichda kontakt yuzasida elektronlar soni eng kam va L qalinlikdan keyin esa kontaktga kirmagan holdagiga (n_0) teng bo'ladi.

$$n(x) = n_0 e^{-\frac{\varphi(x)}{kT}}$$

n_0 – yarim o'tkazgichni ichki ($x \geq L$) qismidagi, ya'ni $\Delta\varphi=0$ bo'lgan joyidagi elektronlar konsentrasiyasi.

Elektronlarning chiqib ketishi kontakt yaqinida yarim o'tkazgich zonalarining egilishiga olib keladi, bu egilish kengligi L ga teng bo'ladi.

Real xolda xar handay yarim o'tkazgichning yuza hismida yupka okcid hatlami bo'ladi. Masalan, kremniyning yuzida kremniy oksidi mavjud bo'ladi ($SiO_1 \rightarrow SiO_2$). Shuning uchun xam real sistemalarda biz xoxlaymizmi, yo'kmi, xar doim yarim o'tkazgich va metall kontakti chegarasida okis katlami mavjud bo'ladi. Kontakt xosil qilishdan oldin yuqori vakuum sharoitida yarim o'tkazgich va metall juda yaxshilab tozalangan bo'lsa, okis katlami juda xam yupka bo'ladi ($a < 20 - 25 \text{ \AA}$). Okis katlamini xisobga olsak, kontakt yakinidagi katlamlarning zonaviy tuzilishini 7.9 – rasmda keltiril-gan shaklda tasvirlash mumkin bo'ladi.

IMS elementlari elektrodleri va kontakt maydoncha oralig'ida tok o'tqazuvchi metall birikmalar xosil qilishda termovakuumli changlatish, bug'lantirish jarayonlaridan foydalaniladi. IMS dagi elementlararo birikmalar yuzalari aktiv va passiv elementlar yuzalariga teng ,xatto katta bo'lishi xam mumkin.

Metallash usuliga talab berilgan elektr parametrlari, yaroqli buyumlar chiqish prosent, ishonchlilik, tayyorlashning oddiyligi va narxiga qarab qo'yiladi.

Kremniydagi aktiv va passiv elementlar elektrodlerini metallash tizimi kichik qarshilikli kontakt xosil qilish imkoniyatini berishi kerak. Metall dielektrik bilan yaxshi birikma xosil qilishi kerak, plenkaning juda ingichka bo'laklarga bo'linishiga imkon berishi kerak va tashki

chiqishlarni biriktirishga qo'llaniladigan qotishma bilan birikma xosil qila olishi kerak.

Ko'p qatlamli strukturalar hosil qilishda yarimo'tkazgichli plastinalar ustida quyidagi qo'shimcha operasiyalar o'tqaziladi:

1. Dielektrik xosil qilish.
2. Pastki metall plenkaga kontakt talab qilingan joyda dielektrikda tirqishcha ochish uchun fotolitografik qayta ishlov berish.
3. Metallning ikkinchi qatlamini o'tqazish va unda rasm hosil qilish.

7.9 – rasm. *Yupqa oksid qatlamiga ega bo'lgan yarim o'tkazgich va metall orasidagi Shottki bar'erining ko'rinishi.*

Alyuminiyli birikmalar

Kremniyli IMS texnologiyasida elementlararo birikmalarni tayyorlashda alyuminiyli metallash keng qo'llaniladi. Buning natijasida IMSni tayyorlashda faqat bitta metallardan foydalaniladi. Bu esa texnologiyani soddalashtiradi. Vakuumsda alyuminiyli bug'lantirish eng ko'p o'rganilgan va oson bajariladigan jarayondir. Bundan tashqari alyuminiy oksidlarga yaxshi adgeziyalanadi. Alyuminiy plyonkalariga fotolitografiya usullari yordamida kerakli konfiguratsiyalarni hosil qilishi uchun oson ishlov berish mumkin. Alyuminiy ayriqcha qizdirish tigellaridan yoki elektron nurlar yordamida bug'lantiriladi. IMS larda alyuminiy plyonkasining qalinligi bir mikron atrofida bo'ladi. Kerakli rasm, ya'ni konfiguratsiya hosil qilingandan so'ng alyuminiyli qoplamaga kremniy bilan kichik qarshilikli kontakt xosil qilish uchun termik qayta ishlov beriladi.

Bunday kuydirishning rejimi 550 °C da bir necha minutni tashkil etadi. Alyuminiy p - va n⁺ - tipli kremniy bilan kichik omli kontakt xosil qiladi va mana shunday qatlamlardan IMSda foydalaniladi.

Omik kontaktlar

Omik kontaktlar ishchi tok diapazonida qarshiligining to'g'ri chiziqliligi bilan ifodalanadi. Kontakt qarshiligini kamaytirishning asosiy usullaridan biri yarim o'tkazgichning sirtini kuchli legirlashdir. O'tkazuvchanligi n - turli kremniyga alyuminiyli kontakt xosil qilinsa uning qarshiligi p - turga qaraganda 100 marta yuqori bo'ladi. SHu sababli p -turli kremniyga kontakt hosil qilish uchun molibdenli idishdan termik bug'lantiriladigan oltindan foydalaniladi. Bunday plyonkalarining qalinligi 20 nm dan oshmaydi. Plyonka 500 °C da kuydiriladi va uning sirtiga $0,5 \div 1,5$ mkm bo'lgan kumush qatlami qoplanadi.

IMS ning aktiv sohasi bir necha kv. mkmdan ortmaydi va ulardan elektrod uchun chiqish chiqarish qiyin. Chiqish chiqarish uchun kontakt maydonchalari xosil qilinadi. Bu maydonchalarning bir qismi aktiv soha bilan biriktiriladi, katta periferiya qismi esa kremniy dioksidi sirtida joylashadi. Kontakt maydonchalarining qatlam osti titan-nikel, titan - kumush, titan - oltin yoki toza alyuminiydan tayyorlanadi.

Hozirgi vaqtda IMS ishlab chiqarishda omik va to'g'rilovchi kontaktlar qiyin eruvchi metallarning silisidlari asosida hosil qilinmoqda.

Adabiyotlar

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника. Под ред. Н.Д. Федорова – М.: Радио и связь, 1998.
2. Технология тонких плёнок. Под ред. Л.Майселла, Р. Глэнгл. I и II т. – М.: Радио, 1997.

3. Физика тонких плёнок. Под ред. Г.Хасса. IV и V. – М.: Мир, 1972.
4. Молекулярно – лучевая эпитаксия и гетероструктуры. Под ред. Л. Ченга. К.Полса. – М.: Мир, 1989.
5. Нормурадов М.Т., Умирзаков Б.Е., Ражаббаев Р.Р. Каттиқ жисм сиртларининг иккиламчи электрон спектроскопияси: Ўқув ўлланма. – Т.: Конструктор, 1993.
6. Нормурадов М.Т., Умирзаков Б.Е., Пармонқулов И.П. Электрон техника махсулотлари ва қурилмалари технологияси. Дарслик – Т.: Мехнат, 2005.
7. Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология: простое объяснение гениальной идеи.: Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2004.
8. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Электронная спектроскопия наноплёнок и наноструктур, созданных ионной имплантацией. – Т.: ТашГТУ, 2004.
9. Алексенко А.Г. Основы микросхемотехники. 3-е изд. – М.: ЛБЗ, 2002.
10. Нанотехнологии в электронике. Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005.
11. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники. – М.: Логос, 2006.
12. www.membrana.ru, www.new-garbage.com, www.stalinit.com, www.ntpo.com, www.vacuumtex.com

MUNDARIJA

I. Epitaksial qatlamlarni o'stirish usullari to'g'risida umumiy ma'lumotlar	3
1.1. Elektron asboblarning rivojlanishida yupqa qatlamlarning ahamiyati.....	3 5
1.2. Epitaksiyaning turlari, o'stirish usullari.....	7
1.3. Tagliklarni tayyorlash.....	17 20
1.4. Kristallarning yuzasiga vakuumda ishlov berish (silliqlash va tozalash).....	20 24
II. Qattiq jism yuzalarining tuzilishi	26
2.1. Uch o'lchamli kristallarda atomlarning joylashishi.....	30 30
2.2. Qattiq jism yuzasida atomlarning siljishi.....	34
2.3. Kremniy va arsenid galliy monokristallarining uzasida atomlarning joylashishi.....	36 38
III. Yuqori vakuum sharoitida epitaksial plyonkalarini hosil qilish usullari	45
3.1. Molekulyar-nurli epitaksiya.....	45 55
3.2. Qattiq fazali va reaktiv epitaksiya.....	57
3.3. Ionli aktivlashtirish usuli bilan qattiq jism yuzalarida yupqa plyonkalar hosil qilish.....	60 62 62
3.4 Ion implantasiya usuli bilan yuzalarni modifikatsiya qilish va yupqa plyonkalar olish istiqbollari.....	66
IV. Yupqa qatlamlarni o'stirish bosqichlari	67 72

4.1. Yupqa qatlamlarda markazlar (o'simtalar) hosil bo'lish nazariyasi.....	74
4.2. Epitaksial plyonkalar olishning bosqichlari o'sish kinetikasi.....	79
4.3. Polikristall plyonkalarining o'sish jarayonida nuqsonlarning vujudga kelishi.....	82
4.4. Monokristall plyonkalardagi nuqsonlar.....	84
V. Kremniy yuzasida epitakcial plyonkalar o'stirish	89
5.1. Kremniy yuzasida kremniy o'stirish (avtoepitaksiya)....	94
5.2. Kremniy epitaksial qatlamlarida kristallografik nuqsonlar.....	10
5.3. Kremniy monokristali yuzasida CoSi_2 ni epitaksial o'stirish.....	0
5.4. MNE va QFE usullarining afzalliklari va kamchiliklari	
VI. Uch qatlamli metall-yarim o'tkazgich-dielektrik geteroepitaksial tizimlar.....	
6.1. Kubik panjarali materiallarni epitaksial o'stirish.....	
VII. Ikki komponentli yarim o'tkazgichlarni epitaksial o'stirish.....	
7.1. Molekulyar nurli epitaksiyasi (MNE) usuli bilan GaAs plyonkasini o'stirish.....	
7.2. GaAs va uning birikmalarini metalloorganik birikmalar asosida gaz fazali epitaksial o'stirish.....	
7.3. MNE usulida $A^{II}V^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ birikmalarni va	

- ularning qattiq eritmalarini yaratish.....
- 7.4. MNE usulida $A^{II}V^{VI}$ birikmalarni va ularning qattiq birikmalarini yaratish.....
- 7.5. Epitaksial qatlamlar yuzasida kontaktlar hosil qilish....
- Adabiyotlar**.....
-