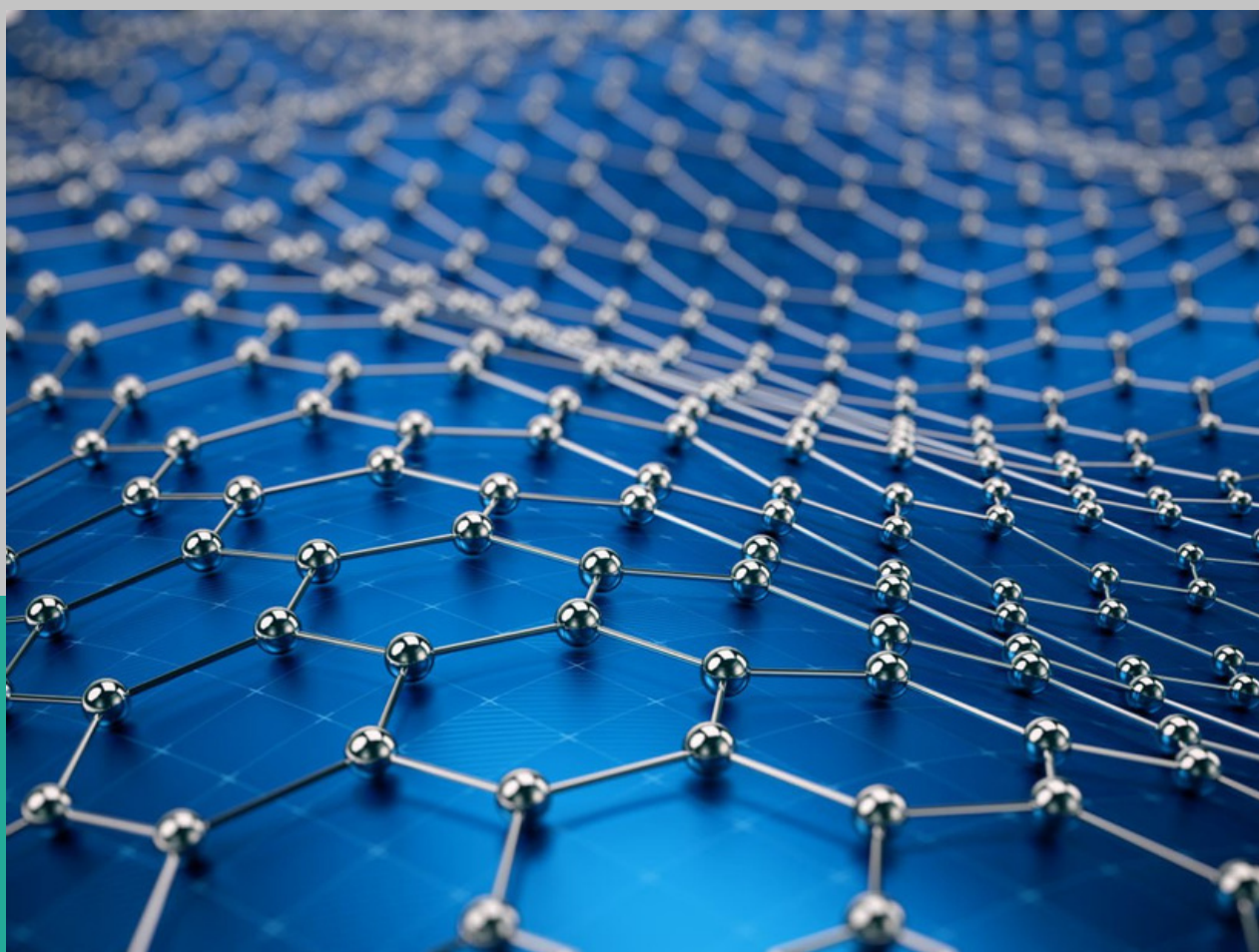


ISBN: 978-93-54648-21-2

STUDYING THE FORMATION MECHANISMS OF NiSi_2 NANOLAYER FORMED ON THE SURFACE AND SUBSURFACE LAYER OF Si SINGLE CRYSTAL BY SOLID PHASE EPITAXY METHOD



Author:

Mustafoeva Nodira
Moyliyevna

Published by

Novateur Publication

466, Sadashiv Peth, M.S.India-411030
novateurpublication.org

Mustafoeva Nodira Moyliyevna

STUDYING THE FORMATION MECHANISMS OF
NiSi₂ NANOLAYER FORMED ON THE SURFACE
AND SUBSURFACE LAYER OF Si SINGLE
CRYSTAL BY SOLID PHASE EPITAXY METHOD

QATTIQ FAZALI EPITAKSIYA USULI BILAN Si
MONOKRISTALINING YUZA VA YUZAOSTI
QATLAMIDA HOSIL QILINGAN NiSi₂
NANOQATLAMINI ELEKTRON, OPTIK VA
ELEKTROFIZIK XUSUSIYATLARI

Ushbu monografiyada Si yuza va yuzaosti qatlamlarida nanoo'lchamli MeSi_2 strukturalarining hosil bo'lish mexanizmlarini aniqlash va ularni olish, shuningdek, ularning tarkibi, tuzilishi va fizik xususiyatlarini aniqlashga katta e'tibor qaratilmoqda. Plyonkali materiallarning elektronika sohasida ishlatilishida eng asosiy o'rinni epitaksial plyonkalar egallaydi. Bunday plyonkalarining xususiyatlarini o'rganishning qiziqarliligi va ahamiyati shundaki plyonkalar katta va o'ta katta integral sxemalar ishlab chiqarishda, lazer asboblari yaratishda, yuqori va o'ta yuqori chastotali rezonatorlar, 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 etadi.

KIRISH

Hozirgi vaqtda dunyoda insonlarning texnologiyalarga bo'lgan talablari ortib borishi bilan Si yuzasida hosil qilingan MeSi_2/Si tipidagi nanoplyonkalarining geterostrukturalari, ular yordamida o'ta yuqori chastotali tranzistorlar va integral sxemalar, nurlanish detektorlari, optoelektron qurilmalar, yupqa omik kontaktlar va barerli (to'siqli) MDP, PDP-strukturalar yaratish fizik elektronika sohasida istiqbolli natijalarga erishishda yangi imkoniyatlar yaratadi. MeSi_2/Si tipidagi geterostrukturalarning elektron tuzilishi va mos ravishda ularning optik va elektrik xususiyatlari nanoob'ektlarning o'lchamlari va tarkibiga bog'liqligini o'rganisha jadal tarzda rivojlanib bormoqda.

Jahonda nanotexnologiya asosiy yutuqlaridan keng foydalanilayotganligiga qaramasdan, bu ishlar hali boshlang'ich bosqichda turibdi. Shu sababli dunyoning ilg'or davlatlarida nanotexnologiya sohasidagi tadqiqotlarga katta e'tibor qaratilmoqda. Xususan, Si yuza va yuza osti qatlamlarida nanoo'lchamli MeSi_2 strukturalarining hosil bo'lish mexanizmlarini aniqlash va ularni olish, shuningdek, ularning tarkibi, tuzilishi va fizik xususiyatlarini aniqlashga katta e'tibor qaratilmoqda.

Plyonkali materiallarning elektronika sohasida ishlatilishida eng asosiy o'rinni epitaksial plyonkalar egallaydi. Bunday plyonkalarining xususiyatlarini o'rganishning qiziqarliligi va ahamiyati shundaki plyonkalar katta va o'ta katta integral sxemalar ishlab chiqarishda, lazer asboblari yaratishda, yuqori va o'ta yuqori chastotali rezonatorlar, 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 etadi va buni o'rganish dolzarb xisoblanadi.

Hozirgi kunda samarali effektiv usullar mavjud bo'lib ular asosida Si yupqa $500\div 1000 \text{ \AA}$ gacha monokristall plyonkalarni olish imkonini beradi va bu plyonkalarining morfologiyasi (yuzasi), stexiometriyasi juda yaxshi va bir jinslidir. Nanoplyonkalar, nanokristallar olish va ularning xususiyatlarini o'rganishga juda katta e'tibor qaratilmoqda. Bu esa o'z navbatida nanomateriallarni o'rganish

usullarini kengayishiga va rivojlanishiga olib kelmoqda. 1965-70 yillarga qadar qattiq jismning deyarli barcha asosiy xususiyatlari uning hajmi holatiga (tarkibi, tuzilishiga) bog'liq deb qaralar edi. Ammo bu davrga kelib jismning juda ko'p xossalari uning yuza qatlamlarining holatiga uzviy ravishda bog'liq ekanligi aniqlana boshlandi. Masalan, jismlarning emission va optikaviy xususiyatlari, korroziyaga va ayrim mexanik ta'sirlarga chidamliligi birinchi holda yuzaning tarkibiga va tuzilishiga bogliq ekanligi ma'lum bo'lib qoldi. Hozirgi paytda qattiq jismning deyarli barcha fizik xususiyatlari, hattoki ayrim mexanik xossalari va ko'pgina kimyoviy xossalari uning yuzasining holati bilan aniqlanishi tajribada isbotlangan. Shuning uchun ham 1970-yillardan boshlab yuzalarni tadqiq qilish va uni o'rganish uchun yangi maxsus usullar ishlab chiqishga juda katta ahamiyat berila boshladi.

Jismning yuza qatlamlari alohida, o'ziga xos bo'lgan murakkab xususiyatlarga ega bo'lib, ular hajmiy xususiyatlardan keskin farq qiladi. Bunday farqlarning juda ko'p sabablari bor. Hattoki, ideal holgacha tozalangan va bir xil tarkibli kristallarda ham yuza va hajm xususiyatlari farq qiladi. Chunki, masalan, hajmda joylashgan atomlar o'zining to'rt tarafidan atomlar bilan bog'langan bo'lsa, yuzadagi atomlar faqat uchta tomondan bog'lanib, tepada atomlar yo'q bo'lganligi uchun to'rtinchi tomondan bog'lanmagan bo'ladi. Shunday qilib yuzadagi kristall tuzulish yoki panjara parametrlari hajmnikidan farq qiladi. Bu esa o'z navbatida hajm va yuza elektron tuzilishlarining bir-biridan farq qilishiga olib keladi. Yuza qatlamlarga tashqi ta'sir ko'rsatib, uning xususiyatlarini kerakli yo'nalishda o'zgartirish mumkin. Buning uchun ionlar implantatsiyasi, lazer va boshqa nurlar bilan ishlov berish, aktiv element atomlari va molekulalar o'tkazish va boshqa usullardan foydalaniladi.

Qattiq jismlarning qator xususiyatlari ko'p jihatdan uning yuza qatlamlariga va o'lchamlariga bog'liqdir. Jumladan hozirgi zamon texnologiyasida, xususan, mikro- va nanoelektronikada, nanoplenkalarni, nanomateriallarni fizikaviy va kimyoviy xossalarni o'rganish asosiy o'rinni egallaydi. Bu nanomateriallarning tarkibini va tuzulishini o'zgartirish uchun juda ko'p usullar qo'llaniladi:

xususan qo'llanmada ionlarni implantatsiya qilish, diffuziya, impulsli elektron dastalari va lazer nurlari bilan ishlov berish, yuqori haroratda qizdirish va qattiq, jism yuzasida atom oqimlardan foydalanib kerakli kristallarning yupqa nanoepitaksial qatlamlarini hosil qilish usullari haqida ma'lumotlar berilgan. Shu qatorda qo'llanmada qattiq jismlarning yuza va yuza osti qatlamlarini tekshiruvchi an'anaviy usullar va zamonaviy usullar haqida qisqacha ma'lumotlar berilgan.

Zamonoviy elektronika asbobsozligida ko'p qatlamli nanoplyonkalar ketma-ketligidan iborat tizimlar asosiy o'rinni egallaydi. Ular asosida katta va o'ta katta integral sxemalar, planar va hajmiy o'ta panjaralar, lazerlar, yuqori va o'ta yuqori chastotali rezanotorlar ishlab chiqilmoqda va takomillashtirilmoqda. Bunday tizimlar nanoplyonkalar va nanokristallar asosida kvant xususiyatli asboblari ishlab chiqarishda ham katta istiqbolga ega. Bu qo'llanmada qattiq jism yuzasi va uning xususiyatlari haqida batafsil ma'lumotlar berilgan. Undan tashqari bir-biri bilan kontaktga kiritilgan ikki qattiq jism chegarasida zonaviy tuzilishning o'zgarishi haqida ma'lumotlar keltirilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. So'ngi yillarda silitsid plyonkalari, xususan, CoSi_2 ni olish, ularning tarkibi, strukturalari va xususiyatlarini o'rganish masalalariga juda ko'p ishlar bag'ishlangan. Ushbu sistemalarda silitsid plyonkalarining qalinligi 30–50 nm dan kichik emas. Plyonkalar qalinliklarini kamaytirish 100 GHz dan ortiq, chegaraviy chastotalarda ishlaydigan integral sxemalar va yuqori chastotali tranzistorlarni yaratishda yangi imkoniyatlar ochib beradi. Yarim o'tkazgichlar yuzada $d < 5\text{--}10$ nm qalinlikdagi nanokristallar va nanoplyonkalarni olishning istiqbolli metodlaridan biri kichik energiyali ion implantatsiyasi hisoblanadi.

Migas D.B. va boshqalar hisoblash yo'li bilan FLAPW-GGA to'la potentsial metodida BaSi_2 ning zonaviy strukturasini olishdi. Ajmal Khan, Yoji Imai va boshqalar nazariy tadqiqotlar orqali B, C, N va F lardan legirlovchi qo'shimchalar sifatida foydalanish energetik jihatdan afzalroq ekanligini ko'rsatib berishdi. So'nggi yillarda Si yuzada yaratilgan BaSi_2 nanostrukturalariga bo'lgan qiziqish fotoelektron o'zgartirgichlar uchun

istiqbolli material sifatida ishlatilish mumkinligi sababli keskin ortdi. Xususan, V.L.Dubov va D.V.Fominlar o'zlarining tahliliy maqolalarida p-BaSi₂/n-Si asosidagi yupqa plyonkali FEO' larning yetarlicha yuqori FIK ga ~ 9-10 % ega ekanligini ko'rsatib berishdi.

CoSi₂/Si tipidagi nanoplyonkali sistemalarni olish va ularning optik, elektr va magnit xususiyatlarini o'rganish bo'yicha W.S.Cho, M.V.Gomonova va U.Starke lar shogirdlari bilan birgalikda faol ish olib borishmoqda. Ular tomonidan CoSi₂/Si submonoqatlamli plyonkalarining shakllanishi mexanizmlari va asosiy qonuniyatlari aniqlandi. Institute of Semiconductor Electronics (Germaniya) institutining xodimlari Facsko S. Va boshqalar 420 eV energiyali Ar⁺ ionlari bilan bombardimon qilish jarayonida GaSb (100) yuzada 35 nm diametrli kvant nuqtalardan geksoqonal kristall strukturalarni olishdi.

GaAlAs/GaAs geterostrukturalarda kvant-o'lcham effektlarining namoyon bo'lishini birinchi marta R.Dingl va V.Vigmanlar kuzatishdi. So'ngra X.V.Cheng optoelektronikaning maxsus qurilmalari va qattiq jisimli lazerlarda qo'llaniladigan GaAs asosidagi davriy geterostrukturalarni oldi. J.I.Alferov tomonidan GaP asosida xuddi shunga o'xshash ko'p qatlamli sistemalar yaratildi.

Prof. M.T.Normurodov, B.E,Umirzakovlar shogirdlari bilan birgalikda qizdirish usuli bilan ion implantatsiya metodini qo'shib birinchi marta CoSi₂/Si/CoSi₂/Si, CdBaTe/CdTe/CdBaTe/CdTe tipidagi ko'p qatlamli sistemani olishdi va ularning elektron va kristall strukturalarini, emission va optik xususiyatlarini o'rganishdi. Shuningdek ular tomonidan berilgan fizik xususiyatlarga ega bo'lgan nanostrukturalar shakllanishi mexanizmlari aniqlandi. Lekin, hozirgi vaqtga qadar Si ning yuza va yuzaosti qatlamlarida NiSi₂ ning nanoo'lchamli fazalari va qatlamlarini olish imkoniyati to'g'risidagi ishonchli ma'lumotlar yo'q. NiSi₂/Si sistemalarini olish va ularning xususiyatlarini o'rganishga bo'lgan qiziqish yana shu bilan xarakterliki, NiSi₂ va Si lar kubik panjaraga ega bo'lib, ularning panjara doimiylari amalda bir-biridan diyarli farq qilmaydi ($a_{Si} \approx 5,41 \text{ \AA}$, $a_{Ni} \approx 5,42 \text{ \AA}$) va NiSi₂/Si(111) chegarasida mos kelmaydigan nuqsonlar yuzaga kelmaydi. Bundan tashqari NiSi₂ ning

solishtirma qarshiligi $\sim 50\text{-}60 \text{ mK}\cdot\text{cm}$ ni tashkil qiladi. Shu sababli, geteroepitaksial MDP i PDP sistemalarni yaratishda bu strukturalar o'ta istiqbolli hisoblanadi.

Monografiya natijalarining joriy qilinishi. Si ning yuza qatlamlarida shakllangan MeSi_2 ning nanoo'lchamli strukturalarining morfologiyasi elektron strukturasini, optik va emission xususiyatlarini o'rganish nihoyatda nazariy ahamiyatga molik masalalardan biridir

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati MeSi_2 ning xususiyatlari, zonalar parametrlarini tadqiq qilish, kelgusida boshqa materiallar uchun ham qo'llanilishi mumkinligi bilan, olingan natijalar funksional elektronika qurilmalari uchun yangi ko'pqatlamli geterostrukturalar yaratishda istiqbollarga egaligi bilan izohlanadi.

Ion implantatsiya va yuqori vakuumli o'tqazish usullari bilan olingan silitsid nanoplyonkalarining strukturasini va elektron xususiyatlari bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida: $\text{NiSi}_2/\text{Si}(111)$ plyonkalarini $T \approx 1000\text{-}1400 \text{ K}$ temperatura oralig'ida qizdirish jarayonida ular morfologiyasining o'zgarish qonuniyatlari, tarkibi va elektron strukturalari ko'rsatib berilishiga doir ilmiy xulosalaridan Kremniy – silitsid – metall erkin ko'pqatlamli nanoplyonkali strukturalarning shakllanish mexanizmlari va ularning elektron va kristall strukturalarini o'rganishda foydalanilgan. Natijada FinFET transiztorining oksid-yarimo'tkazgich chegarasida qamralgan yakka zaryadning o'tish tokiga ta'sirni modellash imkonini bergan. Ni ni Si ga implantatsiya qilish va keyingi qizdirish yo'li bilan $\text{NiSi}_2/\text{Si}/\text{NiSi}_2/\text{Si}(111)$ to'rt qatlamli epitaksial nanoqatlamli sistemaning shakllanish jarayoni aniqlanishiga oid ilmiy xulosalaridan elektron komponentlarni kontaktli payvandlashda qo'llanilgan. Natijada kirishma atomlari bilan ligirlangan kremniy asosida yorug'likka sezgirligi yuqori bo'lgan datchiklar olish imkonini bergan.

I-BOB. TADQIQOT NATIJALARI BO‘YICHA ADABIYOTLAR TAHLILI

1.1. Kremniy asosidagi birikmaning emission xossalari

Ion implantatsiyasi qattiq moddalarning sirt xususiyatlarini maqsadli o‘zgartirishning eng samarali usullaridan biridir. Kichik energiyali ionlari $E_0=0,5\div 5$ keV bo‘lgan materiallar yuzasini bombardimon qilish kristall strukturasining buzilishi bilan birga bo‘ladi, bu ham panjara atomlarining siljishi, ham birikma element atomlarining to‘planishi hisobiga sodir bo‘ladi. Bunday holda, ligerlangan qatlamning qalinligi aniqlanadi.

Ion nurining parametrlari (ionlar turi, energiyasi, oqim zichligi va boshqalar) va maqsadli material. Masalan, $E_0=3$ keV li Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilinganda, sirtga 45° burchak ostida tushganda ligerlangan Si, GaAs va InP qatlam qalinligi mos ravishda 100 Å, 90 Å, va 150 Å ga teng. Faol metall ionlarining implantatsiyasi maqsadi elektrofizik, mexanik, kimyoviy, optik, emissiya va boshqa xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Ion implantatsiyasi ta'sirida qattiq jismning xususiyatlari implantatsiya qilingan buzilish va nuqsonlarning konsentratsiyasiga, ularning chuqur bo'yicha tarqalish profiliga, implantatsiya qilingan materiallar atomlarining kimyoviy holatiga va ionli qatlamning elektron tuzilishiga bog'liq bo'ladi.

Hozirgi vaqtda implantatsiyalar usuli kremniy integral mikrosxemalarini ommaviy ishlab chiqarishda katta muvaffaqiyat bilan qo'llaniladi, mavjud bo'lganlarning korroziya va sirt mexanik xususiyatlarini o'zgartirish uchun materiallar [2], yangi yupqa plyonkali tuzilmalarni yaratish, kristallarning tuzilishidagi turli jarayonlarni muvofiqlashtirish, nuqsonlar shakllanishi, kimyoviy bog'lanishlar va boshqalar. Masalan, [3] da ion bombardimonining diffuziya jarayonlariga ta'siridan foydalanib, noyob metastabil birikmalar $(\text{GaSb})_{1-x}\text{Ge}_x$ olindi. Ushbu birikmalar faqat ion implantatsiyasi sharoitida olinadi, aks holda ikki fazali materialning shakllanishi kuzatiladi. Bundan tashqari, ion implantatsiyasi ichki qabul qiluvchilarni yaratish uchun yarimo'tkazgichli materiallar katta istiqbolga ega [4]. Sirtni qayta ishlashning

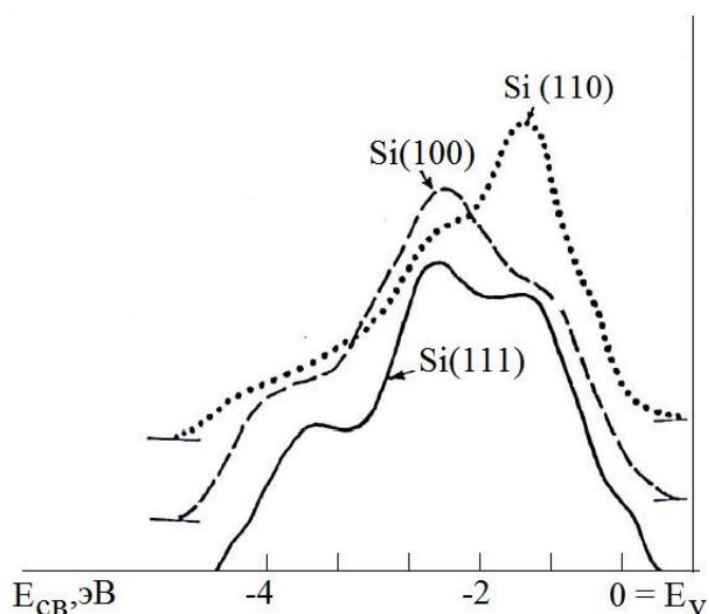
texnologik usuli sifatida ion implantatsiyasining fizik asoslari, metallar va yarim o'tkazgichlarga nisbatan nazariy talqinlar va amaliy tavsiyalar [5, 6] da keltirilgan. Bu [5, 6] ishlarda Ba^+ bilan legirlangan Mo, Si va SiO_2 sirtlarining elementar tarkibi va holati keltirilgan.

Energiyalari $E_0=0,5\div5,0$ keV ishqoriy metallar Mo holatida, Oje elektronlari spektrlarida nurlanish dozasining ortishi bilan Mo Oje cho'qqilari intensivligining pasayishi va birikma elementning cho'qqilari intensivligining oshishi aniqlandi [5]. Bunday holda, barcha Oje- cho'qqilarining shakli va energiya holati, xususan, XVV Mo tipidagi chiziqlar sezilarli darajada o'zgarmadi. Shunga asoslanib, [5] mualliflari yuqoridagi ionlarning Mo ga implantatsiyasi substrat atomlari va birikma element o'rtasida kimyoviy bog'lanish hosil bo'lishiga olib kelmaydi, deb taxmin qiladilar. Si Ga Ba va Na ionlarining implantatsiyasi holatida boshqacha manzara kuzatildi. Oje- cho'qqilari intensivligining o'zgarishi $L_{23}VV$ asosiy kremniy cho'qqisining shakli va holatidagi o'zgarishlar bilan birga vujudga keldi. Yuqori dozalarda ($D\geq 6\cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$) va kichik ion energiyasida ($E_0<1$ keV) silitsid Oje- cho'qqisi $L_{23}VV$ singlet shakldan dublet shaklga aylanadi, bu metall silitsid hosil bo'lishining natijasidir. Bu holda, asosan, BaSi va NaSi tipidagi birikmalar hosil bo'ladi, deb tahmin qilingan. SiO_2 ga Ba^+ va Na^+ ionlarining implantatsiyasi Si-O bog'ining uzilishiga va Ba-O va Ba-Si tipidagi bog'lar bilan yangi ($Ba_m O_n^+ Si$) tipidagi birikmalar hosil bo'lishiga olib keladi [6].

Shuni ta'kidlash kerakki, silitsid fazalarining shakllanishi sirt amorfizatsiyasi dozasiga mos keladigan dozadan boshlangan. Ionli ligerlangan kremniyning $T\approx 700\div 800$ K da qisqa muddatli qizdirilishi shikastlangan qatlamning qayta kristallanishiga va sirtida ustki tuzilmalar paydo bo'lishiga olib keladi, masalan, Si (111)-1x1 Na, Si(111)-1x1 Ba, Si(111)-2x2 Ba.

O_2^+ ionlarini implantatsiya qilishda va hōv ning barqaror holat qiymatlari mos ravishda 14 va 22 eV ni tashkil qiladi, bu SiO_2 plyonkasiga yaqin. Si ga $E_0=0,5\div 5$ keV bo'lgan Ba^+ va ishqoriy metall ionlarini implantatsiya qilishda boshqacha manzara kuzatildi: XPE spektrida ionlar dozasi ortishi bilan plazma tebranishlarining qo'zg'alishi bilan bog'liq cho'qqilarning o'rni kam energiya

yo‘qotishlari tomon siljiydi. Plazma tebranishlari energiyasining kamayishi elementar atomning har bir atomiga to‘g‘ri keladigan valent elektronlar sonining kamayishi bilan izohlanadi, [6] mualliflari Si, GaAs va CaF_2 ning sof va ionli monokristal namunalarining fotoelektron spektrlarini o‘rganishdi. 1.1-rasmdan ko‘rinib turibdiki, Si monokristallarining turli yuzlari uchun fotoelektronlarning KER shakli bir-biridan sezilarli darajada farq qiladi, ammo ular elektron energiyasining yaqin qiymatlarida kuzatiladigan bir qator xususiyatlarga ega (1.1-rasm).



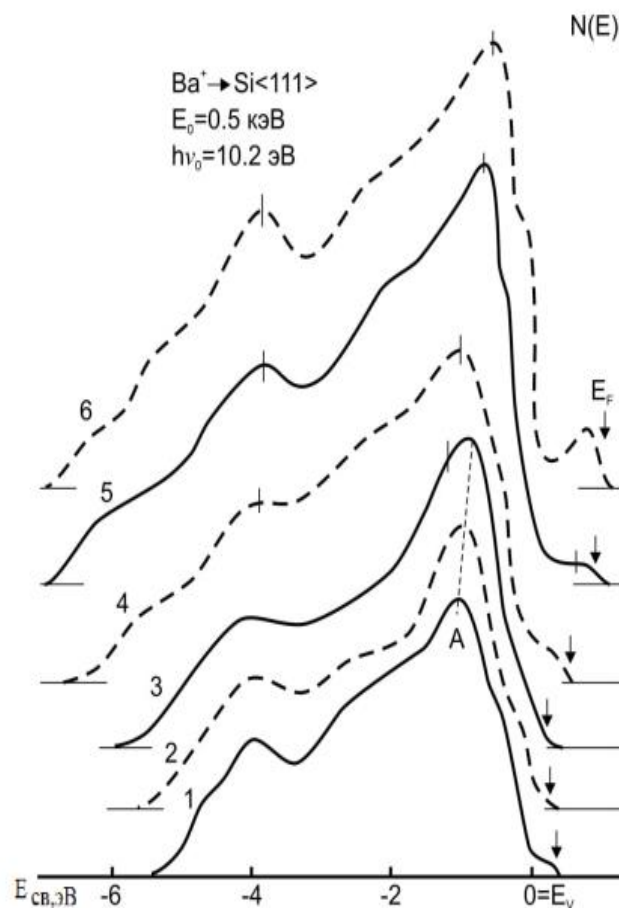
1.1-rasm. n-tipli kremniyning sof monokristallari uchun -FES [8]

Shuning uchun, turli yuzlar uchun valent elektronlarning energiya holatlari zichligining ba'zi maksimumlari taxminan mos keladi deb taxmin qilish mumkin.

1.2-rasmda. Fotoelektronlarning KERlari Ba^+ ionlari bilan ligerlangan p-tipli silitsid monokristalining (111) yuzi uchun berilgan.

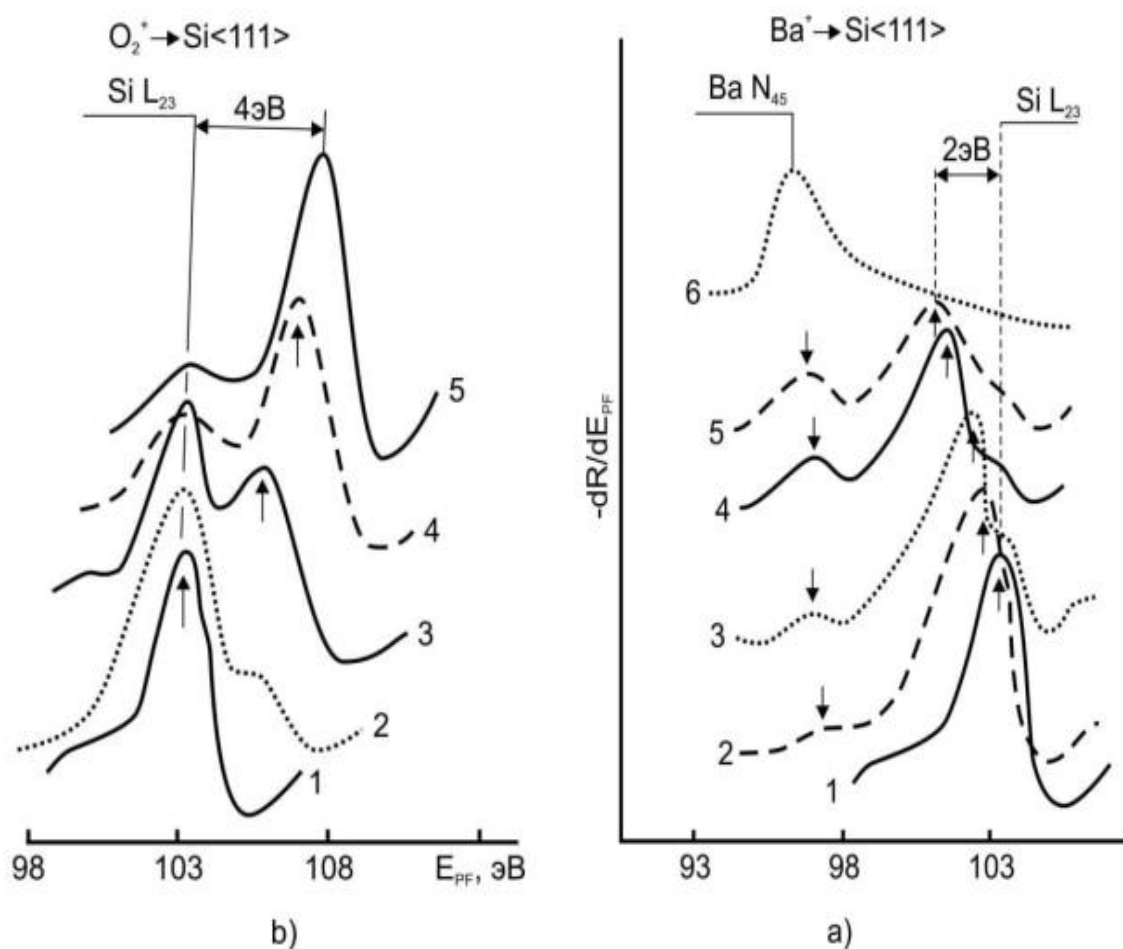
$E_0=0,5$ keV da turli dozalarda [6]. Ko‘rinib turibdiki, nurlanish dozasining oshishi bilan spektrning past energiyali chegarasining pastki bog‘lanish energiyalari tomon siljishi kuzatiladi va birinchi navbatda spektrning yuqori energiyali chekkasi (boshi) $6 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-2}$ dozagacha $E_b \approx 0$ tomon siljiydi, keyin esa ($D \geq 10^{15} \text{ sm}^{-2}$ da) yuqori bog‘lanish energiyalari tomon siljiydi. KERda sezilarli o‘zgarish $D \geq 2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-2}$ da sodir bo‘ladi.

Shu bilan birga, spektrda "yuqori" dozalarga xos bo'lgan deyarli barcha xususiyatlar paydo bo'ladi, sof kremniyga mos keladigan cho'qqilarning intensivligi keskin kamayadi (kremniyning ba'zi cho'qqilari, shu jumladan sirt holatlari bilan bog'liq xususiyatlar butunlay yo'qoladi). Dozaning yanada oshishi bilan yangi xususiyatlarning intensivligi ortadi va ularning pozitsiyalarining kattaroq E_b tomon biroz siljishi bor. Si (111) spektrining o'zgarishi $D \geq 4 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-2}$ da to'liq to'xtaydi. Ushbu dozada fotoelektronlarning energiya taqsimoti ostidagi maydon (ya'ni, fotoelektronlarning kvant rentabelligi) deyarli ikki barobar ortadi va $E_{sv} \approx -6, 4; -5,2; -3,8; -2; -0,6; -0,2$ va $+0,8 \text{ eV}$ energiyalarda $N(E)$ bog'liqligida aniq xususiyatlar paydo bo'ladi; Valentlik zonasining yuqori qismiga nisbatan [6].



1.2-rasm. Ba^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan Si(111) uchun fotoelektronlarning $E_0 = 0,5 \text{ keV}$ da bilan, $D \text{ sm}^{-2}$: 1-0; 2- 10^{14} ; 3- $6 \cdot 10^{14}$; 4- $2 \cdot 10^{15}$; 5- $8 \cdot 10^{15}$; 6- $6 \cdot 10^{16}$; [6]

Olingan spektrlarni tahlil qilish va ularni kesilgan bariy plyonkasi bilan kremniy spektrlari bilan solishtirish $E_{sv} \approx -6,4$ eV da aniqlangan cho‘qqi kremniyga, $-5,2$; $0,2$ va $+0,8$ eV kuchsiz cho‘qqiga tegishli deb taxmin qilish imkonini beradi. Bog‘lanmagan bariy atomlariga - va barcha cho‘qqilari bariy silidsidiga bog‘liq. Quyida ko‘rsatilgandek, bariy atomlarining aksariyati (60-70%) zambil atomlari bilan kimyoviy bog‘lanishga kirishadi [6].



1.3-rasm. $E_0=0,5$ keV bilan Va^+ (a) va O_2^+ (b) implantatsiyasidan keyin L_{23} seriyali Si UOE spektrlari. $D= sm^{-2}$ 1- 0 , $2 \cdot 5 \cdot 10^{14}$, $3 \cdot 10^{15}$, $4 \cdot 8 \cdot 10^{15}$, $5 \cdot 6 \cdot 10^{16}$, 6- qalin Ba qatlam [6].

Taqqoslash shuni ko‘rsatadiki, turli Si yuzlarining FESlari implantatsiya qilingan bir xil sharoitlar faqat past nurlanish dozalarida ($D \geq 10^{16} sm^{-2}$). bir-biridan sezilarli darajada farqlanadi. Doza ortishi bilan bu farqlar ham $D \geq 10^{16} sm^{-2}$ da kamayadi E Fotoelektronlarning turli Si yuzlari uchun deyarli bir xil shakl va tuzilishga ega bo‘ladi. AES, SIMS va elektron mikroskopiya natijalari shuni

ko'rsatdiki, Ba^+ ionlarining yuqori dozali implantatsiyasidan keyin ($E_0 = \text{const da}$) monokristallar, amorf va polikristalli kremniyning turli yuzlari sirt qatlamlarining tarkibi va tuzilishi bir-biridan kam farq qiladi [6]. Yadro elektronlarining bog'lanish energiyasi valent elektronlari holatlari zichligidagi o'zgarishlarga juda sezgir. Binobarin, atomlar o'rtasida har qanday kimyoviy bog'lanishning paydo bo'lishi yadro sathi pozitsiyalarining o'zgarishiga olib kelishi kerak [6].

1.3-rasmdan ko'rinib turibdiki, Si ga bariy ionlari ($y_{e0} = 0,5 \text{ keV}$ implantatsiyasida ionlar dozasi oshishi bilan L_{23} kremniy chizig'i quyi energiyaga, O_2^+ ionlari implantatsiyasida esa yuqori energiyaga siljiydi. Buning sababi shundaki, bariy silidsidlarining hosil bo'lishi elektronlarning bariy atomidan kremniy atomiga o'tishi bilan birga keladi, bu esa matritsa elektronlarining bog'lanish energiyasini pasayishiga olib keladi. Kremniy oksidi holatida, aksincha, ikkinchisi o'z elektronlarini kislorodga beradi va natijada kremniy elektronlarining bog'lanish energiyasi ortadi [6].

1.2. Si namunalarning optik xossalari

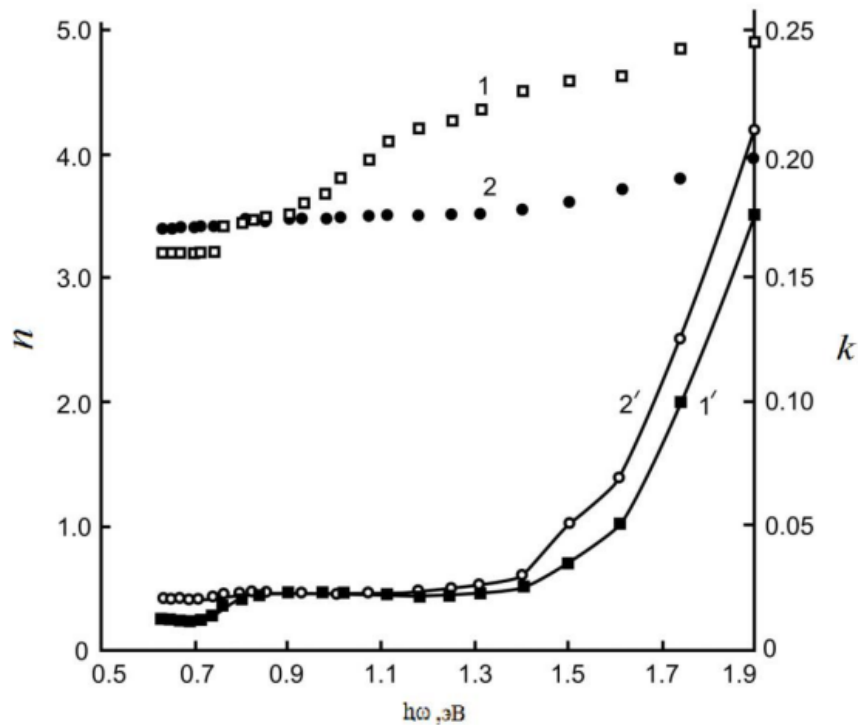
Monokristall kremniyning 3 dan 5 mkm gacha bo'lgan spektrning yuzasida nurlanishning yutilish xususiyatlari [7] da yutilish koeffitsientining namunalardagi qarshilikka va o'tkazuvchanlik turlariga bog'liqligi, intraband bilan bog'liq qo'shimcha yutilish. o'tkazuvchanlik zonasida elektron o'tishlari, qisqa to'liqinli yorug'likning spektrlarni uzatishga ta'siri ko'rib chiqiladi.

Hisoblangan va eksperimental ma'lumotlarni tahlil qilish asosida silitsidni optik muhit sifatida ishlatish bo'yicha tavsiyalar beriladi, [7] da, havodagi substrat harorati, cho'kish tezligi va toblanish harorati o'zgaruvchan elektron nurlari bug'lanishi bilan olingan amorf kremniy plyonkalarining 0,6-2,0 eV oralig'ida sinishi indeksi va so'nish koeffitsientining spektral xususiyatlari keltirilgan.

[10] ma'lumotlariga ko'ra, α -Si plyonkalari diametri 0,5 nm dan katta bo'lmagan teshiklar bilan tavsiflanadi; keyin uni to'liq muvofiqlashtirilgan tuzilishdan chiqarilgan atomlar klasteri deb hisoblash mumkin va (2) ifoda sifatida yozilishi mumkin.

$$n = 1 + (2/3) (\omega_p^2 / \omega_g^2) (\rho / \rho^0)^{1-4f} \quad (1.1)$$

bu erda $f = d \ln C / d \ln \rho$ g'ovak yuzasida klaster bog'lanishlarining ulushi; C - o'rtacha muvofiqlashtirish soni; "0" indeksi to'liq muvofiqlashtirilgan moddaning parametrini bildiradi. Qiymat g'ovak hajmiga qarab 0 dan 1 gacha o'zgarib turadi va kichik g'ovaklarda (2-3 koordinatsion sferadan kam) $f > 0,25$ va bunday muhitning n i to'liq muvofiqlashtirilgan moddanikidan katta bo'ladi.



1.4-rasm. Substrat haroratida elektron nurlar bug'lanishi natijasida olingan α -Si plyonkalarining sindirish ko'rsatkichi n (1, 2) va so'nish koeffitsienti k (1', 2') spektral bog'liqlilari. $T_s = 250$ (1, 1') va 20°S (2, 2') $h\omega$ [12].

Bu mulohazalarga asosanib, $T_s = 250^\circ\text{S}$ da (1.4-rasm) elektron nurlar bug'lanishi natijasida olingan α -Si plyonkalar diametri birinchi yoki ikkinchi koordinatsiya radiusi bilan solishtiriladigan g'ovaklarga ega va shunga mos ravishda bo'ladi deb taxmin qilishimiz mumkin. katta sinishi indeksi bilan tavsiflanadi. [8] da termal oksidlanish yoki ion bombardimoni natijasida olingan turli qalinlikdagi SiO_2/Si plyonkalarining energiya diapazonlari parametrlari, emissiyasi va optik xossalari o'rganildi. Qalinligi 30-40 Å bo'lgan SiO_2/Si plyonkasi uchun tarmoqli bo'shlig'i 8,8-8,9 eV ekanligi ko'rsatilgan. O'tish

qatlamlarda E_g qiymatlari va ikkilamchi elektron emishsiya koeffitsienti σ_m chuqurlik ortishi bilan monoton ravishda kamayadi [8].

1.1-jadvalda asosiy tarmoqli energiya parametrlari (E_v -valentlik diapazoni shifti, E_F -Fermi darajasi, tarmoqli bo'shlig'i, - elektronga yaqinlik) va ikkilamchi elektron emissiya koeffitsientining (σ_m) maksimal qiymatlari va yorug'lik sinishi ko'rsatkichi n ko'rsatilgan. $\lambda = 550$ nm, $\text{SiO}_2/\text{Si}(\theta_{\text{SiO}}=60^\circ)$ tizimining chegaraga yaqin hududining turli chuqurliklarida o'lchanadi. Ko'rinib turibdiki, SiO_2 uchun E_g qiymati 8,9 eV, 9 SiO uchun esa 5 V ga teng. Shunday qilib, SiO_2/Si interfeysida hosil bo'lgan o'tish qatlamida chuqurlikning 0 dan 120 Å gacha ortishi bilan E_g qiymati monoton ravishda ~9,0 eV dan ~1,1 eV gacha kamayadi (1.1-jadval). SiO_2 yuzasida va o'tish qatlamining d_1 va d_2 chuqurliklarida ($\theta_{\text{SiO}}=60^\circ$) o'lchanadigan tarmoqli energiya parametrlari, emissiya va optik xususiyatlar [8].

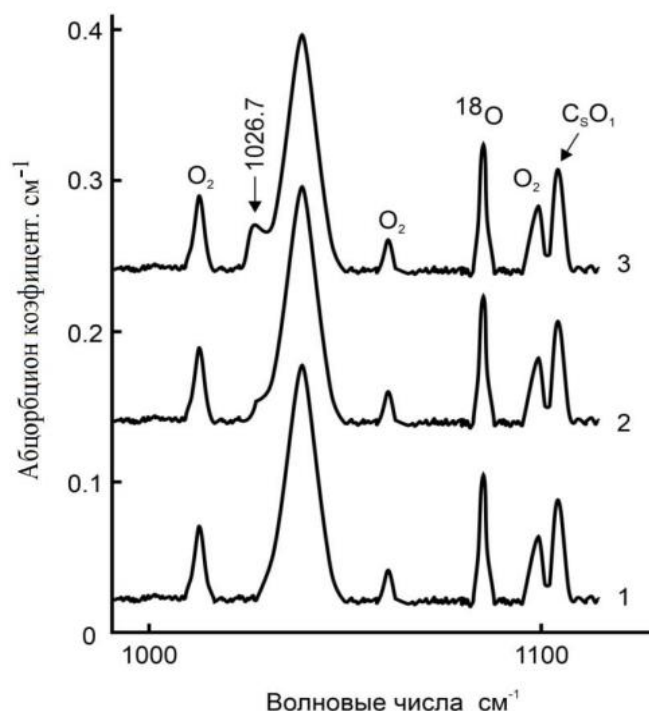
1.1-jadval.

O'rganilgan namunalar	E_v , eV	E_F , eV	E_g , eV	χ , eV	σ_m	N
SiO_2	9,1	4,7	8,6-8,8	0,3-0,5	1,8	1,45
$\text{SiO} (d_1=50\text{Å})$	6,0	-	4,5-5,0	1,0-1,5	1,25	1,95
$\text{Si}(d_2=120\text{Å})$	5,1	4,7	1,1	4,0	1,0	3,25

Bor va kislorod ko'p bo'lgan kremniyda quyosh nurlanishiga yaqin spektrli tarkibli, intensivligi 70–80 mVt/sm² bo'lgan yorug'lik ta'siridan so'ng nuqson ko'rinishi aniqlangan, Bu geliy haroratida 1026,7 sm⁻¹ [9] yutilish zonasiga to'g'ri keladi. Bu nuqsonning tarkibiy qismlari bor va kislorod atomlari ekanligi ko'rsatilgan. Namuna orqali zaif oqimlar oqib o'tganda yorug'lik yoki issiqlik bilan ishlov berish ta'sirida paydo bo'ladigan erkin oqim tashuvchilarning sezilarli konsentratsiyasi mavjud bo'lganda nuqson paydo bo'ladi. Kamchilik tarkibiy qismlar o'rtasidagi to'g'ridan-to'g'ri o'zaro ta'sir natijasida ham, uning barqaror shaklining prekursorlari orqali ham paydo bo'lishi mumkin deb taxmin qilinadi [9]. Kremniyni germaniy bilan doping qilish defekt hosil bo'lish samaradorligini

pasaytiradi, bu aniqlangan so'rilishga mos keladi. Spektrning o'rta IQ hududida T 10 K da qayd etilgan Choxral usuli bilan o'stirilgan bor va kislorodning yuqori miqdori bo'lgan tipik Si namunalarining yutilish spektri shaklda ko'rsatilgan [9].

Ko'rinib turibdiki, ^{18}O kislorod izotoplari, dimerlarning mahalliy tebranishlariga mos keladigan chiziqlar, "tugunli uglerod + interstitsial kislorod" markaziga mos keladigan taxminan 1104 cm^{-1} chiziq, shuningdek, taxminan 1039 cm^{-1} da oldindan noma'lum bo'lgan chiziq mavjud [9].



1.5-rasm. 70mVt/sm^2 intensivlikdagi yorug'lik ta'sirida Si ning yutilish spektrining o'zgarishi. t: 1 - 0, 2 - 20, 3 - 30. $T_{\text{meas}} = 10\text{K}$. $N_{\text{B}} = 10^{16}\text{ sm}^{-3}$, $N_{\text{O}} = 10^{18}\text{ sm}^{-3}$ [9].

1.3. Si ning sirtida va sirtga yaqin joylarda nano o'lchamli fazalarni olish uchun ion implagtatsiya usulini qo'llash

Keyingi yillarda jahonning yetakchi olimlarining e'tibori o'lchamlari kichraytirilgan tizimlarning cheklovchi holati bo'lgan kvant o'lchamli metallarni ishlab chiqishga qaratildi. Ular yarimo'tkazgichli matritsadagi nano o'lchamdagi atom klasterlari qatorini ifodalaydi. Noyob texnologik usullardan foydalanib, kvant nuqtaning o'lchamini, ularning shakli va tarkibini o'zgartirish mumkin, shuning uchun ko'plab tabiiy elementlarning analoglarini olish mumkin. Kvant

nuqtalarining xossalarini o'rganish asosan ularning optik xususiyatlarini o'rganishga qaratilgan.

Si(100)2x1 kremniy yuzasida o'ta yupqa CoSi_2 qatlamlarining qattiq fazali sintez jarayonini o'rganish uchun [11] da UBES usuli ($h\nu=130$ eV) ishlatilgan. Bu ishlarning mualliflari xona haroratida Si(100) yuzasiga ikki monoqatlam kobalt yotqizilganda metall plyonka qatlamma-qavat o'sib borishini ko'rsatdi. Biroq, [12] ma'lumotlariga ko'ra, deyarli bir xil sharoitlarda CoSi_2 kobalt atomlarining substrat bilan faol kimyoviy o'zaro ta'siri tufayli hosil bo'ladi. Orolcha hosil bo'lishining parametrlari 1.2-jadvalda keltirilgan.

1.2-jadval.

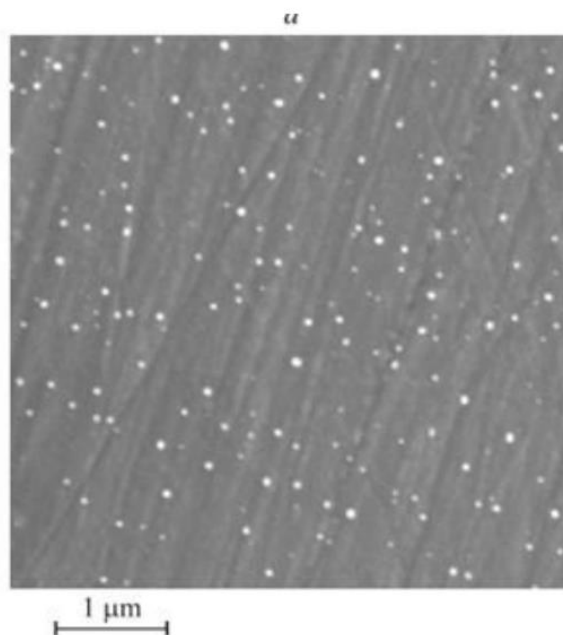
Orol tuzilmalarining parametrlari [13]

Yuvish vaqti, h	Orolning diametri, nm	Dominant diametr orollar, nm	mk ² dagi orollar soni	Plyonka qalinligi ekvivalenti, nm
1	30-85	70	4,5	0,283
2	30-85	70	6,85	0,474
3	30-85 (alohida 100)	70	8,15	0,556

REM tasvirini tahlil qilish asosida, [13] da ko'rsatilishicha, ultra yupqa Pd plyonkali Si tizimida 3 soat davomida qizdirilgandan so'ng, uzluksiz plyonka yuzasida alohida nanoorollar hosil bo'ladi (1.7-rasm).

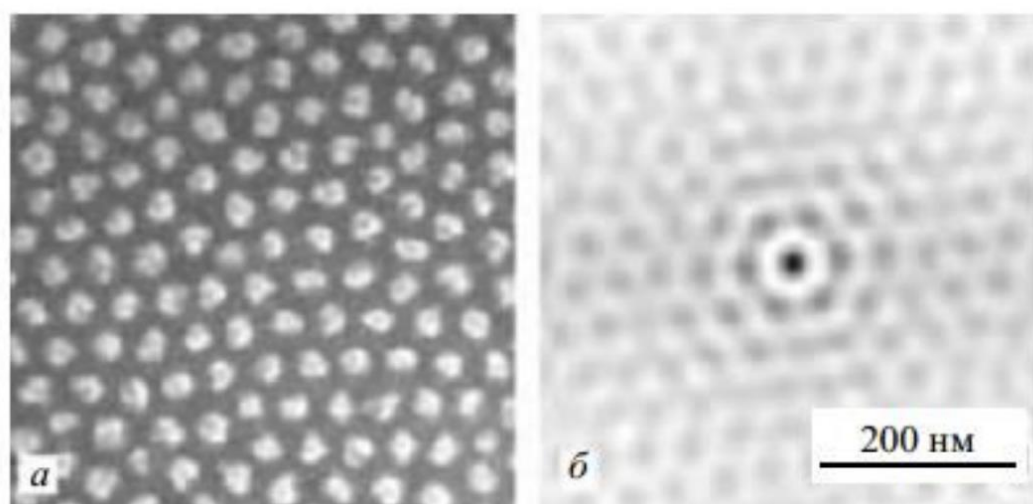
SALICIDE tipidagi o'z-o'zini tekislash texnologiyalaridan foydalanish xotira sxemalarida kobalt disilitsid asosida nanostrukturalarni yaratish uchun ishlatilishi mumkinligi [14] da ko'rsatilgan.

Turli intermetalik fazalar (So_2Si , SoSi , SoSi_2) orasida faqat epitaksial CoSi_2 yetarlicha past qarshilikka ega ($10 \div 20 \mu\Omega \cdot \text{sm}$) va uni olish samarali aloqa uchun ishlatilishi mumkin.



1.7-rasm. REM [11] uchun tavlanişdan keyin Pd/Si tizimining sirtining tasviridir.

Yarimoʻtkazgichlarning sirt qatlamlarida kvant oʻlchovli bir va koʻp komponentli tuzilmalarni olish uchun ion implantatsiyasi usuli qoʻllaniladi. Yarimooʻtkazgichlar elektronika instituti (Germaniya) [15] xodimlari Ar^+ ion nurlari bilan bombardimon qilishdi. Energiyasi 420 eV boʻlgan (100) GaSb yuzasida diametri 35 nm boʻlgan kvant nuqtalarining olti burchakli kristalli tuzilishi olingan (1.8-rasm).



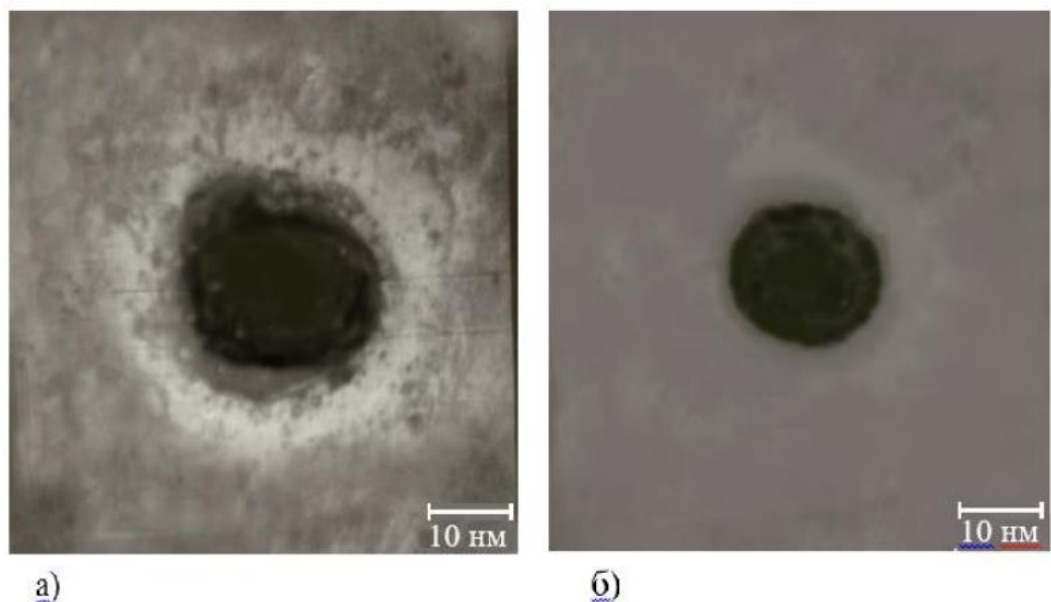
1.8-rasm. (a) Ar^+ ionlari bilan nurlangan bir kristalli GaSb sirtining REM tasviri energiya bilan 420 eV va (b) olti davrdan ortiq davom etadigan

nuqtalarning muntazamligi va olti burchakli tartibining mos keladigan ikki o'lchovli avtokorrelyatsiyasi [15].

Olingan natijalar maqsadli sirtning ionlarning sochilishi, shuningdek, sirtida yangi ko'p komponentli birikmalarning paydo bo'lishi bilan izohlanadi [15]. Olimlar Ga ionlarini Si ichiga joylashtirish va keyinchalik sirtida qayta ishlash orqali parallel kvant hududlari va kvant simlarini oldi.

B.E.Umirzoqov va boshqalar Si, GaAs va CaF_2 sirt mintaqasida ion implantatsiyasini tavlaniş bilan birgalikda hosil qilgan nano o'lchamli faza va plyonkalarining tarkibi, tuzilishi va fizik xossalarini har tomonlama o'rgandilar.

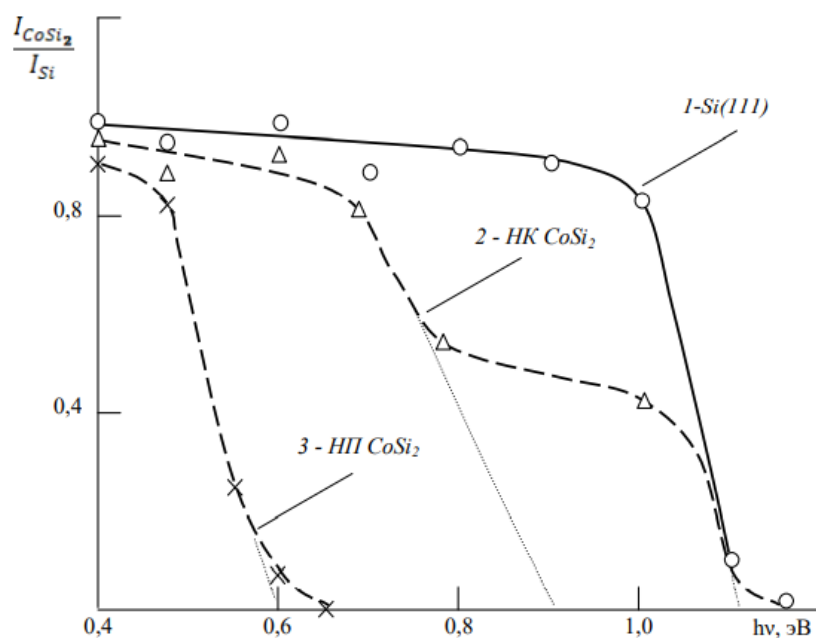
Misol tariqasida, 1.9-rasmda Ba^+ ionlarining implantatsiyasi natijasida Si yuzasida hosil bo'lgan alohida klaster fazasining REM tasvirlarini ko'rsatadi. $D \approx 10^{15} \text{ sm}^{-2}$ da $E_0 = 1,0 \text{ keV}$ bilan, tavlanişdan oldin va keyin (lazer + harorat). Isitilmagan namunaning REM tasviri (1.9 a-rasm) to'rtta halqasimon hududni ko'rsatadi: og'ir qo'shilgan engil doping; birikmagan; substratning shikastlanmagan maydoni. Issiqlikdan so'ng, REM rasmi aniq ko'rinadi BaSi_2 ning disk shaklidagi kristalli fazasi (1.9.b-rasm).



1.9-rasm. Ba^+ ionlari implantatsiyasidan keyin Si yuzasida hosil bo'lgan alohida klaster fazalarining REM naqshlari bilan $E_0 = 0,5 \text{ keV}$, $D = 10^{15} \text{ sm}^{-2}$

Na^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan Si ni $T=800\text{--}1000\text{K}$ da qizdirish natijasida olingan NaSi_2 nanoplyonkasi va nanokristalli Si ning tarkibi va tuzilishi $E_0 = 1,0 \text{ keV}$ va doza oralig'i $D = 5 \cdot 10^{14} \div 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ bilan o'rganildi. NaSi_2 nanokristallarining shakli silindrsimonga yaqin bo'lib, qalinligi $2,5 \div 3 \text{ nm}$ oralig'ida, nanokristallarning sirt o'lchamlari esa $20\text{--}25 \text{ nm}$ edi.

(a) va keyin (b) isitishdan oldin Si yuzasida NaSi_2 va CoSi_2 nanokristallari va nanoplyonkalarni olish uchun ion implantatsiyasi va tavlanishning optimal usullarini va ularning o'lchamlarini (qalinligi h va portlovchi diametri d) aniqlab olinadi.



1.10-rasm. O'tkazilgan yorug'lik intensivligining foton energiyasiga bog'liqligi: 1 – Si (111); 2 – CoSi_2 nanokristalli Si; 3 - CoSi_2 nanoplyonkali Si qalinligi $2,5 - 3,0 \text{ nm}$.

1.10-rasmda yorug'lik namunalari orqali yuqori sezuvchanlikning nanokristalli Si uchun $h\nu$ ga va SoSi_2 nanoplyonkaga bog'liqligi ochib berilgan. O'rganilayotgan namunalarning tarmoqli oralig'ida qanday bog'liqliklar aniqlanganiga qarab: Si $E_g \approx 1,1 \text{ eV}$, SoSi_2 nanokristallari uchun - $0,9 \text{ eV}$ va CoSi_2 plyonkasi uchun - $0,6 \text{ eV}$. Muntazam tartibga solinadigan Si nanofazlarni olish uchun purkashdan oldin CaF_2 substratlarining sirtlari, buyurtma qilingan

yadrolarni Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilish orqali bilan $E_0 = 3 \text{ keV}$ $D=5 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ dozada. Si o'tqazish sharoitlarda 0,1-0,2 nm / min tezlikda amalga oshirildi yuqori vakuum ($P = 10^{-5} \text{ Pa}$). 1.11-rasmda REM tasvirini ko'rsatadi va qalinligi $\theta \sim 1$ bo'lgan Si plyonkasi bilan CaF_2 (111) yuzasining katta energiyali elektronlar difraksiyasi kartina(ichki qismi), $T \approx 800 \text{ K}$ (a) va 850 K (b) da qizdirilgandan so'ng olingan 8 va 10 monoqatlamlar.

1.3-jadval.

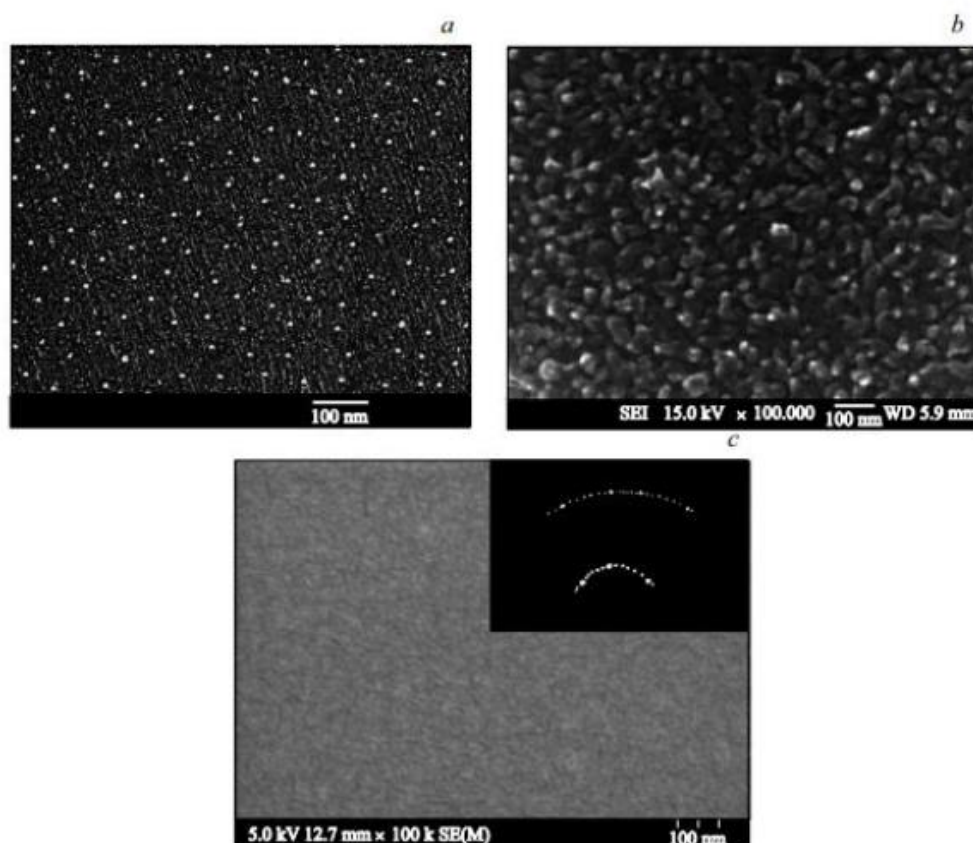
Olish uchun ion implantatsiyasi va tavlanishning optimal usullari nanokristallar va nanoplyonkalar $\text{MeSi}_2/\text{Si}(111)$

Ionlar	$E_0=1\text{keV}$			$E_0=3\text{keV}$		
	D, sm^{-2}	T, K	Nanostruktura	D, sm^{-2}	T, K	Nanostruktura
Co^+	5×10^{14}	800	NK	5×10^{14}	900	NK
	10^{15}	900	NK	10^{15}	900	NK
	5×10^{15}	950	NK	5×10^{15}	950	NK
	6×10^{16}	1000	NP	8×10^{16}	1100	NP
Na^+	5×10^{14}	800	NK	5×10^{14}	850	NK
	10^{15}	800	NK	10^{15}	900	NK
	5×10^{15}	850	NK	5×10^{15}	950	NK
	6×10^{16}	900	NP	8×10^{16}	1000	NP

T - har bir haroratda isitish vaqti $t = 30 \text{ min}$.

Tahlil shuni ko'rsatadiki, $\theta \leq 8$ ta monoqatlam muntazam ravishda hosil bo'ladi joylashgan nanofazalar va $\theta = 8-10$ monoqatlamlarda, nanoplyonkalar bilan $\sim 1,5-2 \text{ nm}$ qalinlikda. Barcha holatlarda Si/ CaF_2 interfeysida atomlarning sezilarli interdiffuziyasi kuzatilmaydi. Sirt o'lchamlari $d = 20-25 \text{ nm}$ va qalinligi $h = 1-1,2 \text{ nm}$ bo'lgan Si nanofazalarida kvant o'lchamli effektlar tavlanish bilan birga ishqoriy elementlarning o'zini namoyon qila boshlagani ko'rsatilgan va ko'rsatilgan: $0,3-1 \text{ keV}$ oralig'idagi ion energiyasida, qizdirilgandan so'ng, Si yuzasida metall silidsidning bir qatlamli qoplamasi hosil bo'ladi. Si(111) namunasi sirtining ϕ ish funksiyasi murakkab ekanligi aniqlandi. turli nurlanish energiyalari va ionlarning turlaridagi dozaga qarab.

Maqsadi ion juftlarini kremniyga ketma-ket yuqori dozali implantatsiya qilishning fizik-matematik modelini ishlab chiqish edi. As va In atomlari bilan implantatsiya qilingan kremniy namunalarining strukturaviy va optik xususiyatlarini eksperimental tadqiqotlar, eksperimental ma'lumotlarni simulyatsiya natijalari bilan taqqoslash.



1.11-rasm. Har xil qalinlikdagi Si plyonkali CaF_2 sirtining REM tasvirlari $\theta =$: a - 1 ta monoqatlam, b- 8 ta monoqatlam, c - 10 ta monoqatlam (katta energiyali elektronlar difraksiyasi qo‘shimchasida) $\theta = 10$ monoqatlamli Si tasvirlari).

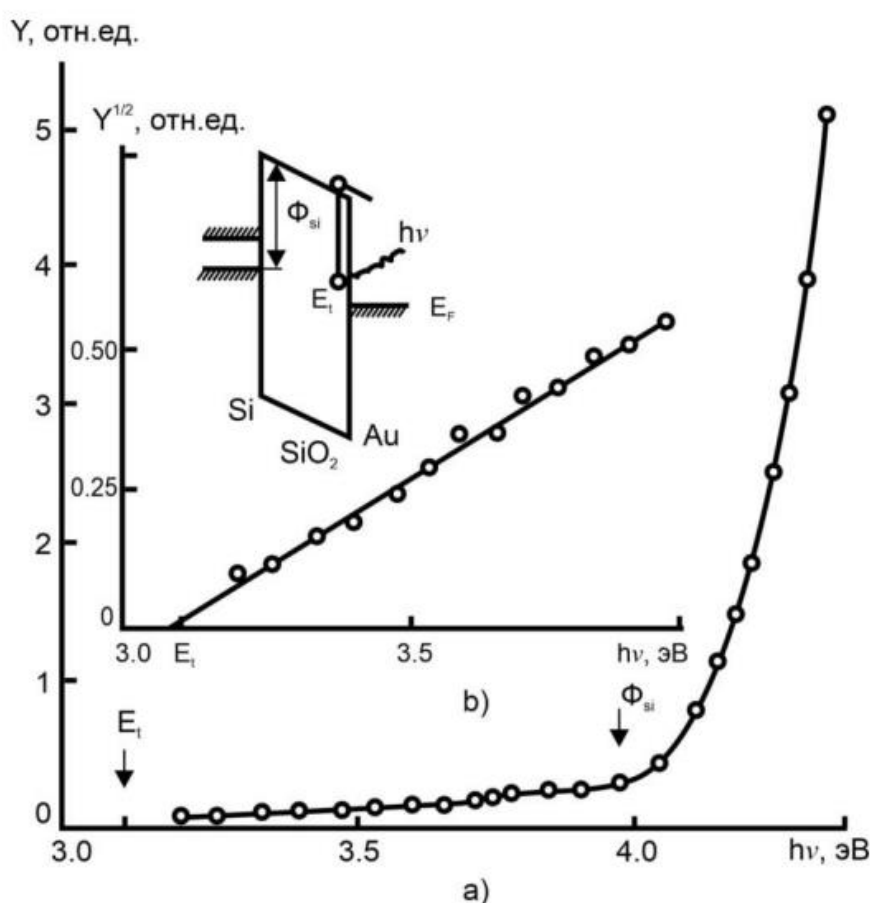
1.4. Kremniy asosidagi ko‘p qatlamli tizimlarning tuzilishi va xususiyatlari

Dielektrik va metallning olingan natijalari atom darajasidagi o‘zaro ta'siri bilan bog‘liq bo‘lgan metall-dielektrik interfaza chegarasining (MFG) murakkab tuzilishini ko‘rsatadi.

Ushbu o‘zaro ta'sir interfeysning kimyoviy va elektron tuzilishini va shuning uchun uning elektrofizik xususiyatlarini aniqlaydi. Shu sababli, metall-izolyator

interfeysidagi atomlararo o'zaro ta'sirning xususiyatlarini uning elektrofizik parametrlari bilan solishtirish katta qiziqish uyg'otadi.

Si-SiO₂ tuzilmalarida fototokning oltin elektrodga musbat potentsialda spektral bog'liqligi 1.12-rasmda ko'rsatilgan. (1.12. a.) SiO₂ dagi Si dan 20 elektron elektronlarining FIga mos keladigan $h\nu > 4,0$ eV kesimidan tashqari, spektrning $E_t = 3,1 \pm 0,2$ eV spektral polga ega bo'lgan uzun to'liqlik hududida fototok kuzatiladi. (1.12. b.)

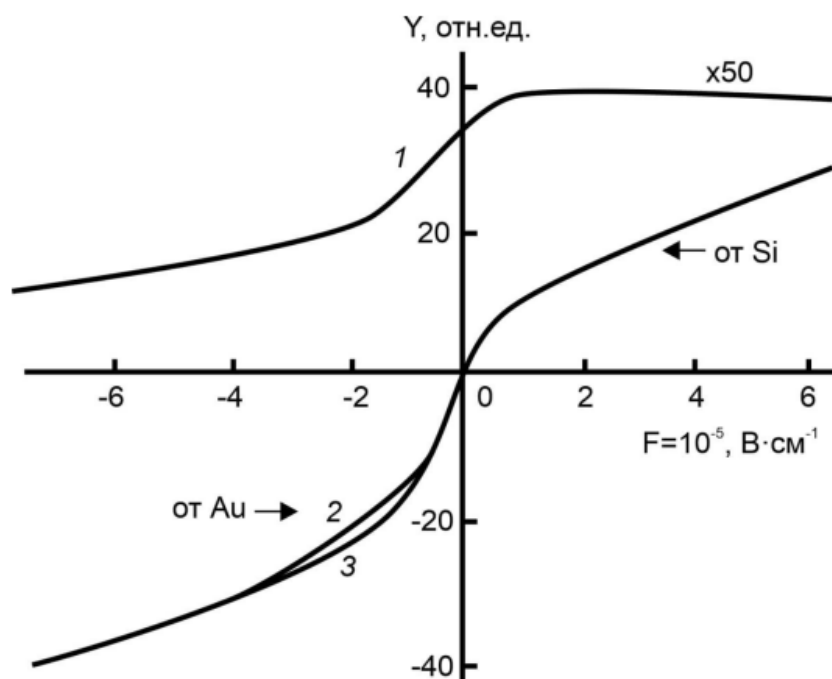


1.12-rasm. a-metall elektrodga musbat potentsialda fototokning (tushgan fotonga) spektral bog'liqligi; b-spektral egri chiziqning boshlang'ich qismidan y_e chegara energiyasini aniqlash. Qo'shimchada oltin elektrodga ijobiy potentsial holati uchun Si-SiO₂-Au strukturasining energiya diagrammasi ko'rsatilgan.

$h\nu < \Phi_{Si}$, Φ_{Au} mintaqasidagi fototokning oksiddagi elektr maydon kuchiga bog'liqligi (1.13-rasm, 1-egri chiziq) elektron FI tokining mos keladigan bog'liqligidan sezilarli darajada farq qiladi (xuddi shu rasmdagi 2-egri).

Fotoin'ektsiya (FI) paytida oqimning yo'nalishi oksiddagi elektr maydonining belgisi bilan belgilanadi, chunki u butun SiO_2 qatlami bo'ylab elektronning siljishi bilan bog'liq. $h\nu < \Phi_{\text{Si}}$, Φ_{Au} da maydon va fototok belgilarining farqi, ikkinchisi butun SiO_2 qatlami bo'ylab elektron tashish bilan bog'liq emasligini ko'rsatadi. Taxmin qilish mumkinki, mobil zaryad tashuvchilarning uzatilishi MFGlardan birining yaqinida buzilgan elektr maydoni bo'lgan mintaqada sodir bo'ladi.

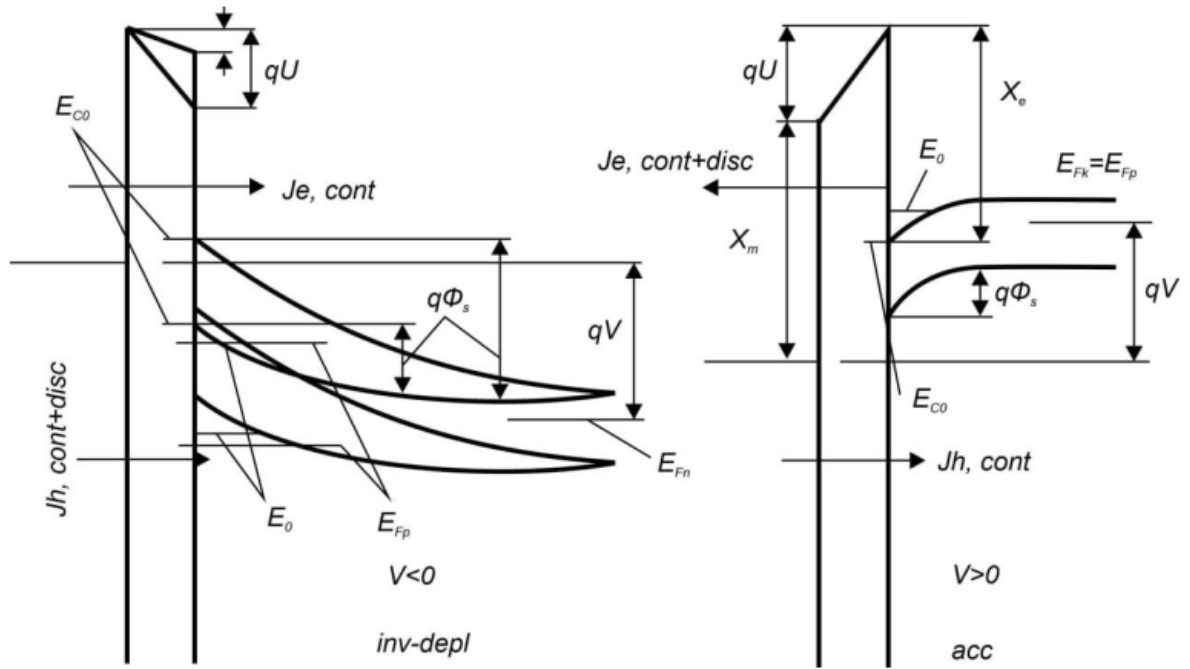
O'rganilayotgan strukturaning $E_t < h\nu < F_{\text{Si}}$, F_{Au} spektral mintaqasidan keladigan yorug'lik bilan uzoq vaqt davomida yoritilishi pol osti mintaqasida fototokni kamaytiradi. FI elektron oqimi va sig'im-kuchlanish bog'liqliklarini o'lchash yordamida oksidning zaryad holatini tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, bu holda AuSiO_2 chegarasi yaqinida musbat zaryad hosil bo'lib, uning ko'payishiga olib keladi oltindan elektronlarning joriy FI (1.13-rasm, egri 3)



1.13-rasm. Fototokning maydonga bog'liqligi: 1-kam foton energiyalar mintaqasida ($h\nu=3,80$ eV); 2-elektron fotoionlanish mintaqasida ($h\nu=4,82$ eV); 3, o'sha yerda, fotodevastatsiyadan keyin.

Au-SiO_2 chegarasini o'rganish MFG ning ikkita xarakterli xususiyatini ajratib ko'rsatishga imkon beradi: 1) buzilgan elektr maydoniga ega o'tish qatlaminin mavjudligi, 2) uning ichida mavjudligi. fotoaktiv qatlam markazlari.

MDP strukturasi tunnel oqimi elektron (metall va kremniy o'tkazuvchanlik zonasi, j_c o'rtasida) va teshik (metall-valentlik zonasi, j_h) komponentlarini o'z ichiga oladi. Zaryad holatiga qarab (boyitish, inversiya-tutish) bu komponentlardan biri faqat "uzluksiz" komponentni, ikkinchisida esa "diskret"ni ham o'z ichiga oladi (1.14-rasm). Ikkinchisi teskari yoki boyitilgan qatlam va metallning kvant darajalari orasidagi tashuvchi tunnel orqali yaratiladi.



1.14-rasm. Oqim uchun formulalarda paydo bo'ladigan miqdorlarni ko'rsatadigan energiya diagrammalari: chapda - inversiya-tushish (U kuchlanishi ozchilik tashuvchilarning hosil bo'lish tezligiga bog'liq), o'ngda - boyitish.

Elektron "uzluksiz" komponent sifatida yoziladi.

$$j_{e,const} = \frac{4\pi q m_{\perp} v_{\perp e}}{h^3} \times \int_{0/q\Phi_s}^{+\infty} (f_m - f_n) \int_0^{\frac{E}{E} - q\Phi_s} T^{*/**}(E, E_{\perp}) dE_{\perp} dE$$

Bu erda E - kremniy o'tkazuvchanlik zonasining chetidan hisoblangan elektronning to'liq energiyasi E_0 dielektrik bilan interfeysda, f_m , f_n - metall va Si o'tkazuvchanlik zonasi uchun Fermi funktsiyalari, $E_{\perp}$ - harakat energiyasi. tunnel yo'nalishiga perpendikulyar bo'lgan tekislik z , $m_{\perp}$ - bu tekislikdagi samarali massa elektroni, $v_{\perp e}$ - uzatishda ishtirok etuvchi vodiylarning

degeneratsiyasining ko‘pligi. $T^{*|**}$ orqali tunnel qilish ehtimolini bildiradi; bir yoki ikkita yulduzcha ta’kidlash uchun xizmat qiladi. Ushbu ishda bu miqdor avvalgisidan boshqacha hisoblanishiga e’tibor qaratish lozim. Teshik toki j_h uchun boyitish rejimidagi bir “uzluksiz” komponentdan yoki har ikkalasidan kamayish inversiyasi uchun ifoda

$$j_{e,const} = \frac{4\pi q m_{\perp} v_{\perp h}}{h^3} \times \int_{-\infty}^{-\frac{E_g}{-E_g} - q\Phi_s} (f_m - f_p) \int_0^{-E_g - \frac{E}{-E_g} - E - q\Phi_s} T(E, E_{\perp}) dE_{\perp} dE, \quad (1.2)$$

$$j_{h,disc} = \frac{q m_{\perp} v_{\perp h}}{\pi h^2 \tau_{ar}(E_0)} \int_{-\infty}^{-E_g - E_0} (f_m - f_p) T(E, -E_g - E - E_0) dE. \quad (1.3)$$

Formulalarda (2) va (3) $v_{\perp h} = 3$ va $m_{\perp}$ kremniydagi teshiklar uchun olinadi [6].

Bu holda tunnel ehtimolini formuladan foydalanib hisoblash mumkin:

$$T = R_{exp} \left(-2 \sqrt{\frac{2m_e}{h^2} \int_{cfr} E_{ci}(z) - E + \frac{h^2 k_{\perp}^2}{2m_e} dz} \right) \quad (1.4)$$

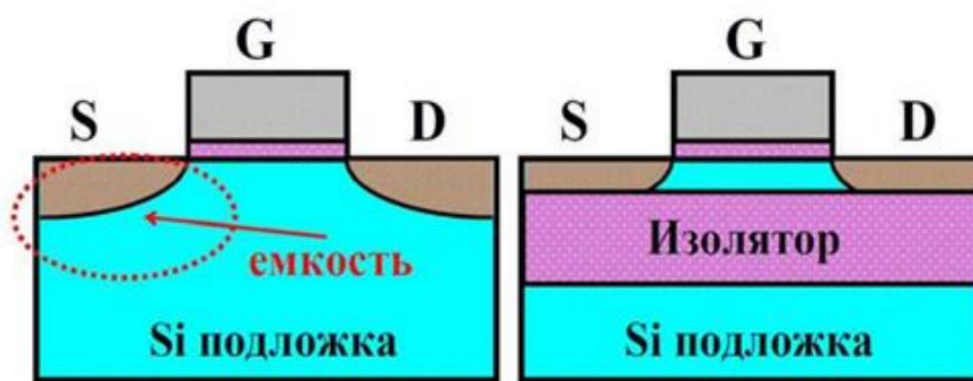
Bu erda E_{ci} (E_{c0} dan o‘lchanadi) dielektrikning o‘tkazuvchanlik zonasi profili, m_e - dielektrikdagi elektronning samarali massasi, $k_{\perp}$ - zarrachaning ko‘ndalang to‘lqin vektori, umumiy energiya E kabi, saqlanish tunnel o‘tqazish paytida saqlanadi. Formuladagi integratsiya dielektrikning klassik taqiqlangan hududida (CFR) amalga oshiriladi.

Zamonaviy elektron texnikaning rivojlanishi kremniy va uning birikmalari asosidagi nanomateriallarning xossalari olish va o‘rganish bilan chambarchas bog‘liq. Ushbu materiallar noyob xususiyatlarga ega va nano- va optoelektronika, fotonika, energiya elektroniği, sensorlar va quyosh energiyasi kabi turli sohalarni yanada rivojlantirish uchun yangi imkoniyatlar ochadi. Shu sababli, so‘nggi

yillarda ko‘plab tadqiqotchilarning e‘tibori yangi kremniy materiallarining elektr va optik xususiyatlarini batafsil o‘rganishga qaratildi.

1.15-rasmda qo‘shimcha izolyator qatlamisiz va qo‘shimchali MOS tranzistorining tuzilmalari keltirilgan. Qo‘shimcha tadqiqotlar dielektrik izolyatsiyasi parazit tiristor tuzilishini yo‘q qilishini va buzilish kuchlanishini oshirishga imkon berishini ko‘rsatdi.

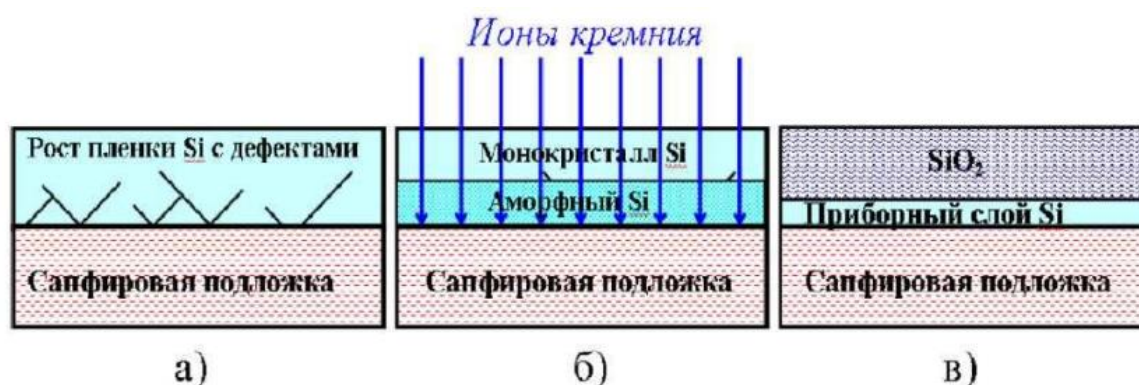
Bunday tranzistorlarni yaratish uchun odatda safirdagi kremniy va izolyatordagi kremniy kabi materiallar ishlatiladi. Ular ELTRAN va Smart Cut usullari yordamida birlashtiriladi.



1.15-rasm. MOP tranzistorlarining tuzilishi. Ommaviy kremniy texnologiyasi (chapda) va KNI texnologiyasi (o‘ngda) yordamida tayyorlangan S - istok, D - stok, G - zatvor.

2002 yilda Amerikaning Peregrine Semiconductor kompaniyasi va Yaponiyaning AKM (Asahi Kasei Microsystems Corp.) kompaniyasi yangi UltraCMOC qo‘shish texnologiyasini ishlab chiqdi, bu esa safir substratidagi kremniy qatlamlarining sifatini yaxshilash va qalinligini 100 nm yoki 100 nm gacha kamaytirish imkonini berdi. Birlashtirish jarayoni uch bosqichdan iborat (1.16-rasm): Safirdagi kremniy epitaksisi (1.16-rasm. a); strukturani to‘liq amorfizatsiyaga qadar kremniy ionlari bilan nurlantirish (1.17.b-rasm); amorf qatlamning asl kristall tuzilishini tiklash uchun $\sim 1100^\circ$ haroratda tavlanish. Va keyin silikon yuzasi termal oksidlanadi, shuning uchun safir kerakli qalinlikdagi kremniy plyonka bilan qoldiriladi (1.16.v.-rasm), so‘ngra oksid chiqariladi.

MIS va PDP tuzilmasida CoSi_2 ulushi alohida o‘rin tutadi [14]. Ushbu tuzilmalar odatda molekulyar nur epitaksisi (MBE) usulini keltirib chiqaradi. SoSi_2 tarkibini aniqlashda asosiy talab kislorod konsentratsiyasini minimal darajaga tushirishdir. Atomning so‘nggi qisqarishi kontakt qarshiligining keskin qiymatiga va Si dagi Co diffuziyasining pasayishi. Ko‘p hollarda kisloroddan xalos bo‘lish uchun silikon va kobalt plyonkasi o‘rtasida Ti, Ta va W ning ultra yupqa plyonkalarini kiritish orqali diffuziya to‘sig‘i paydo bo‘ladi [16].



1.16-rasm. UltraCMOS texnologiyasi. a) Silikon-safir epitaksisi; o‘tish qatlami egizak nuqsonlarni o‘z ichiga oladi. b) Si ionlari bilan nurlanish va nuqsonli qatlamning amorflanishi. v) Amorf qatlamning qattiq fazali epitaksisi va undan keyingi sirt oksidlanishi.

So‘nggi yillarda ion bombardimon qilish usuli yarimo‘tkazgichlar yuzasida va sirtga yaqin mintaqada nanoplyonka tuzilmalarini yaratish uchun ishlatilgan [17]. Bunday holda, ionlar kerakli chuqurliklarga kerakli miqdorda kiritiladi va qo‘shimcha ravishda, bu substrat sirtidan begona aralashmalarning (shu jumladan kislorod) tarqalishiga olib keladi.

Turli energiyaga ega Si ga Co^+ ionlarini implantatsiya qilishdan foydalangan holda ikki qatlamli $\text{CoSi}_2/\text{Si}/\text{CoSi}_2/\text{Si}$ nanoplyonka tizimini olish usuli taklif qilingan: birinchi navbatda implantatsiya yuqori, keyin esa past energiya bilan amalga oshirilgan. Ion implantatsiyasining har bir tsiklidan so‘ng, 30-40 daqiqa davomida optimal haroratda ($T \approx 850-900 \text{ K}$) isitish va $T = 1100 \text{ K}$ da qisqa muddatli isitish amalga oshirildi.

1.5. Tadqiqot muammosini bayon qilishda olingan xulosalar

Qisqacha adabiyotlarni o'rganish shuni ko'rsatadiki, hozirgi vaqtda quyidagilarga bag'ishlangan ko'plab ishlar mavjud: kremniy va uning asosidagi birikmalarning emissiyasi va optik xususiyatlarini o'rganish; Si ning sirtida va sirt osti hududida nano o'lchamli fazalarni olish uchun ion bombardimonini qo'llash; kremniy asosidagi ko'p qatlamli tizimlarning tuzilishi va xossalarini olish va o'rganish usullari.

Metall silitsidlarning yupqa plyonkalarini olish va o'rganishga bo'lgan katta qiziqish, birinchi navbatda, ulardan noyob texnik xususiyatlarga ega bo'lgan qurilma tuzilmalarini yaratish uchun foydalanish imkoniyati bilan bog'liq, masalan, molekulyar nur epitaksisi va qattiq holat epitaksisi bilan olingan CoSi_2 va NiSi_2 plyonkalari. MDP va PDP tuzilmalarini, o'tkazuvchan va metall asosli tranzistorlarni, to'siq qatlamlarini va ohmik kontaktlarni yaratishda keng qo'llaniladi. Shu sababli, ko'plab ishlar silitsidlarning, ayniqsa CoSi_2 ning tarkibi, tuzilishi va xususiyatlarini tayyorlash va o'rganishga bag'ishlangan [14, 19-23]. Ushbu tizimlarda silitsid plyonkasi qalinligi kamida 30-50 nm. Ushbu plyonkalarining qalinligini kamaytirish mikroto'lqinli tranzistorlar va 100 gigagersli chegaralangan chastotada ishlaydigan integral mikrosxemalarni yaratishga yordam beradi. Yarimo'tkazgichlar yuzasida qalinligi $d < 5-10$ nm bo'lgan nanokristallar va nanoplyonkalarni olishning istiqbolli usullaridan biri kam energiyali ion implantatsiyasidir [17]. Xususan, CoSi_2 nanostrukturalari va nanoqatlamlari sirt va sirt osti Si qatlamida tavlanish bilan birgalikda Co^+ ionlarini implantatsiya qilish orqali olingan. Ularning tarkibi, tuzilishi va elektron xossalari o'rganilib, CoSi_2 qatlamlarini hosil qilishning asosiy mexanizmlari yoritilgan.

Ionlarni implantatsiya qilishda Si da turli nuqsonlar va nano o'lchamdagi tuzilmalarning hosil bo'lishi va turli elementlar atomlarining cho'kishi va ularning Si ning fizik xossalariga ta'siri o'rganilgan. Xususan, 100° da Pd ning Si bilan kimyoviy o'zaro ta'siri natijasida yuzaga keladigan chuqur darajali nuqsonlar qatlami 1 mkm chuqurlikka cho'zilishi ko'rsatilgan. Kam energiyali

ion implantatsiyasining Si, GaAs va CaF_2 monokristallarining kristall va elektron tuzilmalariga ta'siri [24-27] da o'rganilgan. Ko'rsatilganki, bu holda sirt qatlamlari tartibsiz bo'lib, bu monokristallarning sirt qatlamlari to'liq tartibsizlanguncha turli nuqsonlar hosil bo'ladi. Termal isitishdan so'ng MeSi_2 , GaMeAs va CaMeF_2 turdagi nanoplyonkalar hosil bo'ldi. MeSi_2/Si va GaMeAs tipidagi nano masshtabli fazalar diapazoni E_g ommaviy MeSi_2 va GaMeAs plyonkalariga qaraganda sezilarli darajada katta ekanligi ko'rsatilgan. Kvant o'lchamli effektlar paydo bo'ladigan nanostrukturalarning o'lchamlari tahmin qilinadi. Monatomik monokristalli yarimo'tkazgichlar (Si, Ge) o'ta yuqori vakuum sharoitida inert gazlar ionlari bilan bombardimon qilinganda, ionli bombalangan qatlamlarning tarkibi o'zgaradi va barcha xususiyatlarning o'zgarishi faqat sirtga yaqin qatlamlarning tartibsizligi bilan aniqlanadi.

Biroq, hozirgi kunga qadar Si ning yuzasida va sirt osti mintaqasida NiSi_2 ning nano o'lchamdagi fazalari va qatlamlarini olish imkoniyati haqida ishonchli ma'lumotlar yo'q. NiSi_2/Si tizimining xossalarini olish va o'rganishga qiziqish NiSi_2 va Si ning kubik panjaraga ega bo'lishi va ularning panjara doimiylari amalda bir-biridan farq qilmasligi ($a_{\text{Si}} \approx 5.41 \text{ \AA}$, $a_{\text{Ni}} \approx 5.42 \text{ \AA}$) bilan bog'liq. Va $\text{NiSi}_2 / \text{Si} (111)$ interfeysida mos keladigan yo'nalish yo'q. Bundan tashqari, NiSi_2 ning o'ziga xos qarshiligi $\sim 50\text{-}60 \text{ mK}\cdot\text{cm}$. Shuning uchun bu tuzilmalar geteroepitaksial MDP va PDP tizimlarini yaratishda juda istiqbolli.

Adabiyot ma'lumotlarini tahlil qilish quyidagi asosiy xulosalari vazifalar belgilashga imkon berdi

1. MLE usuli qalinligi $\theta > 100 \text{ \AA}$ bo'lgan bir hil silitsid plyonkalari va ko'p qatlamli tuzilmalarni yaratishning samarali usuli hisoblanadi; ion implantatsiyasi usuli $\theta = 20\text{-}50 \text{ \AA}$ qalinlikdagi ultra yupqa plyonkalar va omik kontaktlarni, shuningdek, substrat va o'sayotgan plyonka o'rtasida mos keladigan qatlamlarni yaratishga imkon beradi; Yuqori vakuumli termal diffuziya usuli $\sim 100 \text{ \AA}$ dan boshlab keng qalinlikdagi doimiy silitsid plyonkalari va ikki qatlamli tizimlarni olish imkonini beradi.

2. Nano o'lchamli SiSi_2 fazalari Si ning sirtga yaqin hududining 2 va 3-qatlamlarida olingan. 28 - 30 nm chuqurlikda yaratilgan $d = 8 - 10$ nm bo'lgan CoSi_2 nanofazalari $E_g = 0,85$ eV, qoplanish darajasi esa 0,25 - 0,3 ekanligi aniqlandi. Xuddi shu nanofazalarning ikkinchi qatlamini yaratishda ushbu tizimning E_g qiymati amalda o'zgarmaydi va qoplanish darajasi 1,5-2 martagacha oshadi.

3. CoSi_2/Si (111) geterostrukturasi yuzasida Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilish natijasida hosil bo'lgan Si nanostrukturalarining elektron va kristall tuzilmalari o'rganildi. $E_0 = 1$ keV va $D = 10^{14} - 5 \times 10^{15} \text{ sm}^{-2}$ da nanokristalli Si fazalar, $D \geq 4 \times 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ da qalinligi ~ 10 – bo'lgan bir hil uzluksiz Si plyonka hosil bo'lishi ko'rsatilgan. 15 Å hosil bo'ladi.

Biroq, bu ish boshlanishidan oldin:

1. Si ning yuzasida va yuza ostida NiSi_2 ning nano o'lchamli fazalari va qatlamlari olinmagan va ularni sintez qilish uchun optimal sharoitlar aniqlanmagan.

2. Sof bir kristalli Si (111) ning elektron va optik xususiyatlariga yupqa sirt qatlamlarining tartibsizlanishining ta'siri o'rganilmagan.

3. NiSi_2 nanostrukturalarining shakllanishining Si ning kristall va elektron tuzilishiga, emissiya elektrofizik va optik xususiyatlariga ta'siri o'rganilmagan.

4. Qattiq fazali epitaksiya va ion implantatsiyasi natijasida olingan NiSi_2/Si nanoplyonkalarining sirt morfologiyasi, elektron va optik xossalari o'rganilmagan.

Ushbu hal etilmagan muammolardan kelib chiqib, ushbu magistrlik dissertatsiya ishining asosiy maqsad va vazifalari shakllantirildi.

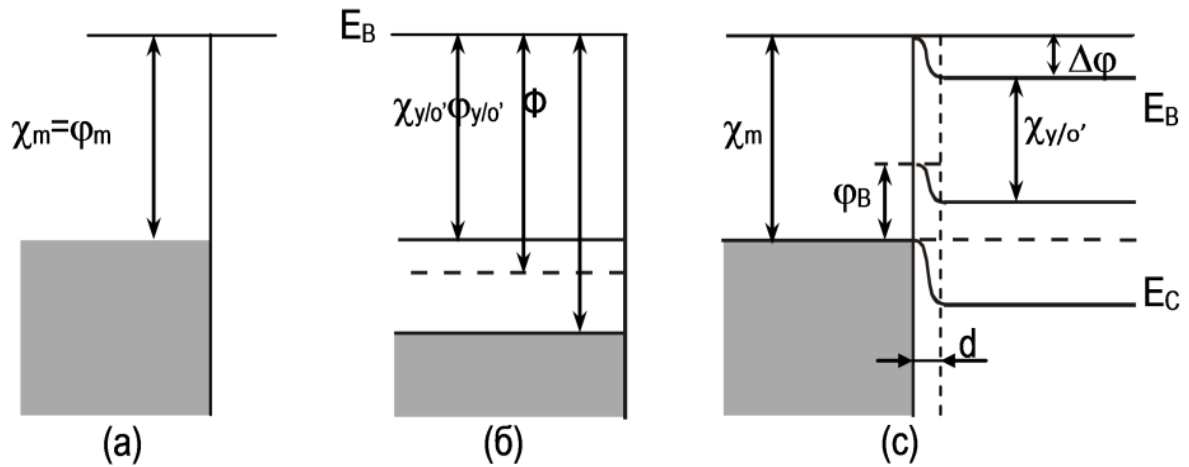
II-BOB. NANOPLYONKA OLIHNING ASOSIY TEKNOLOGIYALARI

Yarim o'tkazgichlar texnologiyasida strukturalarning sirtiga yupqa qatlamli qoplamalarni vakuumda o'tqazish yoki olib tashlash kabi jarayonlar katta o'rin egallaydi. Bu jarayonlar siyraklashgan gazlarda kechadigan molekular-kinetik hodisalarga asoslangan. Yupqa plyonkalar o'tqazishning ikkita asosiy usuli mavjud: termovakuumli bug'lantirib o'tqazish va katodli changlantirib o'tqazish. Termovakuumli bug'lantirib o'tqazishda modda bug'lanish temperaturasi qizdiriladi va uning bug'lari taglik sirtida kondensatsiyalanadi. Bunda taglikning temperaturasi bug' manbaining temperaturasidan pastroq bo'ladi. Katodli changlantirib o'tkazishda xona temperaturasida bo'lgan o'tqaziladigan modda gaz razryadi plazmasidagi kichik energiyali ionlar bilan bombardimon qilinadi. Buning natijasida changlangan atomlar taglikka etib boradi va uning sirtida kondensatsiyalanadi. Bu ikkala usuldan o'tkazuvchi, rezistivli va dielektrikli plyonkalar hosil qilishda foydalaniladi.

2.1. Metall va yarim o'tkazgich chegarasidagi qatlamning tuzilishi

Biz shu paytgacha yuza qatlamlarining tuzilishi bilan tanishib chiqdik. Yuza qatlamni ham "ikki muhit chegarasi" deb qarash mumkin. Ammo bu yerda, ya'ni ikkinchi muhitda atomlar umuman yo'q (vakuum sharoitida) yoki juda kam (gaz muhitida) bo'ladi. Biz endi qattiq jism bilan qattiq jism kontaktlarida ro'y beradigan hodisalar bilan qisqacha tanishib o'tamiz. Bunda asosan ideal hollarni va faqatgina elektron tuzilishnigina ko'rib o'tamiz. Jumladan, bir jism ikkinchi jism bilan kontakt hosil qilgan joydagi atomlarning diffuziyasini hisobga olmaymiz va bu joyda kristall panjara o'zgarmaydi deb faraz qilamiz.

Metall bilan yarimo'tkazgich o'zaro kontakt qilinganda ular orasida to'g'rilash xususiyatiga ega bo'lgan kontakt hosil bo'lishi 1874 yilda aniqlangan. 2.1–rasmda ideal hol uchun metall va yarim o'tkazgichning elektron tuzilishi, ular kontaktga kirmasdan oldingi va keyingi holati tasvirlangan.

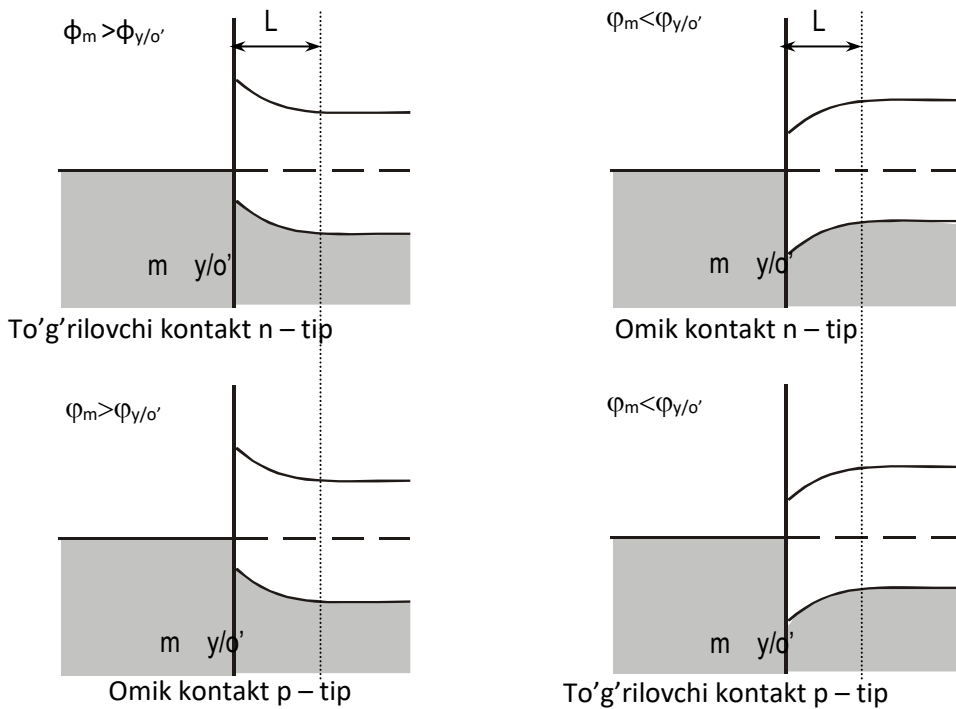


2.1-rasm. Energetik diagramma: a – metall; b – yarim o'tkazgich; v – metall-yarim o'tkazgich kontakti.

Umuman olganda, har qanday to'g'rilovchi kontaktda ikki jism chegarasida bar'yer (to'siq) hosil bo'ladi. Bu to'siq "Shottki bar'yeri" deyiladi. Uning kattaligi:

$$\varphi_B = \varphi_m - \chi_{y/o'}$$

(2.1)



2.2–rasm. Har xil metall – yarim o'tkazgich kontaktlarining energetik diagrammasi.

φ_B – Shottki bar'yerining kattaligi, φ_m – metallning chiqish ishi, $\chi_{y/o'}$ – yarim o'tkazgichning elektron qabul qiluvchanligi, d – metall va yarim o'tkazgich kontakt qilingandan keyingi oraliq (kontakt kengligi), E_F – Fermi sathi. Metall bilan yarim o'tkazgich qo'shilganda omik yoki to'g'rilovchi kontakt hosil bo'lishi mumkin. Qanday kontakt hosil bo'lishi yarim o'tkazgichning turiga hamda uning chiqish ishiga bog'liq bo'ladi (2.2–rasm).

Metall – yarim o'tkazgich kontaktida o'tish qatlami ichida termodinamik muvozanat Fermi sathlarining barobarlashishi tufayli o'rnatiladi. 5.1–rasmdagi holni (ya'ni $\chi_{y/o'} < \varphi_m$) 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 zaryadlanish 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:

$$\Delta\varphi = \chi_m - \chi_{y/o'} \quad (2.2)$$

Bunda d oraliqda elektr maydonning kuchlanishi

$$E = \frac{\Delta\varphi}{ekd} \quad (2.3)$$

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

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

$$L = \frac{\chi_m - \chi_{y/o'}}{4\pi e^2 \kappa n d} \quad (2.4)$$

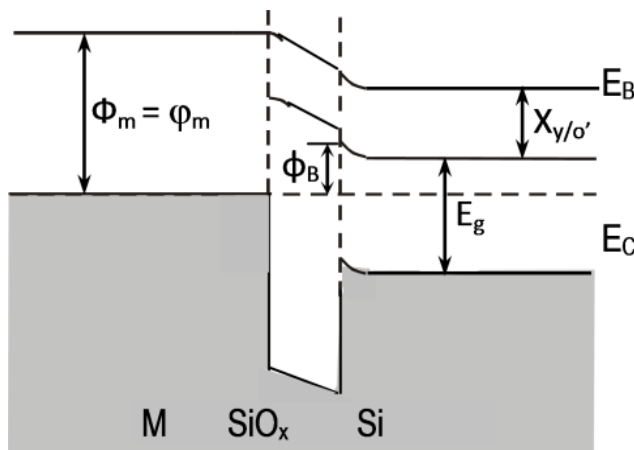
n – moddaning birlik hajmidagi elektronlar konsentratsiyasi.

Misol, $\chi_m - \chi_{y/o'} = 1 \text{ eV}$, $k = \omega$, $n_{y/o'} = 10^{14} \text{ sm}^{-3}$, $n_m = 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ va $d \approx 10^{-7} \text{ sm}$ bo'lsa, $L_{y/o'} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ sm}$, $L_m \approx 5 \cdot 10^{-11} \text{ sm}$ bo'ladi. Demak metallda L qalinlik juda kichik bo'ladi, yarim o'tkazgichda esa u sezilarli kattalikka ega bo'ladi. 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 nolga 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.

$$n(x) = n_0 e^{-\frac{\varphi(x)}{kT}} \quad (2.5)$$

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

Elektronlarning chiqib ketishi kontakt yaqinida yarim o'tkazgich zonalarining egilishiga olib keladi (2.2–rasm), bu egilish kengligi L ga teng bo'ladi.



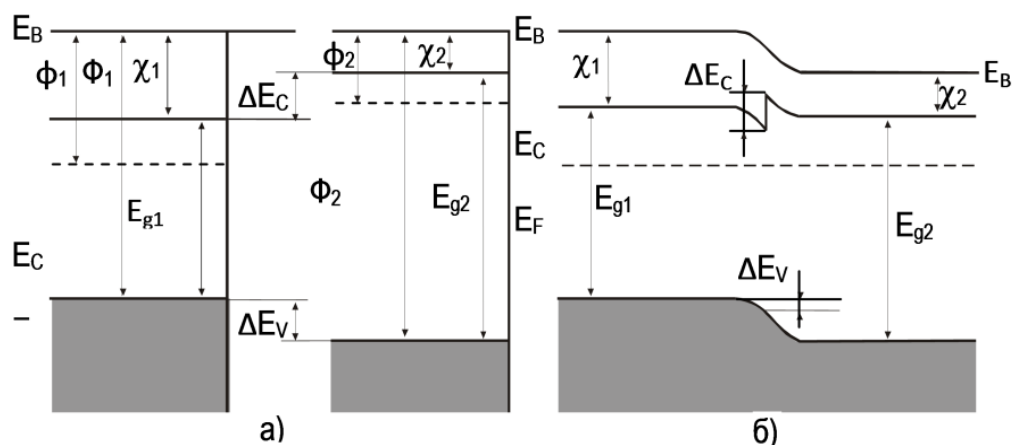
2.3–rasm. Yupqa oksid qatlamiga ega bo'lgan yarim o'tkazgich va metall orasidagi Shottki bar'yerining ko'rinishi.

Real holda har qanday yarim o'tkazgichning yuza qismida yupqa oksid qatlami bo'ladi. Masalan, kremniyning yuzida kremniy oksidi mavjud bo'ladi

($SiO_x \rightarrow SiO_2$). Shuning uchun ham real sistemalarda biz xohlaymizmi, yo'qmi, har doim yarim o'tkazgich va metall kontakti chegarasida oksid qatlami mavjud bo'ladi. Kontakt hosil qilishdan oldin yuqori vakuum sharoitida yarim o'tkazgich va metall juda yaxshilab tozalangan bo'lsa, oksid qatlami juda ham yupqa bo'ladi ($< 20 - 25 \text{ \AA}$). Oksid qatlamini hisobga olsak, kontakt yaqinidagi qatlamlarning zonaviy tuzilishini 2.3–rasmda keltirilgan shaklda tasvirlash mumkin bo'ladi.

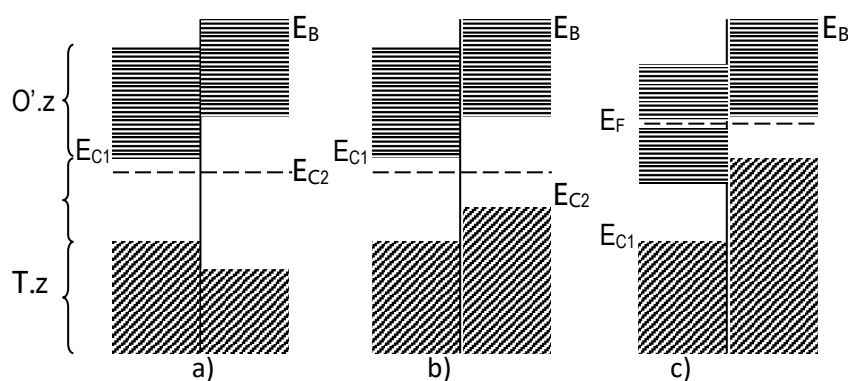
2.2. Yarim o'tkazgich va yarim o'tkazgich orasidagi chegaraviy qatlam

Hozirgi zamon texnologiyasida geteroo'tishlar tayyorlash eng dolzarb muammolardan biri bo'lib kelmoqda. Shuning uchun bitta yarim o'tkazgichning ustida ikkinchi yarim o'tkazgich qatlamlarini hosil qilish va chegaraviy qatlamni o'rganish keyingi vaqtda juda ham rivojlandi. Buning asosiy sababi hozirgi zamon mikroelektronika asboblarning (tranzistor, integral sxemalar, har xil nurlarning detektorlari, o'ta yuqori chastotali asboblari, axborotlarni eslab qoluvchi sistemalar) asosiy qismini bir-biri bilan kontaktga kiritilgan yarim o'tkazgichlar tashkil qiladi. Bitta tipdagi yarim o'tkazgich ustiga boshqa tipdagi yarim o'tkazgich o'tkazilsa va ularning tarkibi (energetik zonalarining tuzilishi, masalan, taqiqlangan zonaning kengligi) bir-biridan farq qilsa, geterostruktura hosil qilingan bo'ladi. Geteroo'tishga qisqacha quyidagicha ta'rif berish mumkin: **geteroo'tish – bu taqiqlangan zonalarining kengligi har xil bo'lgan ikkita yarim o'tkazgichlar kontaktdan hosil qilingan tizimdir. Masalan, Ge ($E_g = 0,7 \text{ eV}$) – $GaAs$ ($1,4 \text{ eV}$), Si ($1,1 \text{ eV}$) – $GaAs$ ($1,4 \text{ eV}$).** Bunday sistemalarni hosil qilish uchun har xil usullardan: purkash (adsorbtsiya), epitaksial o'tkazish, ionlar implantatsiyasi va boshqalardan foydalaniladi. Ikkita yarim o'tkazgich kontaktda kiritilganda yangi bir xususiyatli materialning paydo bo'lishi asosan kontakt qilingan sohada elektron tuzilishning keskin o'zgarishi sababli bo'ladi. 2.4–rasmda bir-biridan ta'qiqlangan zonasining kengligi bilan farq qiladigan ikkita n – tipdagi yarim o'tkazgichning kontaktdan oldingi va kontakt hosil qilingandan keyingi zonaviy tuzilishi tasvirlangan.



2.4–rasm. n – tipdagi yarim oʻtkazgichlarning kontaktdan oldingi (a) va keyingi (b) zonaviy diagrammasi.

Umuman yarim oʻtkazgichlar kontaktlari uchun ikki xil turdagi getero strukturalar mavjud boʻladi. Ularning ideal hol uchun (kontakt sohasida roʻy beradigan zonalar egilishini hisobga olmasdan hosil qilingan) energetik diagrammalari 2.5–rasmda keltirilgan.

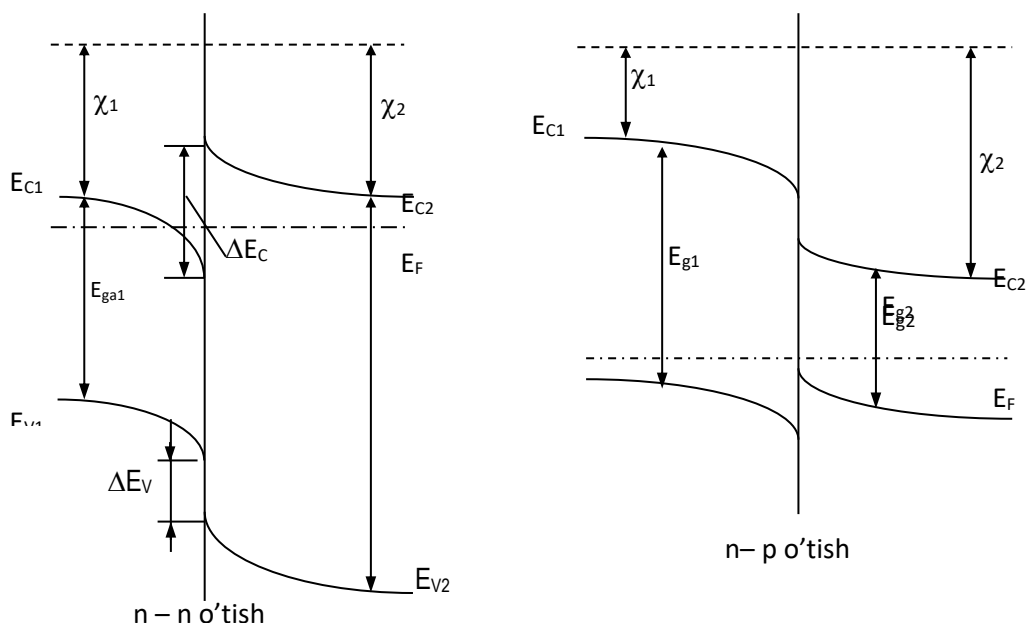


2.5-rasm. Geterooʻtishlarning tiplari: a – I tip, oʻz ichiga oluvchi; b – II tip, pogʻonali; c – III tip, uzilgan.

Bu rasmda keltirilgan misollar ideal hol uchun mos keladi. Real holda zonalarining egilishlarini va energetik zonalarining boshqa xususiyatlarini hisobga olish kerak boʻladi. Geterooʻtishlar bir xil tip oʻtkazuvchanlikka (masalan n–n, p–p) ega boʻlsa uni izotipli geterooʻtish, har xil tip oʻtkazuvchanlikka ega boʻlsa anizotipli geterooʻtish deyiladi. 2.6–rasmda zonalarining egilishini hisobga olgan holda izotip va anizotip geterooʻtishlarga misollar keltirilgan.

2.3. Molekulyar nurli epitaksiya

Mikroelektronikaning asosiy yutuqlari, nanoelektronikaning paydo bo'lishi va rivojlanishi tarkibi, tuzilishi va xususiyatlari jihatidan mukammal yupqa va o'ta yupqa ko'p komponentli va ko'p qatlamli plyonkalar tizimlarini hosil qilish bilan chambarchas bog'liqdir.



2.6–rasm. Geteroo'tishli kristallning zonaviy diagrammasi.

Plyonkali materiallarning elektronika sohasida ishlatilishida eng asosiy o'rinni epitaksial plyonkalar egallaydi. Bunday plyonkalar katta va o'ta katta integral sxemalar ishlab chiqarishda, 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.

Kristill panjarasining tuzilishi asosning kristall panjarasi tuzilishi bilan bir xil bo'lgan monokristall plyonkalar epitaksial plyonkalar deyiladi.

MNE da hosil bo'layotgan plyonka berilgan asosning yuzasida o'sadi va bu yuza bilan plyonka atomlari aralashib ketmaydi. MNE da kerakli atomlar asosning yuzasiga kelib o'tiradi va yuzada qatlam-qatlam o'sib boraveradi.

Kremniyning yuzasiga kobalt kremniy ($CoSi_2$) plyonkasini MNE yo'li bilan hosil qilish jarayoni: yuqori vakuum sharoitida yuzasi juda yaxshi tozalangan kremniy monokristalining sirtiga kobalt (Co) va kremniy (Si) manbalaridan ularning atomlari kelib o'tira boshlaydi. Bunda har bir momentda bitta kobalt atomi kelib o'tirganda, ikkita kremniy atomi tushadi. Asosning harorati shunday tanlanadiki, yuzaga kelib o'tiradigan atomlar $CoSi_2$ birikmasini hosil qiladi va ularning plyonkasi epitaksial o'sa boshlaydi.

Boshqa 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 hisobiga epitaksiya haroratini 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'tkazish 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 mumkin, 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 kontsentratsiyasini o'zgartirish yo'li bilan xususiyati o'zgarib boruvchi tizimlarni hosil qilish mumkin.

Yuqorida ko'rsatilgan afzalliklar tufayli MNE plyonkalar mikroelektronikaning rivojlanishida asosiy rolni 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 rolni o'ynaydi.

Shunday qilib, kristall panjara parametrlari bir xil bo'lgan MNE qatlam va asos chegarasida, nazariy jihatdan atomlarning o'zaro aralashib ketishi ro'y bermaydi. Ammo amaliyotda har qanday ideal sharoitda, masalan avtoepitaksiya (Si monokristali yuzasida Si qatlami, Ge da Ge va h.k.) usuli bilan hosil qilingan plyonkalarda ham asos va plyonka chegarasida atomlarning o'zaro aralashib ketishi ro'y beradi. Ya'ni ular chegarasida yangi qatlam hosil bo'ladi. Bunday qatlam chegaraviy qatlam deb ataladi. O'ta yuqori vakuum ($R \leq 10^{-8}$ Pa) sharoitida yuqori darajada silliqlangan va tozalangan asos yuzasida avtoepitaksial qatlam hosil qilinsa, chegaraviy qatlamning kengligi $10 \div 20$ Å bo'ladi. Shunday sharoitda asosning yuzasida boshqa tarkibli plyonka o'stirilsa va ularning panjara doimiylari o'zaro juda kam farq qilsa ($< 0,7\%$), chegaraviy qatlamning qalinligini $20 \div 50$ Å gacha kamaytirish mumkin. Agar plyonka va asosning panjara parametrlari katta farq qilsa ($3 \div 4\%$), chegaraviy qatlamning qalinligi $400 \div 500$ Å gacha borishi mumkin.

Chegaraviy qatlamning kengligi yana plyonka va asosning sirtiy energiyalariga bog'liq bo'ladi. Ularning sirtiy energiyalari keskin farq qilishi plyonkaning orolchali bo'lib o'sishiga va natijada notekis qatlamlar hosil bo'lishiga olib keladi. Natijada chegaraviy qatlamning kengligi ham o'zgaruvchan bo'ladi.

Epitaksial plyonkalar hosil qilish qizdirish va keyin sovitish jarayonlari bilan uzviy bog'liqdir. Shuning uchun ham hosil qilinayotgan plyonkaning mukammalligi ham chegaraviy qatlamning kengligi va sifati hamda plyonka va asosning kristall panjaralarining kengayish harorat koeffitsientlari kattaliklariga bog'liq bo'ladi. Agar ularning harorat koeffitsientlari sezilarli farq qilsa, qizdirish yoki sovitish jarayonida plyonka va asos orasida qo'shimcha kuchlanish vujudga keladi va u plyonkaning ham, chegaraviy qatlamning ham sifatiga salbiy ta'sir qiladi.

Shunday qilib, mukammal plyonkalar va chegaraviy qatlamlar hosil qilish uchun o'ta yuqori vakuum, asosning o'ta yuqori darajada silliqilanishi va tozalanishi, molekulyar va atomar manbalarini yuqori tozalash, o'tqazish rejimlarini juda aniq olib borish bilan bir qatorda quyidagilar ham katta rol o'ynar ekan:

1. Asos va plyonka panjara parametrlarining bir-biriga juda yaqin bo'lishi ($\leq 0,7\%$);
2. Asos va plyonka sirtiy solishtirma erkin energiyalarining (SSEE) mumkin qadar keskin farq qilmasligi;
3. Kristall panjara chiziqli kengayish harorat koeffitsientlari (ChKHK) ning o'zaro yaqin bo'lishi.

Hozirgi zamon elektronikasida *Si*, *GaAs*, *CoSi₂*, *CaF₂* lar va ularning birikmalari YaDYa va MDYa tizimlar hosil qilishda keng qo'llaniladi. Quyidagi 2.1-jadvalda ularning ayrim kattaliklari keltirilgan.

2.1-jadval

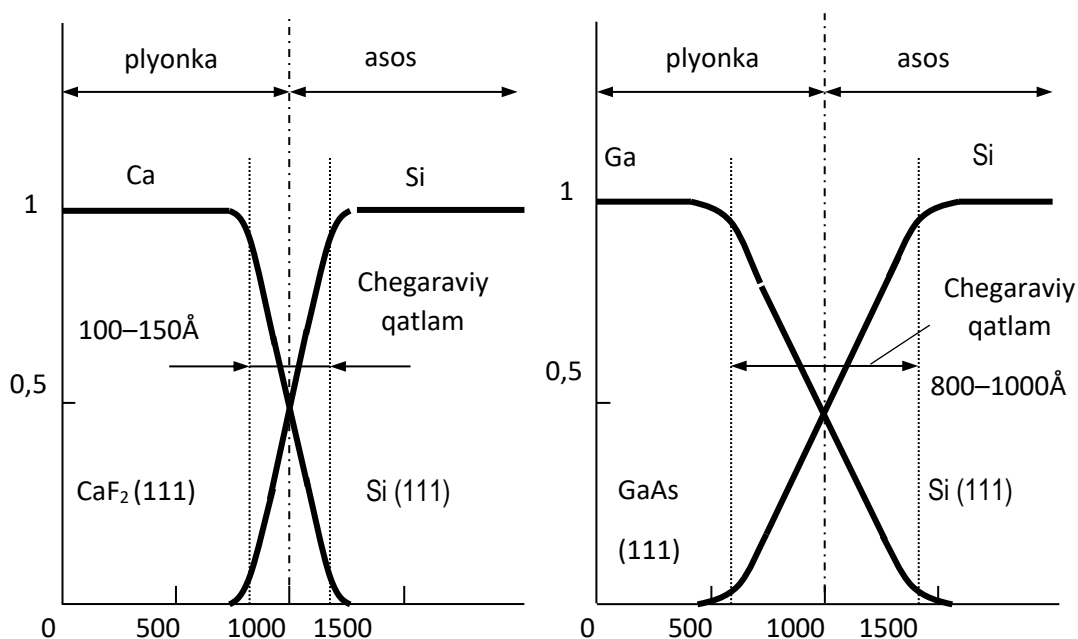
Si, *GaAs*, *CoSi₂*, *CaF₂* larning fizikaviy va strukturaviy xususiyatlari

Material	Kristall tuzilish	Panjara	CHKHK, $\text{\AA}/^\circ\text{S}$	Erish haro-rati T, $^\circ\text{S}$	Fizikaviy xususiyati	SSEE, erg/sm^2		
						100	110	111
<i>Si</i>	Kubik (olmos)	5,431	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1415	yarim o'tk- ch	1710	1690	1360
<i>CaF₂</i>	Kubik (flyuorit)	5,464	$19,1 \cdot 10^{-6}$	1360	diel-k	—	1082	540

$CoSi_2$	Kubik (flyuorit)	5,365	$15,4 \cdot 10^{-6}$	1320	metall	4130	2960	2380
$GaAs$	Kubik (aldamchi ruh pan- jarasi)	5,65 3			yarim o'tk- ch			

Jadvaldan ko'rinadiki, $CoSi_2-Si-CaF_2$ tizimini hosil qilish har tomonlama nisbatan qulayliklarga ega. Chunki ularning panjaralari bir xil tipda va doimiysi katta farq qilmaydi. Ammo ChKHK farq qilganligi tufayli chegaraviy qatlam kengroq bo'ladi. Plyonka hosil qilishda yuza tomonga qaysi kristallografik tomon to'g'ri kelishi ham muhim rol o'ynaydi. Masalan, (100) yo'nalishda CaF_2 uchun SSEE juda katta. Shuning uchun bunday sirtlarda o'ta mukammal plyonkalar olish deyarli mumkin emas.

$GaAs$ ning panjara doimiysi keskin farq qilganligi uchun $Si-GaAs$, CaF_2-GaAs , $CoSi_2-GaAs$ tizimlarida o'tish qatlamlari juda keng bo'ladi.

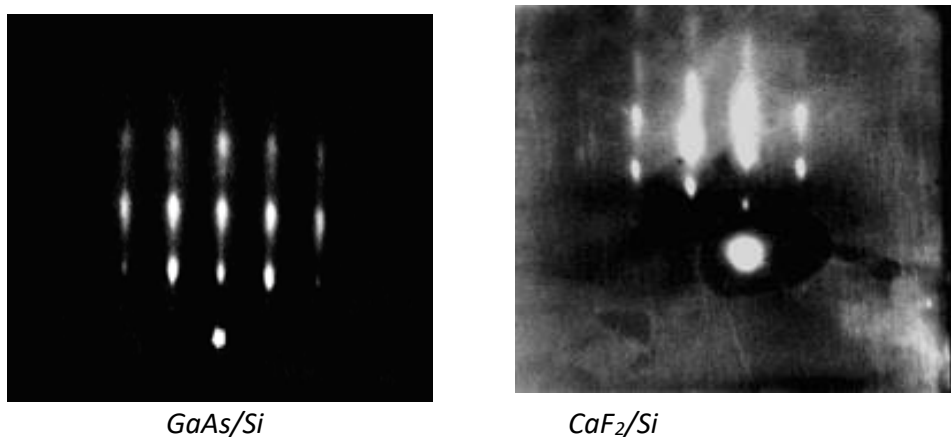


2.7–rasm. CaF_2/Si va $GaAs/Si$ chegaralarida atomlar konsentratsiyalarining chuqurlik profili bo'yicha o'zgarishi.

2.7–rasmda har xil “plyonka-asos” tizimlari uchun chegaraviy qatlam qalinliklari keltirilgan. Rasmdan ko’rinadiki, panjara doimiysi katta farq qilsa, chegaraviy qatlam ham juda keng bo’lar ekan.

Panjara doimiylarining mos kelmasligi o’stirilayotgan MNE plyonkaning kristall tuzilishida nuqsonlarni vujudga keltiradi. Bu ayniqsa yupqa plyonkalarda ($\leq 200 \div 300 \text{ \AA}$) yaqqol seziladi. 2.8–rasmda Si yuzasida o’stirilgan CaF_2 va GaAs plyonkalarining elektronogrammalari (katta energiyali difraksiya tasvirlari) keltirilgan. Ikkala holda ham plyonka qalinligi $300 \text{ \AA}$.

Rasmdan ko’rinadiki, GaAs/Si uchun tasvir CaF_2/Si ga nisbatan ancha chaplangan va ikkilamchi reflekslar mavjud. Buning asosiy sababi GaAs va Si panjara doimiylarining bir – biridan sezilarli farq qilishidir (5.1-jadvalga qarang).



2.8–rasm. Si (111) yuzasida hosil qilingan GaAs va CaF_2 plyonkalarining elektronogrammalari.

2.4. Qattiq fazali epitaksiya (QFE) usuli bilan olingan plyonka va asos orasidagi chegaraviy qatlam

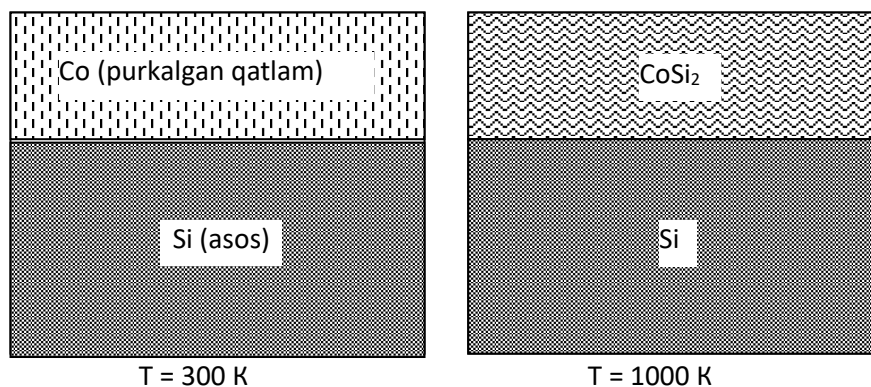
Qattiq fazali epitaksiya usulida yuzaga kelib o’tirayotgan atomlar (molekulalar) asos atomlari bilan aralashib o’zaro birikma hosil qilib yangi xususiyatli plyonkani vujudga keltiradi. 2.9–rasmda CoSi_2 plyonkasini QFE usuli bilan hosil qilishning shakliy tasviri keltirilgan.

Qattiq fazali epitaksiya ham molekulyar nurli epitaksiya (MNE) kabi o’ta yuqori vakuumda amalga oshiriladi. QFE ni uchta bosqichga ajratish mumkin:

- 1) asos yuqori darajada aralashmalardan tozalanadi va yuzasi silliqlanadi, kelib o'tiradigan atomlar manbai ham qizdirish yo'li bilan aralashmalardan tozalanadi;
- 2) xona haroratida (yoki past haroratda) asos yuzasiga kerakli atomlar o'tqaziladi;
- 3) asos sekin-asta kerakli haroratgacha qizdiriladi, bunda yuzadagi plyonka atomlari asos ichiga va asosdagi atomlar plyonka ichiga kirib boradi, ular orasida kimyoviy reaksiya ro'y beradi va birikmalar hosil bo'ladi.

Shunday qilib, QFE da avvaliga asosning yuziga kerakli atomlar (molekulalar) o'tqaziladi, so'ng asos kerakli darajada qizdirilishi yo'li bilan yupqa epitaksial qatlam olinadi.

QFE da hosil bo'ladigan plyonkaning tarkibi va qalinligi o'tqazilayotgan atomlarning konsentratsiyasiga, haroratiga va ma'lum paytgacha vaqtga bog'liq bo'ladi.



2.9–rasm. QFE usuli bilan CoSi₂ plyonkasining hosil bo'lish jarayoni.

Ayrim hollarda 2 yoki 3 komponentli plyonkalar olishda QFE ning boshqacha usuli ham qo'llaniladi. Masalan, kobalt-kremniy (CoSi₂) hosil qilish uchun kremniyning yuzasida kremniy plyonkasi hosil qilinib, uning yuzasiga kobalt o'tqaziladi, yoki kremniyning yuzasiga kobalt o'tqazilib, uning yuzasiga kremniy o'tqaziladi, keyin kerakli darajada qizdiriladi.

QFE quyidagi kamchiliklarga ega:

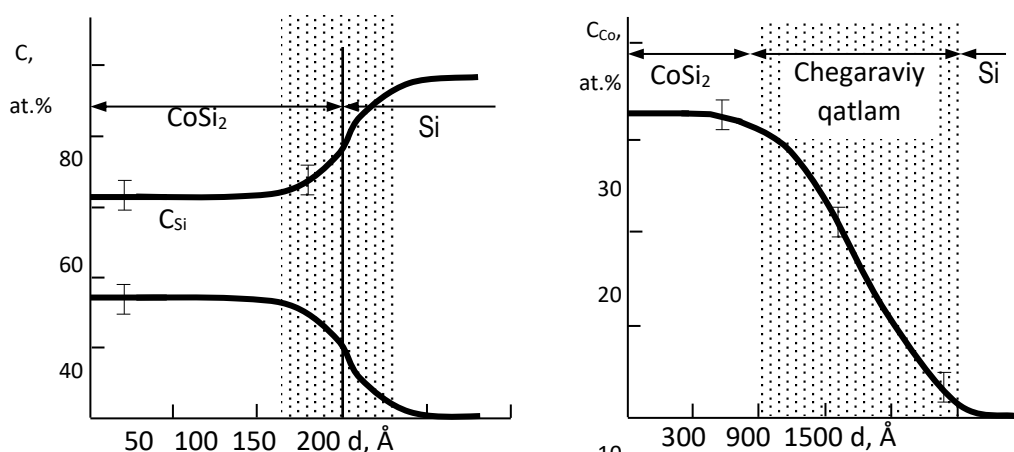
- a) plyonkada har xil kanallar hosil bo'lishi mumkin;

- b) ayrim qismlarda tarkib boshqacha bo'lishi mumkin;
- v) plyonka atomlarning aralashib ketishi hisobiga hosil bo'lgani uchun uning qalinligini to'g'ri nazorat qilish qiyin;
- g) uning asos bilan chegarasi bir tekis bo'lmaydi va hokazo.

Reaktiv epitaksiya deb, asosning yuzasiga atomlarni kelib o'tirishi jarayonida asosni qizdirish yo'li bilan asos va kelib o'tirgan modda atomlaridan tashkil topgan plyonka hosil qilish jarayoniga aytiladi.

Shunday qilib, QFE da ham RE da ham plyonka asosning yuza va yuza osti qatlamlarida o'sadi. Bunday o'sish o'zaro diffuziya hodisasiga asoslangan. Bunda yuzaga o'tqazilgan (tushayotgan) atomlarning kontsentratsiyasiga bog'liq ravishda har xil qalinlikdagi plyonkalar olish mumkin. QFE va RE o'sishda asos va plyonka orasida qat'iy chegara bo'lmaydi. Masalan, $CoSi_2$ va Si orasida qat'iy chegara yo'q. $CoSi_2$ plyonkaning pastki chegarasidan boshlab Co ning miqdori sekin-asta kamayib boradi, ya'ni chegaraviy qatlam vujudga keladi. Ko'pincha bu chegaraviy qatlamning kengligi 1000 – 1200 Å gacha boradi. Agar $CoSi_2$ epitaksial plyonka bo'lsa, chegaraviy qatlam ham epitaksial bo'ladi.

2.10–rasmda $CoSi_2/Si$ (110) plyonka – asos tizimida Co atomlari kontsentratsiyasining (C_{Co}) profil bo'yicha taqsimlanishi ko'rsatilgan.



2.10–rasm. $CoSi_2/Si$ chegarasida atomlarning profil bo'yicha taqsimlanishi.

Rasmdan ko'rinadiki, $CoSi_2$ plyonkasining qalinligi 100–150Å dan kichik bo'lsa, o'tish qatlamining qalinligi ham 100 – 120 Å dan katta bo'lmaydi, nisbatan

qalin $>100 - 150 \text{ \AA}$ plyonkalar olishda esa chegaraviy qatlam qalinligi keskin oshib ketadi.

Shuni ta'kidlash kerakki, plyonka qalinligi $800 - 1000 \text{ \AA}$ dan keyin qancha kattalashtirilsa ham chegaraviy qatlam qalinligi juda kam o'zgaradi

2.5. Kichik energiyali ionlar implantatsiyasi.

Energiyaga bog'liq ravishda ion inplantatsiya usulini shartli ravishda 3turga bo'lish mumkin:

1 - kichik energiyali $E_i \approx 0.2-10 \text{ keV}$

2 - o'rta energiyali $E_i \approx 10-50 \text{ keV}$

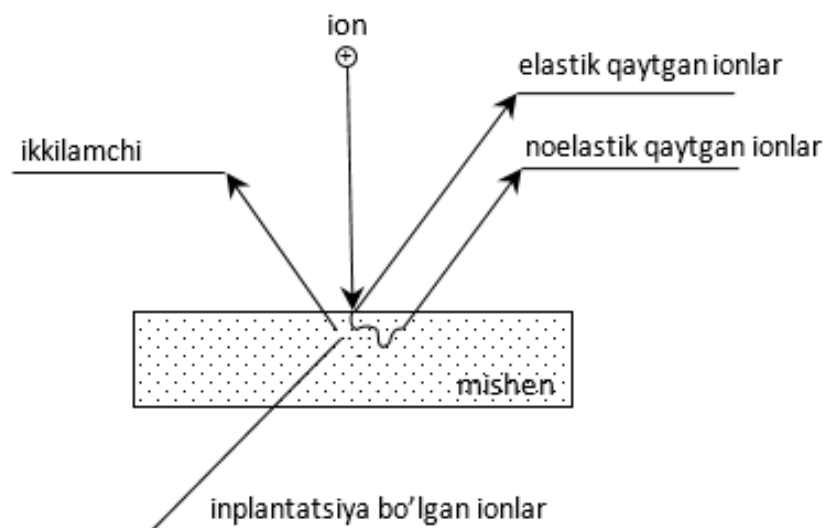
3 - katta energiyali $E_i > 50 \text{ keV}$.

O'rta va katta energiyali ionli inplantatsiyasi yarimo'tkazgichlarda p yoki n tipli aralashmalar hosil qilish uchun ishlatiladi. So'ngi yillarda ular chuqur qatlamlarda nanonuqtalar olish uchun ham ishlatilmoqda. Kichik energiyali ionlar implantatsiyasi asosan qattiq jismni yuza qatlamlarini modifikatsiya qilish uchun, hamda nanofazalar, nanoklasterlar, nanokristallar va nanoplenkalar olish uchun qo'llanilmoqda. Modifikatsiya jarayonini sirtida reaksiyasiz amalga oshirish mumkin, buning natijasida sirtning fizik xususiyatlari o'zgarib boradi va ikkilamchi emissiya xususiyati oshib boradi. Ion bombardirovka – mishenga urilgan ionlar kristall ichida qolishi ham yoki qolmasligi ham mumkin. Ion inplantatsiyada esa ionlar mishen ichida qoladi.

Kichik energiyali ionlar inplantatsiyasida ionlar asosan qattiq jismning yuza va yuza osti qatlamlariga joylashadi. Ionlar monokristall yuziga tushganda, ularning ayrimlari kanallar bo'ylab o'z harakatini davom ettirishi va bu uzoq masofalargacha davom etishi mumkin.

Kanallanish ikki xil bo'ladi: o'q va tekislik bo'yicha. Ionlarni asosiy qismi betartib tarqalib yuza osti qatlamlarga joylasha boshlaydi, bunday joylashish diffusion joylashish deb ataladi. Ular energiyaga bog'liq ravishda muayyan bir chuqurlikda joylashadi. Ionlar joylashgan qatlamlarni ionli legirlangan qatlam deb ataladi. Ionli legirlangan qatlam va bu qatlamning pastida, legirlangan

qatlamlardan ko'ra 2-3 barobar katta bo'lgan qatlamlarni kristall panjarasi buzuladi va amorflana boshlanadi.



2.11 –rasm. Ion implantatsiya jarayonida sirtida yuz beradigan hodisalar

Kerakli brikmanni hosil qilish uchun, amorf qatlamlarni kristallash uchun ion implantatsiyadan so'ng, haroratli yoki lazer nuri bilan ishlov beriladi.

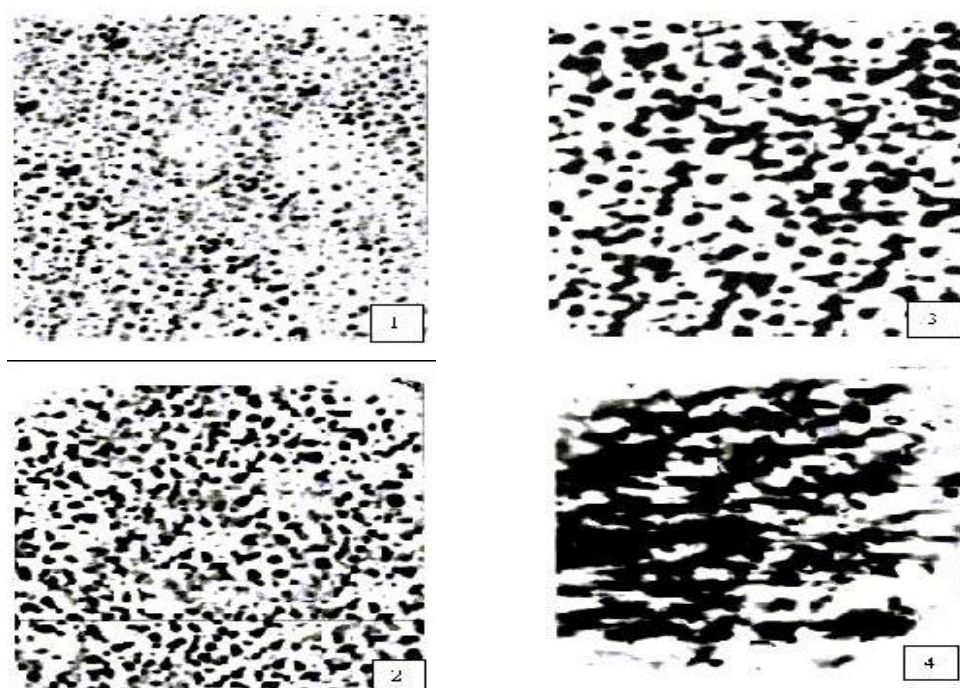


2.12-rasm. Ion legirlangan qatlamning ko'rinishi

Tajribalar ko'rsatadiki, kichik dozalarda $D < 10^{15} \text{sm}^{-2}$ ionlar yuzani alohida – alohida maydonlariga tushadi, bu joylarni shartli ravshida nanoklasterlar, kattaroq bo'lsa orolchalar deb atash mumkin. Bu no'munalarni qizdirib monokristallar hosil qilish mumkin. Shu usul bilan Si yuzasida BaSi_2 , CoSi_2 ; GaAs yuzasida esa $\text{Ga}_x\text{Ba}_{1-x}\text{As}$, $\text{Ga}_x\text{Na}_{1-x}\text{As}$ larning nanoklasterlari olingan.

Ionlar dozasi oshirilib borganda klasterlar kengayib, orolchalar hosil bo'ladi, katta dozalarda $D > 10^{16} \text{sm}^{-2}$ yaxlit legirlangan qatlam hosil bo'ladi, bu

qatlamni qizdirib yangi turdagi nanomaterial olish mumkin. Ion implantatsiya usuli yordamida bir xil atomli plenklar olish, asosan yuza va yuza osti qismlariga ma'lum dozali boshqa atomlarni kiritish orqali, shu material yuzasida va yuzaga osti qatlamlarida nanomateriallar yoki nanplenklar hosil qilish mumkin.



2.13– rasm. Ba^+ ionlari bilan legirlangan Si(111) sirtiing ko'rinishi,
 $E_i=1keV$

Bunday turdagi materiallar lazer texnologiyalarida har xil kuchaytiruvchi qurilmalarda, tranzistorlarni ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi. Agar birlik yuzaga tushayotgan ionlar konsentratsiyasi $10^{14}-10^{15}sm^{-2}$ ta bo'lsa, u holda yuzaning turli nuqtalarida nanomateriallar hosil qilinadi, doza ortib borishi bilan yuzada nanoplenklar hosil bo'ladi.

Termovakuumli bug'lantirib o'tqazish

Usulning asosi. Usul modda bug'ining yo'nalgan oqimini hosil qilish va bu bug' oqimini temperaturasi bug' manbai temperaturasidan kichik bo'lgan taglik sirtiga kondensatlanishiga asoslangan. Termovakuumli bug'lantirib o'tqazish jarayonini to'rtta bosqichga bo'lish mumkin: modda bug'ini hosil qilish, bug'ning manbadan taglikka tomon tarqalishi, taglikda bug'ning kondensatsiyalanishi, o'sish markazlarining hosil bo'lishi va plyonkaning o'sishi.

Modda bug'ini hosil qilish uchun modda bug'lantiriladi yoki sublimatsiyalanadi. Modda qizdirilganda undagi atomlarning o'rtacha kinetik energiyasi oshib boradi. Buning natijasida ularning atomlararo bog'lanishni uzish ehtimoli ham oshadi. Atomlar sirtidan ajralib chiqadi va fazoda tarqalib bug' hosil qiladi.

Tizimning muvozanat holatida, ya'ni modda sirtidan chiqib ketayotgan atomlar soni qaytib tushayotgan atomlar soniga teng bo'lgan holatga mos keluvchi bug'ning bosimi r_s to'yingan bug'ning bosimi deyiladi. Bug'lanishning shartli temperaturasi deb $r_s = 1,33$ Pa ga teng bo'ladigan moddaning temperaturasi aytiladi.

Bug'lanishning solishtirma tezligi deb 1 sm^2 yuzadan bir sekunda bug'lanayotgan moddaning grammlar hisobidagi miqdoriga aytiladi va quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$V_{\text{öyç}} = 5,85 \rho_s \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (2.6)$$

bu yerda p_s – modda to'yingan bug'ining bosimi, Pa; M – moddaning molekular massasi, g/mol; T – moddaning temperaturasi, K.

Bug'ning manbadan taglikka tomon tarqalishi birinchi navbatda vakuum darajasi ta'sir qiladigan diffuziya va konveksiya yo'llari bilan amalga oshadi. Bug'lanayotgan materialning isroflanishini kamaytirish va bir xil qalinlikdagi plyonka hosil qilish uchun zarrachalarning taglik tomon to'g'ri chiziqli harakatini amalga oshirish kerak. Buning asosiy sharti bug' zarrachasining erkin yugurish yo'li uzunligi manba – taglik masofasidan katta bo'lishligidir.

Gazlarning kinetik nazariyasiga binoan:

$$\lambda_{o'rt} = \kappa T / (\pi \sqrt{2} \delta^2 p) \quad (2.7)$$

bu yerda $\lambda_{o'rt}$ – gaz molekulasining erkin yugurish yo'lining o'rtacha uzunligi, sm;

$k = 1,37 \cdot 10^{-17} \text{ Pa} \cdot \text{sm}^3/\text{K}$ – Boltsman doimiysi; T – gazning absolyut temperaturasi, K; δ – gaz zarrachasining effektiv diametri, sm; r – gazning bosimi, Pa.

(2.7) ifodaga binoan $r \approx 10^{-3}$ Pa dan boshlab gaz zarrachalarining erkin yugurish yo'li uzunligi bug' manbaidan taglikkacha bo'lgan masofadan (bu masofa sanoatda ishlatiladigan vakuum qurilmalarida 30 sm dan oshmaydi) katta bo'ladi. Demak, mana shu bosimdan boshlab bug' zarrachasining qoldiq gaz molekulalari bilan to'qnashish ehtimolligi juda kichik bo'ladi va bug'lantirilayotgan moddaning zarrachalari taglik tomon to'g'ri chiziqli harakat qiladi.

Taglik sirtida bug'ning kondensatsiyalanishi taglikning temperaturasi va atomli oqim zichligiga bog'liq bo'ladi. Taglikka yetib borgan bug' atomlari a) shu zahoti undan qaytishi (elastik to'qnashish), b) adsorbsiyalanadi va qisqa vaqtdan so'ng taglikdan qaytib chiqishi (qayta bug'lanish), v) adsorbsiyalanadi va sirt bo'ylab qisqa vaqtli migratsiyadan so'ng unda butunlay qoladi (kondensatsiya).

Bug' atomlarining taglik atomlari bilan bog'lanish energiyasi taglik atomlarining o'rtacha energiyasidan katta bo'lsa, kondensatsiya kuzatiladi, aks holda atomlar sirtdan qaytib ketadi. Agar taglik qizdirilgan bo'lsa, uning atomlarining energiyasi katta va bug'larning kondensatsiyalanish ehtimoli kichik bo'ladi.

Bug' oqimining berilgan zichligida taglik sirtdan hamma atomlar qaytib ketadigan va yupqa qatlam hosil bo'lmaydigan temperatura kondensatsiyaning kritik temperaturasi deyiladi.

Berilgan temperatura uchun atomar oqimning kritik zichligi deb, taglikda atomlar kondensatsiyalanadigan eng kichik zichlikka aytiladi.

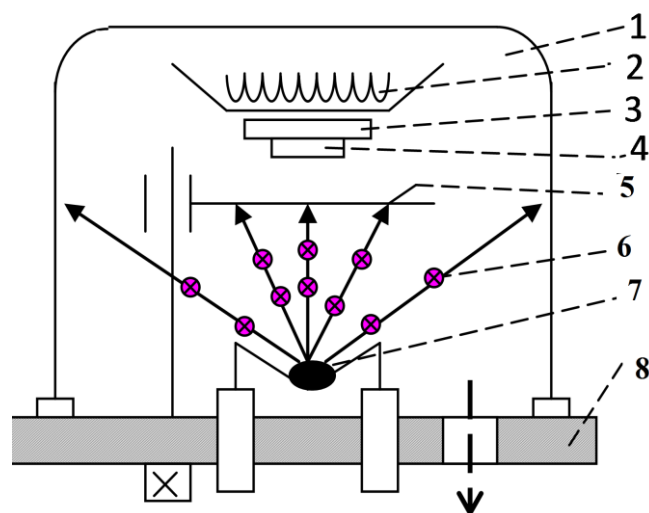
O'sish markazlarining hosil bo'lishi atomlarning atom – taglik tizimida erkin energiyaning minimumiga mos keluvchi o'rinlarni topish natijasida ro'y beradi. Bug'larning kondensatsiyalanishi davomida o'simtalar o'sib boradi, ular orasida birlashtiruvchi ko'priklar hosil bo'ladi, o'simtalar birlashib yirik orolchalarga aylanadi. Bundan so'ng orolchalar birlashib bitta to'r hosil bo'ladi. To'r yaxlit plyonkaga aylanadi va qalinlik bo'yicha o'sish boshlanadi. Mana shu vaqtdan boshlab taglikning ta'siri yo'q bo'ladi va bug' zarrachalari sirtdan umuman qaytmasdan hammasi amalda kondensatsiyalana boshlaydi.

Termovakuumli bug'lantirish (TVB) texnikasi. Kremniy oksidi plyonkalarini termik bug'lantirish bilan hosil qilish jarayoni maxsus bosimli vakuum kameralarida o'tkaziladi. Buning uchun VUP-5 vakuum qurilmasidan foydalaniladi. Jarayonning sxemasi 2.14-rasmda keltirilgan. Jarayon vakuum kamerasini yuklash bilan boshlanadi: bug'lantiriluvchi material tigellarga joylashtiriladi, tagliklar taglik ushlagichlarga, niqoblar niqob ushlagichlarga o'rnatiladi. Undan keyin kamera germetik yopilib, undagi havoni so'rish boshlanadi. Berkitgich (zaslonka)ning yopiq holatida tagliklarni belgilangan haroratgacha, bug'latgichlar esa bug'lanish haroratigacha qizdiriladi. Kameradan havoni so'rish chegaraviy vakuum darajasigacha amalga oshiriladi.

Bundan keyin berkitgich ochiladi va chang-lantirish boshlanadi. Belgilangan qalinlikdagi plenka hosil qilinganidan keyin berkitgichni yopish yo'li bilan changlatish jarayoni to'xtatiladi. Tagliklar sovitiladi va keyin sekin - asta kameraga havo kiritiladi, so'ng tagliklar yechib olinadi.

TVB jarayonining asosiy parametrlari: vakuum kamerasidagi bosim, bug'lantirgichlarning temperaturasi, tagliklarning temperaturasi, bug'lantirish vaqti.

Usulning ustunliklari va kamchiliklari. TVB jarayoni yaxshi o'rganilgan bo'lib, ko'pgina passiv elementlar hosil qilish, yarim o'tkazgichli strukturalarni metallash imkoniyatini beradi, fotoshablonlar va shu kabilarni tayyorlashda qo'llaniladi. TVB yordamida metallar, yarim o'tkazgichlar, dielektriklarning plenkalarni hosil qilish mumkin. Jarayonni avtomatlashtirishning nisbatan osonligi EHM yordamida boshqariladigan murakkab vakuum qurilmalar va komplekslar yaratish imkoniyatini beradi.



2.14-rasm. Termovakuum changlatish jarayonining

sxemasi: 1–vakuum kamerasi, 2–taglik qizdirgichi, 3–taglik ushlagichi, 4 – taglik, 5 – berkitgich (zaslonka), 6–bug’lanuvchi moddaning zarralari, 7 – kremniy monooksidi bo’lagi solingan bug’lantirgich; 8 – tayanch plita.

Usulning kamchiliklari: qotishmalar va murakkab moddalarni bug’lantirib o’tqazishda komponentlarning protsentli nisbatlarining o’zagirishi, katta sirtli tagliklarda bir xil qalinlikdagi plenkalari hosil qilish qiyinligi, qiyin eruvchan materiallarning plenkalarni hosil qilish qiyinligi, bug’lantirgichlarning yuqori inertsiyaligi, plenkalari adgeziyasining nisbatan yuqori emasligi, bug’latirish vaqtiga nisbatan so’rish jarayoni tayyorgarlik vaqtining uzunligi, ishlash resurslari 50 ... 100 soatdan oshiq bug’lantirgichlarni yaratish murakkabligi, jihozlarning nisbatan murakkabligi.

Dielektriklarning yupqa himoya qatlamlarini hosil qilish texnologiyasi

Himoyalovchi yupqa qatlamlarga qo’yiladigan talablar. Yarim o’tkazgichli asboblari va integral mikrosxemalarni planar texnologiya bo’yicha tayyorlashda himoyalovchi dielektrikli yupqa qatlamlar asosiy rol o’ynaydi. Ular donori va akseptor kirishmalarni lokal diffuziya qilish, mikrosxemalarning bir-biridan izolyatsiyalangan aktiv va passiv elementlarini shakllantirish, hamda p-n o’tishlarni tashqi ta’sirlardan himoya qilish imkoniyatlarini beradi.

Shu sababli planar texnologiyada himoyalovchi dielektrikli yupqa qatlamlarga quyidagi asosiy talablar qo’yiladi: dastlabki taglikning sirtini

diffuziyalanuvchi elementar (bor, fosfor, sur'ma, mishyak va boshqalar) kirishmalarning kirishidan to'liq himoyalash; vaqt bo'yicha kimyoviy chidamlilik va barqarorlik; bir jinslilik va nuqsonsizlik; solishtirma qarshilik va elektr mustahkamligining yuqoriligi; yuqori mexanik mustahkamlik.

Himoyalovchi dielektrikli yupqa qatlamlar yuqorida keltirilgan talablarga mumkin qadar to'liq javob bera oladigan moddalardan xosil qilinadi.

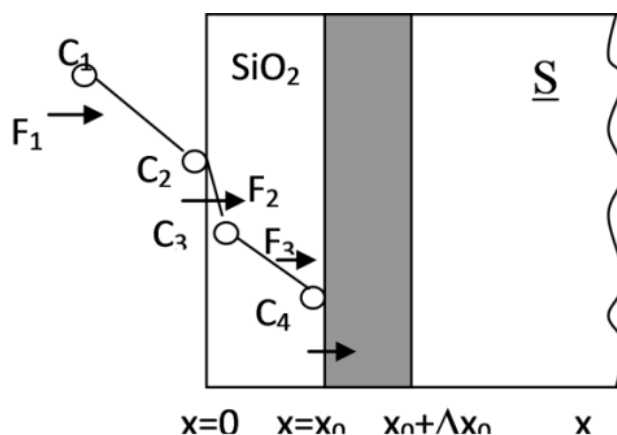
Himoyalovchi dielektrikli yupqa qatlamlar tayyorlash uchun boshlang'ich materiallar sifatida kvarts, kremniyning monooksidi va dioksidi, kremniy nitridi, alyuminiy oksidi va nitridi, bor nitridi va boshqalardan foydalanish mumkin. Biroq xozirgi davrda sanoatda ko'proq ikki material: kremniy dioksidi va nitridi keng qo'llanilmoqda.

Kremniyni termik oksidlash kinetikasi. Yarim o'tkazgichli asboblari va IMSlarni planar texnologiya bo'yicha tayyorlashda kremniyni termik oksidlash usuli eng ko'p tarqalgan bo'lib, bunda himoyalovchi dielektrikli yupqa qatlam SiO_2 boshlang'ich kremniyli tagliklarni oksidlovchi muhitda qizdirish bilan hosil qilinadi. Bu usul yuqori sifatli niqoblovchi, bir xil qalinlik va strukturali, yuqori himoyalovchi va dielektrikli hossalarga ega bo'lgan yupqa qatlamlar olish imkoniyatini beradi.

Kislorodli atmosferada termik oksidlash bilan himoyalovchi dielektrikli yupqa qatlam SiO_2 ning hosil bo'lish jarayoni kinetikasini ko'rib chiqamiz

2.15 – rasmda kremniyni termik oksidlash jarayonining modeli keltirilgan bo'lib, u oksidlovchi (gaz) – oksid qatlami (qattiq) - kremniy tagligi tizimidan iborat. Bu tizim orqali to'rtta oqimdan tashkil topgan “oksidlovchining oqimi” o'tadi.

“Oksidlovchining oqimi” deganda taglikning birlik sirtidan birlik vaqtda kesib o'tadigan oksidlovchining molekullari miqdori tushuniladi. To'rtta oqimning xar bittasi oksidlovchi muhit - kremniy tagligi tizimining bitta sohasiga tegishlidir.



2.15 – rasm. Kremniyni termik oksidlash jarayonining modeli.

Rasmdan shu narsa ko'rinib turibdiki, F_1 oqim kremniy taglik sirtiga oksidlovchining gaz fazasidagi massa uzatilishiga mos keladi. Kremniy sirtida doimo oksidning yupqa qatlami bo'lgani uchun F_1 oqimni oksidlovchining oksid sirtiga uzatiladigan oqim deb hisoblashimiz mumkin. Bu uzatilish diffuziya jarayoni hisobiga, hamda majburiy ravishda gaz – uzatuvchi yoki oksidlovchi oqimining siljishi hisobiga amalga oshishi mumkin. Uzatilish tezligi oksidlash jarayonining texnologik rejimiga bog'liq bo'ladi.

Sanoatda kremniyni termik oksidlash jarayoni uchun ishchi kameradan ma'lum bir tezlikda o'tayotgan F_1 oksidlovchining majburiy oqimidan foydalaniladi:

$$F_1 = h(C_1 - C_2), \quad (2.8)$$

bu yerda h - oksidlovchini gaz fazasidan massa uzatish jarayoni tezligining konstantasi; S_1 – gaz fazasi hajmidagi oksidlovchining muvozanatli konsentratsiyasi; S_2 – oksidlovchining oksid sirtidagi konsentratsiyasi.

Oksid sirtiga yetib borgan oksidlovchi shu sirtga adsorbsiyalanadi va unda erib ketadi. Bunda gaz fazadagi oksidlovchining konsentratsiyasi bilan qattiq fazada erigan oksidlovchining konsentratsiyalari orasida taqsimlash koeffitsiyenti bilan aniqlanadigan nisbat amalga oshadi. Oksidda oksidlovchining erish jarayonini xarakatlantiradigan kuch gaz – oksid sirti tizimidagi oksidlovchining konsentratsiya gradienti hisoblanadi. Shu sababli oksidlovchining oqimi

$$F_2 = \delta(C_2 - C_3), \quad (2.9)$$

bu yerda δ - oksid qatlamidagi oksidlovchining erish jarayoni tezligining konstantasi; S_3 – gaz faza chegarasidagi oksidlovchining kontsentratsiyasi.

Oksid qatlamda erigan oksidlovchi gaz faza – oksid bo'linish sirtidan oksid – kremniy taglik bo'linish sirtiga diffuziyalanadi. Bu xolatda oksidlovchining oqimi F_3 oksidlanish chegarasidagi kontsentratsiyalar farqiga to'g'ri proporsional, oksid qatlami qalinligiga esa teskari proporsional bo'ladi:

$$F_3 = D \frac{C_3 - C_4}{x_0}, \quad (2.10)$$

bu yerda D – oksidlovchining oksiddagi diffuziya koeffitsienti; C_4 – oksid - kremniy taglik chegarasidagi oksidlovchining kontsentratsiyasi; x_0 – oksid qatlamining qalinligi.

Oksid qatlami orqali diffuziyalangan oksidlovchi oksid – kremniy chegarasiga yetib keladi va kremniy bilan reaksiyaga kirishadi. Kremniyning oksidlanishi natijasida oksidning yangi qatlami xosil bo'ladi. F_4 oqim oksid – kremniy bo'linish sirtida kechayotgan oksidlanish kimyoviy reaksiyasining tezligini ifodalaydi. Kremniyning oksidlanish tezligi oksidlovchining kontsentratsiyasiga proporsional, shu sababli,

$$F_4 = RC_4, \quad (2.11)$$

bu yerda R – oksidlash reaksiyasi tezligining konstantasi.

Turg'un rejimda (muvozanatda) hamma oqimlar bir – biriga teng, ya'ni $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F$ bo'lgani uchun oqimlar tenglamalarini birgalikda echib oksidlovchining yig'indi oqimi uchun alohida oqimlarni hisobga olgan holdagi ifodasini topish mumkin.

Bu ifodaning oxirgi ko'rinishi quyidagicha bo'ladi:

$$F = \frac{\frac{R}{a} C_1}{1 + \frac{R}{\delta} + \frac{R x_0}{D}} = R_{ef} C_1, \quad (2.12)$$

bu yerda $0 < a < 1$, R_{ef} – oksidlash jarayoni tezligining effektiv konstantasi.

Agar V birlik hajmdagi oksidni oksidlash reaksiyasi natijasida hosil bo'lishi uchun oksidlovchining N zarrachasi ketgan bo'lsa, unda oksid qatlamining o'sish tezligi quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{F}{N} = FV = R_{ef} C_1 V; \quad (2.13)$$

yoki

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{\frac{1}{a} C_1 V}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\delta}\right) + \frac{x_0}{D}} = \frac{\frac{1}{a} C_1 V D}{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\delta}\right) D + x_0} \quad (2.14)$$

Quyidagi belgilashlarni kiritamiz:

$$A = 2\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\delta}\right) D \quad \text{va} \quad B = 2\frac{1}{a} C_1 V D, \quad (2.15)$$

unda $\frac{dx_0}{dt} = \frac{B}{A + 2x_0}$ ni hosil qilamiz. Endi bu ifodani o'zgaruvchilarni

bo'laklash usuli bilan integrallaymiz: $\int (A + 2x_0) dx_0 = \int B dt$ va

$x_0^2 + Ax_0 - Bt = 0$ ni hosil qilamiz.

Bu kvadrat tenglamani yechib, oksid qalinligining vaqt bo'yicha funksiyasining ifodasini topamiz:

$$x_0 = -\frac{A}{2} + \frac{A}{2} \sqrt{1 + \frac{t}{A^2/(4B)}} \quad (2.16)$$

yoki

$$\frac{x_0}{A/2} = \sqrt{1 + \frac{t}{A^2/(4B)}} - 1 \quad (2.17)$$

Kremniyni termik oksidlash jarayonining ikkita chegaraviy holini ko'rib chiqamiz:

1 –hol. Oksidlash jarayoni katta vaqtda o'tkazilmoqda, ya'ni $t \gg A^2/(4B)$, unda quyidagi ifodani xosil qilamiz:

$$\left(\frac{x_0}{A/2}\right)^2 = \frac{t}{A^2/(4B)} \quad \text{yoki} \quad x_0^2 = Bt \quad (2.18)$$

Shunday qilib, bu chegaraviy holda termik oksidlash jarayonining parabolik qonuni amal qiladi. V konstanta oksidlash tezligi konstantasi sifatida qaraladi.

2-hol. Oksidlash jarayoni nisbatan kichik vaqtda o'tkazilmoqda, ya'ni $t \ll A^2/(4B)$, bunda

$$\frac{x_0}{A/2} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{t}{A^2/(4B)} \right) ;$$

Bundan

$$x_0 = \frac{B}{A} t. \quad (2.19)$$

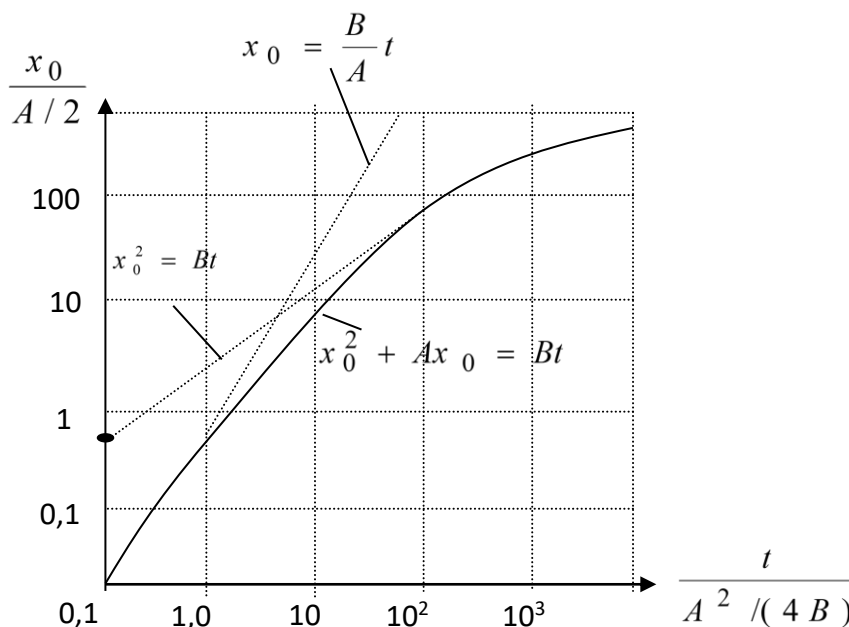
2.16 – rasmda oksid qalinligining termik oksidlash jarayoni vaqtiga umumiy va uning 2 ta chegaraviy holi uchun bog'lanishlari ko'rsatilgan.

Kremniyni suv bug'ida termik oksidlash. Kremniyda himoyalovchi dielektrik yupqa qatlamini hosil qilish uchun yuqori tozalikdagi suv bug'ida (10-20 MOm·sm atrofida) termik oksidlashdan foydalaniladi. Agar bug' miqdori reaksiya tezligini cheklamasa, kremniyning suv bug'i bilan yuqori temperaturali reaksiyasidan foydalaniladi.

Kremniy plastinkasi sirtida suv bug'ining kerakli partsial bosimini ushlab turish uchun suv isitiladi.

Oksid yupqa qatlamining strukturaviy shakllanishi oksid qatlami orqali kremniy sirtiga suvning diffuziyali uzatilishi hisobiga ro'y beradi. Oksid yupqa qatlamining strukturaviy shakllanishiga oksidlash reaksiyasi jarayonida hosil bo'ladigan va plastinkaning ichkarisiga diffuziyalanadigan vodorod ta'sir ko'rsatadi. Vodorodning diffuziya koeffitsiyentining ($2 \cdot 10^{-6} \text{ sm}^2/\text{s}$, 1050 °C da)

suv diffuziya koeffitsiyentidan ($2 \cdot 10^{-10} \text{ sm}^2/\text{s}$, 1050°C da) ancha katta ekanligidan kremniy – oksid bo'linish chegarasida gidroksid guruhining hosil bo'lishi faqat suv molekulasini borligi bilan emas, balki vodorodning ham borligi bilan tushuntiriladi.



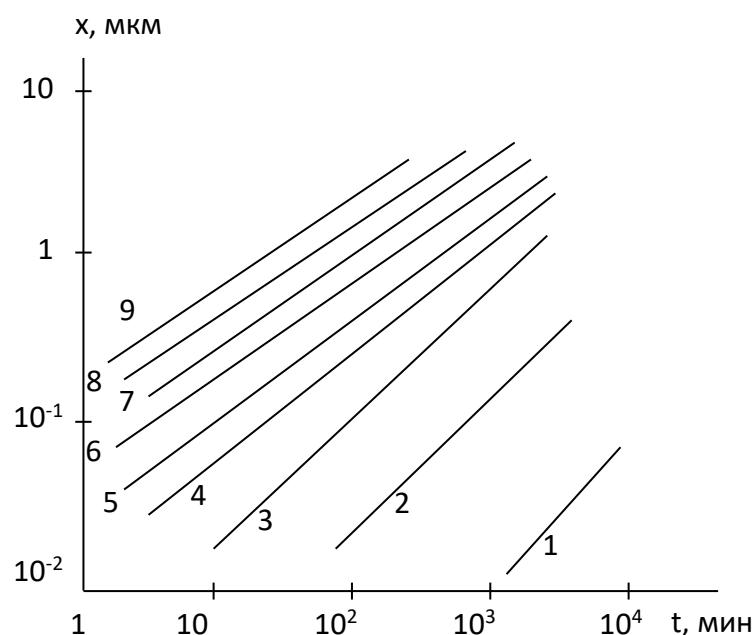
2.16 – rasm. SiO_2 yupqa qatlami qalinligining kremniyni oksidlash jarayoni o'tkazilayotgan vaqtga bog'lanishi.

Oksidlanish jarayoni 1100°C temperaturadan yuqori temperaturalarda o'tkazilganda oksid qatlami parabolik qonun bo'yicha hosil bo'ladi va $x^2=Bt$ ifoda bilan tasvirlanadi. Jarayon 1100°C dan past temperaturada o'tkazilganda oksid qatlamining hosil bo'lish qonuni parabolik bo'lmasdan

$$x^2 + b_1 x = b_2 t \quad (2.20)$$

ko'rinishga ega bo'ladi.

Oksidlanish jarayoni past temperaturada o'tkazilgan sari oksid qatlami chiziqli qonunga yaqin qonun bo'yicha hosil bo'ladi. Oksid yupqa qatlami o'sishining chiziqli qonuni yuqori bosimli ($2,5 \cdot 10^5 - 4,0 \cdot 10^7 \text{ Pa}$) suv bug'ida $500 - 800^\circ\text{C}$ temperaturalarda kuzatiladi. 2.17-rasmda suv bug'i atmosferasida xar xil temperaturalar uchun oksid yupqa qatlami qalinligining jarayonni o'tkazish vaqtiga bog'lanishi keltirilgan.



2.17 – rasm. Suv bug’i atmosferasida o’stirilgan SiO_2 yupqa qatlamining har xil temperaturalarda vaqtga bog’lanishi: 1 – 600°C ; 2 – 700°C ; 3 – 800°C ; 4 – 900°C ; 5 – 1000°C ; 6 – 1100°C ; 7 – 1200°C ; 8 – 1300°C ; 9 – 1400°C .

Oksidli yupqa qatlamning o’sish tezligiga taglikning orientatsiyasi, elektr o’tkazuvchanlik turi va boshlang’ich taglikdagi kirishmalar kontsentratsiyasi katta ta’sir qiladi.

Planar texnologiyada yarim o’tkazgichli asboblarda va integral mikrosxemalar tayyorlashda himoyalovchi dielektrik yupqa qatlamlar muhim ahamiyatga ega. Ular donor va aktseptor kirishmalarini lokal diffuziya o’tkazish, mikrosxemalarning bir - biridan izolyatsiyalangan passiv va aktiv elementlarini shakllantirish, shuningdek p-n o’tishlarni tashqi ta’sirlardan himoyalash imkoniyatlarini beradi.

Himoyalovchi dielektrik plyonkalarni hosil qilish uchun boshlang’ich materiallar sifatida kvarts, kremniy monooksidi va dioksidi, kremniy nitridi, alyuminiy oksidi va nitridi, bor nitridi va hokazolar ishlatilishi mumkin.

Himoyalovchi kremniy oksidi yupqa qatlamlarini hosil qilish uchun kremniy monooksidini bug’lantirishga asoslangan ikkita usul qo’llaniladi. Birinchi usulda texnik kukunsimon kremniy monooksidi ishlatiladi. Ikkinchi usulda esa kremniyli elektrod kislorod atmosferasida qizdiriladi. Bunda uning sirti

kremniyga nisbatan bug'larining bosimi yuqoriroq bo'lgan va oson bug'lanadigan kremniy monooksidi bilan qoplanadi.

Yarim o'tkazgichli taglikka changlatish yo'li bilan hosil qilinadigan oksidlar Si-SiO-SiO₂ kompleksi ko'rinishida bo'ladi. Bir jinsli himoyalovchi oksid qatlamini hosil qilish uchun kremniy monooksidi kukunidan bug'lantirish manbai sifatida foydalanilganda eng e'tiborli narsalardan biri kremniy monooksidi kukuni joylashtiriladigan mahsus likobcha (tigel) ning konstruksiyasi hisoblanadi.

Bug'lanish tezligi likobchanning geometrik shakliga, monooksid kukunining haroratiga, bosimiga, shuningdek bir jinsliligiga bog'liq bo'ladi. Ma'lum bir turdagi manbalardan foydalanilganda bug'lanish tezligi likobchani qizdiradigan elektr quvvatini o'zgartirish bilan boshqariladi. Bu usulda boshlang'ich plastinaga himoyalovchi qatlamning adgeziyasi yaxshi bo'lishini ta'minlash uchun kremniy plastinalari 300°C va undan yuqoriroqgacha qizdiriladi. Agar changlatish kichik tezlikda, lekin kislorodning yuqori partsial bosimida amalga oshirilsa, bu holda yupqa qatlam SiO₂ kabi xususiyatlarga ega bo'ladi. O'tkazish tezligining katta qiymatlarida yoki kislorodning nisbatan kichikroq partsial bosimlarida o'tqazilgan yupqa qatlamning optik xarakteristikalar SiO₂ plyonkalariga xos xususiyatlarga o'xshash bo'ladi.

SiO₂ plyonkasi xususiyatlariga ega bo'lgan himoyalovchi yupqa qatlamlarni odatda manbaning 1300-1400 °C haroratida va umumiy bosimi 6,5·10⁻⁴Pa dan kam bo'lmagan holda hosil qilinadi.

Oksid plyonkalarini vakuumda changlatish usuli bilan olish uchun manba sifatida kremniy qo'llanilishi mumkin. Bunda kremniyning sirtida ro'y beradigan reaksiya asosiy rol o'ynaydi.

Bu sirt yaqinidagi kislorodning harorati va partsial bosimi kremniy sirtiga kislorod adsorbsiyasi va SiO₂ ning bug'lanish tezliklarini aniqlaydi. Kremniy 700 – 1000 °C haroratgacha qizdiriladi. Kislorodning partsial bosimi shunday bo'lishi kerakki, bunda kremniyli manba sirtida Si+O → SiO reaksiyasi ta'minlanishi lozim. Bu usul bilan boshlang'ich yarim o'tkazgichli plastinada 0,1 mkm

qalinlikdagi yupqa qatlamni 900°C haroratda va $1,3 \cdot 10^{-4}\text{Pa}$ bosimda 30 daqiqa ichida olish mumkin. Plastinalar joylashtirilgan taglik qizdirilganda oksid bug'larining adsorbsiyasi va ularning yarim o'tkazgichli plastinalarga adgeziyasi yaxshilanadi. O'tkazilgan oksid plenkasining bug'lanib ketmasligi uchun plastinalarining harorati manba haroratidan $100 - 200^{\circ}\text{C}$ pastroq bo'lishi lozim.

III-BOB EKSPERIMENTAL TADQIQOT TEXNIKALARI

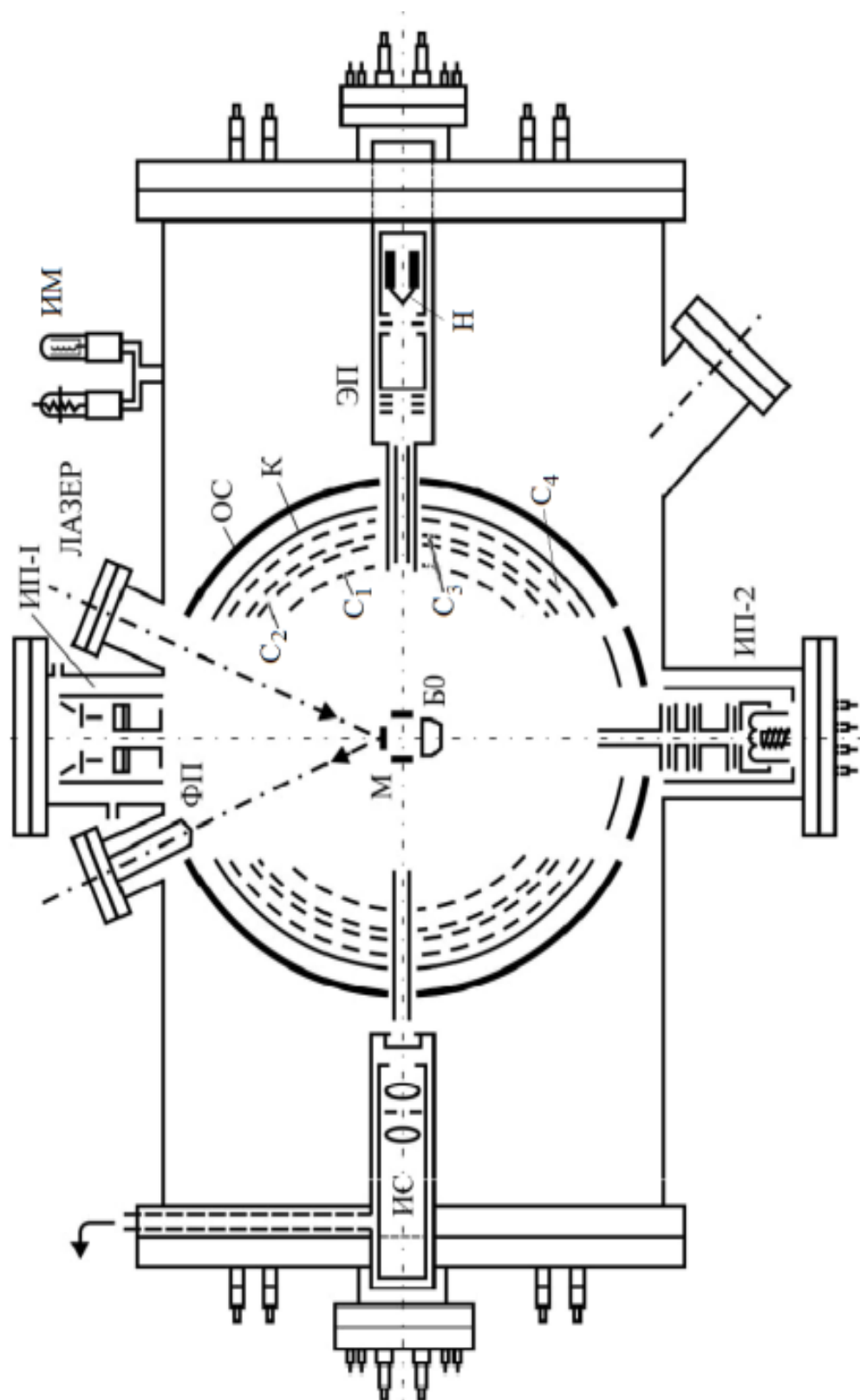
3.1. Ion implantatsiya uchun eksperimental qurilma

Ni⁺ ion manbai

Ni⁺ ionlarini olish uchun biz qattiq holatdagi ion tabanasidan foydalandik. U bug'lashtirgich, oraliq anod, halqali katod, ion hosil qiluvchi elektrodlar, elektromagnit separator va burilish plitalari tizimidan iborat. Evaporatator kosasi tavlangan tantaldan, halqasimon katod 300 mk volfram-reniy birikma simidan qilingan. Ion tabanasining barcha plitalari va elektrodleri vakuumli tavlangan zanglamaydigan po'latdan yasalgan. Qattiq holatdagi ion tabanasining ishlashi ishlaydigan modda atomlarining elektron ta'sirida ionlanishiga asoslanadi. Ni bug'lanishi metall-emitterga qaratilgan elektron nurning issiqlik ta'sirida amalga oshiriladi. Elektron nurning quvvatini o'rnatish orqali ionlanish fazosida ishchi moddaning ma'lum bir optimal bug' bosimini ushlab turish mumkin. Ni⁺ atomlarini ionlash uchun elektronlar 4-5 keV gacha tezlashtiriladi, ular anod-ionlash kamerasining o'qi bo'ylab o'tib, bug'langan implantator atomlarini ionlashtiradi. Nikel ionlarini ion tabanasidagi nopok ionlardan ajratish uchun kirish va chiqish diametrlari ~8 mm bo'lgan elektromagnit ion ajratgich ishlatiladi.

3.1.1. Eksperimental asbob

Ishda Toshkent davlat universiteti fizika kafedrasi xodimlari tomonidan loyihalashtirilgan va ishlab chiqarilgan o'ta yuqori vakuumli universal qurilmadan foydalanilgan [28], qurilma konstruksiyasi 3.1-rasmda ko'rsatilgan. Asbob va uning bo'linmalariga ikkita to'rt tarmoqli yarim sharli analizatorlar, IP1 gaz ionlari manbalari va IP2 faol metallar, ultrabinafsha nurlanish manbai IP, nishon ushlagichli manipulyator, fotodetektor va purkagich o'rnatilgan. Qurilmaga maxsus oyna o'rnatilgan bo'lib, u orqali nishonlar lazer nurlari bilan



3.1-rasm. Eksperimental qurilma. I yorug‘ lik manbai, EP elektron qurol,

М-mishen, ИП-1-ИП-2- tarixiy gaz ionlari va Ni atomlarining manbalari; ФП fotodetektor, К-kollektor, 1-4 panjaralari, Б0 sovutish moslamasi

tavlantirilib, yorug'likning tarqalish koeffitsientini o'lchash uchun nishon turli chastotali yorug'lik bilan nurlantirildi. Mishenlar maxsus ushlagichga joylashtirildi. Namuna ushlagichi manipulyatorning o'qiga biriktirilgan, bu namunani X, Y, Z o'qlari bo'ylab 30 mm ga siljitish va o'q atrofida 360 ga aylantirish imkonini berdi.

Tutuvchi qurilmalar namunani volfram spiralidan nurlanish ta'sirida $T=800\div 900$ K gacha va nishonning orqa tomonidan elektron bombardimon qilish orqali $T=2000$ K gacha qizdirish imkonini berdi.

Umuman olganda, qurilma bir xil eksperimental sharoitda: a) $E_p=1\div 2000$ eV mintaqasidagi Eee koeffitsientlarining energiya va burchak bog'liqliklarini, $h\nu \leq 11$ eV mintaqadagi Fotoelektronlarning spektrlarini, spektrlarni qayd qilish imkonini beradi. Oje- xarakterli energiya yo'qotishlari va elastik aks ettirilgan elektronlar;

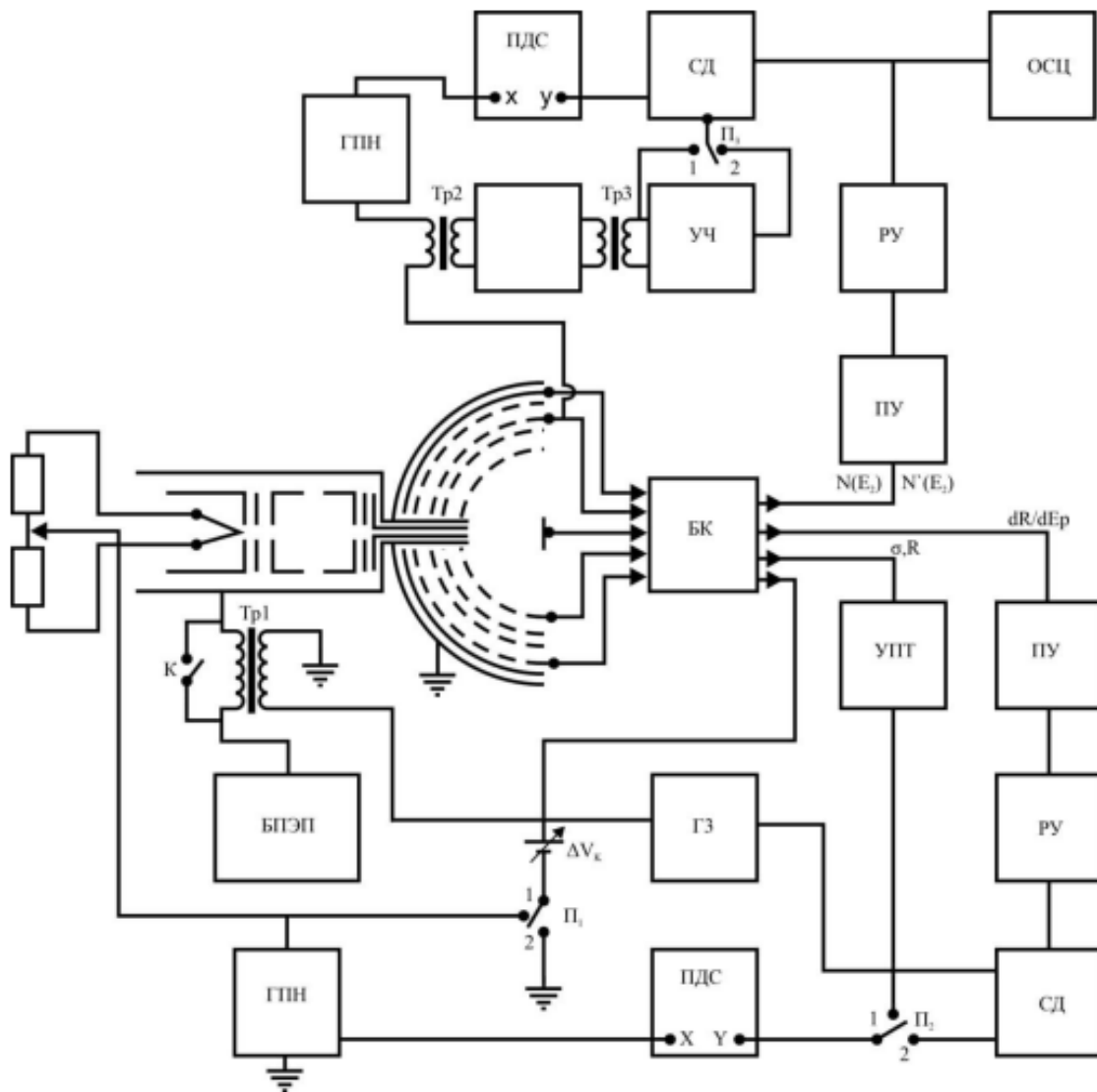
b) ish funksiyasini, yorug'likni aks ettirish koeffitsientini, Fotoelektron kvant unumini, statik o'tkazuvchanlikni, termion tok zichligini o'lchash.

v) mishenli sirtni metall va gaz ionlari, termal va lazerli tavlaniş bilan bombardimon qilish.

Qurilmaning dizayni [28] da yaxshi tasvirlangan. Quyida ushbu maqolada qo'llaniladigan asosiy tadqiqot usullarining juda qisqacha tavsifi keltirilgan.

3.1.2. IEE usullari bilan o'lchashning elektr sxemasi

Qabul qiluvchi qurilma sifatida to'rt tarmoqli analizatordan foydalanish foto va ikkilamchi elektronlarni energiya bo'yicha ajratish uchun turli xil elektron-optik sxemalardan foydalanish imkonini berdi. b, R koeffitsientlari va ularning hosilalarining energiyaga bog'liqligini avtomatik qayd qilish, shuningdek, Oje- va PE spektrlarini o'z ichiga olgan ikkilamchi elektronlarning energiya spektrlarini qayd etishning sxematik diagrammasi 2.2-rasmda ko'rsatilgan [28]. Sxemani turli rejimlarga o'tkazish kommutatsiya bloki yordamida amalga oshirildi.



3.2-rasm. HyeA usulida sirtni tekshirish uchun eksperimental qurilmaning blok diagrammasi. B kommutatsiya birligi; PU oldindan kuchaytirgich; RU-rezonans kuchaytirgich; HF chastotali dublyor; LeD sinxron detektor; PDS-ikki koordinatali oʻz-oʻzini yozish potentsiometri; GPN - arra tishli kuchlanish generatori; elektron qurol uchun BPpP quvvat manbai; sinusoidal tebranishlarning GZ generatori; Tr transformator

1. EEE koefitsientlarining energiya bog‘liqliklari ikkilamchi oqimni to‘liq kollektorga olish sharti bilan birlamchi elektron oqimining statik rejimida maqsadli sxemadan qayd etilgan. Bu elektronlarning elektron qurolga qaytishi bilan bog‘liq xatolarni kamaytiradi. Bunday holda, kollektor va 2, 3 va 4 panjaralari o‘zaro bog‘langan va antidinatron kuchlanish birinchi panjara va

kollektor o'rtasida qo'llanilgan (bir tarmoqli rejim). Maqsadli oqimning J_M (y_{er}) ga bog'liqligi b (y_{er}) yoki R (y_{er}) egri chizig'ining yo'nalishini aks ettirishi uchun joriy qiymat y_{er} ga bog'liq bo'lmasligi kerak. Shuning uchun elektron qurolning bunday ish rejimi edi. E_r o'zgarishi bilan birlamchi elektronlarning qiymati (J_1) o'zgarmagan holda tanlangan. Ushbu rejimda katod va qurol elektrodleri o'rtasidagi potentsial farq doimiy bo'lib qoldi va qurol katodi va nishon o'rtasida birlamchi elektronlarni tezlashtiradigan kuchlanish qo'llanildi. $b(E_p)$ bog'liqligini qayd qilishda elektronlarni to'liq tanlash uchun C_1 tarmog'iga maqsadga nisbatan $\Delta V_K \approx 2 - 15$ V tezlashtiruvchi potentsial qo'llanildi (P_1 kaliti 1 holatida). $R(E_p)$ energiyaga bog'liqligini ro'yxatdan o'tkazish uchun P_1 kaliti 2 holatiga o'tkazildi.

Keyinchalik, ΔV_K qiymatini o'zgartirib, bunday kechiktiruvchi potentsial C_1 tarmog'iga qo'llanildi, bunda y_{er} o'zgarishlarining barcha diapazonida kollektorga faqat elastik aks ettirilgan elektronlar tushdi, ya'ni. energiya $E_2 \approx E_p - 1,5$ eV bo'lgan elektronlar. Birlamchi elektronlarning energiyasi arra tishli kuchlanish generatori (SPG) yordamida 60, 100 va 300 soniyali tozalash vaqtlari bilan o'zgartirildi. $b(E_p)$ va $R(E_p)$ bog'liqliklari olib tashlanganda, K kaliti yopildi. Maqsadli kontaktlarning zanglashiga olib keladigan signal KP 303 I dala tranzistorlarida yig'ilgan muvozanatli doimiy to'g'ridan-to'g'ri kuchaytirgich UPT kirishiga uzatildi. Kuchaytirilgan signal PDS-021 magnitafonining "U" kirishiga uzatildi, uning tashigi harakatlanadi. "X" o'qi bo'ylab y_{er} o'zgarishi bilan sinxron ravishda. Bunda magnitafon lentasidagi P_1 holatiga qarab yo $b(E_r)$ yoki $-R(E_r)$ bog'liqligi yoziladi. $dN/de(E)$ egri chiziqlarini qayd etishda asosiy oqim 815 Gs chastotali sinusoidal signal bilan modulyatsiya qilindi, buning uchun kalit ochiq holatga o'tkazildi.

Bunday holda, ovoz chastotasi generatoridan (Tr_1 transformatori orqali) qurolning katodiga $\sim 0,5$ V o'zgaruvchan kuchlanish berildi. Old kuchaytirgich tomonidan kuchaytirilgandan so'ng, modulyatsiyalangan signal rezonansning kirishiga (selektiv) berildi.) 815 Gs chastotaga sozlangan kuchaytirgich. Sinxron SD detektori o'zgaruvchan signalni doimiy signalga aylantirdi. Detektorning chiqishidan signal magnitafonning "U" kuchaytirgichining kirishiga yuborildi.

Ushbu qurilmaning "X" kirish qismi GPN kuchlanishining bir qismi bilan ta'minlangan.

2. Ikkilamchi elektronlarning energiya spektrlarini olish birlamchi elektronlar energiyasining belgilangan qiymatlarida amalga oshiriladi. IVE va PE spektrlari $E_r = 3 - 500$ eV va EOS spektrlari - $E_r = 0,5 - 2,0$ keV mintaqasida olingan. Bunday holda, qurilmaning kollektor qismi maqsadga nisbatan to'rt kunlik analizator rejimiga o'tkazildi, ular orasidagi RP ni qoplaydigan bunday potentsial qo'llanildi. Natijada, S_2 S_3 tarmog'idagi ikkilamchi elektronlar, kechiktiruvchi potentsial bilan birga, 815 Gs chastotali kichik modulyatsiya qiluvchi kuchlanish (0,5 - 1 V) bo'lgan Tr2 izolyatsiya transformatori orqali ovoz generatoridan etkazib berildi. Keyin sekinlashtiruvchi maydondagi ikkilamchi elektronlarning sekinlashishi S_1 va S_2S_3 panjaralari o'rtasida sodir bo'ldi. Bu maqsaddan chiqarilgan elektronlar traektoriyasining mumkin bo'lgan buzilishini istisno qildi. S_4 tarmog'ining mavjudligi kollektor va S_2S_3 tarmog'i o'rtasidagi sig'imni keskin pasaytiradi, bu esa kollektorni kechiktiruvchi tarmoq potentsialining o'zgaruvchan komponentidan saralashga yordam beradi. Kollektordagi ikkilamchi oqimning o'zgaruvchan komponenti birinchi navbatda oldindan kuchaytirgich tomonidan kuchaytiriladi, so'ngra signalning foydali qismi $\nu = 815$ Gs chastotasiga sozlangan selektiv rezonans kuchaytirgich tomonidan chiqariladi. Tanlangan o'zgaruvchan signal sinxron detektor yordamida doimiy signalga aylantiriladi va kechikish kuchlanishining kattaligi o'zgarishi bilan sinxronlashtirilgan magnitafonning chiqish kuchaytirgichiga beriladi (GPN dan kuchlanishning bir qismi "U" kirishiga qo'llaniladi. "qurilmaning). Bunday holda, kollektor oqimining kechiktiruvchi potentsialga nisbatan birinchi hosilasi magnitafon lentasida qayd etiladi, ya'ni. ikkilamchi elektronlarning energiya taqsimot funksiyasi $dJ_2 / dE_2 = N(E_2)$. dN/dE_2 (E_2) kechikish gri chiziqlarining ikkinchi hosilasini qayd qilish uchun kechiktiruvchi tarmoqqa qo'llaniladigan modulyatsiya qiluvchi kuchlanish chastotasi ikki baravar kamaytiriladi va mos yozuvlar kuchlanish sinxron detektorga chastotali dublör orqali qo'llaniladi (2-pozitsiyadagi P_2 kaliti) [28].

3.1.3. Ultrabinafsha fotoelektron spektroskopiyasi

Fotoelektronlarning energiya spektrlarini qayd etish texnikasi Oje- elektron spektrlarini qayd etish texnikasidan deyarli farq qilmadi, faqat birlamchi elektron qurol foton manbai bilan almashtirildi. Ishda kripton va vodorod lampalar ishlatilgan: $\lambda_{kr}= 123,6 \text{ nm}$, $h\nu = 10 \text{ eV}$; $\lambda_n= 115 \text{ nm}$; $h\nu = 10,8 \text{ eV}$. Nishondagi foton nurlarining diametri $\sim 1 \text{ mm}$, foton oqimining intensivligi esa $\sim 10^{14}$ foton/s edi. UIP-1 manbasidan chiroqqa elektr quvvati (filameent va anod kuchlanishi, yonish kuchlanishi) beriladi.

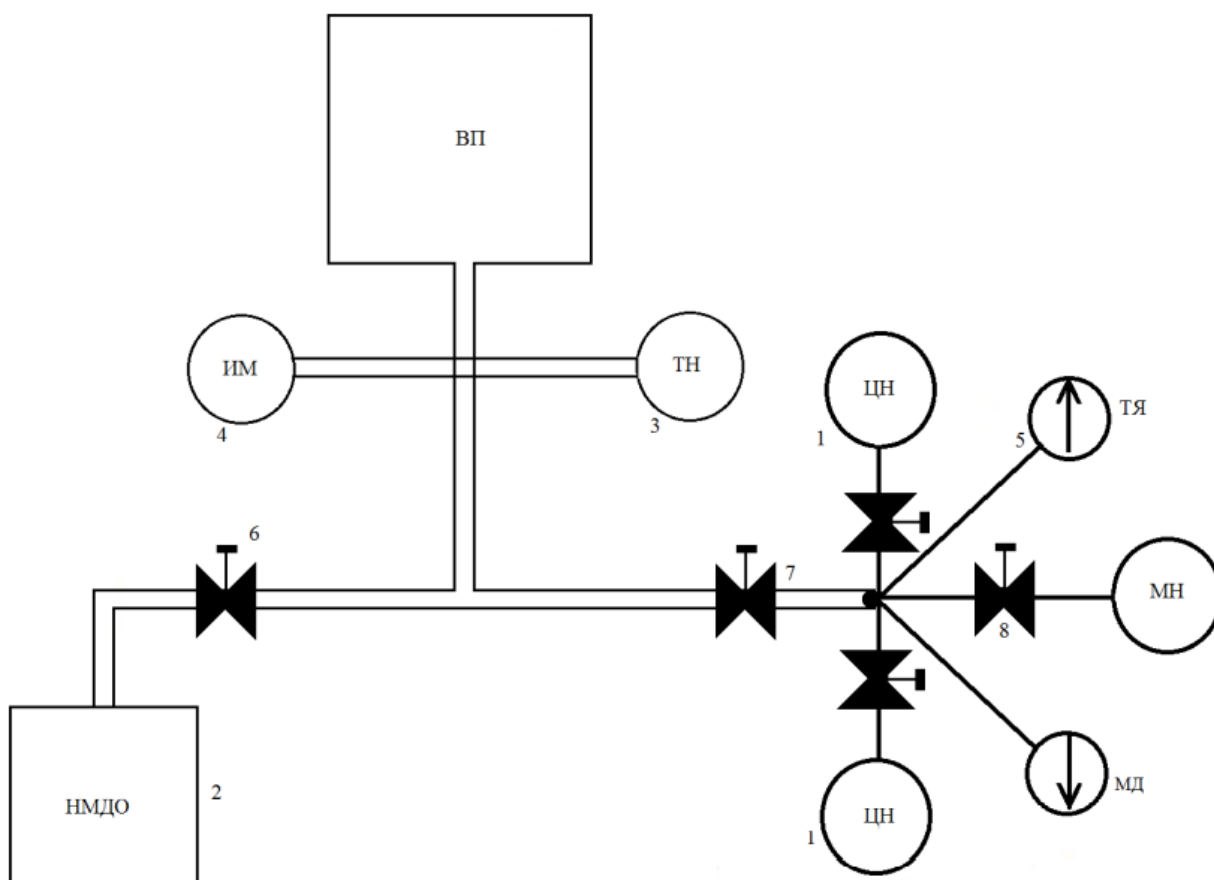
Fotoelektronlarning energiya spektrlari to'rtta to'rtli analizatorida qayd etilgan. Kollektor oqimining birinchi va ikkinchi hosilalari qayd etilgan. Foton nurlarining energiya tarqalishi $\sim 1\%$ ni tashkil etdi. PeS spektrlaridagi cho'qqilarning energiya pozitsiyalari $\sim 0,1 \text{ eV}$ aniqlik bilan aniqlangan.

3.1.4. O'ta yuqori vakuumni olish va sinov namunalarini tajribaga tayyorlash

O'rnatishning vakuum qismi zeolit nasoslari tizimidan (1), NMDO magnit tushirish nasosidan (2), titan oluvchi nasosdan (3), ionlanish manometridan (4), termojuft bosim sensori (5) va yuqori vakuum klapanlari (6 - 8) (2.3-rasm). O'rnatishdan oldin qurilmaning barcha metall va shisha qismlari (ulash quvurlari, oyoqlari, qurol va kollektor qismlari) avval mexanik tozalash va organik erituvchilar bilan tozalashdan o'tkazildi, so'ngra spirtida yuviladi va distillangan suvda qaynatiladi va oxirida issiq havo oqimi quritiladi.

Vakuum qurilmasi ceolit nasosi bilan 10^{-3} Pa bosimgacha, keyin magnit razryadli nasos bilan evakuatsiya qilindi. Qurilmani uzluksiz evakuatsiya qilish bilan uning barcha qismlari bir necha soat davomida elektr pechida $T = 650 - 700 \text{ K}$ haroratgacha $R \approx 1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$ dan yomon bo'lmagan vakuumda qizdirildi. Nishon, ion va elektron qurollarni, titan nasoslarini o'qitish va gazdan chiqarish taxminan 10^{-6} Pa barqaror vakuumga erishgandan so'ng amalga oshirildi. Bir necha isitish davrlaridan so'ng, qurilmadagi qoldiq gaz bosimi $5 \cdot 10^{-7} \text{ Pa}$ dan oshmadi. Ion doping va birikma emitentlarni faollashtirish 10^{-6} Pa vakuumda amalga oshirildi. Magnit deşarj nasosiga parallel ravishda, titanium oluvchi

nasosning kiritilishi barcha o'lchovlarni $\sim 10^{-7}$ Pa vakuumda amalga oshirishga imkon berdi.



3.3-rasm. O'rnatishning vakuum qismi

1- seolit nasosi, 2-magnit razryadli nasosi, 3-titan nasosi, 4-ionlashtiruvchi manometr, 5-termojuft bosim datchigi, 6-8 ta yuqori vakuumli klapanlar

Mishen sifatida bitta kristalli Si namunalari ishlatilgan. Si monokristallari disk shaklida edi. Diskning diametri 0,8 - 1 sm, qalinligi esa $\sim 1,5$ mm. Mexanik parlatishdan so'ng namunalar kimyoviy elektropolishingdan o'tkazildi. bosim, 6-8 ta yuqori vakuumli klapanlar

Kremniy gabsizlantirildi va qurilmada 10^{-6} Pa dan kam bo'lmagan vakuumda tozalandi, avval $T \approx 1200$ K da uzoq muddatli isitish, so'ngra $T \approx 1500$ K gacha qisqa muddatli isitish orqali. Shundan so'ng, agar zarur bo'lganda, isitish sirtini Ar^+ ionlari bilan yumshoq surtish bilan birgalikda amalga oshirildi. Bunday ishlov berishdan so'ng sirtidagi O va konsentratsiyalari 1-1,5 at.% gacha kamayadi.

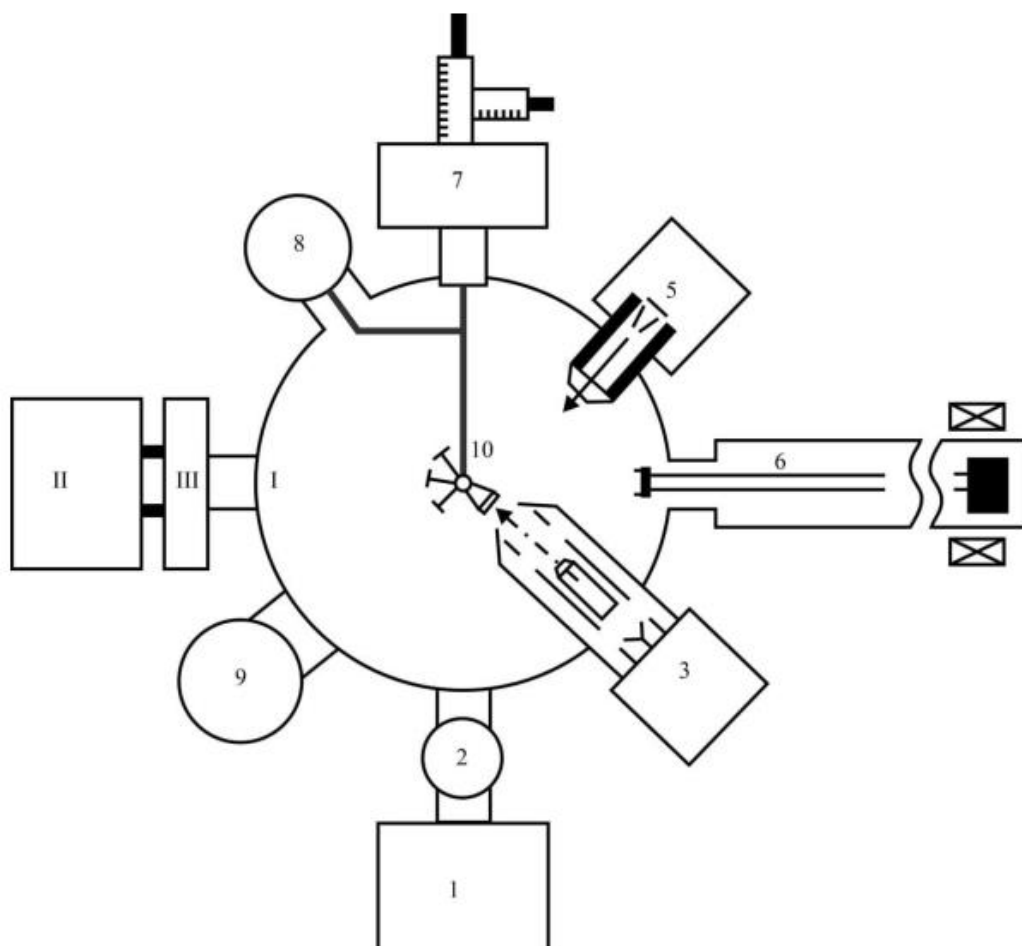
3.2. LAS-2200 eksperimental asbobining qurilmalari

Miqdoriy tahlil qilish uchun silindrsimon oyna tipidagi (ATSZ) analizatorlar keng qo'llaniladi, ular boshqa turdagi analizatorlardan ajralib turadigan bir qator afzalliklarga ega. Ba'zi seriyalarda ion implantatsiyasiga duchor bo'lgan namunalarning sirt va sirtga yaqin qatlamlarini miqdoriy Oje-tahlili biz tomonidan "silindrsimon oyna" (ATSZ) tipidagi analizator bilan jihozlangan LAS-2200 qurilmasida amalga oshirildi. ATSZ ning o'lchamlari ~ 0,3% ni tashkil qiladi va signal-shovqin nisbati sekinlashtiruvchi maydonga ega analizatorlarga qaraganda 100 baravar yuqori. LAS-2200 analitik kamera va yuklash kamerasidan iborat (3.4-rasm).

Namunani analitik kameradan yuklash kamerasiga o'tkazish oraliq shlyuz 111 orqali amalga oshiriladi. Yuklash kamerasida nishonlar almashtiriladi. Analitik kamerada A (3), elektron tabana (4) va ion mavjud. Namunalar sirtini Ar^+ ionlari bilan purkash uchun tabana (5) va namuna uzatish manipulyatorlari (6) yordamida bir kameradan ikkinchisiga o'tkazildi va namunalarni pastga harakatlantirildi va aylantirildi. Bundan tashqari, signallarni ko'rish imkonini beruvchi analitik kamerada bo'linma (8) mavjud, elektron qurilmani joylashtirish uchun o'rganilayotgan sirtidan katod nurlari trubkasi ekraniga qurilma qo'yiladi.

Qurilmaning analitik kamerasida o'ta yuqori vakuum (~ 10⁻¹⁰ mm Hg) ion (5) va sublimatsiya nasoslari (2) yordamida yaratiladi.

ATSZda Oje- signallarini ro'yxatdan o'tkazish printsipi [29, 30] da yaxshi tasvirlangan. Shuni ta'kidlash kerakki, ATSZda Oje- signaliga qaraganda energiya bilan ancha sekin o'zgaruvchan Se signalini yo'q qilish mumkin va signal-to-shovqin nisbatini keskin oshirish.



3.4-rasm. LAS-2200 qurilmasining analitik kamerasi. 1 - ion nasosi; 2 - sublimatsiya nasosi; 3 - quvvat manbai eelektron qurol; 4- eelektron qurol; 5 - ionli qurol; 6,7 - manipulyator; 8 - videoo kuchaytirgich; 9 - ko‘rish oynasi; 10 - mishen; I - o‘lchash kameerasi; III - shlyuz; II - yuklash kamerasi

Odatda amalda bu nisbat 103 ga teng, ya'ni. 45 sezgirlik chegarasi 0,1% ni tashkil qiladi, ATSZ analizatorining o‘lchamlari quyidagi formula bo‘yicha baholanishi mumkin:

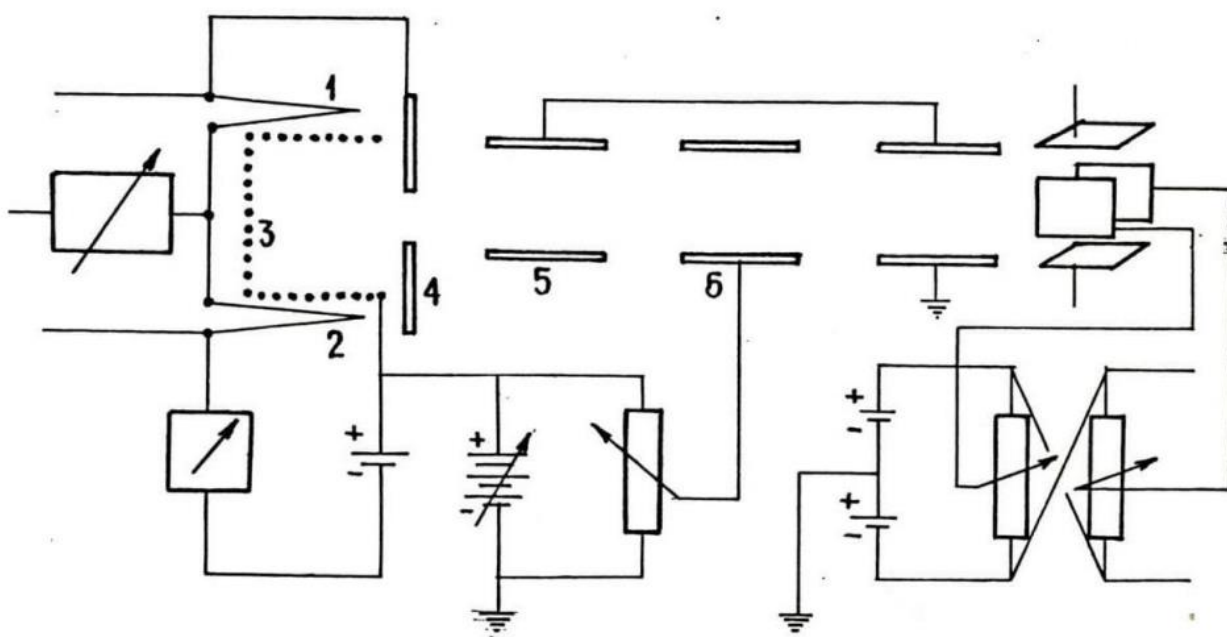
$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{0,18\omega}{r_1} + 1,39(\Delta\alpha)^3,$$

Bu erda $\Delta\alpha$ Oje- cho‘qqisining yarmi kengligi, ω - ichki shilindrning tirqishining (diafragmasining) kengligi. Nazariy jihatdan $\sim 0,15\%$ ruxsat olish mumkin. Amalda erishish mumkin bo‘lgan rezolyutsiya 0,2 - 0,3% oralig‘ida yotadi.

3.2.1. Qatlamli tahlil

Qatlam-qatlam Oje- tahlili namuna yuzasini Ar^+ ion nurlari bilan sepish orqali amalga oshirilishi mumkin. Bunday holda, Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilish va Oje- tahlili bir vaqtning o'zida amalga oshiriladi, bu esa o'rganilayotgan element konsentratsiyasining o'zgarishining uzluksiz profilini ion parchalanish chuqurligiga qarab olish imkonini beradi. ATSZ qurilmalarida elektron traektoriyasining buzilishiga yo'l qo'ymaslik uchun magnit maydonlar odatda elektron va ion nurlarini qaratish uchun ishlatilmaydi. Ushbu ishda ishlatiladigan ion tabanasining dizayni 3.5-rasmda ko'rsatilgan. 1 va 2 volfram filamentlari chiqaradigan elektronlar tarmoq kuchlanishi 3 tomonidan ~ 100 eV energiyagacha tezlashadi va 3 va 4 elektrodlar orasidagi Ar atomlarini ionlashtiradi. Hosil bo'lgan Ar^+ ionlari 5 va 6 elektrodlar yordamida tezlashtiriladi va fokuslanadi. Hosil bo'lgan ion. dasta X va Y plitalarning burilish ta'sirida tahlil nuqtasiga to'g'ri keladi. Ion energiyasi 1–3 keV oralig'ida o'zgargan. Namunadagi ionlarning tushish burchagi namuna ushlagichining moyilligini o'zgartirish orqali o'zgartirilishi mumkin. Ion manbaidagi maksimal argon bosimi $\sim 5\text{-}10$ Pa edi. Bunda ion oqimining zichligi $100 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ga yetdi, ionli kremniyda esa chayqalish tezligi $50 \text{ Å}/\text{min}$ ga yetdi. Nishondagi ion nurlarining diametri $\sim 3 \text{ mm}$ edi.

Ion nurini skanerlash sirtning tahlil qilingan hududida qirqishning bir xilligini sezilarli darajada oshirishga imkon berdi. Oje- profilometri kraterning chuqurligini $\sim 5 \text{ Å}$ aniqlik bilan aniqlash imkonini beradi. Namuna chuqurligi bo'ylab nopoklik konsentratsiyasi taxminan 5 - 8% aniqlik bilan aniqlandi.



3.5-rasm. Ar^+ ioni olish qurilmasi

1-2-katod; 3-to‘r; 4,5,6-tortuvchi va tezlashtiruvchi elektrodlar

3.3. Oje-elektronlar spektrometri

OES keyingi paytlarda qattiq jism sirtlarining kimyoviy tarkibini tahlil qilishda eng ko‘p tarqalgan usullardan biri bo‘lib qoldi. Bu usulning asosiy afzalliklari quyidagilardan iborat: qalinligi $5\div 20 \text{ \AA}$ bo‘lgan yuza qatlamlarni katta aniqlik bilan juda tez (bir necha minut) fursatda tahlil qila oladi. Mendeleyev davriy jadvalidagi (N va Ne dan boshqa) hamma elementlar to‘g‘risida miqdoriy ma’lumot bera olishi bilan birga, atomlar orasidagi kimyoviy bog‘lanishlarni ham aniqlash imkonini beradi.

Hozirgi paytda OES faqatgina ilmiy izlanishlardagina emas, balki standart tahlil usuli sifatida elektron asbobsozlikda keng qo‘llanilmoqda. U, ayniqsa, yarim o‘tkazgichlar texnologiyasida, metalshunoslikda, katalizda, mineralogiyada va foydali qazilmalarni tahlil qilishda, kristallarni o‘stirishda keng qo‘llanilmoqda.

OES bilan bir paytda yuzalarni ionlar yordamida yemirish usulini qo‘llab jismlarning yuza osti qatlamlarini (xajmini) ham tahlil qilish mumkin.

OES usulining yaratilishi, prinsipi, turlari, imkoniyatlari va olingan natijalar to‘g‘risida rus va ingliz tillarida juda ko‘p ilmiy monografiya va

maholalar e'lon qilingan. Biz bu yerda asosan oje-jarayon, EOS usulining prinsiplari va qurilmalar to'g'risida to'xtalib o'tamiz.

Oje - jarayon. Energiyasi yetarli darajada katta bo'lgan birlamchi elektron jism atomlarining ichki sathlarining bittasidan, masalan, K dan elektron urib chiqarishi mumkin. Bu bo'sh qolgan joy tezda ($10^{-12} - 10^{-13}$ s ichida) yuqori sathlardan biridagi (masalan, L_1 dagi) elektronning o'tishi bilan to'ladi. Bu o'tish natijasida $E_k - E_L$ energiya ajralib chiqadi. Bu energiya xarakterli rentgen nurlanish qolida ajralishi mumkin yoki boshqa (masalan, L_2) sathdagi elektronga berilishi mumkin. Agar aytilgan energiya elektronga berilib, uni vakuumga chiqarsa, ko'rib o'tilgan jarayon **oje - jarayon**, uchib chiqqan elektron esa **oje-elektron** deyiladi. Bu o'tishlar KL_1L_2 kabi belgilanadi. Demak oje-jarayon uchta bosqichdan iborat bo'lar ekan:

- 1) ichki sathlarning birida vakant (bo'sh) joy hosil bo'ladi;
- 2) yuqoridagi sathlardan biridagi (yoki valent zonadagi) elektron bilan vakant joy to'ldiriladi;
- 3) ajralib chiqqan energiya yuqori sathlardagi yoki valent zonadagi elektronlardan biriga berilib, uni vakuumga chiqaradi (Ajralib chiqqan energiya albatta to'ldiruvchi elektron joylashgan sathdagi yoki undan yuqoridagi sathlardagi elektronga beriladi). 3.6-rasmda oje - o'tishlarga ayrim misollar keltirilgan.

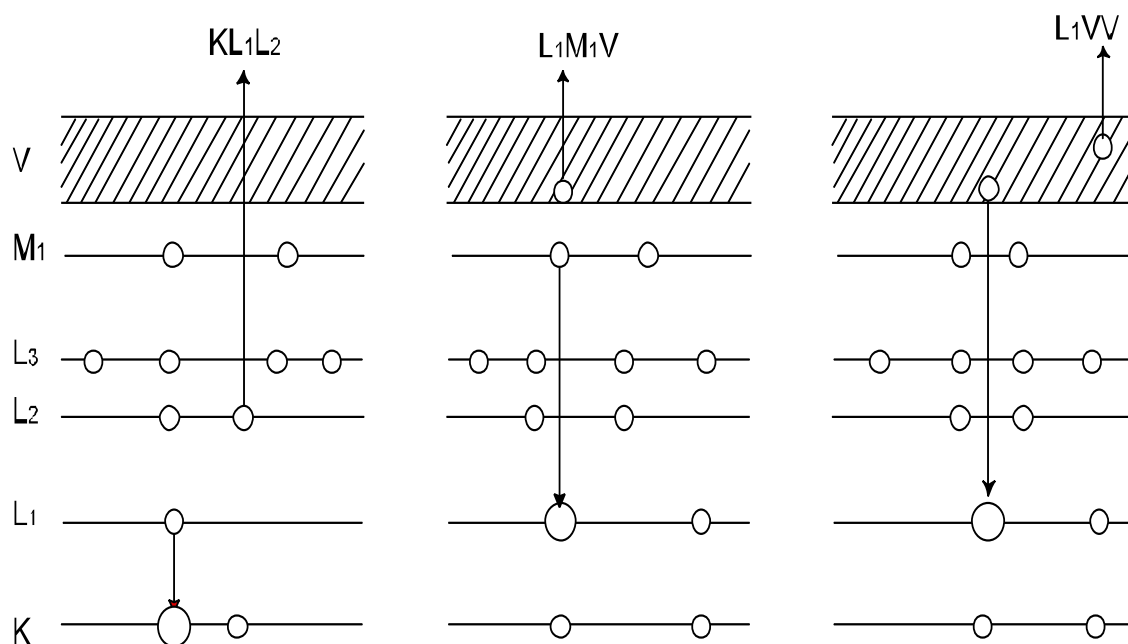
Oje-elektronlarning energiyasi E_{wxy} umumiy holda taxminan quyidagiga teng bo'ladi:

$$E_{wxy} = E_w - E_x - E_y, \quad (3.1)$$

bunda w – vakansiya hosil bo'lgan sath: x – vakansiyani to'ldirish uchun elektron bergan sath: y – oje-elektron uchib chiqqan sath. Oje-elektronlarning energiyasini aniqroq hisoblash uchun quyidagi empirik formuladan foydalanish mumkin:

$$E_{wxy} = E_w(z) - E_x(z) - E_y(z) - 1/2\{E_y(z+1) - E_y(z) + E_x(z+1) - E_x(z)\} - \varphi_a \quad (3.2)$$

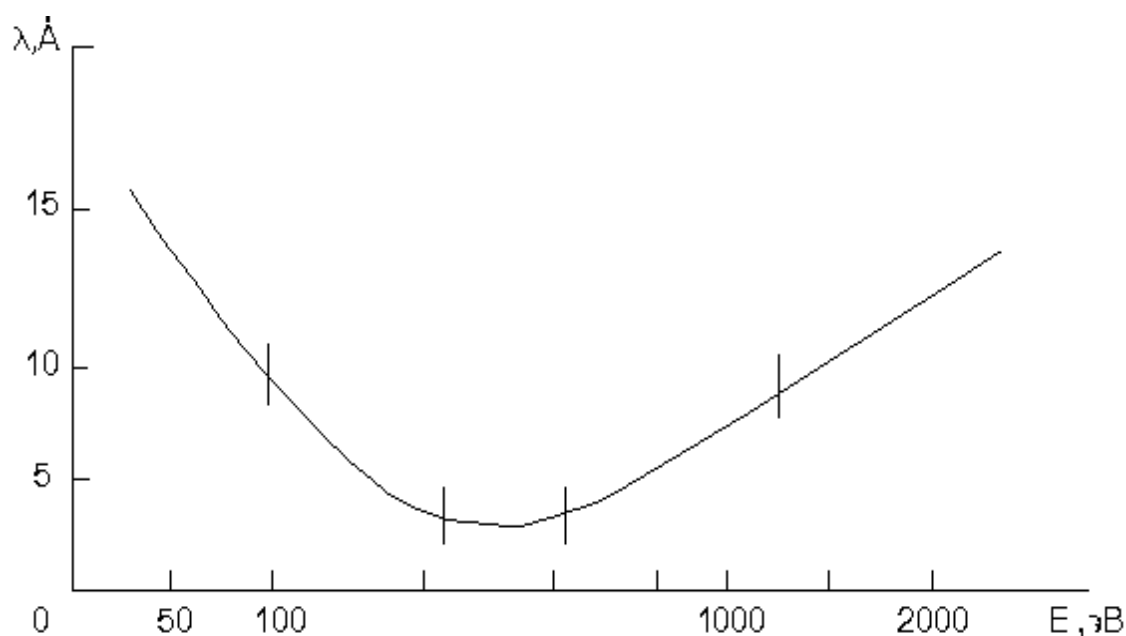
Bu yerda, z – tekshirilayotgan elementning tartib nomeri, φ_a – oje-elektronlarni qabul qilib olayotgan elektrod (analizator) ning chiqish ishi.



3.6-rasm. Oje o'tishlar. KL_1L_2 – K sathda vakansiya hosil bo'ladi, L_1 dagi elektron uni to'ldiradi, L_2 dan oje-elektron uchib chiqadi; L_1M_1V – L_1 dagi vakansiya M_1 dan to'ldiriladi, V dan oje-elektron chiqadi; L_1VV – L_1 dagi vakansiya V dan to'ldiriladi va V dan oje-elektron chiqadi.

Demak, oje-jarayon uchun kamida 2 ta elektron sath bo'lishi kerak ekan. Shuning uchun ham N va Ne atomlari uchun oje-o'tish ro'y bermaydi. Elementning tartib nomeri oshib borgan sari unda ruy beradigan oje-o'tishlarning soni ham ortib boradi, ya'ni har xil energiyali oje-elektronlar hosil bo'ladi. Har qanday elementdagi bir necha oje-o'tishlar energiyalari, boshqa elementdagi oje-o'tishlarning energiyalari bilan hech qachon bir xil bo'lmaydi. β 'ni oje-elektronlarning energiyasini tahlil qilib har qanday elementni aniqlash mumkin.

Oje-elektronlarning chiqish chuqurligi λ , ikkilamchi elektronlarning erkin yo'l uzunligiga teng bo'lib, ularning energiyasiga bog'liq bo'ladi. Bu chuqurlik elementning turiga unchalik bog'liq emasligi tajribada aniqlangan. 3.7-rasmda barcha elementlar uchun universal bo'lgan oje-elektronlar energiyasi va chiqish chuqurligi orasidagi bog'lanish $Y_{oje}(\lambda)$ berilgan.



3.7 - rasm. Oje-elektronlar chiqish chuqurligi va energiyasi orasidagi bog‘lanishini ifodalovchi egri chiziq.

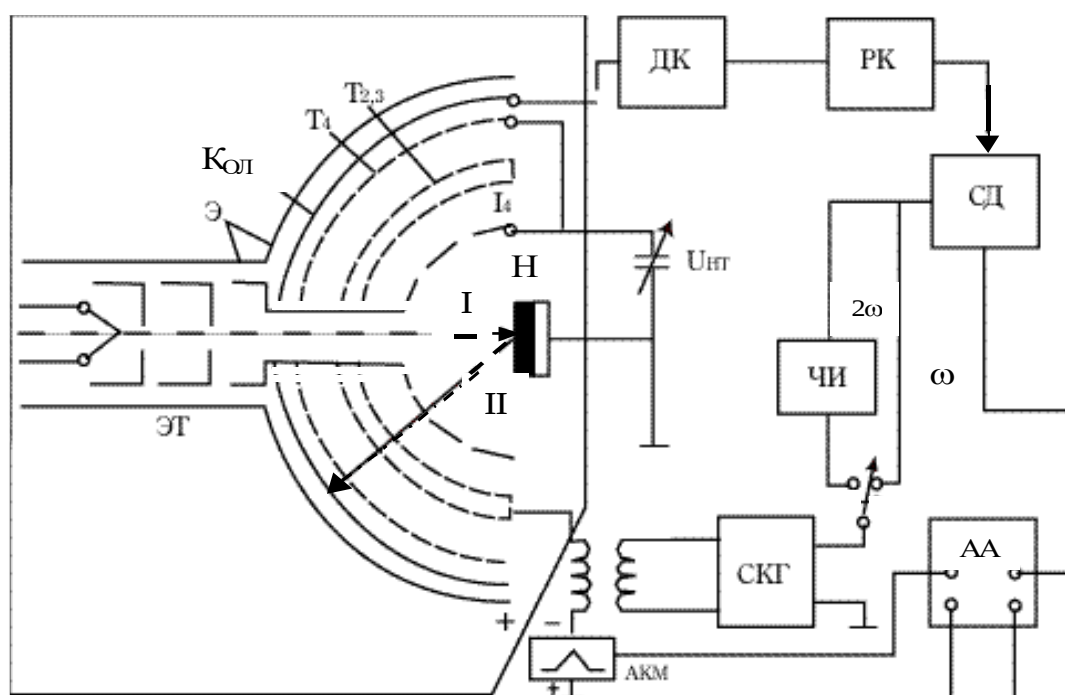
Oje – elektronlar spektrometri Jism yuzasini o‘rganish uchun undan chiqayotgan oje-elektronlarni tahlil qilish usuli **oje-elektron spektroskopiya** deyiladi. Oje-elektronlar soni juda kam bo‘lganligi uchun ular hosil qilgan tok ikkilamchi elektronlar tokining to‘xtatuvchi potensialga (energiyaga) bog‘lanish $i_2(U)$ egri chizig‘ida umuman sezilmaydi. Ikkilamchi elektronlarning energetik spektrida (ya’ni $N(E)=di_2/dE_2$) oje-elektronlar juda kichik intensivlikka ega bo‘lgan cho‘qqichalar hosil qiladi. Ularni yaqqol sezish uchun spektrdan yana bir marta hosila olinadi: $dN/dE=di_2^2/dE_2^2$.

Oje-elektronlarni hosil qilish, ularni habul qilish va kuchaytirish, hamda differensiallangan energetik spektrlarini yozib olishlarni amalga oshiruvchi qurilmalar oje-elektron spektrometrlar deb ataladi. Analizatorining (tahlillagichning) tuzilishi va ishlash prinsipiga qarab spektrometrlarning turlari har xil bo‘ladi. Biz shulardan eng ko‘p tarqalgan ikki turini ko‘rib o‘tamiz. Boshqa turdagi analizatorlar ham mohiyat jihatdan bulardan tubdan farq qilmaydi.

1. To‘htatuvchi (tormozlovchi) maydonli analizatorga ega bo‘lgan spektrometrlar. Eng oddiy ko‘rinishdagi OES qurilmasi qo‘yidagilardan iborat bo‘ladi: yuqori vakuumli ($P \approx 10^{-6}$ Pa) kamera, elektron to‘p, nishon

(tekshirilayotgan jism) va elektron analizator (spektrometr). OES yuzaning holatiga uzviy bog‘liq bo‘lganligi uchun tekshirishlar o‘ta yuqori vakuum sharoitida olib borilishi kerak. Elektron to‘p yuqori darajada fokuslangan (nishondagi o‘lchami 100-150 mkm), intensivligi kerakli darajada ($i_1=10^3\div10^5$ mkA/sm²) katta bo‘lgan birlamchi elektronlar dastasini hosil qiladi. Ko‘pincha bu elektronlarning energiyasi $E_1 \approx 1-5$ keV oralig‘ida bo‘ladi. Analizator esa ikkilamchi elektronlarni energiya bo‘yicha taqsimlanishini tahlil qilishga xizmat qiladi.

To‘xtatuvchi maydonli analizator sferik (yarim sferik) ko‘rinishdagi **to‘rlar** (2 tadan 4 tagacha) va **kollektordan** iborat bo‘ladi. To‘rtta to‘rga ega bo‘lgan analizatorli spektrometrning chizmasi 3.8-rasmda keltirilgan.



3.8-rasm. To‘xtatuvchi maydonli analizatorga ega bo‘lgan spektrometr:
 ET – elekt-ron to‘p, E – ekran, Kol. – kollektor, $T_1\div T_4$ – to‘rlar, N – nishon,
 DK va RK – dastlabki va rezonans kuchaytirgich, SD – sinxron detektor,
 CHI – chastotani ikkilantiruvchi, SKG – sinusoidal kuchlanishlar generatori,
 AKM – arrasimon kuchlanish manbai, AA – avtomatik yozuvchi asbob.

Bu yerda T_1 to‘r nishondan uchib chiqayotgan ikkilamchi elektronlarning maydonsiz fazoda harakatlanishini ta‘minlashga xizmat qiladi.

Buning uchun nishon bilan to‘r T_1 taxminan bir xil potensialga ega bo‘lishi kerak (Ular orasidagi kontakt potentsiallar farqi U_{nt} manba yordamida kompensatsiya qilinadi).

Shuning uchun ikkilamchi elektronlar T_1 gacha o‘z yo‘nalishlarini o‘zgartirmay yetib keladi. Ikkilamchi elektronlarni to‘xtatuvchi potensial (maydon) T_1 va T_2 oralig‘ida beriladi. To‘xtatuvchi U_t potensialning to‘r katakchalari o‘rtasida ham bir xilda qolishini ta‘minlash uchun T_2 ga juda yaqin qilib T_3 to‘r joylashtiriladi. Energiyasi to‘xtatuvchi maydon energiyasidan katta bo‘lgan ikkilamchi elektronlar kollektorga tushadi. Kollektor va T_{23} to‘rlar orasidagi sig‘imni keskin kamaytirish uchun ular orasiga T_4 to‘r joylashtiriladi. To‘xtatuvchi potensialni sekin-asta 0 dan U_1 gacha monoton o‘zgartira borib $i_2(U_2)$, ya‘ni $i_2(E_2)$ bog‘lanish egri chizig‘ini yozish mumkin. Bu bog‘lanishning hosilasini olish uchun T_{23} to‘rga U_t bilan birgalikda ω chastotali ozgina kuchlanish ($\Delta U = K \sin \omega t$) beriladi. Bu yerda $K = 0,5 \div 3V$ atrofida bo‘ladi. Natijada kollektorga o‘tayotgan ikkilamchi tok ω chastota bilan modulyatsiyalangan (tebrangan) bo‘ladi, ya‘ni uni quyidagicha yozish mumkin: $I_2(U_2 + \Delta U)$. Bu ifodani Teylor qatoriga yoyib chiqamiz:

$$I_2(U_2 + K \sin \omega t) = I_{20}(U) + I_2^I K \sin \omega t + I_2^{II} K^2 \frac{\sin^2 \omega t}{2} + \dots + \quad (3.3)$$

Ma‘lum almashtirishlardan keyin (3.2) ni quyidagicha yozish mumkin:

$$I_2(U + K \sin \omega t) = I_{20}(U) + (I_2^I K + \frac{I_2^{III}}{2} K^3 + \dots) \sin \omega t - (\frac{I_2^{II}}{4} K^2 + \frac{I_2^{IV}}{48} + \dots) \cos \omega t.$$

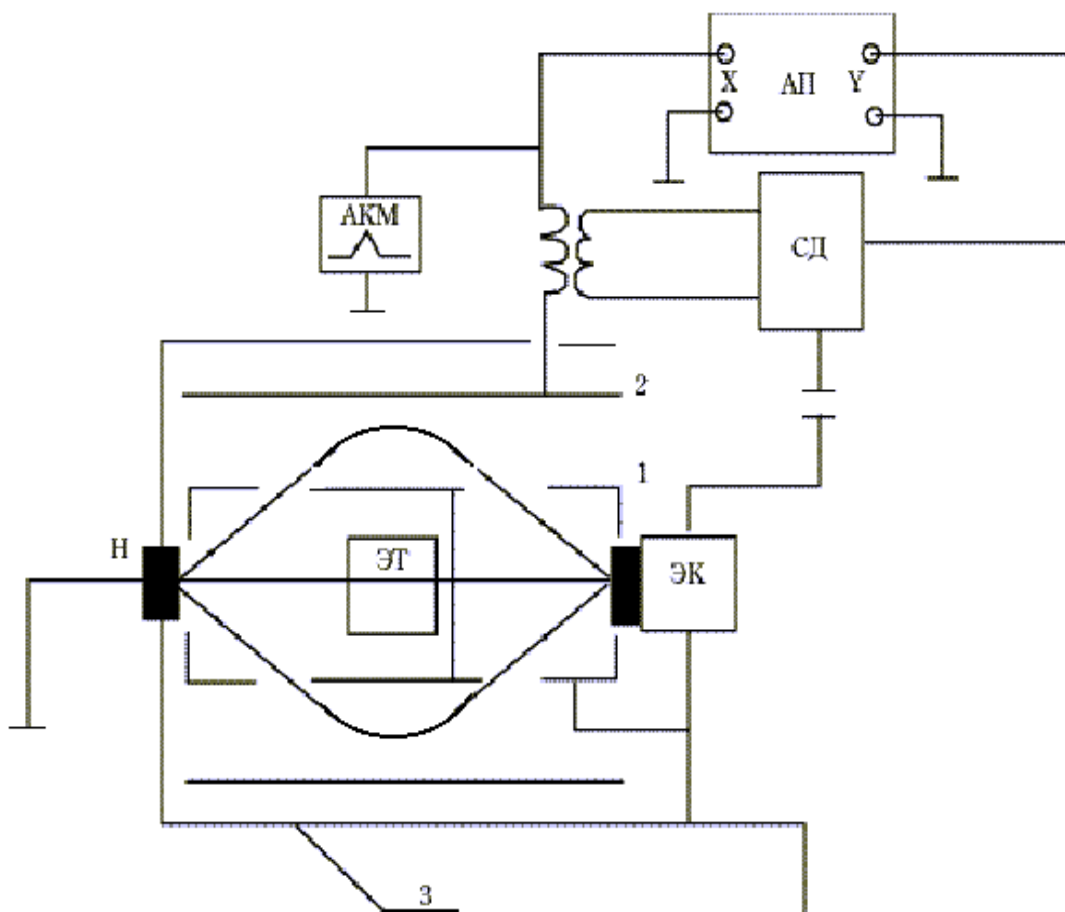
Bu yerda $I_{20}(U)$ – vaqtga bog‘liq bo‘lmagan hamma hadlarni o‘z ichiga oladi. $K \ll U$ bo‘lganligi uchun K^3 va undan yuqori darajali hadlarni tashlab yuborsak:

$$I_2(U + K \sin \omega t) = I_{20}(U) + I_2^I (K \sin \omega t) - \frac{I_2^{II}}{4} K^2 \cos 2\omega t \quad (3.4)$$

Qabul qiluvchi sistemadagi dastlabki va rezonans kuchaytirgichlarni hamda sinxron detektorni ω **chastotada ishlaydigan** qilib sozlansa, yozib oluvchi

qurilmada $N(E)$ qayd qilinadi. $N(E)$ spektr ikkilamchi elektron-larning birinchi garmonikasining amplitudasi I^I_2K ga proporsional bo'ladi. Qayd qiluvchi **sitemani 2ω chastotaga** sozlab $I^{II}_2K^2$ amplitudaga proporsional bo'lgan **$N^I(E)=dN_2/dE_2$ signallarni yozib olish mumkin.**

Silindrik ko'zguli analizatorga ega bo'lgan spektrometrlar. Bunday analizator bitta markaziy o'qqa ega bo'lgan ikkita (ichki va tashqi) silindrdan iborat bo'ladi. Ichki silindr ichiga optik o'qi analizator-larning markaziy o'qi bilan ustma-ust tushadigan qilib elektron to'p joylashtiriladi. Analizator ikkita fokusga ega bo'lib, ulardan biriga nishon, ikkinchisiga esa ikkilamchi elektronlarni habul qiluvchi asbob (elektron kuchaytirgich - EK) o'rnatiladi (3.9 – rasm).



3.9-rasm. Silindrik ko'zguli analizator spektrometri: EK – elektron kuchaytirgich, ET – elektronlar to'pi, T – to'siq, 1 va 2 – ichki va tashqi silindrlar.

Nishondan uchib chiqqan elektronlar radial yo‘nalishlar bo‘ylab harakatlanib, ichki silindrdagi halqasimon tirqish orqali o‘ta boshlaydi. Tashqi silindrga berilgan manfiy potensial ma’lum energiyali elektronlarni orqaga qaytarib, ikkinchi halqasimon tirqish orqali EK ga yo‘naltiradi. Tahlil qilinayotgan elektronlarning energiyasi tashqi silindr potensialiga proporsional bo‘ladi. Maydonning ekvipotensialligini saqlash uchun halqasimon tirqishlarga to‘rlar qoplanadi. Elektronlar ichki silindr orqali EK ga tushmasligi uchun elektronlar to‘pining (ET) orqa tomoniga to‘siq qo‘yiladi.

Bu usulda yozib olingan signal to‘g‘ridan-to‘g‘ri ikkilamchi elektronlarning spektri $N(E)$ ni beradi. Oje-signallarni yozish uchun tashqi silindrga qo‘shimcha ozgina sinusoida kuchlanish $\Delta U = K \sin \omega t$ beriladi. Bu spektrometrda signalning shovqinga nisbati 10^3 va undan katta bo‘ladi.

Ajrata olish qobiliyati esa $0,2 \div 0,5\%$ ni tashkil qiladi. Demak, silindrik ko‘zguli analizatorlarning sezgirlik va aniqlik darajasi to‘xtatuvchi maydonli analizatorlardan ancha yuqori bo‘ladi.

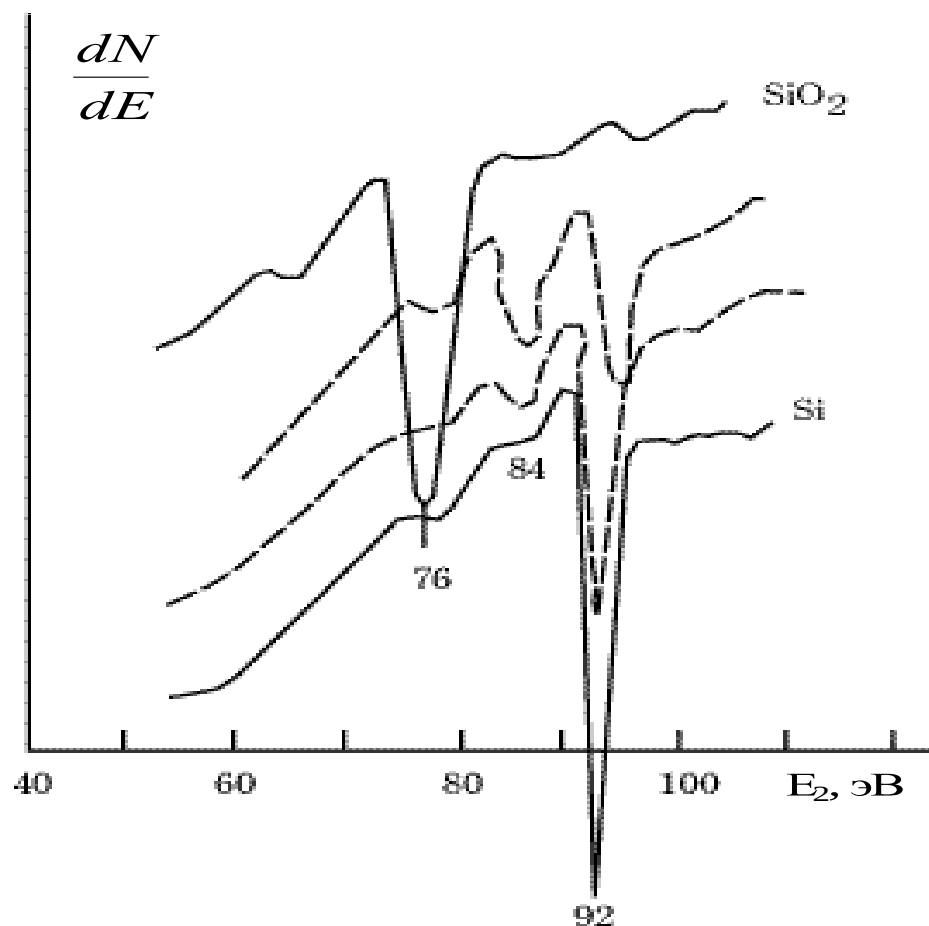
Biz ko‘rib o‘tgan bu ikkala turdagi analizatorlarning o‘nlab modifikatsiyalari ishlab chiqilgan. Bundan tashqari uchinchi tur analizatorlar ham mavjud. Bunday analizatorlar Yuza-Rojanskiy analizatori deb ataladi. Bu analizatorlar hozirgi kunda oje-elektron spektroskopiya keng tarqalmagan.

Sifat tahlili. Jism yuzasidagi elementlarning tarkibini va atomlar orasidagi kimyoviy bog‘lanishlar bor yoki yo‘q ekanligini aniqlash bilan kifoyalanish **sifat tahlili** deyiladi. Sifat tahlilida ma’lum bir elementning ko‘p yoki ozligi to‘g‘risida oje-cho‘qqilarning intensivligiga qarab fikr yuritish mumkin, ammo ularning konsentratsiyalari to‘g‘risida ma’lumot berilmaydi. Masalan 3.9-rasmga qarab Mo tarkibida uglerod ko‘proq, kislorod ozroq deb fikrlash mumkin. Ammo ularning konsentratsiyalarini aniqlaganimizda teskarisi bo‘lishi ham mumkin.

Jism yuzasidagi atomlar o‘zaro kimyoviy birikmalar hosil qilsa, oje-cho‘qqilarning energetik o‘rni va shakli o‘zgarishi mumkin. Bu o‘zgarishlar asosan XVV turidagi oje-cho‘qqilarda sezilarli bo‘ladi, shuning uchun ular

atomlarning kimyoviy holatini aniqlash uchun keng qo'llaniladi. 3.10-rasmda oksidlanish jarayonida kremniyning $L_{23}VV$ cho'qqisining o'zgarishi ko'rsatilgan.

Oksidlanish davomida yangi cho'kqining hosil bo'lishi, uning siljishi va shaklining o'zgarishiga qarab yangi birikma hosil bo'layotganligini yaqqol bilish mumkin.



3.10-rasm. Kremniyning oksidlanish jarayonida $L_{23}VV$ – oje-cho'qqining o'zgarishi.

Sifat tahlili elektron texnikaning hamma sohalarida (jumladan mikroelektronikada) juda ko'p qo'llaniladi. chunki ko'p hollarda jismda qanday chet elementlar bor ekanligini, ular kimyoviy birikma hosil qiladimi- yo'qmi ekanligini taxminiy aniqlash yetarli bo'ladi.

Miqdoriy tahlil. OES ni amaliy qo'llashda ko'pgina hollarda yarim miqdoriy tahlil bilan chegaralanish mumkin. Ammo yangi texnologiyani amalga

oshirishda, hamda yangi hosil qilinayotgan materialarning kimyoviy tarkibini o'rganishda yuqori aniqlikdagi miqdoriy ma'lumotlar zarur bo'ladi.

Qattiq jism yuzada mavjud bo'lgan elementlarning har birining miqdorini, ularning qancha qismi birikma hosil qilganligini, birikmalarni turini va konsentratsiyalarini aniqlash – **miqdoriy tahlil** deyiladi.

Miqdoriy tahlil qilishda tekshirilayotgan elementning oje-elektronlar toki bilan uning konsentratsiyasi orasidagi bog'lanishni aniqlash zarur bo'ladi. Oje-elektronning toki sifatida oje-cho'qqining amplitudasi (intensivligi) yoki cho'qqi osti yuzasi olinishi mumkin. Bu bog'liqlikni biror γ elementning WXY oje-jarayoni uchun quyidagi soddalashtirilgan ko'rinishda yozish mumkin:

$$I_{\gamma}(wxy) = I_1 T N_{\gamma} \gamma_{\gamma}(wxy) \sigma_{\gamma}(E_1, E_w) \lambda (1 + R_B) \quad (3.6)$$

Bu yerda R_B – elektronlarning orqaga qaytish koeffitsenti, I_1 – birlamchi elektronlarning toki, T – analizatorning o'tkazish qobiliyati, N_{γ} – γ -elementning atom zichligi, $\gamma_{\gamma}(wxy)$ – WXY-oje-o'tishning extimolligi, λ – oje-elektronlarning chiqish chuqurligi, E_1 – birlamchi elektronlarning energiyasi, $\sigma_{\gamma}(E_1, E_w)$ – ichki W sathning ionlashish ko'ndalang kesimi.

Biz miqdoriy tahlilning ikki xil usulini qisqacha ko'rib o'tamiz.

a) Tashqi etalonlar usuli. Bu usulda **tekshirilayotgan jismning oje-spektrlari**, tarkibida aniq miqdorli bizni qiziqtirayotgan element atomlari bo'lgan, **etalon namunaning oje-spektrlari** bilan taqqoslanadi. γ elementning etalondagi $N_{\gamma}^{\mathcal{O}}$ konsentratsiyasi ma'lum bo'lsa, uning tekshirilayotgan jismdagi noma'lum N_{γ}^T konsentratsiyasini quyidagi formuladan topish mumkin:

$$\frac{N_{\gamma}^T}{N_{\gamma}^{\mathcal{O}}} = \frac{I_J^T \lambda^{\mathcal{O}}}{I_{\gamma}^{\mathcal{O}} \lambda^T} \left(\frac{1 + R_B^{\mathcal{O}}}{1 + R_B^T} \right) \quad (3.7)$$

Bu usulning asosiy afzalligi shundaki, bunda ionizatsiya ko'ndalang kesimi va oje-elektronlarning chiqish extimolini bilish shart emas. Bundan tashhari etalon va tekshirilayotgan jismning tarkiblari katta farq qilmasa $\lambda^e \approx \lambda^T$ va $R_{VE} \approx$

R_V^T deb olish mumkin. Bu holda konsentratsiyani faqatgina oje-cho‘qqilarning intensivliklari orqali aniqlash mumkin.

Ammo kerakli etalonlarga har doim ega bo‘lish juda qiyin. Shuning uchun bu usul kam qo‘llaniladi.

b) Elementlarning sezgirlik koeffitsiyenti usuli. Elementlarning sezgirlik koeffitsenti usulining aniqlik darajasi kichikroq bo‘lsa ham, ahamiyati juda kattadir. Chunki bu usul universal bo‘lib, har qanday elementning konsentratsiyasini hech qanday etalon qo‘llanmasdan aniqlash imkonini beradi. Bu yerda har bir element ma’lum bir sezgirlik koeffitsiyentiga ega deb qabul qilinadi. Elementlarning sezgirlik koeffitsenti birorta o‘ta toza elementga nisbatan olingan. Bunday element sifatida ko‘pincha kumush elementi olinadi.

Biror jism tarkibidagi X – elementning noma’lum S_x miqdori (konsentratsiyasi) atom % larda quyidagi formuladan topiladi:

$$C_X = \frac{I_X / S_X}{\sum (I_i / S_i)} \quad (3.8)$$

bu yerda I_x – x element oje-cho‘qqisining balandligi (maksimum va minimum orasidagi masofa); S_x – x elementning sezgirlik koeffitsiyenti; $\sum(I_i/S_i)$ – jismdagi barcha elementlarning I/S nisbatlarining yig‘indisi.

Har xil elementlar uchun S ning qiymatini maxsus jadval – katalogdan olish mumkin. Ammo aniqlikni oshirish uchun elementlarning sezgirlik koeffitsiyentini matritsa tuzatmalarini hisobga olgan holda hisoblash mumkin.

$$S = S_T \cdot \alpha \quad (3.9)$$

S_T – S ning jadvaldan aniqlangan qiymati:

α – matritsa tuzatmasi:

$$\alpha = \frac{\lambda_i^j \cdot N_i^j (1 + r_i^j)}{\lambda_i^i \cdot N_i^i (1 + r_i^i)} \quad (3.10)$$

Bu yerda λ_i^j – j elementlardan tashkil topgan matritsa tarkibidagi I element oje-elektronlarining chiqish chuqurligi, λ_i^i – bir xil I elementlardan tashkil topgan

matritsadan I oje-elektronlarining chiqish chuqurligi, N – atom zichligi, r – orqaga qaytish koeffitsiyenti.

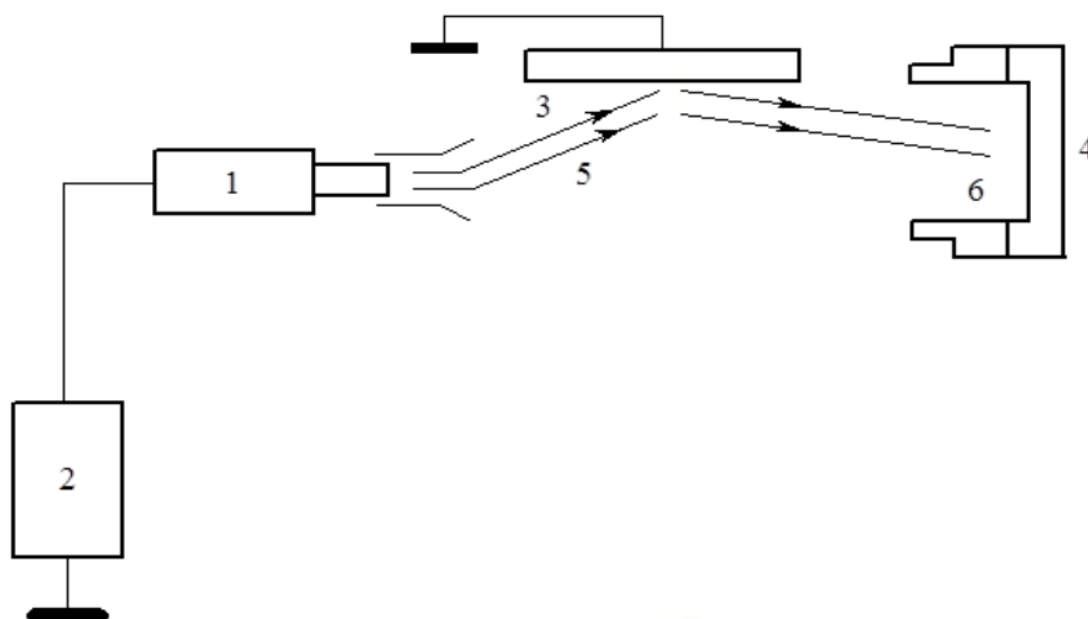
N , λ va r parametrlar maxsus formulalar yordamida hisoblanadi.

OES usuli yordamida chuqurlik bo'yicha ma'lumot olish uchun u bilan birgalikda yuzalarni ionlar bilan yemirish usulidan foydalaniladi. Bunda avvaliga yuza yedirilish qalinligining vaqtga bog'liqligi aniqlab olinadi. Vaqtning ma'lum bir qiymatlarida yedirilish to'xtatilib, OES yordamida jismning shu yerdagi tarkibi aniqlanadi. Umuman tarkibni aniqlash ionli yedirish bilan bir vaqtda ham olib borilishi mumkin.

3.4. Ushbu ishda ishlatiladigan standart asboblarning asosiy xususiyatlari

Ion bombardimon qilish va keyingi tavlanish jarayonida Si kristall strukturasi va panjara parametrlarining o'zgarishi EMR 2 qurilmasida o'rganildi. Asosiy o'lchovlar birlamchi elektronlar energiyasi 70-75 keV, zondlash chuqurligi 47 sirtida sodir bo'lganida amalga oshirildi. 5-10° burchak ostida 50÷100Å bo'lgan. DBE usulining sxemasi 2.6-rasmda ko'rsatilgan. DBE sozlamasi quyidagilardan iborat: elektron tabana - 1, elektron qurolni boshqarish quvvat manbai - 2, namuna - 3, lyuminestsent ekran - 4, bug'langan materiallar - 7. Elektron tabanada yaratilgan elektronlar (5) namunaga burchak ostida tushadi. (0- 10°) va namunaning sirt panjarasining atomlari tomonidan tarqaladi.

DBE usulida elektronlarning de Broyl to'lqin uzunligi qattiq jismlarning panjara doimiylari bilan solishtirish mumkin bo'lganligi sababli, panjaradagi elektron diffraksiyasining Laue sharti bajariladi [31].



3.11-rasm. Tez elektron difraktometr: 1-elektron tabana, 2-elektron qurolni boshqarish quvvat manbalari, 3-namuna, 4-lyuminestsent ekran, 5-asosiy elektron nur, 6-difraksiyalangan elektronlar.

Difraksiyalangan elektronlar (6) lyuminestsent ekranda 48 diffraksiya naqshlarini hosil qiladi. Agar DBE naqshlarida diffuziya foni (amorf galo) paydo bo'lsa, unda sirt amorf holatda, deyishimiz mumkin, agar konsentrik halqalar paydo bo'lsa, sirt polikristal holatda bo'ladi, agar nuqta yoki ko'zgu paydo bo'lsa, sirt bir shaklga o'tadi. monokristal holati.

Sirt topografiyasini o'rganish uchun 2-3 nm o'lchamli JEOL skanerlash elektron mikroskopi ishlatilgan. REM ning ishlash printsipti ikkilamchi elektron emissiyasining o'zgarishiga asoslanadi, bu elektron nurlar namuna yuzasida rastrga skanerlanganda sirt topografiyasining farqiga bog'liq.

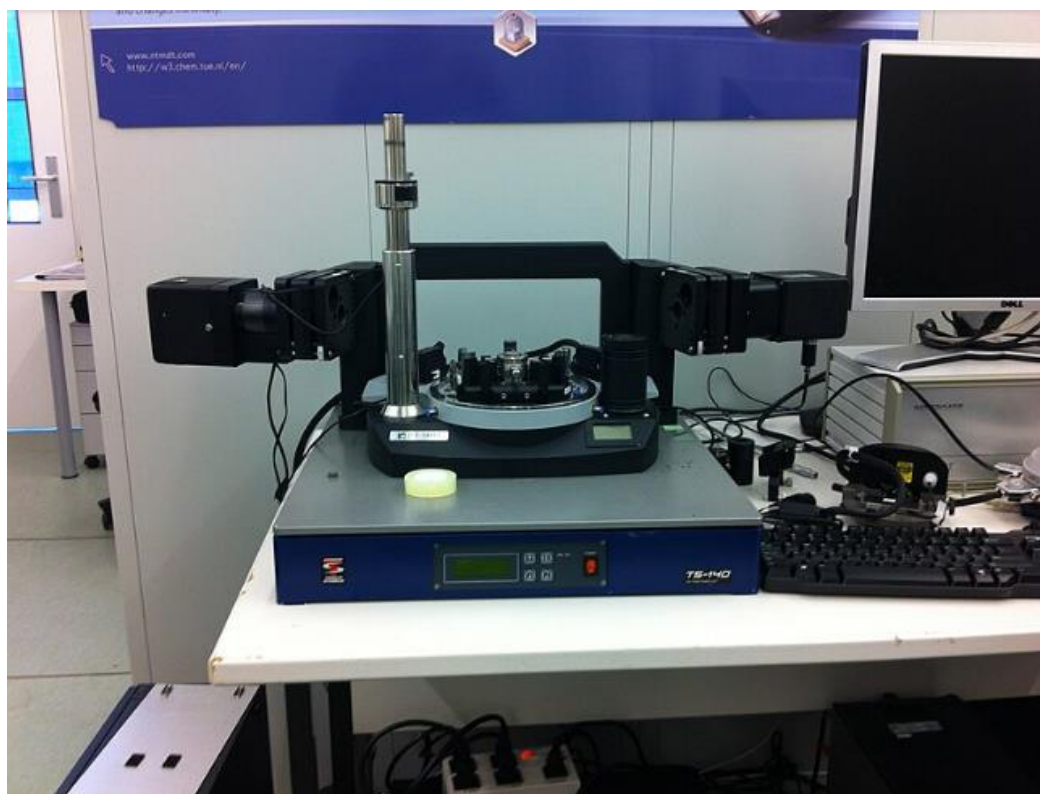
Atom kuchli mikroskopiysi

Tadqiqotlar XIA tipidagi AKMda o'tkazildi. AKM ishi prob va sirt o'rtasidagi kuch o'zaro ta'siriga asoslangan bo'lib, u oxirida o'tkir zondli elastik konsol bo'lgan maxsus zond sensorlari yordamida ro'yxatga olinadi. Probga sirtidan ta'sir qiluvchi kuch konsolning egilishiga olib keladi. Buriilish kattaligini qayd qilib, zond va sirt orasidagi o'zaro ta'sir kuchini boshqarish mumkin.

Atom kuchli mikroskopi (AKM, inglizcha AKM - atom-kuch mikroskopi) - nanometr yoki undan yuqori o'lchamdagi sirt topografiyasini aniqlashga qodir yuqori aniqlikdagi skanerlash zondli mikroskop.

Skanerli tunnel mikroskopidan farqli o'laroq, atom kuch mikroskopi o'tkazuvchan va o'tkazmaydigan sirtlarni tekshirishi mumkin.

O'tkazmaydigan jismlar sirtlarining rel'efini aniqlash uchun elastik konsol (konsol) ishlatilgan, uning og'ishi, o'z navbatida, skanerlash tunnel mikroskopidagi kabi tunnel oqimining kattaligi o'zgarishi bilan aniqlangan. Biroq, konsol holatidagi o'zgarishlarni qayd etishning bu usuli eng muvaffaqiyatli bo'lmadi va ikki yil o'tgach, optik sxema taklif qilindi: lazer nuri konsolning tashqi yuzasiga yo'naltiriladi, aks ettiriladi va fotodetektorga uriladi. Konsol burilishlarini qayd etishning ushbu usuli ko'pgina zamonaviy atom kuchli mikroskoplarida qo'llaniladi.



3.11-rasm. Atom kuchli mikroskopi

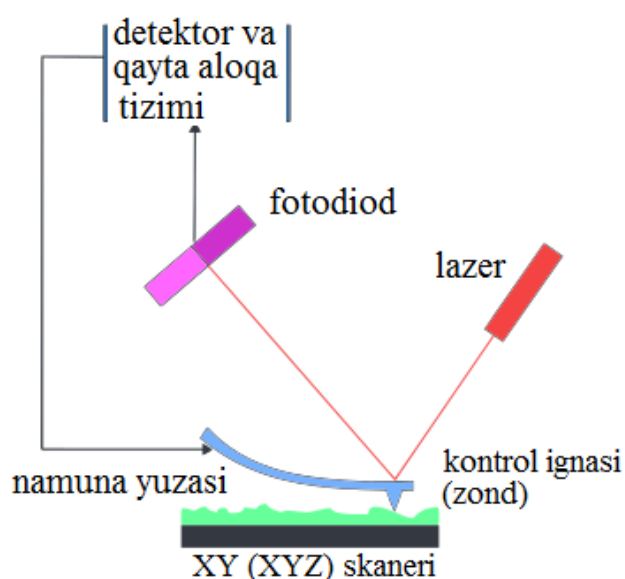
Atom kuchli mikroskopining ishlash printsipi o'rganilayotgan namuna yuzasi va zond o'rtasidagi kuchlarning o'zaro ta'sirini qayd etishga asoslangan.

Nano o'lchamdagi uchi zond sifatida ishlatiladi, konsol deb ataladigan elastik konsolning oxirida joylashgan. Probga sirtidan ta'sir qiluvchi kuch konsolning egilishiga olib keladi. Uchi ostidagi tepaliklar yoki depressiyalarning paydo bo'lishi probga ta'sir qiluvchi kuchning o'zgarishiga olib keladi va shuning uchun konsolning egilishi miqdori o'zgaradi. Shunday qilib, egilish miqdorini qayd qilib, biz sirt topografiyasi haqida xulosa chiqarishimiz mumkin.

Namuna yuzasi o'rtasida harakat qiluvchi kuchlar uzoq masofali Van der Waals kuchlarini anglatadi, ular kichik masofalarda itaruvchi kuchlardir va masofaning oshishi bilan jozibali kuchlarga aylanadi. Konsol va namuna yuzasi orasidagi masofa va kuchlar turiga qarab, atom kuchi mikroskopining uchta ish rejimini ajratish mumkin:

1. Aloqa rejimi
2. Kontaktsiz rejim
3. Yarim kontakt rejimi yoki teginish rejimi

O'ngdagi rasmda nol sifatida qabul qilingan masofa sirt atomlarining yadrolari va konsolning eng chiqadigan atomi orasidagi nol masofaga to'g'ri keladi. Shuning uchun minimal potentsial energiyaga ega bo'lgan muvozanat nuqtasi atomlarning elektron qobiqlarining "chegarasiga" mos keladigan chekli masofada joylashgan.



3.12- Atom kuchli mikroskopining ishlash sxemasi

Atom kuch mikroskopining kontaktli ish tartibi

Atom kuch mikroskopining aloqa rejimida sodir bo'ladigan atomlarning qobiqlari bir-biriga yopishganda, profilometrning ish rejimiga o'xshash repulsiya sodir bo'ladi. Konsolning eng chiqadigan atomi sirt bilan bevosita aloqa qiladi. Teskari aloqa doimiy quvvat rejimida skanerlash imkonini beradi, agar tizim doimiy ravishda konsol egilishini saqlaydi. 10–10 m gacha bo'lgan balandlik farqlari bilan toza sirtni o'rganishda zond va namuna yuzasi o'rtasidagi doimiy o'rtacha masofada skanerdan foydalanish mumkin. Konsolning harakati, bu holda, namuna yuzasidan o'rtacha balandlikda sodir bo'ladi. Har bir nuqta uchun zondga ta'sir qiluvchi kuchga mutanosib bo'lgan kanteleverning egilishi DZ o'lchanadi. Va bu rejimdagi tasvir prob va sirt o'rtasidagi o'zaro ta'sir kuchining fazoviy taqsimotini ko'rsatadi.

Usulning bir qancha afzalliklari bor:

- Boshqa usullar bilan solishtirganda eng katta shovqinsiz ishlaydi;
- Eng yuqori erishilgan skanerlash tezligi;
- Relyefdagi keskin o'zgarishlar bilan yuzalarni eng yaxshi sifatli skanerlashni ta'minlaydi;

Shuningdek, usulning kamchiliklari:

- Bosqichlar yaqinidagi sirt bo'ylab yo'naltirilgan kuchlarning mavjudligi bilan bog'liq yod namunalarning mavjudligi;
- Havoda skanerlashda kapillyar kuchlar sirtida suvning atom qatlamining muqarrar mavjudligi sababli zondga ta'sir qiladi va sirt balandligini aniqlashda xatolikka olib keladi;
- Biologik ob'ektlar va organik materiallarning shaklini o'rganish uchun amalda yaroqsiz.

Atom kuch mikroskopining kontaktsiz ishlash rejimi

Kontaktsiz rejimda ishlaganda, prob jozibali kuchlar harakat qiladigan masofada joylashgan. Piezokeramik probning rezonansli tebranishlarini qo'zg'atadi. Bunday holda, van der Vaals kuchlari orqali sirt xususiyatlari tebranishlarning amplituda-chastota va faza-chastota xarakteristikalarining

siljishiga olib keladi. Signalning yuqori harmoniklaridagi o'zgarishlarni o'lchash ham mumkin.

Teskari aloqa tufayli prob tebranishlarining doimiy amplitudasi saqlanadi va sirtidagi har bir nuqtada chastota va faza o'lchanadi. Boshqa rejimda tebranishlar chastotasi yoki fazasining doimiy qiymatini saqlab qolish uchun qayta aloqadan foydalanish mumkin.

Usulning quyidagi afzalliklari ta'kidlangan:

- Probning tekshirilayotgan sirtga ta'siri yo'q.

Va kamchiliklarga quyidagilar kiradi:

- Barcha tashqi shovqinlarga juda sezgir;
- Eng past aniqlik;
- Eng past skanerlash tezligi;
- U faqat vakuum sharoitida, sirtida adsorbsiyalangan suv qatlami bo'lmaganda ishlaydi;

Skanerlash paytida kantelning ifloslanishi uning chastota xususiyatlarini o'zgartiradi.

IV-BOB. QATTIQ FAZALI EPITAKSIYA VA ION IMPLANTATSIYASI NATIJASIDA OLINGAN NISI₂ NANOPLYONKALARNING SIRT MORFOLOGIYASI, TARKIBI, TUZILISHI VA ELEKTRON VA OPTIK XUSUSIYATLARI

Hozirgi vaqtda sirt qatlamlarida nanofazalar va nanoplyonkalar bilan yarim o'tkazgichlarning optik va elektron xususiyatlarini o'rganishga katta e'tibor berilmoqda. Kremniyning xususiyatlarining o'lchamlarini bir necha nanometrgacha pasayishi bilan bog'liq tadqiqotlar, shuningdek, turli xil ta'sirlar (atom adsorbsiyasi, ion va elektron bombardimonlari, oksidlanish) ostida Si nanoplyonkalarining xususiyatlarini o'zgartirishga qaratilgan tadqiqotlar alohida qiziqish uyg'otadi. [32, 33] da ko'rsatilgan bo'lib, NK Si fazalarining so'raladigan zonasining kengligi o'lchamning kamayishi bilan 1,9 eV ga oshadi. E_g ning ortishi yupqa amorf kremniy plyonkalar hosil bo'lgan holatda ham kuzatiladi [34]. Shuning uchun amorf kremniy nanokristalli kremniy tizimi yuqori samaradorlikka ega quyosh batareyalarini ishlab chiqish uchun istiqbolli materialdir [35].

Metall silitsidlarning yupqa plyonkalarining fizik-kimyoviy xususiyatlarini olish va o'rganishga qiziqish, birinchi navbatda, MDP, PDP tranzistorlari, SVCh mikroto'lqinli qurilmalar va ISlar, radiatsiya detektorlari, omik kontaktlar va to'siq tuzilmalarini yaratish uchun ulardan foydalanish imkoniyati bilan bog'liq.

Yuqori chastotali mikroto'lqinli qurilmalar va ular bilan aloqalarni olish uchun an'anaviy past haroratli materiallarga qaraganda ancha yuqori talablarga (o'tish qatlamining kichik qalinligi, kompozitsion o'zgarmasligi va sirtning morfologik mukammalligi) qo'yiladigan nano o'lchamdagi qalinlikdagi qatlamlardan foydalanish kerak. -chastotali qurilmalar. Hozirgi vaqtda juda yaxshi morfologiyasi, stokiometriyasi va bir xilligi bilan yupqa ($d \leq 500 \div 1000 \text{ \AA}$) Si asosidagi monokristal plyonkalarni olish imkonini beruvchi bir qancha samarali usullar mavjud. Bularga epitaksial o'sish usullari va tavlanish bilan birlashtirilgan ion bombardimonlari kiradi.

CoSi₂, BaSi₂ va NaSi₂ ning eng nozik plyonkalari va nanokristal fazalari past energiyali ($E_0 \leq 5$ keV) ion bombardimoni bilan tavlanish bilan birga olinadi. CoSi₂ dan katta va o'ta yirik integral mikrosxemalarning (IC) asosiy elementi bo'lgan metall va o'tkazuvchan bazali tranzistorli tranzistorlarda qo'llanilishi, asosan, o'zining noyob elektrofizik xususiyatlari va past elektr qarshiligi ($\rho \approx 20-40$ mkOm·sm) bilan bog'liq [1,38].

4.1. Qattiq fazali epitaksiya usuli bilan olingan NiSi₂/Si plyonkalarining yuza morfologiyasi

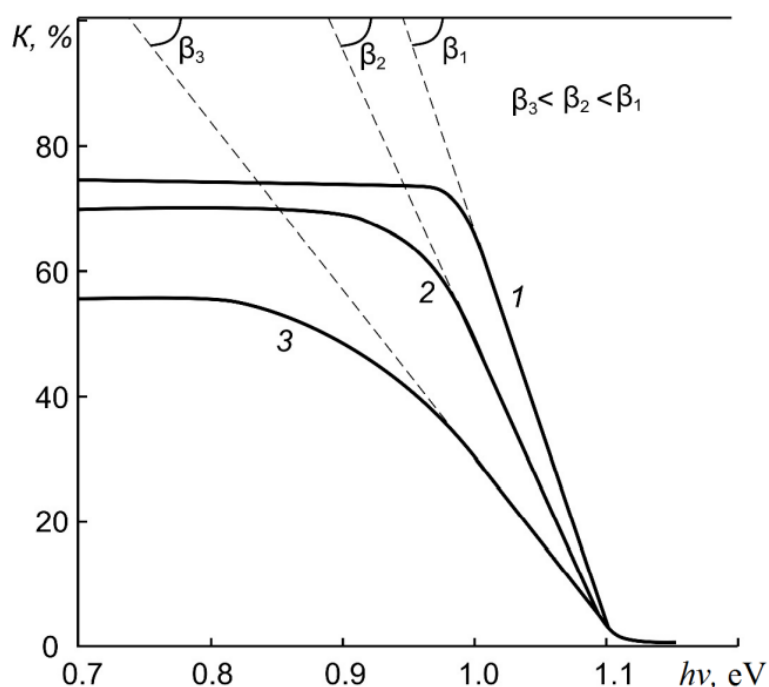
Si (111) sirtga yaqin qatlamining buzilishi foton energiyasining butun o'rganilayotgan hududida ($h\nu = 0,4 - 1,5$ eV) yorug'lik o'tkazuvchanligi K ning pasayishiga olib keladi (4.1.-rasm). 4.1-rasmdan ko'rinib turibdiki, sof Si (111) $h\nu = 0,6 - 0,9$ eV mintaqasida K ning qiymati sezilarli darajada o'zgarmaydi 55, juda qisqa mintaqada $h\nu = 0,9 - 1$ eV, qaramlik K ($h\nu$) eksponent xarakterga ega va mintaqada $h\nu = 1,0 - 1,1$ eV K keskin, deyarli chiziqli, katta tik bilan nolga kamayadi. Bu Si(111) namunasining yaxshi monokristalligini ko'rsatadi. Ma'lumki [36, 37] kristallarda atom darajasida tartibsizlikning mavjudligi yutilish koefitsientining $(h\nu)^2$ ga bog'liqligida ko'rsatkichli kesmalarning paydo bo'lishiga olib keladi. Ionlarning bombardimon qilinishi butun o'rganilayotgan $h\nu$ mintaqada yutilish koefitsientining sezilarli pasayishiga, ko'rsatkichli kesmaning oshishiga va natijada $I(h\nu)$ egri chiziqning chiziqli kesimi tikligining pasayishiga olib keladi (4.1.-rasm).) [1A].

Bu o'zgarishlar $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozasigacha sodir bo'ladi, bu esa sirtga yaqin qatlamning to'liq amorfizatsiyasiga to'g'ri keladi. Eksponensial mintaq uchun yorug'lik yutilishida, yutilish koefitsienti α foton energiyasiga bog'liqligini CdSeS kristali uchun [37] da berilgan formuladan baholash mumkin:

$$\alpha = \alpha_0 e^{\frac{-(E_g - h\nu)}{E_0}} \quad (4.1)$$

bu erda E_0 - xarakterli energiya, u chekka tikligini aniqlaydi va atomlararo masofalar qiymatlarining o'zgarishi haqida ma'lumot beradi [37]. [37] da E_0 qiymatini aniqlash uchun $\ln \alpha(h\nu)$ bog'liqlik qurildi va bu bog'liqliklar chiziqli

bo'ladigan bo'limlar tanlandi, E_0 qiymati esa chiziqli kesmalar tikligining o'zaro nisbati bilan aniqlandi.



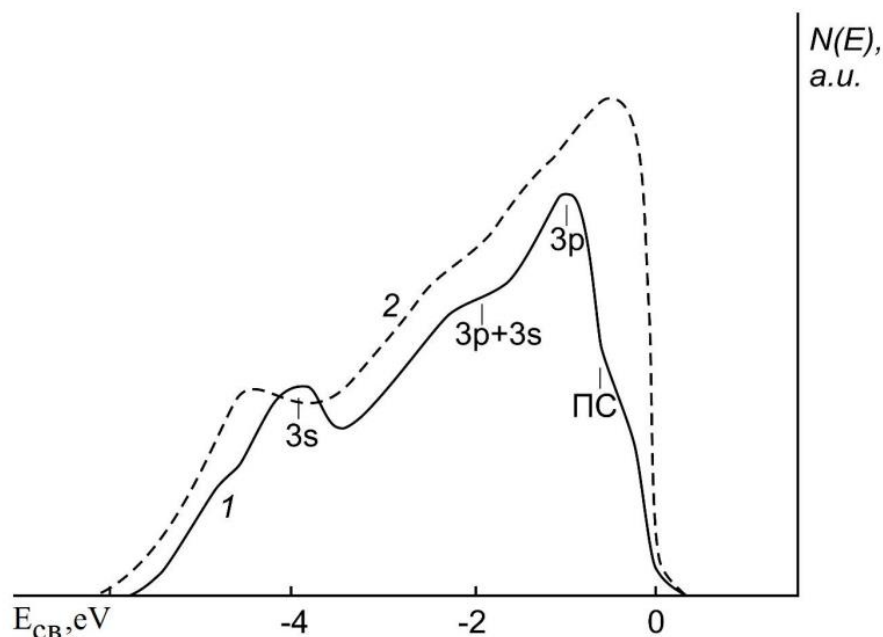
4.1-rasm. Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilingan Si(111) plyonkasi uchun yorug'lik o'tkazuvchanligi K ning foton energiyasiga bog'liqligi.

D , sm^{-2} : 1 – 0; 2 – $5 \cdot 10^{15}$; 3 – $5 \cdot 10^{16}$ [1A] dozalarida $E_0 = 1$ keV bilan ligerangan.

Bir kristalli va amorf Si plyonkalar uchun o'rganilayotgan $h\nu$ hududida yorug'lik aks etish koeffitsientlari bir-biridan kam farq qilishini va uning qiymati 4–6% dan oshmasligini hisobga olsak, bu plyonkalar uchun bog'liqliklar $K(h\nu)$ va $\alpha(h\nu)$ teskari proporsionaldir deb taxmin qilish mumkin. Shuning uchun sirt buzilishi darajasini $K(h\nu)$ egri chiziqlarning chiziqli kesimlarining tikligidan baholash mumkin. Bunda $\alpha(h\nu)$ dan farqli ravishda $K(h\nu)$ egri chiziqlarning qiyaliklari $K = 100\%$ ga nisbatan aniqlanadi. Ko'rinib turibdiki, ion dozasining ortishi bilan β qiymati mos ravishda $\text{tg}\beta$ egri chiziqlarining tikligi pasayadi va $E_0 \sim \frac{1}{\text{tg}\beta}$ – qiymat ortadi, bu yorug'lik yutilishining oshishiga va uzatiladigan intensivlikning pasayishiga olib keladi. yorug'lik [37]. Shuni ta'kidlash kerakki, ionli bombardimon paytida, ion dozasidan qat'i nazar, K ning taxminan nolga tushadigan $h\nu$ qiymati o'zgarmaydi va 1,1 - 1,15 eV oralig'ida yotadi, ya'ni.

amorfizatsiya paytida tarmoqli bo'shlig'i kamaymaydi. Keyingi tadqiqotlarimiz shuni ko'rsatdiki, amorflangan Si qatlami uchun $E_g \sim 1,2$ eV

4.2-rasmda $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ da $E_0 = 1 \text{ keV}$ bo'lgan Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilishdan oldin va keyin o'lchangan Si (111) uchun fotoelektron spektrlari ($h\nu = 10,8 \text{ eV}$) ko'rsatilgan.



4.2-rasm.. Si (111) plyonkasi uchun (1-egri chiziq) oldin va $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ da $E_0 = 1 \text{ keV}$ bo'lgan Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilingandan keyin $h\nu = 10,8 \text{ eV}$ da o'lchangan fotoelektron spektrlari (egri 2) keltirilgan.

4.2-rasmdan ko'rinib turibdiki, amorflanish valentlik elektronlar holati zichligining keskin o'zgarishiga olib keladi. Xususan, asosiy maksimalning pozitsiyasi valentlik zonasining yuqori qismiga qarab 0,4 - 0,5 eV ga siljiydi. Bunda ΔE spektrining kengligi 0,2–0,3 eV ga, fotoelektronlarning kvant unumi (energiya taqsimoti egri chizig'i ostidagi maydon) 25–30% ga oshadi. Si Fotoelektron spektrlarini tahlil qilish asosida energiya zonalarining asosiy parametrlarini aniqlash mumkin. Xususan, valentlik zonasining yuqori qismining holati quyidng formula bilan aniqlangan.

$$E_v = h\nu - \Delta E \quad (4.2)$$

Hisoblashlar shuni ko'rsatdiki, ion bombardimonidan oldin Si (111) uchun E_v qiymati $\sim 5,1$ eV ga teng, keyin. ion bombardimoni $\sim 5,25$ eV. 4.1-jadvalda energiya holatlarining asosiy parametrlari va $h\nu = 0,4$ va $1,0$ eV uchun yorug'lik o'tkazish koeffitsienti ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, ion implantatsiyasidan so'ng $h\nu \approx 0,8$ eV mintaqasida o'tkazish koeffitsienti 20-30% gacha kamayadi, $h\nu$ qiymati E_g ga yaqinlashganda K ning pasayishi kuchliroq sodir bo'ladi.

4.1-jadval

Si uchun ion bombardimon amorfizatsiyasidan oldin va keyin E_v , E_g , χ va K qiymatlari

	E_v , eV	E_g , eV	χ , eV	Transmessiya koeffitsiyenti, %	
				$h\nu=0.8$ eV	$h\nu=1.0$ eV
Si (111)	5.2	1.1	4.1	75	62
$Ar^+ \rightarrow$ Si (111)	5.0	1.25	3.85	56	27

Bir xil tarkibdagi materiallar holatida tartibsiz qatlamlarni aniqlash zamonaviy elektron texnologiyaning juda qiyin vazifasidir. Si qatlamlarining amorfizatsiya chuqurligini baholash uchun ushbu ishda birinchi marta E_p ning 500 - 1500 eV oralig'ida turli qiymatlarida o'lchangan $\eta(\varphi)$ bog'liqligini o'rganish usuli qo'llanildi. Muayyan E_p qiymatlarida xususiyatlar $\eta(\varphi)$ bog'liqligida paydo bo'ladi. Bunda $\varphi = 0 - 5^\circ$ mintaqadagi xususiyat (maksimal) eng yuqori intensivlikka ega. Buning sababi shundaki, $\varphi = 0^\circ$ da ℓ_e birlamchi elektronlarning samarali kirish chuqurligi va shunga mos ravishda NOE chiqish chuqurligi (d_η) eng katta bo'ladi. ℓ_e va d_η ning qiymati [38] formula bilan baholanadi:

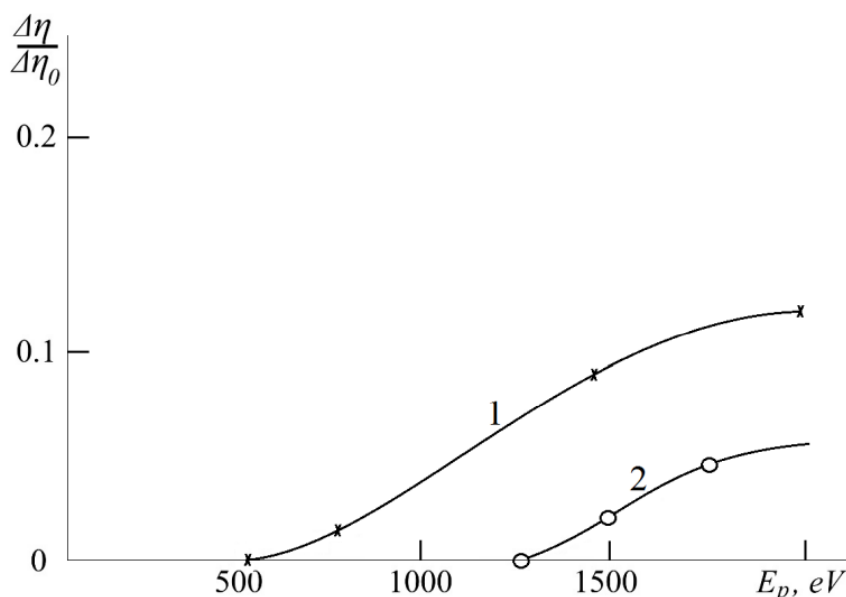
$$e_3 = 6 \cdot \frac{10^{-6}A}{Z \cdot \rho} E_p^{1.4} \quad (4.3)$$

$$d_\eta = \frac{\ell_3}{2} \quad (4.4)$$

bunda, ℓ_e va d_η , sm; E_p , keV; ρ , g/sm³; A - atom og'irligi; Z - seriya raqami.

4.3-rasmda $E_0 = 1$ keV va 2 keV bo'lgan Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilingan Si (111) uchun birinchi cho'qqining $\Delta\eta/\Delta\eta_0$ bog'liqligiga nisbiy

intensivligining $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ da birlamchi elektronlar energiyasiga o'zgarishi ko'rsatilgan.



4.3-rasm. E_0 , keV li Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilingan Si (111) uchun $\Delta\eta_0/\Delta\eta$ ning E_p bog'liqligi: 1 – 1 keV; 2 - 2 keV. $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$.

Ko'rinib turibdiki, $\Delta\eta_0/\Delta\eta$ qiymatining pasayishi yuqori E_p qiymatlarida aniq aniqlanadi va $E_p \approx 1800\text{-}2000 \text{ eV}$ da $E_p = 1500 \text{ eV}$ gacha to'yinganlik sezilarli darajada oshadi va $E_p \geq 1500 - 2000 \text{ eV}$ sezilarli darajada o'zgarmaydi. Hisob-kitoblar shuni ko'rsatadiki, $E_p = 600 \text{ eV}$ da qiymat $d_\eta = 100 - 120 \text{ \AA}$, ya'ni. tartibsiz qatlam qalinligi $100 - 120 \text{ \AA}$ deb taxmin qilish mumkin. $E_0 = 2 \text{ kV}$ bilan bombardimon qilinganda, tartibsiz qatlam qalinligi $\sim 150 - 160 \text{ \AA}$ ni tashkil qiladi.

Ko'p qatlamli epitaksial geterostrukturalar sintezi sohasidagi ilmiy-tadqiqot ishlarini faollashtirishning asosiy sabablaridan biri ular asosida noyob parametrlarga ega bo'lgan yangi qattiq jismlar elektron qurilmalarni yaratish istiqbolidir: mikroto'lqinli qurilmalar, IR, UF va rentgen detektorlari va boshqalar. Bu holda ko'p qatlamli MDP tuzilmalarini ishlab chiqarish alohida qiziqish uyg'otadi. Nano miqyosda bunday tuzilmalarni yaratish ushbu materiallarning kristall panjarasi parametrlarining yaqinligini talab qiladi. Metall sifatida ko'pincha metall xususiyatlarga ega bo'lgan metall silitsidlar qo'llaniladi (past tarmoqli bo'shlig'i va kichik qarshilik ρ). 3.2-jadvalda mikro-, nano- va

optoelektronik priborlarni yaratishda keng qo'llaniladigan metall silitsidlarning tarmoqli bo'shlig'i va panjara parametrlari ko'rsatilgan; bu strukturalar TFE usuli bilan tavlaniish bilan birgalikda olingan. Plyonka qalinligi $\sim 200\text{--}250 \text{ \AA}$.

Ko'rinib turibdiki, barcha metall silidsidlar uchun E_g 0,5-0,7 eV oralig'ida va CoSi_2 va NiSi_2 ning doimiy panjara doimiylari Si ning panjara doimiylari bilan yaxshi mos keladi. Shuni ta'kidlaymizki, hozirgi vaqtda CoSi_2/Si ning tuzilishi va xossalari batafsilroq o'rganilgan. Shuning uchun bu ishda asosiy ta'sir NiSi_2/Si tizimining tarkibi, tuzilishi va xususiyatlarini tayyorlash va o'rganishga xosdir. Kristallanish harorati va NiSi_2 tipidagi birikma hosil bo'lishini aniqlash bo'yicha dastlabki tajribalarimiz ular plyonka qalinligi va isitish haroratiga bog'liqligini ko'rsatdi: yupqa plyonkalar (qalinligi $h_{\text{Ni}} \leq 10 - 15 \text{ \AA}$) $T = 750$ dan boshlab qizdirilganda K, Ni plyonkasi butunlay bug'langan.

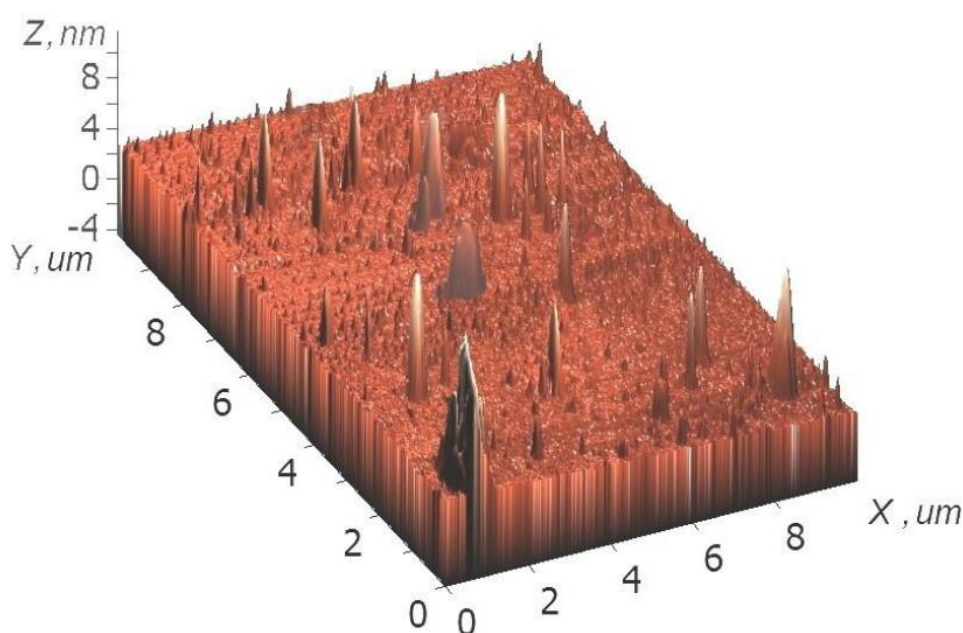
4.2-jadval

MeSi ning E_g , r va panjara parametrlarining qiymati

Parametr	Si	CoSi_2/Si	NiSi_2/Si	BaSi_2/Si	NaSi_2/Si
E_g , eV	1,12	0,5	0,58	0,7	0,65
Panjara paramerti, $\text{\AA}$	5,43	5,37	5,42	6,71	8,9
ρ , mkOm·sm	$5 \cdot 10^6$	40	50	100-120	-

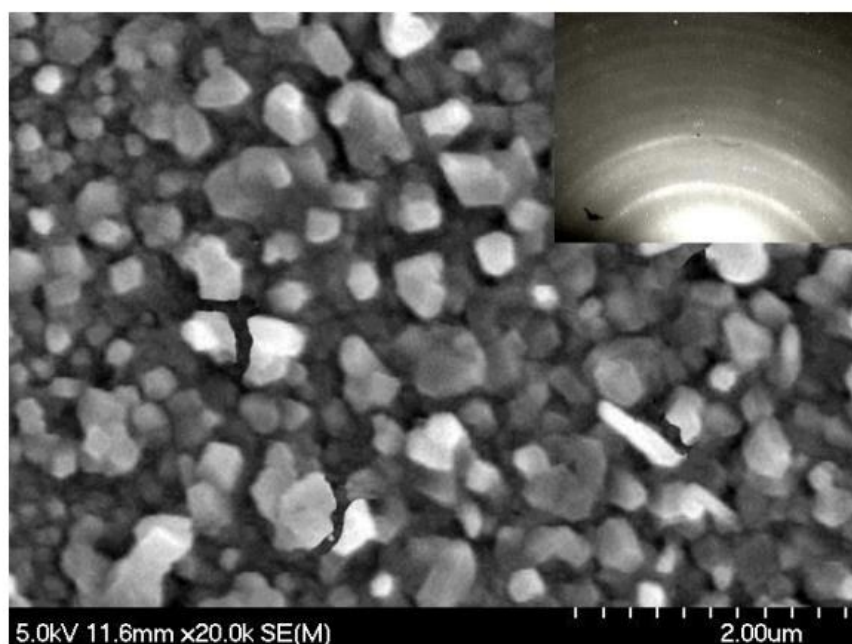
$h_{\text{Ni}} = 20\text{--}60 \text{ \AA}$ oralig'ida, $T = 800 \text{ K}$ da 1 soat davomida qizdirilgandan so'ng, orol plyonkalari va $h_{\text{Ni}} = 80\text{--}200 \text{ \AA}$ oralig'ida, $T = 850\text{--}900 \text{ K}$ da qizdirilgandan so'ng, doimiy NiSi_2 plyonkalari hosil bo'ldi. shakllandilar. Yuvish vaqtining yanada oshishi plyonkalarining tarkibi va tuzilishida sezilarli o'zgarishlarga olib kelmadi. $T = 1000 \text{ K}$ da plyonka orollarga parchalanib ketdi va $T = 1100 \text{ K}$ da uning bug'lanishi kuzatildi. OES dan o'yma bilan birgalikda qo'llagan hisob-kitoblarimiz shuni ko'rsatadiki, NiSi_2 plyonkasi qalinligi yotqizilgan Ni plyonkasi qalinligidan 2,5-3 baravar katta. Turli xil qalinlikdagi NiSi_2 nanoplyonkali beshta Si namunalari bir xil sharoitlarda tadqiqot uchun tayyorlangan: 1 – $h = 50 \text{ \AA}$, 2 – $100 \text{ \AA}$, 3 – $150 \text{ \AA}$, 4 – $200 \text{ \AA}$ va 5 – $550 \text{ \AA}$.

4.4-rasmda ~ 50 Å qalinlikdagi NiSi_2 plyonkali Si(111) sirtining ACM tasvirlari ko'rsatilgan (namuna №1). Ko'rinib turibdiki, plyonka orol xarakteriga ega. Bu orollar konus (yoki piramida) shakliga ega va balandligi 7-8 nm ga etadi. REM naqshlarining tahlili shuni ko'rsatdiki, orollar chiziqli o'lchamlari $\sim 0,2-0,3$ mkm bo'lgan ko'pburchak shakliga ega. Ushbu fazalarning markazlari orasidagi masofa $\sim 0,8 - 1$ mikron. 4.4-rasmdan ko'rinib turibdiki, yer yuzasida yirik orollar bilan bir qatorda ko'plab mayda orollar (fazalar) hosil bo'ladi. Plyonka qalinligining yanada oshishi (qattiq fazali cho'kish vaqti) asosiy orollar balandligining sezilarli darajada oshishiga olib kelmadi.



4.4-rasm. Qalinligi 50 Å NiSi_2 plyonkali Si (111) sirtining AFM tasvirlari.

Bunday holda, katta orollarning sirt o'lchamlarining oshishi va kichik orollarning uchta kattaligining oshishi kuzatildi. $h = 150$ Å b'lgan NiSi_2 plyonkasi bo'lsa, Si sirtining deyarli 80-85% NiSi_2 orollari bilan qoplangan (4.5-rasm).



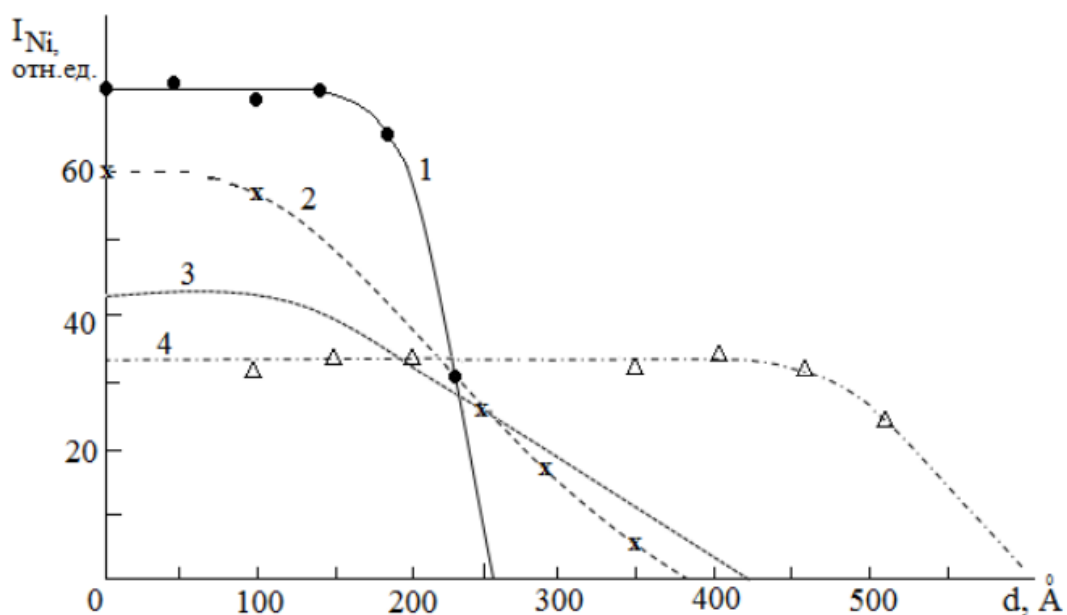
4.5-rasm. 150 Å qalinlikdagi NiSi_2 plyonkali Si (111) sirtining REM tasvirlari (namuna № 3).

Orolchalarning kattaligi 0,3-0,5 mkm. Shu bilan birga, DBE naqshida polikristal namunalarga xos bo'lgan konsentrik halqalar topiladi. Ko'rinib turibdiki, plyonka $T = 800 \text{ K}$ da qizdirilgandan keyin kristallanadi, lekin alohida kristallarning kristallografik yo'nalishlari bir-biriga to'g'ri kelmaydi. Orollarning birlashishi va uzluksiz plyonka hosil bo'lishi $\sim 200 \text{ Å}$ qalinlikda sodir bo'ldi. Biroq, bu qalinlikda plyonkalar bir xil bo'lmagan va h qiymati 100 - 150 Å oralig'ida edi. Eng mukammal bir xil epitaksial NiSi_2 plyonkalari $T = 950 \text{ K}$ [2A, 11A] da qizdirilgandan keyin $h \geq 200 \text{ Å}$ qalinligida hosil bo'ldi.

Olingan ma'lumotlarga asoslanib va OES natijalariga tayangan holda (3.6-rasm) qattiq fazali epitaksiya paytida nikel silidsidning nisbatan qalin plyonkasi ($\geq 200 \text{ Å}$) hosil bo'lish kinetikasini quyidagicha ifodalash mumkin. Ni atomlari xona haroratida $d \geq 200 \text{ Å}$ qalinlikdagi Si yuzasiga joylashtirilsa, amorf uzluksiz bir hil Ni plyonkasi hosil bo'ladi. Ni-Si interfeysida Ni atomlarining Si dagi va Si dagi Ni atomlarining biroz interdiffuziyasi mavjud (egri chiziq, 4.6-rasm).

Ni-Si sistemasi $T=900$ K da qizdirilganda intensiv interdiffuziya boshlanadi. 15 daqiqa qizdirilganda, $\sim 25\text{-}30\%$ Ni atomlari Si ichiga kirib boradi va Ni plyonkaga kirgan Si atomlarining bir qismi uning yuzasiga chiqadi.

Bu qatlamlarda Ni_xSi_y tipidagi silitsidlar qisman hosil bo'ladi. Ni plyonka va taglik tarkibidagi o'zgarishlar $t=40\text{-}50$ minutgacha sodir bo'ladi. Bunday holda, Si yuzasida qalinligi $\sim 500\text{--}550$ Å bo'lgan bir kristalli NiSi_2 plyonkasi hosil bo'ladi. t ning keyingi o'sishi tarqatish profilini o'zgartirmaydi. T ning 1000 K gacha oshishi Ni konsentratsiyasining pasayishiga va NiSi_3 ga yaqin birikma hosil bo'lishiga olib keldi.

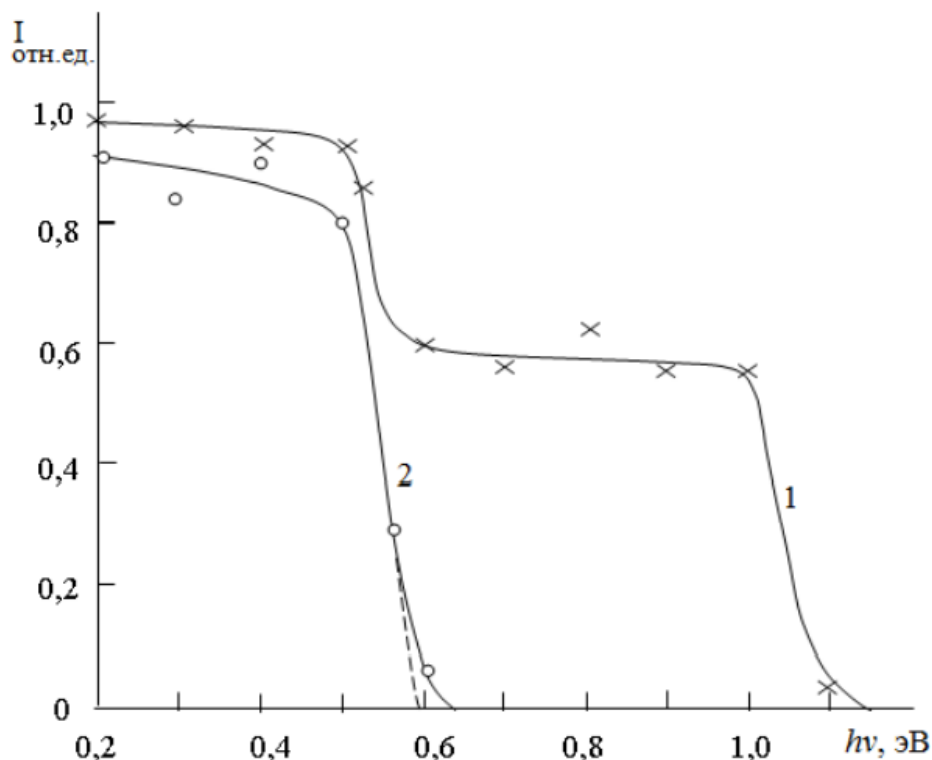


4.6-rasm. $T=900$ K da qizdirilgan Ni/Si tizimi uchun $L_3M_{45}M_{45}$ Oje-Ni ($E=848$ eV) cho'qqisi intensivligining chuqurlikka bog'liqligi, min: 1=0, 2-15 min, 3-25 min, 4 -40 min. Ni qalinligi -200 Å.

4.7-rasmda $h = 50$ Å va $h = 200$ Å bo'lgan NiSi_2 nanoplyonkali Si uchun o'tkazilgan yorug'lik intensivligi I ning $h\nu$ foton energiyasiga bog'liqligi ko'rsatilgan. Qalinligi 50 Å NiSi_2 plyonkasi bo'lgan Si holatida, $h\nu$ ning ikki qiymatida uzatiladigan yorug'lik intensivligining keskin pasayishi kuzatiladi. I ning $h\nu = 0,5$ eV dan boshlab kamayishi NiSi_2 nanoorollari bilan qoplangan

hududlarda yorug‘likning yutilishi bilan, I ning $h\nu = 1$ eV bilan kamayishi NiSi_2 bilan qoplanmagan maydonlar bilan bog‘liq.

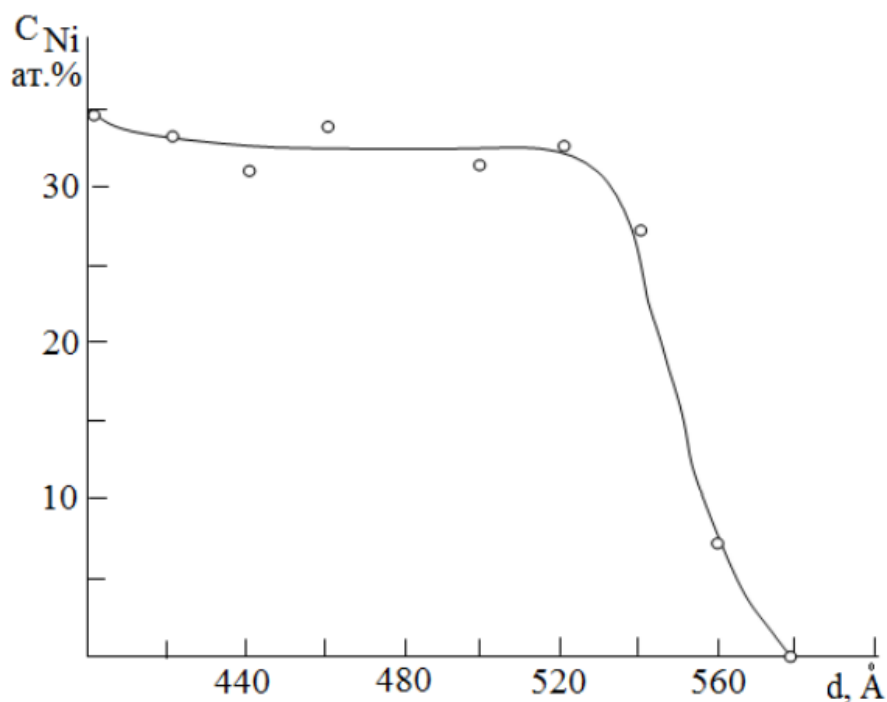
Bu egri chiziqlarni $h\nu$ o‘qiga ekstrapolyatsiya qilish shuni ko‘rsatadiki, NiSi_2 uchun E_g qiymati $\sim 0,6$ eV, Si uchun esa $\sim 1,1$ eV. Uzlaksiz NiSi_2 plyonkasi holatida I ning qiymati $h\nu = 0,5 - 0,6$ eV oralig‘ida keskin nolga tushadi.



4.7-rasm. O‘tkazilgan yorug‘lik intensivligi I ning NiSi_2 nanoplyonka qalinligi h bo‘lgan Si uchun foton energiyasiga bo‘liqligi h , Å: 1 - 50 (namuna № 1), 2 - 200 (namuna № 4).

4.8-rasmda $h = 550$ Å (namuna № 5) bo‘lgan NiSi_2 nanoplyonka bilan Si chuqurligi bo‘yicha Ni atomlarini taqsimlash profillari berilgan. Ko‘rinib turibdiki, plyonka va substrat o‘rtasida hosil bo‘lgan o‘tish qatlamining qalinligi 50 - 60 Å dan oshmaydi. Bu Si ($a = 5,43$ Å) va NiSi_2 ($a = 5,41$ Å) kristall panjara parametrlarining yaqinligi bilan izohlanadi.

Mikroto‘lqinli elektron qurilmalarni (tranzistorlar, diodlar, radiatsiya detektorlari va boshqalar) ishlab chiqishda keskin chegaraga ega bo‘lgan silidsid-kremniy tizimining shakllanishi juda muhimdir.



4.8-rasm. Qalinligi 550 Å boʻlgan NiSi₂ nanoplyonka bilan Ni atomlarining Si chuqurligi boʻylab taqsimlanishi profillari (namuna № 5) [2A].

4.2-jadvalda NiSi₂/Si (111) TFe plyonkalarining hosil boʻlish usullari va ularning qarshilik qiymatlari koʻrsatilgan [2A, 4A].

4.2-jadval

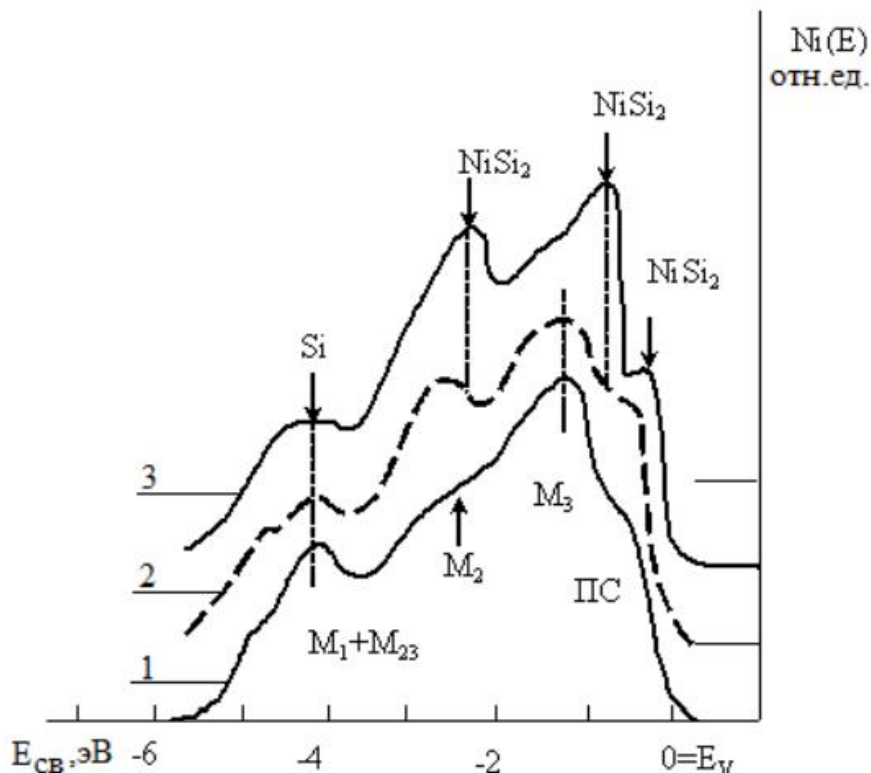
Namuna nomeri	h_{Ni} , Å	h_{NiSi_2} , Å	$T_{epit.}, K$	Plyonka koʻrinishi	ρ , mkOm·sm
1	15 – 20	50	800	Orolli	$2 \cdot 10^5$
2	35 – 40	100	850	Orolli	$5 \cdot 10^2$
3	50 – 60	150	850	Orolli	–
4	80	200	900	Tekis, *	100
5	200	550	950	Tekis, **	50

* – bir jinslimas, ** – bir jinsli.

Koʻrinib turibdiki, orol plyonkasida ρ qiymati juda yuqori. $h_{NiSi_2}=200\text{Å}$ da uzluksiz plyonka hosil boʻladi, ammo ρ qiymati qalinligi 550 Å boʻlgan

plyonkaning ρ qiymatidan biroz kattaroqdir. Ko‘rinishidan, $h = 200 \text{ \AA}$ da plyonkalar hali yuqori darajada mukammallikka ega emas.

4.9-rasmda $h\nu = 10,8 \text{ eV}$ da olingan p-tipli Si (111) va Si nanokristalli va NiSi_2 nanoplyonkali fotoelektron spektrlari ko‘rsatilgan. Absissa Fermi darajasiga nisbatan o‘lchangan elektronlarning bog‘lanish energiyasini ko‘rsatadi [2A]



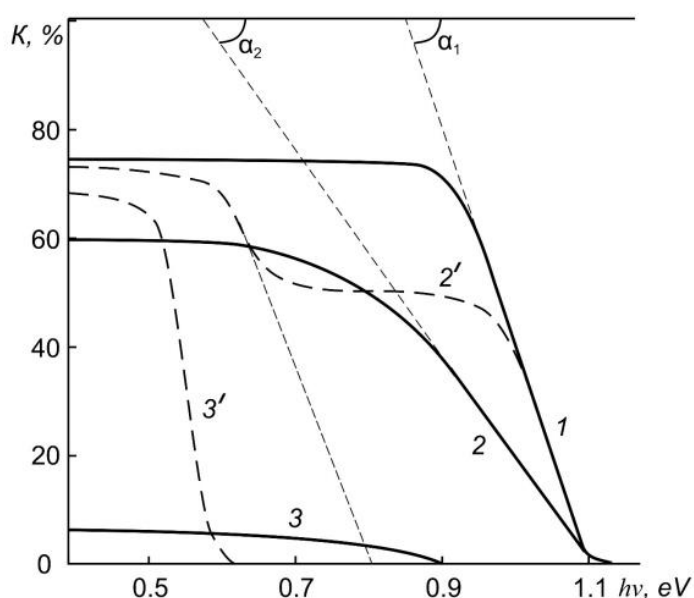
4.9-rasm. Qalinligi h , $\text{\AA}$: 1 – 0, 2 – 50, 3 – 200 bo‘lgan NiSi_2 nanoplyonkali Si UFES.

Ko‘rinib turibdiki, qalin NiSi_2 plyonkasi ($h = 200 \text{ \AA}$) asosiy cho‘qqilarining shakli va holati Si uchun cho‘qqilarning shakli va holatidan sezilarli darajada farq qiladi. Bunda spektrda energiyalari $E_{sv} = -0,3$ bo‘lgan cho‘qqilar topiladi; $-0,9$; $-2,2$ va $-4,2 \text{ eV}$. Ushbu spektrni tahlil qilish va uni Si va Ni spektrlari bilan solishtirish $E_{sv} = -0,3 \text{ eV}$ bo‘lgan cho‘qqi kremniyning M_3 holatlari va Ni ning M_5 holatlari, cho‘qqilarning gibridlanishi tufayli hosil bo‘ladi, deb taxmin qilish imkonini beradi. $E_{sv} = -0,9 \text{ eV}$ bilan Si ning M_2 holati va ning M_3 holatining duragaylanishiga bog‘liq, $E_{sv} = -2,2 \text{ eV}$ bilan tepalik Si ning M_1 holati va Ni holatining M_4 gibridlanishiga bog‘liq, va $E_{sv} = -4,2 \text{ eV}$ bo‘lgan cho‘qqi Si ga

tegishli. $h = 50 \text{ \AA}$ bo'lgan NiSi_2 plyonkalari orol xarakteriga ega, shuning uchun uning spektri Si va NiSi_2 ga xos bo'lgan cho'qqilarni ko'rsatadi.

4.2. NiSi_2/Si nanoplyonkalarining Si ga Ni-ion implantatsiyasi va qizdirish bilan birgalikda olingan elektron va optik xususiyatlari

4.10-rasmda $D = 10^{15}$ va $6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozalarda $E_0 = 1 \text{ keV}$ bo'lgan Ni^+ ionlari implantatsiya qilingan Si (111) uchun $K(h\nu)$ bog'liqliklari ko'rsatilgan. $D = 10^{15} \text{ sm}^{-2}$ da Si (111) yuzasida, asosan, bog'lanmagan Si va Ni atomlari va NiSi va NiSi_2 tipidagi birikmalardan tashkil topgan alohida klaster fazalari hosil bo'ladi. Yorug'lik bu fazalardan deyarli o'tmaydi, shuning uchun K ning qiymati keskin 40-50% gacha kamayadi, ya'ni. bu fazalar bo'yicha sirt qoplanish darajasi $\sim 0,4$ deb taxmin qilish mumkin. $D = D_{\text{sat}} = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ uchun $h\nu \leq 0,5 - 0,6 \text{ eV}$ da uzatiladigan yorug'lik intensivligi $\sim 8 - 10\%$, $h\nu \geq 0$ da u 3 - 5% dan oshmadi. Ko'rinishidan, NiSi, NiSi_2 va bog'lanmagan Si atomlari kabi ma'lum miqdordagi birikmalarning ($\sim 15 - 20 \text{ at.}\%$) mavjudligi yorug'likning juda past intensivlik bilan o'tishiga yordam beradi.



4.10-rasm. $D, \text{ sm}^{-2}$ dozalarda $E_0 = 1 \text{ keV}$ bo'lgan Ni^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan Si (111) uchun $K(h\nu)$ bog'liqliklari: 1 - 0; 2 - 10^{15} ; 3 - $6 \cdot 10^{16}$. 2', 3' -

$T=900 \text{ K}$ da qizdirilgandan keyin

Ni ionlarining implantatsiyasi jarayonida amorfizatsiya bilan birga sirtga yaqin qatlamlarning tarkibi keskin o'zgaradi, E_g qiymati 0,2-0,3 eV gacha kamayadi, shuning uchun $K(h\nu)$ egri chizig'ining eksponensial qismi keskin ortadi. Xuddi shu namunalarni $T = 900$ K haroratda qizdirgandan so'ng, Si sirt qatlamlarida epitaksial nanokristal fazalar va qalinligi 50 - 60 Å bo'lgan NiSi -plyonkalari hosil bo'ladi. Binobarin, $K(h\nu)$ bog'liqlik strukturasi keskin o'zgaradi ($2'$ va $3'$ egri chiziqlar). Bu egri chiziqlarni $h\nu$ o'qiga ekstrapolyatsiya qilish shuni ko'rsatadiki, bu holda NiSi_2 nanokristalining E_g 0,8 eV, nanoplyonkaniki esa 0,6 eV ga teng. Kristallanish K qiymatining sezilarli darajada oshishiga olib keladi.

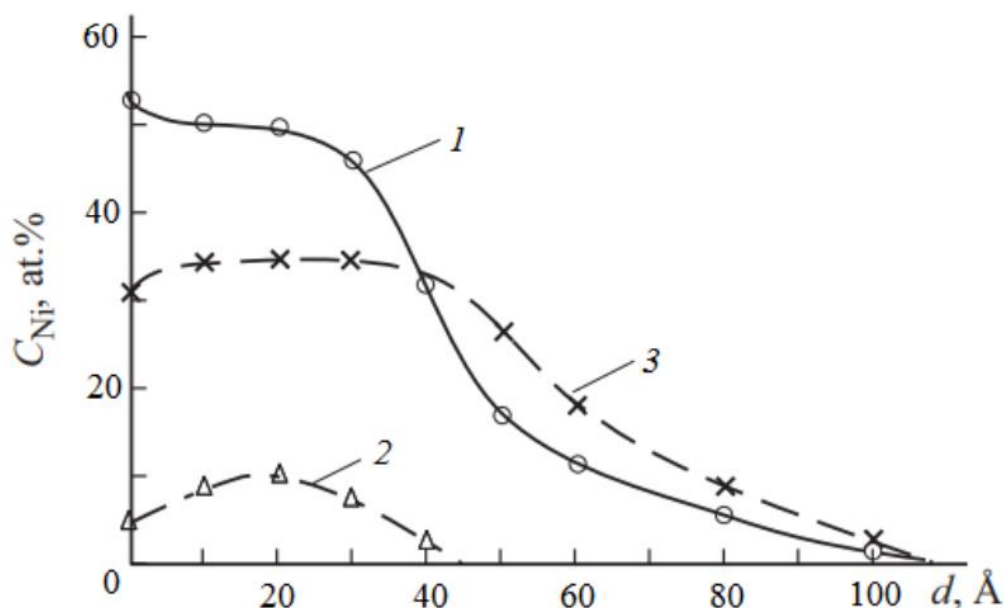
4.11-rasmda $T = 900$ K da isitishdan oldin va keyin o'lchangan $D = 6 \times 10^{16}$ sm^{-2} to'yinganlik dozasida $E_0 = 1$ keV bilan Ni^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan Si chuqurligi bo'yicha Ni taqsimotining konsentratsiya profillarini ko'rsatadi. Ko'rinib turibdiki, ion implantatsiyasidan so'ng (1-egri chiziq) sirtidagi Ni konsentratsiyasi 45-50% ni tashkil qiladi va 3,0-3,5 nm chuqurlikda sezilarli darajada o'zgarmaydi. Bunday holda, sirtga yaqin qatlamlar butunlay tartibsizdir. Ion qo'shilgan qatlamda bog'lanmagan Si va Ni atomlari, shuningdek $\text{Ni} + \text{Si}$ tipidagi birikmalar mavjud. Biz L_{23VV} va M_{3VV} cho'qqilarining holati va intensivligining nisbiy o'zgarishidan ionli qatlamning turli chuqurliklarida ushbu komponentlarning konsentratsiyasini baholashga harakat qildik.

4.11-rasmdan 2-egri chiziq $S_{\text{Ni+Si}(d)}$ bog'liqligi $d = 1,5\text{-}2,0$ nm oralig'ida maksimaldan o'tishini ko'rsatadi.

Ko'rinib turibdiki, metall silidsidlarning hosil bo'lishi sirtga emas, balki ion qo'shilgan qatlam ichida yuqori ehtimollikka ega.

$T = 900$ K haroratda 30 daqiqa qizdirilgandan so'ng, sirt qatlamlarida Ni konsentratsiyasi pasayadi va qalinligi $\sim 3,5\text{-}4,0$ nm bo'lgan stexiometrik tarkibi NiSi_2 (111) ning bir xil epitaksial qatlami hosil bo'ladi (egri 3). OES spektrlarini tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, ion implantatsiyasi paytida ham, keyingi yuqori haroratli tavlaniş jarayonida ham NiSi_2 tipidagi birikmalar hosil bo'ladi. Ko'rinishidan, bu NiSi_2 va Si bir xil kristall tuzilishga ega bo'lganligi va ularning

panjara doimiylari bir-biriga yaxshi mos kelishi bilan bog'liq. Boshqa Ni silidsidlari kubik panjaraga kristallanmaydi yoki "a" - kremniydan farq qiladigan panjara doimiysi bilan kristallanadi [39].



4.11-rasm. (1, 2) dan oldin $D = 6 \times 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozada $E_0 = 1 \text{ keV}$ bo'lgan Ni ionlari bilan implantatsiya qilingan Si chuqurligi bo'yicha Ni (1-egri) va Ni^+ Si (2-egri) konsentratsiyasining taqsimlanishi profillari va $T = 900 \text{ K}$ (3) [3A] da qizdirilgandan keyin.

NiSi_2 (111) va Si (111) plyonkalari orasida qalinligi 4,0-5,0 nm bo'lgan o'tish qatlami hosil bo'ladi. Taqqoslash uchun qattiq fazali epitaksiya bilan olingan qalinligi 50,0 nm bo'lgan NiSi_2 plyonkasi uchun parametrlar ham keltirilgan.

4.3-jadval

Si(111) va NiSi_2 /Si(111) strukturalarining zonalar energiyasi, emissiyasi va optik parametrlari

Namuna	d, nm	ϕ , eV	Φ , eV	E_g , eV	χ , eV	σ_m	Y	$\rho, \mu\Omega \cdot \text{sm}$
Si(111)	0	4,7	5.1	1.1	4	1.1	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^6$

NiSi ₂	3.0	4.3	4	0.6	3.4	1.5	$4 \cdot 10^{-4}$	80
/Si(111)	6.0	-	4	0.5	3.5	1.6	$4 \cdot 10^{-4}$	60
	50.0	4.2	4	0.5	3.5	1.6	-	55

4.3-jadvalda $d = 3,0$ nm bo'lgan NiSi₂ ning tarmoqli bo'shlig'i 0,6 eV va metallarnikiga yaqin xossalarga ega ($r = 80 \text{ m}\Omega \text{ sm}$) ko'rsatilgan. Bunda σ_m va I ning qiymati 1,5 va 2 martagacha ortadi. Ko'rinishidan, NiSi₂ qatlamlarining emissiya samaradorligi Si qatlamlarining samaradorligidan bir oz yuqoriroqdir, bu NiSi₂ ($\sim 4,5 \text{ g / sm}^3$) va Si ($2,42 \text{ g / sm}^3$) atom zichligi o'rtasidagi sezilarli farq bilan bog'liq bo'lishi mumkin. $d = 6,0$ nm bo'lgan NiSi₂ plyonkalarining elektron va optik xususiyatlari qalin plyonkanikidan sezilarli darajada farq qilmadi.

Xulosa

1. Birinchi marta monokristalli kremniy sirtining buzilishining uning optik xossalriga ta'siri o'rganildi. Ko'rsatilganki, buzilish darajasi oshgani sayin yorug'lik yutilish ko'effitsienti ortadi, o'tkazuvchanlik ko'effitsienti pasayadi va aks ettirish ko'effitsienti sezilarli darajada o'zgarmaydi. Ar^+ ionlari bilan yuqori dozali bombardimondan so'ng tartibsiz kremniy qatlamlarining qalinligi eksperimental tarzda baholandi; Bunda E_g ning qiymati atigi 0,1 eV ga ortadi, valentlik zonasidagi elektronlar holatining zichligi esa keskin o'zgaradi.

2. $\text{NiSi}_2/\text{Si}(111)$ plyonkalar Ni ni Si ichida o'tqazish, so'ngra $T \approx 850\text{-}900\text{ K}$ ga 40 daqiqa qizdirish yo'li bilan olingan. Nikel qalinligi $h_{\text{Ni}} \approx 20\text{-}60\text{ \AA}$ oralig'ida orol NiSi_2 plyonkasi, $h_{\text{Ni}} = 80\text{-}200\text{ \AA}$ oralig'ida esa uzluksiz epitaksial NiSi_2 plyonkasi hosil bo'lishi aniqlandi

3. $E_0 = 1\text{-}5\text{ keV}$ li Ni^+ ionlarini Si yuzasiga qizdirish bilan bcirgalikda joylashtirish natijasida qalinligi 25-30 Å dan 50-60 Å gacha bo'lgan nanokristal fazalar va NiSi_2 plyonkalari hosil bo'ldi. NiSi_2 nanoplyonkaning kristallografik orientatsiyasi va panjara doimiysi $\text{Si}(111)$ substratiniki bilan to'liq mos kelishi birinchi marta ko'rsatildi.

4. Olingan natijalarni o'tkazuvchan asosli tranzistorlar yaratish va nano qatlamli konstruktsiyalarda ohmik kontaktlarni yaratishda qo'llash bo'yicha ilmiy asoslangan tavsiyalar berilgan.

QISTQARMALAR, KONVENSIYALAR, BELGILAR, BIRLIKLAR VA ATAMALAR RO'YXATI

QFE - qattiq fazali epitaksiya

FES - fotoelektron spektroskopiya

MNE - molekulyar nur epitaksiya

KEED - kam energiyali elektron diffraktsiyasi

SEM - skanerlovchi elektron mikroskop

XEYS - xarakterli energiya yo'qotgan elektronlar spektroskopiyasi

OES - Oje elektron spektroskopiyasi

UYV - ultra yuqori vakuum

II - ion implantatsiyasi

IEX - ikkilamchi emissiya xususiyatlari

I - interfeys

KPF - kontakt potentsial farqi

IKYOQ - ikki koordinatali yozib olish qurilmasi

EQ - elektron qurol

Å – angstrom ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$)

E_0 - ion energiyasi

E_p - birlamchi elektronlarning energiyasi

D – ion nurlanish dozasi

T - harorat, Kelvinda

keV - kiloelektro volt

IF - ish funktsiyasi

R - qarshilik

IEEK – ikkilamchi elektron emissiya koeffitsienti

j – oqim zichligi

c - atomlar konsentratsiyasi, at. %

S – elementning Oje sezuvchanlik koeffitsienti

MUNDARIJA

Kirish	3
I-BOB. TADQIQOT NATIJALARI BO‘YICHA ADABIYOTLAR TAXLILI.....	8
1.1 Kremniy asosidagi birikmaning emission xossalari	8
1.2 Si namunalarining optik xossalari	13
1.3 Si ning sirtida va sirtga yaqin joylarda nano o‘lchamli fazalarni olish uchun ion implagtatsiya usulini qo‘llash	16
1.4 Kremniy asosidagi ko‘p qatlamli tizimlarning tuzilishi va xususiyatlari	22
1.5 Tadqiqot muammosini bayon qilishda olingan xulosalar	29
II-BOB. NANOPLYONKA OLISHNING ASOSIY TEXNOLOGIYALARI	32
2.1 Metall va yarim o‘tkazgich chegarasidagi qatlamning tuzilishi ...	32
2.2 Yarim o‘tkazgich va yarim o‘tkazgich orasidagi chegaraviy qatlam	36
2.3 Molekulyar nurli epitaksiya	38
2.4 Qattiq fazali epitaksiya usuli bilan olingan plyonka va asos orasidagi chegaraviy qatlam	43
2.5 Kichik energiyali ionlar implantatsiyasi	46
III-BOB. EKSPERIMENTAL TADQIQOT TEXNIKALARI	62
3.1 Ion implantatsiya uchun eksperimental qurilma Ni ⁺ ion manbai ..	62
3.2 LAS-2200 eksperimental asbobining qurilmalari	70
3.3 Oje-elektronlar spektrometri.....	73
3.4 Ushbu ishda ishlatiladigan standart asboblarning asosiy xususiyatlari	84
IV-BOB. QATTIQ FAZALI EPITAKSIYA VA ION IMPLANTATSIYASI NATIJASIDA OLINGAN NISi2 NANOPLYONKALARNING SIRT MORFOLOGIYASI,	

TARKIBI, TUZILISHI VA ELEKTRON VA OPTIK XUSUSIYATLARI	90
4.1 Qattiq fazali epitaksiya usuli bilan olingan NiSi ₂ /Si plyonkalarining yuza morfologiyasi	91
4.2 Si ga Ni-ion implantatsiyasi va qizdirish bilan birgalikda olingan NiSi ₂ /Si nanoplyonkalarining elektron va optik xususiyatlari	103
Xulosa	107
Foydalanilgan adabiyotlar	110

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Дубов В.Л., Фомин Д.В. BaSi_2 – перспективный материал для фотоэлектрических преобразователей(обзор)// Успехи прикладной физики, 2016, том 4, № 6
2. Гусева М.И. Ионная имплантация в металлы //Поверхность 1982. №4 С.27- 50
3. Greene I.E. and Barnett S.A. Non-surface interactions during vapour, phase crystal growth by sputtering MBE, and plasma-enhanced CVD: Applications of semiconductors // J.Vas. Sci. and Technol. 1982, 21, №2. P.285
4. Алешин А.Н., Унишерлова К.Л. и др. Создание внутреннего геттера в кремний путем имплантации ионов углерода и кислорода// Поверхность. 1992. №1. С. 35-40.
5. Нормурадов М.Т. Умирзаков Б.Е. Энергетические спектры поверхности твердых тел, имплантированных ионами низких энергий. Тошкент, Фан. 1989, 158 с.
6. Умирзаков Б.Е. Электронно-спектроскопические и анализ состояния поверхности многокомпонентных систем, созданных ионной имплантацией. Дисс. док.физ-мат.наук.Ташкент-1993.
7. А.И. Машин, А.В. Ершов, Д.А. Хохлов «Влияние условий получения и отжига на оптические свойства кремния» Физика и техника полупроводников, 1998, том 32, № 7 . с.1390-1392
8. Д. А. Ташмухамедова, М. Б. Юсупжанова «Эмиссионные и оптические свойства тонких пленок SiO_2/Si » Поверхность, Рентгеновские, Синхротронные и нейтронные исследования, 2016, 10, с. 1-3
9. Л.И. Хируненко, Ю.В. Помозов, М.Г. Соснин — Оптические свойства кремния с высоким содержанием бора// Физика и техника полупроводников, 2013, том 47, вып. 2. с.233-238
10. N.J. Shevchik, W. Paul. The structure of amorphous Ge // J. Non-Cryst. Sol.,

11. Cho W.S., Kim J.Y., Park N.G., Lyo I.W., Jeong K., Kim S.S., Choi D.S., Whang S.N., Chae K.H. Atomic structure of ultrathin Co layer on Si(001)(2 x 1) at room temperature // Surf. Sci. 453, L309 (2000).
12. Starke U., Weiss W., Heinz G.K., Fauster Th., Castro G.R. CoSi₂ on Si(100): LEED investigation of the c(2x2) and phases and comparison to a bulk crystal CoSi₂(100) surface // Surf. Sci. 352, 89 (1996). 88
13. Томилин С.В., Яновский А.С., Томилина О.А., Микаелян Г.Р. Исследование вольтамперных характеристик наноструктурированных пленок Pd на Si-подложке после вакуумного отжига // ФТП, 2013. т. 47. вып. 6, С. 772 – 776.
14. Bei Li, Jiandin Liu. CoSi₂-coated Si nanocrystal memory // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 084905.
15. Facsko S., Dekorsy T., Koerdts C., Trappe C., Kurz H., Vogt A., Hartnagel H. Formation of ordered nanoscale semiconductor dots by ion sputtering // «Science»- 1999;-Vol. 285, No. 5433.-P. 1551-1553.
16. Гомоюнова М.В., Пронин И.И., Галль Н.Р., Молодцов С.Л., Вялых Д.В. Взаимодействие кобальта с поверхностью окисленного кремния // ФТТ. 2003. Т. 45. Вып. 8. С. 1519–1522.
17. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Ruzibaeva M.K., Tashatov A.K., Donaev S.B., Mavlyanov B.B. Analysis of the structure and properties of heterostructured nanofilms prepared by epitaxy and ion implantation methods // Techn. Phys. 2013. V. 58. N 9. P. 1383–1386.
18. Эргашов Ё.С., Умирзаков Б.Е. Структура и свойства двухслойной 92 наноразмерной системы CoSi₂/Si/CoSi₂/Si, полученной ионной имплантацией. //Журнал технической физики, 2018, том 88, вып. 12
19. Алексеев А.А., Олянич Д.А., Утас Т.В., Котляр В.Г., Зотов А.В., Саранин А.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 94–100.
20. Kim K.J., Kang T.-H., Kim K.-W., Shin H.-J., Kim B. // Appl. Surf. Sci. 2000. Vol. 161. P. 268–275.

21. Starke U., Schardt J., Weiß W., Rangelov G., Fauster T.H., Heinz K. Structure of Epitaxial CoSi₂ Films on Si(111) Studied with Low-Energy Electron Diffraction (LEED) // Surf. Rev. Lett. 1998. Vol. 5. P. 139–144.
22. Colinge J.P. // Material Research Society Proceedings. 1985. Vol. 35. P. 653. <http://dx.doi.org/doi 10.1557/ PROC-35-653>
23. Алтухов А.А., Жирнов В.В. Анализ морфологии и стехиометрии пленок CoSi/Si(100), полученных методами ТФЭ и РЭ // Материалы II-го Всесоюзного межотраслевого совещания || Тонкие пленки в электронике—: Москва-Ижевск. 1991. С. 15.
24. З.А. Исаханов, З.Э. Мухтаров, Б.Е. Умирзаков, М.К. Рузибаева. ЖТФ, 4, 117 (2011) [Z.A. Isakhanov, Z.E. Mukhtarov, B.E. Umirzakov, M.K. Ruzibaeva. Technical Physics, 56(4), 546 (2011)].
25. S.B. Donaev, F. Djurabekova, D.A. Tashmukhamedova, B.E. Umirzakov. Physica Status Solidi (C), 12(1-2), 89 (2015). DOI 10.1002/pssc.201400156
26. B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, M.K. Ruzibaeva, F.G. Djurabekova, S.B. Danaev. NIMB, <https://www.scopus.com/sourceid/29068?origin=resultslist326>, 322 (2014).
27. Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова, Г.Х. Аллаярова, Ж.Ш. Содикжанов. Письма в ЖТФ, 45(7), 49 (2019). [B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, G.K. Allayarova, Z.S. Sodikzhanov. Technical Physics Letters, 45(4), 356 (2019).
28. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. «Электронная спектроскопия нанопленок и наноструктур, созданных ионной имплантацией» Отпечатано в типографии ТГТУ. Ташкент. 2004. С.149
29. Ташмухамедова Д.А. Электронная спектроскопия нанопленок и нанокристаллов, созданных на основе полупроводниковых и диэлектрических пленок методом низкоэнергетической ионной бомбардировки. Докторская диссертация, Ташкент-2009
30. Методы анализа поверхностей. Под ред. Зандерны А.: пер. с англ. //под ред. Кораблева В.В., Петрова Н.Н.-М.: Мир,-1979.-540 с.324.

31. Голдстейна Дж. Яковица Х. Практическая растровая электронная микроскопия. Пер. под ред. В.И. Петрова. - М.: Мир, 1978. - 656 с.
32. S. Horiguchi, M. Nagase, K. Shiraishi, H. Kageshima, Y. Takahashi, K. Murase. Japanese Journal of Applied Physics, 40, L29 (2001). <https://doi.org/10.1143/JJAP.40.L29>
33. М.С. Браслер, О.В. Гусев, Е.И. Теруков, А. Froitzheim, W. Fuhs. Физика твердого тела, 46, 18 (2004).
34. X. Li, S. He, S.S. Talukdar. Lagmur, 19, 8490 (2003).
35. C. Buerhop, S. Wirsching, S. Gehre, T. Pickel, T. Winkler, A. Bemm, J. Mergheim, C. Camus, J. Hauch, C.J. Brabec. 2017 IEEE 44th Photovoltaic specialist conference. p. 3500.
36. П.Г. Петросян, Л.Н. Григорян. ЖТФ, 87(3), 443 (2017).
37. Д.М. Седракян, П.Г. Петросян, Л.Н. Григорян. ЖТФ, 85(5), 94 (2015).
38. И.М. Бронштейн, Б.С. Фрайман. Вторичная электронная эмиссия. (М., Наука, 1969). с. 170 – 175, с. 244 – 246.
39. Самсонов Т.В., Дворина Л.А., Рудь Б.М. Силициды. М.: Металлургия, 1979. 372 с.
- 1А. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Tashatov A.K., Mustafoeva N.M., Muradkabilov D.M. Effect of the Disordering of Thin Surface Layers on the Electronic and Optical Properties of Si(111) // Semiconductors, 54(11). 2020. стр. 1424-1429.
- 2А. Tashatov A.K., Mustafoeva N.M. Surface Morphology of NiSi₂/Si Films Obtained by the Method of Solid-Phase Deposition // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, Vol.14, No 1. 2020. pp. 81-84
- 3А. Tashatov A.K., Mustafoeva N.M., Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A. Electronic and Optical Properties of NiSi₂/Si Nanofilms // Technical Physics, Vol.64, Issue 5 (2019), pp. 708-710. Ташатов А.К., Мустафоева Н.М., Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Электронные и оптические свойства

нанопленок NiSi₂/Si // Журнал технической физики, том 89, вып. 5. 2019. с.759-761.

4А. Ташатов А.К., Мустафоева Н.М. Исследование физические и оптические свойства нанопленок NiSi₂/Si // Министерство науки и высшего образования российской федерации национальный исследовательский ядерный университет —МИФИ|| VII международная конференция —Лазерные, плазменные исследования и технологии|| ЛаПЛАЗ. Москва, 2021. с.333-334

5А. Мустафоева Н.М., Ташатов А.К., Азизова Л.Х. Исследование влияние ионной имплантации на состав, структуру и оптические свойства кремния // Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон миллий университети. Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни. Тошкент. РИАК-XIV-2021. с.192-196

6А. Ташатов А.К., Мустафоева Н.М., Азизова Л.Х. Зависимость состава и параметров энергетических зон от глубины ионно-легированного слоя для Si имплантированного ионами Ва⁺ // Восьмая международная конференция по физической электронике IPES-8. Тошкент-2021. с.21-22