

**O‘ZBEKISTON MILLI UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

SAYFULLOYEV SHOHRUH AMIN O‘G‘LI

**«ION LEGIRLASH YORDAMIDA KREMNIYDA FeSi_2 VA CoSi_2
SILITSIDINI HOSIL QILISH MEXANIZMLARINI TADQIQ QILISH»**

01.04.10 – YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYA AVTOREFERATI**

Toshkent – 2023

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiya avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on physical-mathematical sciences**

Sayfulloyev Shohruh Amin o'g'li

Ion legirlash yordamida kremniyda FeSi_2 va CoSi_2 silitsidini hosil qilish
mexanizmlarini tadqiq qilish. 3

Сайфуллоев Шохрух Амин угли

Изучение механизмов образования силицидов FeSi_2 и CoSi_2 на
кремнии, полученных ионным легированием. 23

Sayfulloyev Shohruh Amin o'g'li

Study of mechanisms of formation of silicides FeSi_2 and CoSi_2 on silicon
obtained by ionic doping 43

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works. 47

**O‘ZBEKISTON MILLI UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

SAYFULLOYEV SHOHRUH AMIN O‘G‘LI

**«ION LEGIRLASH YORDAMIDA KREMNIYDA FeSi_2 VA CoSi_2
SILITSIDINI HOSIL QILISH MEXANIZMLARINI TADQIQ QILISH»**

01.04.10 – YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYA AVTOREFERATI**

Toshkent – 2023

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2019.2.PhD/FM381 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.ispm.uz) hamda «ZiyoNeb» Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	Egamberdiyev Baxrom Egamberdiyevich fizika-matematika fanlari doktori, professor
Rasmiy opponentlar:	Mamadalimov Abdug'ofur Teshaboyevich fizika-matematika fanlari doktori, akademik Abduraxmanov Qaxor Pattaxovich Fizika-matematika fanlari doktori, professor
Yetakchi tashkilot:	Namangan muhandislik-qurilish instituti

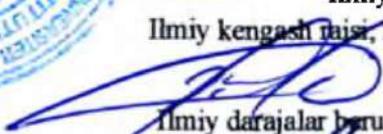
Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2023 yil «22» 05 kuni soat 10:00 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy). Tel./Faks: (+99871) 248-79-91/(+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.

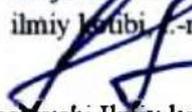
Dissertatsiya bilan O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ ___ raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100057, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel./faks: (+99871) 248-79-91/(+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, O'zMU huzuridagi YAFM III majlislar zali).

Dissertatsiya avtoreferati 2023 yil «13» 05 kuni tarqatildi.
(2023 yil «13» 05 dagi № 46 raqamli reestr bayonnomasi)




Sh.B. Utamuradova,
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash raisi, i.-m.f. d., professor


J.J. Hamdamov,
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
ilmiy kotibi, i.-m.f. (PhD), k.i.x.


N. Turgunov,
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi
ilmiy seminar raisi, f.-m.f. d., dotsent

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Hozirgi davrda jahon amaliyotida kremniy sirtida metallarning barqaror silitsidlarini va turg'un bo'lmagan birikmalarini ham hosil qilish mumkinligi ma'lim. Silitsidlar asosan metall atomlarining termodiffuziya natijasida hosil bo'lishi kuzatiladi. Turg'un bo'lmagan fazalarning shakllanishi, gaz fazasi orqali metall atomlarining diffuziya jarayoni yoki kremniy sirtiga purkalgan metall qatlami keyinchalik termik ishlov berish jarayoniga bog'liqdir. Kremniyga metall atomlarini ion legirlash, undan keyingi termik ishlov berish orqali ham silitsidlarni hosil qilib, silitsid qatlamlarining oson boshqarish mumkin. Bu jarayonlar juda murakkab va katta ilmiy qiziqish uyg'otadi, chunki turg'un bo'lmagan fazalar g'ayritabiiy xususiyatlarga ega bo'lishi mumkin. Ko'rib chiqilayotgan tizimlardagi fazaviy o'tishlarning har-xilligini tushuntirish imkonini beradigan nazariya hali mavjud emas. Eksperimental natijalar bir-biriga mos emas. Shuning uchun Fe/Si va Co/Si tizimlarida silitsid hosil bo'lishining dastlabki bosqichlari muammosi ilmiy adabiyotlarda muhokama qilinmoqda va tadqiqotlar o'tkazilishini talab etadi.

Dunyo miqyosida o'tish metallari atomlarini kremniydagi silitsidlari katta (KIX) va o'ta katta (O'KIX) integral sxemalarning zamonaviy texnologiyasida muhim ahamiyatga ega. Shottki diodlarini, katta integral sxemalarning faol sohalarida sifatli omik kontaktlarni olish, kichik qarshilikka ega bo'lgan, yuqori haroratlarga chidamli elementlar oralaridagi yupqa qatlamlar, metal-dielektrik-yarimo'tkazgich tranzistorlarinig zatvorlarini olish texnologiyalarida samarali ishlatiladi.

Respublikamizda ushbu muammoni hal qilishning eng informatsion va istiqbolli usullaridan biri ikkilamchi ion mass-spektroskopiya (IIMS) va Rezerford teskari sochilishi (RTS) yordamida kremniy sirtini tahlildir. Bugungi kunda IIMS kremniy sirtida temir va kobalt silitsidlarining shakllanish jarayonini tadqiq etishda uchun ishlatilib bo'lgan bir necha ishlar mavjud. O'tkazilgan tadqiqotlarning natijalarini ilmiy tahlil qilish kremniydagi elektronlarining bog'lanish energiyasi $2p$ hosil bo'lgan qatlamlarning fazaviy tarkibi juda sezgir ekanligini ko'rsatadi. Biroq, turli ishlarda bir xil fazalar uchun berilgan bog'lanish energiyalarining qiymatlari bir-biridan juda katta farq qiladi. Ushbu farqlar ishlatilgan qurilmalarning yetarlicha yuqori energiyalarni o'lchay olmasligi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Odatda, energiya o'lchamlari 0,15-0,3 eV oraliqda bo'lib, taglik asoslarni tarkibiy qismlarga ajralishini qiyinlashtirardi. Bundan tashqari, taglik asos sifatida monokristall kremniyning turli holatdagi sirtlari ham muhim ilmiy ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2018-yil 14-iyuldagi "Ilmiy va ilmiy-texnikaviy faoliyat natijalarini tijoratlashtirish samaradorligini oshirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida" PQ-3855-son, 2020 yil 29 oktyabrdagi PF-6097-sonli "Ilm fanni 2030 yilgacha rivojlantirish konseptsiyasini tasdiqlash to'g'risidagi Farmonini, 2021 yil 19 martdagi PQ-5032-son "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi, 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi

Farmoni, shuningdek ushbu sohada qabul qilingan boshqa meyoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqotini muayyan darajada bajarishga mos keladi.

Tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiya rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot O‘zbekiston Respublikasi III-3 “Energetika, energiya va resurslarni tejash, transport, mashina-asbobsozlik, zamonaviy elektronika va mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozlikni rivojlantirish” fan va texnologiyasining ustuvor yo‘nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Hozirga kunga qadar dunyo, MDH va o‘zbek olimlaridan kremniy asosida ko‘p qatlamli kompozitsion materiallar va geterostrukturalarni yaratishda MNEdan foydalanish imkoniyatlari tizimli tadqiq qilish quyidagi ilmiy markazlarda o‘rganilgan: birinchilardan bo‘lib IFP SO RAN (Stenin S.I., Pchelyakov O.P. va boshqalar), MNIIRM (Minsk), LFTI (Alferov J.I., Kopev P.S. laboratoriyasi, Sokolov N.S. guruhi), IRE (Dvoryankin V.F., Mityagin A.Y., Mokerov V.G. Jamoalari), NII ME va NIIFP (Zelenograd), FGUP “NPO Orion” (Osadchev L.A.), SNITI (Jitkovsky V.D.), IPTM (Vyatkin A.F.), IOFAN va FIAN (barchasi- Moskva shahri) va boshqa olimlar bu masala bilan ham shug‘ullanishgan.

O‘zbekistonlik taniqli olimlar S.Z.Zaynabidinov, A.T.Mamadalimov, M.K. Baxadirxanov, K.P.Abduraxmanov, Sh.B.Utamuradova, X.S.Daliyev va boshqalarning ishlarida 3d-metall guruhi elementlari bilan legirlangan kremniy monokristalining elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlariga kirishma atomlari hosil qilgan nuqsonlarning ta’siri shuningdek, bunday kirishma nuqsonlarni holatiga tashqi omillarning ta’siri batafsil tadqiq etilgan. Kremniy asosida ko‘p qatlamli kompozitsion material va geterostrukturalarni yaratish bo‘yicha shug‘ullangan avtorlarning ishlari keltirilgan. Ammo mavzu bo‘yicha – kremniyda Mn, Co, Ni silitsidlarini hosil bo‘lish mexanizmlari. fazaviy holatlari, muvozanat holatlari (metallga boyitilgan quyi silitsidlar, kremniyga boy yuqori silitsidlarning hosil bo‘lish mexanizmlari rentgen nurlarining qaytish spektri va optik qaytish koeffitsiyentining spektral bog‘lanishlari orqali) birinchi marotaba Amaliy fizika institutining katta ilmiy hodimi T.S.Kamilovning tomonidan o‘rganilgan.

Dissertatsiya tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining koordinatsion loyihasi asosida 4.2.1 “Ion-plazma texnologiyasida qattiq jismlarning fizik xossalarni nazorat qilish va ularni mikroelektronikada qo‘llash imkoniyatini o‘rganish” mavzusidagi amaliy loyiha (2017-2020) bo‘yicha bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi: Ion legirlash yordamida kremniyda $FeSi_2$ va $CoSi_2$ yupqa qatlam silitsidlarini hosil bo‘lish mexanizmlarini o‘rnatish.

Tadqiqotning vazifalari:

- Fe, Co ionlarining katta dozalari implantatsiyasi va undan keyingi termik qizdirishning kremniy monokristallari sirtiga yaqin sohalarda elementlar tarkibiga, kristall tuzilishiga ta’sirini o‘rganish;

- yupqa monokristall silitsidli qatlamlar hosil bo'lishining optimal shartlarini aniqlash, valent va o'tkazuvchanlik sohalarida elektron holatlarining zichligi taqsimotini aniqlash;

- ion-implantatsiya qilingan kremniy namunalarining qisqa muddatli termik qizdirilishi natijasida kuzatiladigan yangi sirt usti tuzilmalari (silitsid qatlamlarini) shakllanishi mexanizmlarini aniqlash;

- kremniydagi implantatsiyalangan o'tish guruhi atomlarining dozasi va ularning taqsimlanishiga temperaturaning ta'siriga qarab qizdirish rejimlarini IIMS, OES va RTS usullari orqali aniqlash.

- kremniydagi Fe va Co o'tish guruhlarining ion implantatsiyalangan sohalar holatiga konsentratsiya profillari va termik qizdirish ta'sirini tahlil qilish;

Tadqiqot obyekti ion implantatsiya orqali kremniy sirti yaqinida hosil qilingan o'tish elementlarining yupqa qatlamlari.

Tadqiqot predmeti rentgen mikrozonid tahlili (Jeol Super Probe JXA-8800 R/RL), Xoll effekti usuli, to'rt zondli usul va texnologik usullar (IIMS), (EOS), (RQYO) iborat.

Tadqiqot usullari. Analitik kamera orqali ion implantatsiya usuli bilan kremniy sirtida o'tish elementlarining yupqa qatlamlarini olish texnologik usuli, Oje-elektron spektroskopiyasi, tez elektronlar difraksiyasi, Rezerford teskari sohilishi o'lchash usullari.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

- birinchi marta kremniyning sirtiga yaqin sohalarida, energiyasi 40 KeV, dozalari $10^{15} \div 10^{17} \text{ sm}^{-2}$ oraliqda bo'lgan Fe va Co ionlarini implantatsiyalash orqali, qalinligi 100 \AA bo'lgan temir va kobalt atomlarining yupqa qatlamlarini hosil qilish va implantatsiyadan keyin $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratdan yuqori haroratlarda termik ishlov berish orqali silitsid qatlamlarini hosil qilish texnologiyasi yaratilgan;

- energiyasi 40 keV va $10^{15} \div 10^{17} \text{ ion/sm}^2$ nurlanish dozasi ega bo'lgan Fe ionlari bilan ion implantatsiyasi orqali legirlangan Si monokristallarini legirlashda Si sirtidan $350\text{-}450 \text{ \AA}$ chuqurlikda Fe atomlarining konsentratsiyasi yuqori qiymatga erishib, sirt konsentratsiyaning $25\div 30 \text{ at.}\%$ ni tashkil etishi RTS spektri tahlili asosida aniqlangan;

- $10^{15} \div 10^{17} \text{ ion/sm}^2$ nurlanish dozasi ega bo'lgan Fe ionlari bilan ion implantatsiya orali Si namunalarini legirlashda kengligi $d \approx 100 \text{ \AA}$ bo'lgan qatlamda hosil bo'lishi va bu qatlam asosan FeSi_2 tipidagi birikmalardan iborat ekanligi aniqlangan;

- Co^+ ionlari bilan implantatsiyalangan kremniy $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dan yuqori haroratlarda qizdirilganda CoSi_2/Si yupqa qatlamlar hosil bo'lishi aniqlangan;

- kremniy namunalarini katta dozalarda ($10^{15} \div 10^{17} \text{ ion/sm}^2$) Co^+ ionlari bilan ion-implantatsiya qilinganda $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratdan yuqori haroratlarda termik ishlov berish orqali CoSi_2 silitsid qatlamlarini hosil bo'lishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

turli strukturali kombinatsiyalarda silitsidlarning ion-legirlangan qatlamlarini olishning optimal rejimlari ishlab chiqilgan;

materiallarning sirtidan ma'lum chuqurligida silitsidlarni yaratilishi parametrlarni boshqarish imkonini aniqlandi;

ion implantatsiya usuli yordamida olingan silitsidlar fotodatchiklar, O'YCH-tranzistorlar, past omli-kontaktli kabi sezuvchan elektron asboblari va strukturalar yaratilishi uchun qo'llanilishi o'rganildi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi MNE, QPE va RE usullari orqali 40 keV energiya va $10^{15} \div 10^{17}$ ion/sm² nurlanish jadalliklarida Fe va Co ionlarini implantatsiyasi orqali kremniyning sirtiga yaqin sohalarda silitsidning yupqa qatlamini xosil qilish texnologiyasidan foydalanish, ilmiy natijalar olishda rentgen mikrozonid tahlili (Jeol Super Probe JXA-8800 R/RL), Oje elektron spektroskopiyasi, tez elektronlar diffraksiyasi va Rezerford teskari sochilish usullarini qo'llanilishi bilan belgilanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati qatlamlarning tarkibiy, o'suvchi, elektrofizik xususiyatlari jarayonida ionli implantatsiya borasida yangi ma'lumotlarni qo'lga kiritish, shuningdek, ushbu jarayon va xususiyatlar haqida nazariy tasavvurni rivojlantirish nazarda tutildi. Ionli implantatsiyada yuzaning elektron o'zgarishiga olib keluvchi mexanizmlarni aniqlash va valentli elektronlar xususiyatini, tabiatini aniqlash, zaryadlangan zarrachalarning qattiq jismlarga nisbatan ta'siri nazariyasi uchun katta ahamiyatga ega.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati oksidli qatlam ostiga temir va kobalt atomlari kiritilishining aniqlangan samarasidan kremniy sirtida hosil bo'ladigan temir va kobalt disilitsidlarining o'tayupqa qatlamlarining morfologik xususiyatlarini yaxshilash uchun qo'llanishdan iborat va bu qatlamlar ta'sirchan elektron asboblari: termo va fotodatchiklar, SVCH-tranzistorlari, past omli kontaktlar yaratish uchun qo'llanishi mumkin.

Tadqiqot natijalarini joriy qilinishi.

Kremniyning ion-implantatsiya qilingan namunalari qisqa muddatli termik toblanishi natijasida kuzatiladigan yangi sirt usti tuzilmalari shakllanishining mexanizmlari bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

kobalt bilan ion-implantatsiya qilingan kremniyda barqaror elektrofizik parametrlarga ega bo'lgan boshqariladigan nano o'lchovli tuzilishga ega yarimo'tkazgich materiallarni olish mexanizmlarini aniqlashga kobalt kremniy yupqa plyonkasining haqiqiy elektron tuzilishini aks ettiruvchi energiyaviy diagrammasini olish, kobalt kremniy yupqa plyonkasining energetik xarakteristikalarini aniqlash ekanligidan O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasining Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida № OT-F3-13 "Kremniy-silitsid-metall erkin ko'ppqatlamli nanoplyonkali strukturalarning shakllanish mexanizmlari va ularning elektron va kristall strukturalarini o'rganish" amaliy loyihasining "Turli texnologiyalar yordamida olingan CoSi₂ plyonkalarining asosiy energetik xususiyatlarini aniqlashda" foydalanilgan (O'zR FA ning 2022-yil 7-noyabrdagi №2/1255-2798-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan barqaror elektrofizik parametrlarga ega bo'lgan boshqariladigan nano o'lchovli tuzilishga ega yarimo'tkazgich materiallarni olish mexanizmlarini aniqlashga imkon bergan.

O'tish elementlarining kirishmalari bilan kremniyni legirlashning fizik va kimyoviy jihatlari va texnologiyasi ishlab chiqilgan, temir silitsidlarining Si 2p elektronlarining bog'lanish energiyalarining belgilangan qiymatlari asosiy sathlarining fotoelektron spektroskopiya usulini amaliy qo'llash, oksidli qatlam ostiga temir va kobalt atomlarini singishi "FOTON" AJda ishlab chiqariladigan yarimo'tkazgichli kremniy asosidagi elektron qurilmalarda foydalanilgan ("O'zeltexsanoat" aksiyadorlik jamiyatining 2022 yil 24 yanvar oyidagi №04-3/128 ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish sezgir elektron qurilmalar va tuzilmalar, foto sezgir qurilmalar, tranzistorlar, past qarshilikli kontaktlarni yaratish uchun ishlatilishi mumkinligi ko'rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining natijalari 2 ta xalqaro va 5 ta respublika ilmiy-amaliy konferensiyalarida muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha asosiy natijalar 7 ta ilmiy ishda, ulardan 1 tasi dissertatsiya ishlarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, shu jumladan 6 ta maqola xorijiy xalqaro jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa va iqtiboslar keltirilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 112 betni, shu jumladan 28 ta chizma va 100 nomdagi adabiyotlar ro'yxatini tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi asoslangan, tadqiqotning respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlari bilan aloqasi aniqlangan, muammoning o'rganilganlik darajasini ochib berilgan, maqsad va vazifalari bayon etilgan, tadqiqot obyektlari, mavzulari va usullari keltirilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati bayon etilgan, natijalarning joriy qilinishi, ish natijalarini sinovdan o'tkazish va nashr etish, shuningdek dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi haqida qisqacha ma'lumot berilgan.

"Kremniyda temir va kobalt silitsidlarining tuzilishi va xossalari (adabiyotlar tahlili)" nomli birinchi bobda metall silitsidlar hosil bo'lishining asosiy qonuniyatlari, kristall va elektron tuzilish xususiyatlari hamda silitsidlarning elektrofizik xossalari o'rganishga bag'ishlangan ilmiy ma'lumotlar berilgan. Si yuzasida ionli legirlangan qatlamlarning o'sish muammolari, turli o'sish mexanizmlarini aniqlaydigan epitaksiyaning termodinamik jihatlari, o'sish sharoitlarining morfologiya, stixiometriya, strukturaviy nuqsonlar va qatlamlarning elektrofizik xususiyatlari bilan aloqasi tahlil qilingan.

"Tajriba o'tkazish shartlari va o'lchash usullari" nomli ikkinchi bobda sirtni Oje-tahlilini tajribada o'rnatish va o'tkazish usullari va namunaning chuqurligi bo'ylab kirishmalarning tarqalish taqsimotlarini aniqlash bo'yicha tadqiqot natijalari keltirilgan. Boshlang'ich material sifatida Choxral usuli bilan o'stirilgan, bor konsentratsiyasi $2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ va $1 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan KDB markali kremniydan foydalanilgan. Temir va kobaltning ion implantatsiyasi Kurchatov nomidagi Atom

energiyasi institutida ILU-3 qurilmasida amalga oshirildi. Legirlash shartlari quyidagicha edi: kremniy plastinkalarning silliqlangan yuzasiga energiyasi 40 KeV, tok zichligi 50 mA/sm² va dozalari 10¹⁵ dan 10¹⁷ ion/sm² gacha bo'lgan ionlar yo'naltirildi. Implantatsiya jarayoni xona haroratida o'tkazilgan. Bu tajribada ishtirok etayotgan nuqsonlar keyin ham qoladi, ya'ni ularning taqsimlanishi implantatsiya yo'li bilan aniqlanadi, deb faraz qilishga imkon beradi.

O'stirilgan qatlamlar strukturasi o'rganishning asosiy usuli bu tez elektronlar difraksiyasi (TED) usuli bo'lib, sirt tuzilishi va uning evolyutsiyasini bevosita o'sish davomida o'rganishga imkon beradi.

O'sishning o'ta toza sharoitlari so'rib olishning yog'siz usullari (membranali, sorbsiyali, magnitrazryadli va titan sublimatsiyali nasoslar)ni ishlatish orqali, suyuq azot bilan sovutiladigan kriopanellardan foydalanish, qurilmani sovutish uchun maxsus chora-tadbirlardan foydalanish orqali erishildi. Qoldiq gazlar atmosferasining tarkibini tahlil qilish uchun o'sish kamerasi to'rtburchak mass-spektrometri bilan jihozlangan.

Analitik kamera OES, RTS va IIMS usullari bilan shakllangan epitaksial tuzilmalar tadqiqotlari uchun xizmat qiladi. IIMS usuli qatlamlarning elementar tarkibini tahlil qilish uchun ishlatildi, OES usuli qatlamlarning morfologiyasi va stexiometriyasini o'rganish uchun ishlatildi. Taglik asosni CoSi₂ qatlami bilan qoplash koeffitsiyentini Oje-profillash paytida Co va Si Oje-signallari intensivligi bilan bog'laydigan analitik munosabat olindi.

Bayon qilinayotgan tajribalarning muhim xususiyati shundaki, o'rganilayotgan namunalarda vakuumni buzmasdan o'sish kamerasidan analitik kamera o'tkazildi.

“Kremniy sirtida temir atomlari bilan ion-implantatsiyalangan yupqa qatlamlarni hosil qilish texnologiyasi” nomli uchinchi bobda Si<Fe> tizimlari uchun chuqurlik bo'ylab atomlar taqsimlanishining konsentratsiya taqsimotlarini o'rganish bo'yicha tajribalar natijalari keltirilgan.

Temirning kremniyda taqsimlanish rejimlari o'lchovlari “RIBER” kompaniyasining LAS-2200 rusumidagi ikkilamchi ion massa spektrometrik qurilmasida va mazkur dissertatsiya ishda tasvirlangan qurilmada o'lchandi.

Si da implantatsiya qilingan Fe va Co kirishma atomlarining maksimal konsentratsiyasi legirlash dozasi 1·10¹⁶ ion/sm² ga teng bo'lganda Fe uchun mos ravishda 45,0-50,0 nm va 180,0-200,0 nm kattalikdagi chuqurliklarda yotishini ko'rish mumkin. Fe maksimumining cho'kish chuqurligidagi bunday farq uning massasi va elektron konfiguratsiyasidagi katta farq bilan tushuntiriladi. Bundan ko'rinib turibdiki, ikki xil qurilmada o'tkazilgan tajriba natijalari bir-birini to'lato'kis tasdiqlaydi. Chuqurlik bo'ylab aralashma tarqatish egri chizig'idan ko'rinib turibdiki, har ikki natijalar uchun R_p deyarli aniq teng.

Nurlanishning dozasi va energiyasiga qarab ion implantatsiyasi yarimo'tkazgich materiallar tarkibi, tuzilishlari va xossalari sezilarli o'zgarishga olib keladi. E = 20 (40 keV energiyadagi temir ioni bilan legirlangan kremniy monokristali alohida qiziqish uyg'otadi, chunki past nurlanish miqdorlarida (D < 10¹⁵ sm⁻²) termo diffuziya usuli bilan olib bo'lmaydigan yuqori konsentratsiyalar hosil bo'ladi, yuqori ion miqdorlarida yangi fizik xususiyatlarga

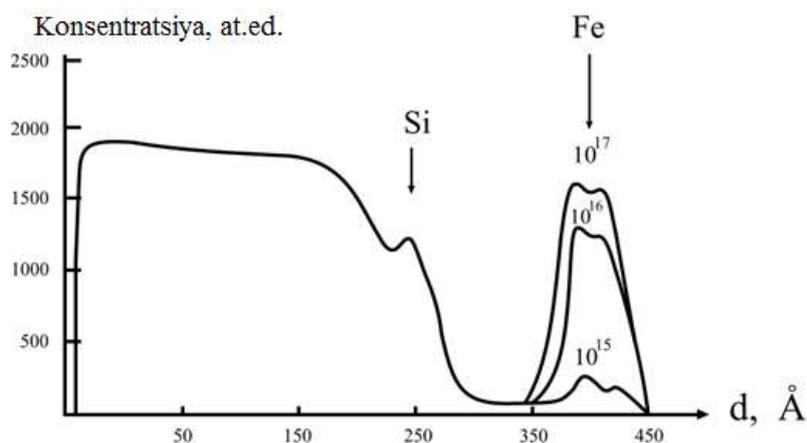
ega metall silitsidlar hosil bo‘ladi. Biroq, bunday silitsidlar hozirda MNE va QFE usullari bilan olinadi.

Boshqa tomondan, aynan bizni qiziqtirgan chuqurlik bilan bog‘liq rentgen reflekslarini analitik ravishda aniqlash juda qiyin. Shuning uchun struktura turi va uning parametrlari tafsilotlariga to‘xtamasdan, struktura o‘zgarishlarini aniqlash uchun an’anaviy REM-2000 rastrli elektron mikroskopidan foydalanildi. Temirni kompensatsiyalovchi kirishma sifatida tanlash haroratning keng oralig‘ida kremniy panjarasidagi kirishma atomlarining holati ancha barqaror ($100 \div 450$ °C) va shu bilan birga kremniy bilan legirlangan kremniyning parametrlari ham.

$E_0 = 40\text{keV}$ energiyali, nurlanish dozasi $10^{15} \div 10^{17}$ ion/sm² oralig‘ida bo‘lgan kremniyga implantatsiya qilingan temir atomining teng taqsimlanishning konsentratsion taqsimotining tajriba ishlari olib borildi. Boshlang‘ich material sifatida KDB markadagi solishtirma qarshiligi $p=10$ Om·sm bo‘lgan kremniy ishlatildi, tadqiqotlar ikkilamchi ion mass-spektrometriya, Rezerford teskari sochilishi va elektron Oje- mikroskopiya usullari yordamida amalga oshirildi.

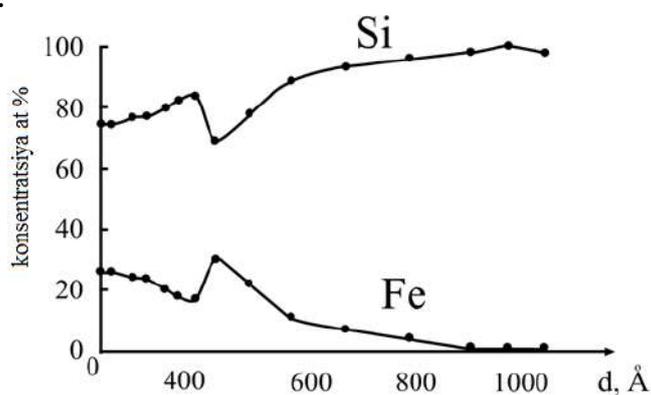
Legirlangan kirishmaning va kremniyni o‘zining konsentratsion mosligining RTS usuli bilan tadqiq etilishi quyidagi natijalarni berdi. 10^{15} ion/sm² dozada implantatsiya qilingan temir uchun namuna yuzasida atom birliklari hisobidan 83% kremniy, 15% kislorod va 2% temir tashkil qiladi. Usulning sezgirligi oralig‘ida temir 600 Å chuqurlikkacha kuzatiladi. 400 Å chuqurlikda nurlanish miqdori 10^{16} ion/sm² bo‘lganda elementlar mutanosibligi quyidagicha bo‘ldi, atom birliklari hisobidan kremniy 76%, kislorod 18% va temir 6%. 400 Å chuqurlikda nurlanish miqdori 10^{17} ion/sm² bo‘lganda elementlar mutanosibligi quyidagicha bo‘ldi: atom birliklari hisobida Si - 82 %, O - 3 % i Fe - 15 %. Haroratni qizdirish elementlar foizlari nisbatiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Masalan, 10^{16} ion/sm² nurlanish dozasi bilan legirlangan namunalar uchun taqsimot maksimumi 800 Å chuqurligiga o‘tadi.

1-rasmda Si(111) dan 10^{15} ion/sm² ÷ 10^{17} ion/sm² gacha dozali He⁺ ionlari bilan implantatsiya qilingan Si bitta kristalldan He⁺ ionlarining orqalik taglik asoslari keltirilgan. 1-rasmdan ko‘rinib turibdiki, Fe ning cho‘qqi xarakteristikasi spektrda $D \approx 10^{15}$ ion/sm² dozada paydo bo‘ladi. Shu bilan birga sirtning kristall tuzilishi va ion-legirlangan qatlamlarning elektrofizik xossalari o‘rganildi. Tajriba natijalari shuni ko‘rsatdiki, $D \leq 10^{15}$ ion/sm² da hali sirtga yaqin yuza qatlamlarining sezilarli darajada kengayishi kuzatilmaydi, Fe ning elektrofaol atomlarining konsentratsiyasi $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{sm}^{-3}$ dan oshmaydi. Dozani $5 \cdot 10^{15}$ ion/sm² ga oshirish amalda Fe ning elektrfaol atomlari konsentratsiyasining ortishiga olib kelmaydi. Sirtga yaqin yuza qismida qisman tartibsizlik bo‘ladi, Fe ning teskari sochilish cho‘qqisi aniqroq va yanada kuchli bo‘ladi.



1-rasm. Energiya miqdori 40 keV va nurlanish miqdori 10^{15} - 10^{17} ion/ sm^2 bo'lgan Fe ionlari bilan legirlangan Si monokristallidagi He^+ ionlarining RTS spektrlari

$D \approx 10^{16}$ ion/ sm^2 nurlanish miqdorida sirtga yaqin yuza qatlamning amorflanishi va Fe cho'qqisining sezilarli o'sishi sodir bo'ladi, ion legirlangan qatlamning ma'lum joylarida Fe+Si ning klasterli fazalari paydo bo'la boshlaydi. Bu o'zgarishlar $(8 \div 10) \cdot 10^{16}$ ion/ sm^2 miqdorgacha sodir bo'ladi. Miqdorning keyingi ortishi Si va Fe cho'qqilarining nisbiy intensivligining sezilarli o'zgarishiga olib kelmaydi. Shuning uchun $D \approx 10^{17}$ ion/ sm^2 miqdorini to'yinish miqdori sifatida qabul qilish mumkin. Yuqoridagi holatda elektrfaol atomlarning eng yuqori konsentratsiyasi $5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ gacha yetgan. Metall atomlarining nurlanish miqdoriga qarab Si da chuqurlik bo'yicha taqsimlanishi qiziqish uyg'otadi. O'rtacha nurlanish dozalarida ($D = 10^{15} \div 10^{16} \text{ sm}^{-2}$) taqsimlanish profili bir necha maksimumga ega bo'lgan juda murakkab shaklga ega. Misol sifatida, 2-rasmda Fe va Si konsentratsiyasining $D = 10^{16}$ ion/ sm^2 ionlari miqdori uchun chuqurlikka bog'liqligini ko'rsatadi.

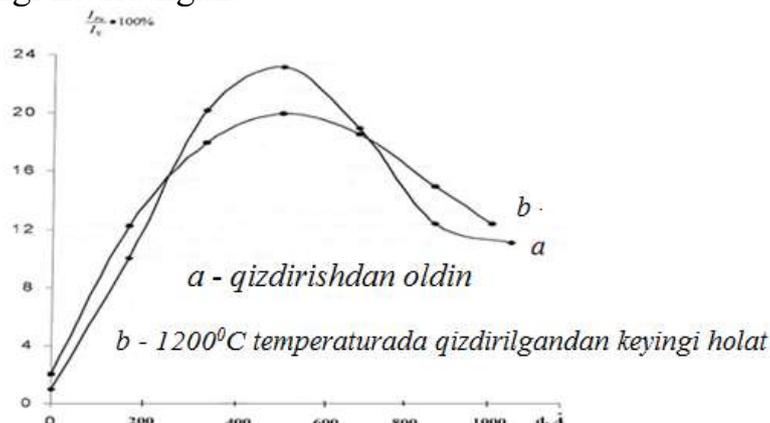


2 - rasm. Energiya miqdori 40 keV va nurlanish miqdori 10^{16} ion/ sm^2 bo'lgan Fe ionlarining Si dagi taqsimlash profillari

2-rasmdan ko'rinadiki, Fe konsentratsiyasi birinchi maksimum davrida ($d = 100 \text{ Å}$) $25 \div 30$ at. % gacha yetadi. Implantatsiya qilingan atomlarning asosiy qismi sirt usti yuzada $d = 300 \text{ Å}$ chuqurlikkacha joylashgan. $d = 400 \text{ Å}$ da d ortib borishi bilan temirning konsentratsiyasi keskin kamayadi va $800 \div 850$ chuqurlikda esa uning qiymati $1 \div 2$ at. % dan oshmaydi. Yuqori nurlanish dozalarida ($D > 10^{17}$ ion/ sm^2) bir necha maksimum o'rniga bitta maksimum paydo bo'ladi va temirning sirtidagi konsentratsiyasi keskin kamayadi. Oxirgi holat sirt usti

atomlarining sochilish tezligini oshirish bilan izohlanadi. $D \approx 10^{17}$ ion/sm²da Fe ning taqsimoti Gauss shakliga ega bo‘lib, maksimum yuza qatlamlarda $d \approx 400 \div 450$ Å da hosil bo‘ladi. Maksimumda temir tarkibi $\sim 30 \div 35$ at.% ga teng. Ion dozalarining yanada ortishi maksimumning sirt tomon siljishiga va uning kengayishiga olib keladi. Bu sirt qatlamlarini intensiv changlanishiga ham va metall silitsidlarning shakllanishi tufayli sirtga yaqin qatlamlarining zichligini oshirishga ham bog‘liq. Shu bilan birga, keng maksimum hududida temir konsentratsiyasi $35 \div 40$ at. % ga teng bo‘ladi. Bu qatlamlarda asosan FeSi₂ tipidagi birikmalar hosil bo‘ladi.

Yuqori miqdordagi ionlar ($D > 10^{16}$ ion/sm²) bilan legirlangan namunalar qizdirilganda boshqacha ko‘rinish kuzatiladi. 3-rasmda $D = 10^{16}$ ion/sm² bo‘lgan Fe⁺ ionlari bilan legirlangan Si(111)ning turli haroratlarda qizdirilganidan keyin olingan C_{Fe}(d)ning bog‘liqligi ko‘rsatilgan.



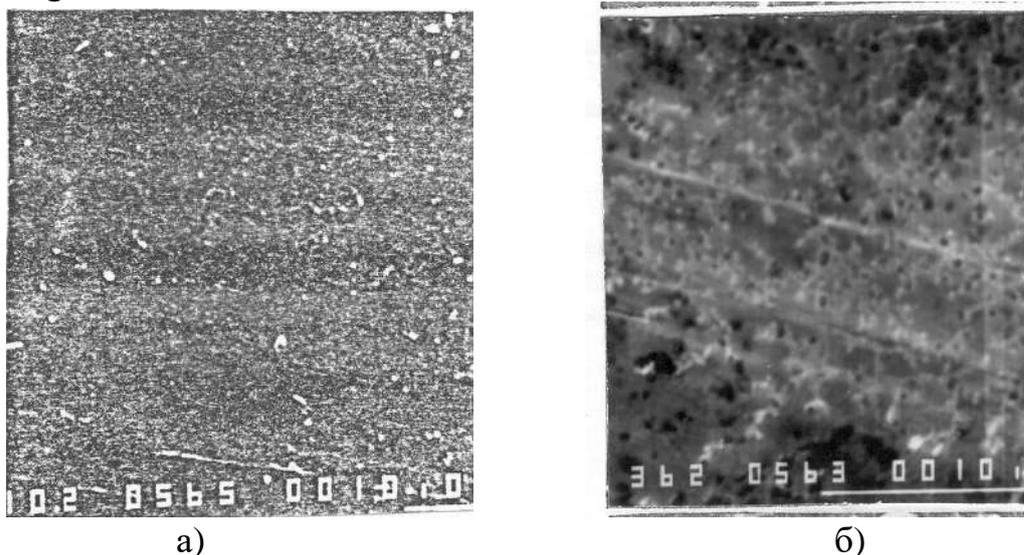
3-rasm. 40 keV energiyali va 10^{17} ion/sm² miqdorli implantatsiya paytida Si da Fe ning tarqatilish profillari. a- yumshatishsiz; b-1200 °C haroratda qizdirilgandan keyin

Qizdirish paytida legirlangan qatlamning tarkibi va tuzilishidagi asosiy o‘zgarishlar 25÷30 daqiqa ichida sodir bo‘ladi. $T = 600 \div 1200$ °C intervaldagi harorat oralig‘ida maxsus metodika bilan olib borilgan issiqlik ishlovi ko‘rsatdiki, 600 °C haroratda temir atomlarining sezilarli faollashuvi amalga oshadi, buni namunalarni sirt qarshiligining ortishi bilan baholash mumkin. Izotermik qizdirishda haroratdan qat’i nazar, implantatsiya miqdori oshishi bilan implantatsiya samaradorligi oshadi.

Bundan ko‘rinadiki, spektrda Fe ga xos bo‘lgan cho‘qqi $D \sim 10^{15}$ ion/sm² dozada paydo bo‘la boshlaydi. Bu bilan bir vaqtda sirtning kristall tuzilishi va ion legirlangan qatlamlarning elektrofizik xossalari o‘rganildi. Bu tajribalarning natijalari shuni ko‘rsatdiki, $D \leq 10^{15}$ ion/sm² da hali sirtga yaqin qatlamlarning tartibsizligi namoyon bo‘lmaydi, Fe ning elektrfaol atomlarining konsentratsiyasi $\sim 5 \cdot 10^{13}$ sm⁻³ni tashkil etadi.

$E_0 = 40$ keV energiyali, nurlanish miqdorini $10^{15} \div 10^{17}$ ion/sm² oraliqda variatsiyalanuvchi kremniyda implantatsiyalangan temir atomlarining konsentratsiya taqsimotlarini tadqiq etilishi bo‘yicha eksperimentlar o‘tkazildi. Dastlabki material sifatida, solishtirma qarshiligi $\rho = 10$ Om·sm bo‘lgan KDB rusumdagi kremniydan foydalanildi, tadqiqotlar ikkilamchi ion mass-spektroskopiya, tez elektronlarni kaytarilishiga bo‘lgan difraksiyasi,

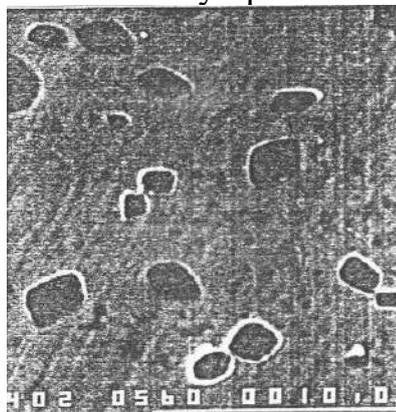
Rezerford teskari sochilishi, IIMS va elektron Oje-mikroskopiya uslublaridan foydalanilgan holda o'tkazildi.



4-rasm. Sof kremniy yuzasi (a) va ion legirlangan Fe⁺ (b) yuzalarining elektron-mikroskopik suratlari

4-rasmdan ko'ringanidek, sof kremniy bo'lishida elektron surat yaxlit va bir tekis ko'rinishda bo'ladi, chunki namunalar jilvirlangan va silliqlangan edi (4.a.-rasm.) Ion legirlanishidan keyin, nurlanish dozasi va ionlarning turiga bog'liq ravishda, elektron surat ko'rinishi jiddiy o'zgaradi. Surat ko'rinishi silliq yuzadan g'adir-budur yuzaga o'tadi (4.b.rasm).

800 °C dan yuqori haroratda suratda monokristallarga xos bo'lgan ba'zi hoshiyalangan sohalar elektron Oje-spektroskopiya uslubida element tahlili ular asosan Si va Fe atomlaridan va qisman kisloroddan tashkil topganligini ko'rsatdi. Kremniy va temirning Oje cho'qqilarini amplitudali holati, bu sohalar FeSi₂ turidagi silitsidlar ekanligini tasdiqlash imkonini beradi. Aynan shunga o'xshash ko'rinishlar Fe ionlari bilan 10¹⁶ ion/sm² nurlanish dozasi Fe bo'lishi holatida kuzatiladi, hoshiyalangan sohalar 800 °C va bundan yuqori haroratda paydo bo'ladi (5-rasm).



5-rasm. 10¹⁶ ion/sm² miqdorli Fe ionlari bo'lgan nurlantirilgan yuzani 800 °C haroratda termik ishlanishidan keyingi elektron-mikroskopik surati

Murakkab yuza jarayonlari legirlovchi kirishmalarning turi, harorati va dozasi bog'liqdir. Kremniy namunalarini katta miqdorlarda legirlashda mutlaqo boshqacha natijalar olinadi. 6-rasmda 10¹⁷ ion/sm² miqdorda Fe ionlari bilan

legirlangan kremniy yuzasini 800 °C haroratda qizdirilishidan keyingi elektron suratlari ko'rsatilgan.



6-rasm. 10^{17} ion/sm² nurlanish miqdorida Fe ionlari bilan legirlangan yuzaning, 800 °C termik qizdirilishidan keyingi elektron-mikroskopik surati

Olingan natijalarni tahlil qilinishi, namunaning yuzasida bo'lgani kabi, chuqurlik bo'yicha ham ion implantatsiya jarayonida temirni taqsimlanish maksimumi asosan kislorod miqdori va konsentratsiyasini o'zgarishi hisobiga o'zgaradi. Temir ionlarini kremniyga singib kirishi asosan kislorodni siqib chiqaradi. Ion legirlash, ionlar dozasi va energiyasiga bog'liq ravishda yuzaning strukturasi kuchli ta'sir ko'rsatadi. Legirlashdan keyin yuzaga g'adir-budur bo'lib qoladi. Ushbu strukturaga haroratli qizdirish kuchli ta'sir ko'rsatadi. 800 °C dan yuqori haroratda, monokristall uchun xos bo'lgan ba'zi hoshiyalangan sohalar hosil bo'ladi.

Struktura o'zgarishlari nurlanish miqdori va qizdirish haroratiga bog'liqdir. Masalan, 10^{17} ion/sm² nurlanish miqdoriga ega temir uchun, 800 °C haroratda yuzada ko'psonli nuqsonlarga ega monokristall ko'rinishidagi qatlam hosil bo'ladi. Haroratni 1100 °C gacha yanada ko'tarilishi yuzada amorf qatlamni paydo bo'lishiga olib keladi.

“Kremniy sirtida kobalt atomlari bilan ion-implantatsiyalangan yupqa qatlamlarning metallografik va elektrofizik xususiyatlari” nomli to'rtinchi bobda 10^{15} ÷ 10^{17} sm⁻² oralig'ida nurlanish miqdorining o'zgarishi bilan kremniyda implantatsiya qilingan Co atomlarining tarqalish konsentratsion taqsimotlarini aniqlash bo'yicha eksperimental tadqiqotlar natijalari keltirilgan. Tadqiqotlar IIMS, RTS va OES usullari yordamida ion tozalash bilan birgalikda amalga oshirildi. Nurlanishning miqdori va energiyasiga qarab ion implantatsiyasi yarimo'tkazgich materiallar tarkibi, tuzilishi va xossalari sezilarli o'zgarishiga olib keladi. 20-50 keV energiyali Co ioni bilan legirlangan kremniy monokristali alohida qiziqish uyg'otadi, chunki past nurlanish miqdorlarida ($D \leq 10^{15}$ sm⁻²) yuqori konsentratsiyali elektrfaol markazlarni yaratish mumkin, ular termik diffuziya usuli bilan yaratilmaydi; yuqori ion dozalarida yangi fizik xususiyatlarga ega bo'lgan metall silitsid hosil bo'ladi. Namunaning Oje-profillari 7-rasmda, silitsidning o'sish rejimlari va tahlil natijalari esa 1-jadvalda keltirilgan. CoSi_2/Si (100) qatlamlarining

o'sish rejimi, stexiometriyasi va yuza qarshiligi morfologiyasining OES tahlili natijalari.

1- jadval

Namuna №	Taglik asos tipi	Å	Epitaksiya tipi	$T_s, ^\circ C$	t_{OTJ}, min	Cho'kish tezligi, Å/s	I_{Co}/I_{Si}	I_{Si^II}/I_{Si}	θ	$R_s, \text{MKOM} \cdot \text{SM}$
1	KDB-7,5	105 105	RE	633 660	—	2 2	0,52	0,93	0,43	18
2	KDB -7,5	210	QFE	575	5	2	0,47	0,88	0,87	25
3	KEF-4,5	210	QFE	610	7	2	0,54	0,87	0,83	25
4	KEF-4,5	105 105	RE RE	580 562	—	2 2	0,89	0,78	0,95	8
5	KDB -12	210	QFE	630	7	2	0,65	0,94	0,29	23

Turli uslublarda o'stirilgan qatlamlarning tahlili, qatlamlar morfologiyasi va stexiometriyasi kritik ravishda o'sish shart-sharoitlariga bog'liq ekanligini ko'rsatadi. CoSi_2/Si qatlamlar morfologiyasi nuqtai nazardan uch asosiy turga bo'lish mumkin:

- 1) yaxlit CoSi_2 qatlamlari;
- 2) mikroskopik teshikli pardalar;
- 3) oralchasimon pardalar;

CoSi_2 stexiometriyasi farqlanishi bo'yicha ikki fazalarga bo'linadi:

- 1) ($\text{CoSi}_2\text{-Si}$) kremniy bilan boyigan CoSi_2 ;
- 2) ($\text{CoSi}_2\text{-Co}$) kobalt bilan boyigan CoSi_2 ;

Morfologi, stexiometriya va CoSi_2/Si strukturalarning o'sish shart sharoitlari o'rtasida o'rgatilgan bog'liqliklar, epitaksial katlamlari ma'lumotlari asosida asbob strukturalarini yaratishda katta ahamiyatga egadir. Ko'pchilik hollarda, maksimal birjinsli qatlamlar olinish masalasi oldinga quyiladi, biroq bir qator qo'llanishlarda boshqariluvchi morfologik tavsiflarga ega bo'lgan, submikron o'lchashlardagi teshikli qatlamlarni shakllanishi qiziqish hosil qiladi. Singuvchi bazali tranzistor yasash usuli taklif etiladi, qaysiki bularda metall asosidagi teshiklar rolini CoSi_2 qatlamidagi tabiiy submikron teshikchalar o'ynaydi α – Tranzistor tokini uzatilish ko'effitsiyentini CoSi_2/Si sistemadan qoplanish θ ko'effitsiyenti bilan bog'lovchi ifoda taklif etiladi;

$$\alpha = \frac{\xi}{\gamma + \xi}, \quad (1)$$

bunda,

$$\gamma = \frac{1 - \theta}{\theta}, \quad (2)$$

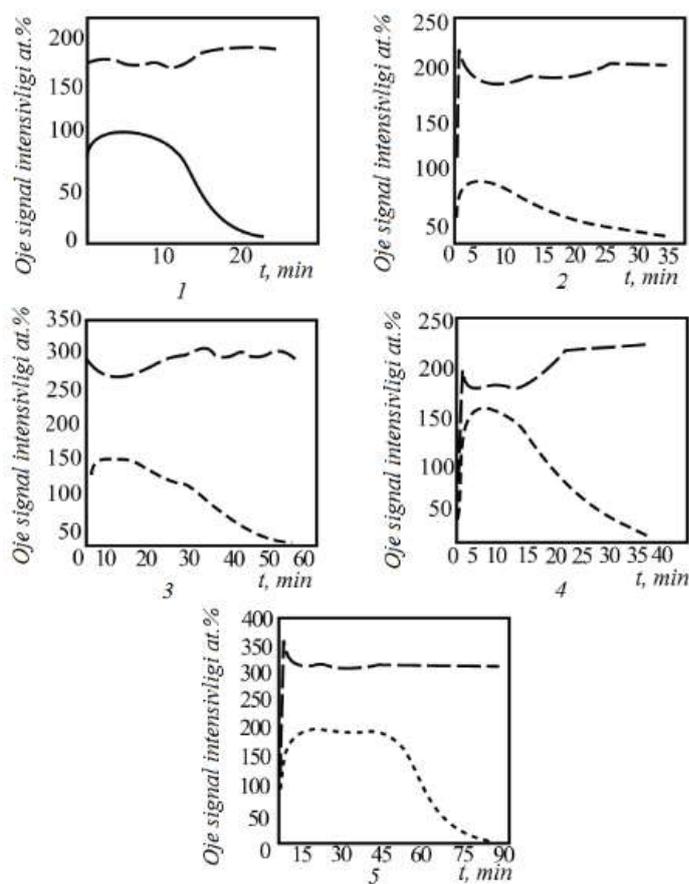
$$\varepsilon = \kappa T / e \Delta_0 [\exp(e \Delta_0 / kT) - 1] \quad (3)$$

Bunda Δ_0 – teshik markazida Shottke to'sig'i kattaligini o'zgarishi ($\Delta_0 = f(x)$; x – teshiklar o'rtacha diametri.

Shunday qilib, CoSi_2 qatlamining o'sish shart-sharoitlarini o'zgartirgan holda x va Θ kattaliklarni va demak tok uzatilish α koeffitsiyentini boshqarish mumkin bo'ladi. CoSi_2 pardalar stexiometriyasi elektrofizik xususiyatlarga, jumladan Shottke to'sig'i balandligi va solishtirma qarshilikka ta'sir ko'rsatadi.

Shuni ta'kidlash kerakki, (1) formula juda katta yaqinlashtirishlar asosida olingan, xususan stexiometriya o'zgarganda atomlarning hajmi va sirt zichligi buzilmaydi, ya'ni stexiometriya buzilganda bir turdagi atomlar kristall panjaraning tugunlarida boshqalari bilan almashinadi, atomlarning tugunlar kesishmasida paydo bo'lishi hisobga olinmaydi. Masalan, a va d namunalarda (1) formula qamrab olish koeffitsiyentining aniq kamaygan qiymatlarini beradi. Boshqa tomondan, yanada past ko'rsatgichlar: h_{CoSi_2} - taglik asosga cho'kkan kobalt qatlami qalinligi; T_s - epitaksiya paytidagi taglik asosning harorati. t_{omx} - QFE paytidagi yumshatish vaqti. δ namunaning kattaligi TED ma'lumotlari bilan tasdiqlanadi. Difraksion ko'rinishda CoSi_2 ning monokristall sirtidan reflekslar bilan birga qayta tiklangan Si (100) 2×1 sirtga mos keladigan reflekslar kuzatildi va bu kremniy taglik asosining silitsid qatlam bilan qoplanmagan katta hajmli maydonini ko'rsatadi. Shunday qilib, (1) formula turli o'sish rejimlari bo'yicha olingan qamrov koeffitsiyentlarini sifatli darajada tahlil qilish imkonini beradi.

Oje-taqsimotlar (7-rasm) ma'lum o'sish sharoitida kobalt silitsid sirtida sof kremniyning yupqa qatlami hosil bo'lishiga guvohlik bermoqda. Bu effektning sababi yo kobalt atomlarining namunaning sirtidan chuqurligiga tomon yo'nalgan diffuziyasi yo kremniy atomlarining taglik asosdan sirtga qarab diffuziyasi bo'lishi mumkin. Birinchi mexanizm ishonchliroq ko'rinadi. Har qanday holatda ham silitsid sirtida kremniy qatlamining hosil bo'lishi energetik jihatdan o'rinli, chunki Si ning erkin sirt energiyasi CoSi_2 nikidan nisbatan kam. CoSi_2 da sof kremniy qatlamining hosil bo'lishi CoSi_2/Si strukturasi ustida epitaksial kremniy qatlamini o'stirish kerak bo'lgan metall bazali tranzistor ishlab chiqarishda foydali ta'sir ko'rsatishi mumkin. Bu holda CoSi_2 sirtida kremniyning yupqa bufer qatlami mavjudligi epitaksial kremniy qatlamining kristall mukammalligini yaxshilashi aniqlangan. 5-shakldagi profillardan ko'rinib turibdiki, sirtga yaqin kremniy qatlami faqat ma'lum o'sish sharoitida hosil bo'ladi. Shunday qilib, bu jarayonni boshqarish imkoni mavjud.



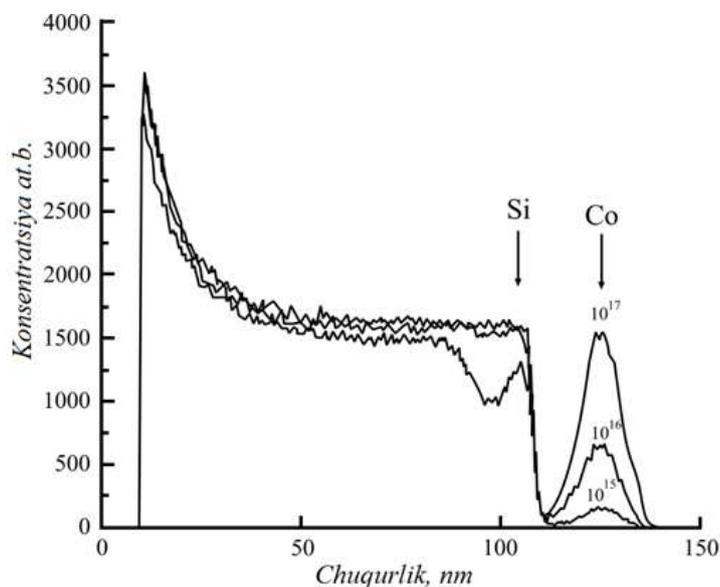
7-rasm. CoSi₂/Si namunalarning o'sish va Oje- taqsimotlari rejimi (Jadvaldagi namunalarning 1-5 raqamlari b-rasmdagi Oje-taqsimotlarga to'g'ri keladi)

Sirt qarshiligini o'lashlar shuni ko'rsatdiki, $T > 600$ °C da o'stirilgan CoSi₂ qatlamlarining qarshiligi (4-namuna), qarshilikning uch marta kamayishiga olib keladi. OES ma'lumotlari shuni ko'rsatadiki, bu sharoitda kobalt bilan boyitilgan CoSi₂-CoSi₂-Co hosil bo'ladi. Reaksiyaning pasaytirilgan haroratida CoSi₂-Co ning paydo bo'lish ehtimoliga ishda ham ko'rsatilgan edi. CoSi₂ ning g'ayritabiiy past qarshilik qiymati (4-namuna) CoSi₂-Co fazasining elektr xususiyatlari CoSi₂ va CoSi₂-Co dan sezilarli darajada farq qilishini ko'rsatadi.

10^{15} at/sm² dozada legirlangan namunalar qizdirilganda $T = 750$ °C haroratda faollashish kuzatiladi, kremniydagi elektrfaol bo'lgan kobalt atomining konsentratsiyasi $(2-5) \cdot 10^{15}$ sm⁻³ gacha ortadi, bu diffuzion legirlashga nisbatan 4-5 marta katta. Qizdirish haroratining 1200 °C dan yuqori bo'lishi elektrfaol kirishmalar konsentratsiyasining keskin kamayishiga olib keldi. 800 °C dan yuqori haroratlarda sirtida monokristallga xos ayrim qirrali sohalar hosil bo'ladi. Nurlanish miqdori va qizdirish haroratiga qarab strukturaviy o'zgarishlar kuzatiladi. Masalan, 10^{17} at/sm² nurlanish dozasiidagi temir implantatsiyasi uchun, 800 °C haroratda qizdirilgandan so'ng sirtida nuqsonlari ko'p bo'lgan monokristall shaklidagi qatlam hosil bo'ladi. Haroratning yana 1100 °C ga ko'tarilishi sirtida amorf qatlam hosil bo'lishiga olib keladi.

8-rasmda boshqacha ko'rinish kuzatiladi. He⁺ ionlarining 40 KeV energiyali 10^{15} - 10^{17} ion/sm² miqdordagi Co⁺ ionlari bilan implantatsiya qilingan Si(111)

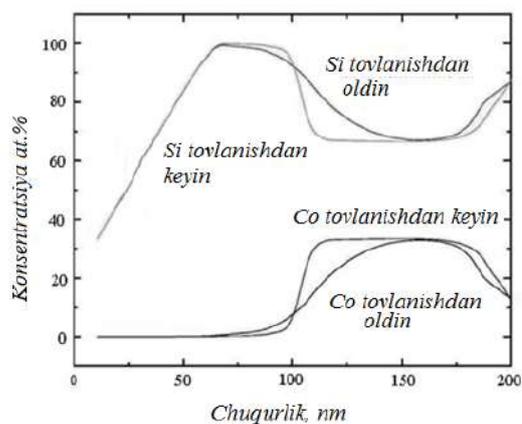
monokristallidan teskari sochilishi ko'rsatilgan. Tajriba natijalari RTS-spektrlar shaklida quyida keltirilgan. Co ga xos cho'qqi $D \approx 10^{15}$ ion/sm² miqdorda ko'rina boshlaydi, kobalt chuqurlashtirilgan, taqsimlash maksimumi taxminan 120 nm masofada bo'lib, IIMS yordamida olingan ma'lumotlar bilan mos keladi. Miqdorning ortishi bilan geliy ionlarining kobaltda sochilishiga mos keluvchi cho'qqi ortadi, shuningdek kirishma kirish chuqurligida spektr shakli o'zgaradi (matritsada yoyilish chiqishi kamayadi).



8-rasm. He⁺ ionlarining 40 KeV energiyali 10^{15} - 10^{17} ion/sm² gacha dozadagi Co⁺ ionlari bilan implantatsiya qilingan Si monokristallidagi RTS spektri

1000 °C daraja haroratda 30 daqiqa termik qizdirishdan keyin kobalt tarqatish profili sezilarli darajada torayadi va tarqatish markazidagi konsentratsiya ortadi. Shu bilan birga kobaltning keng maksimum maydondagi konsentratsiyasi 30-35 at% ni tashkil etdi. CoSi₂ tipidagi birikmalar asosan shu qatlamlarda hosil bo'lgan. Shu bilan birga kremniy uchun spektrning keskin kamayishi kremniyda radiatsion nuqsonlarning sezilarli qizdirilishini ko'rsatadi. Barcha spektrlar qizdirilgandan keyin kremniy spektrida kichik cho'qqilar ko'rinadi bu kisloroddir. Vakuum issiqlik bilan ishlov berish vaqtida yetarli darajada yaxshi bo'lmagan, natijada namunalarda kremniy oksidi SiO₂ paydo bo'lgan.

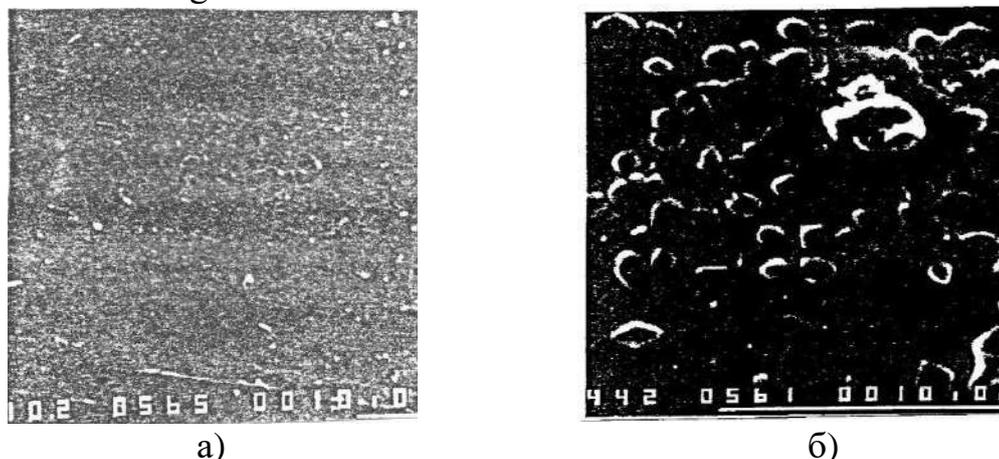
9-rasmda 10 mA tok uchun taqsimlash profillari ko'rsatilgan, bu tok o'z-o'zini yumshatish uchun yetarli ekanligini tajribaviy spektrda ko'rdik. Namunadagi profillar ham bu yerda ko'rsatilgan, ammo 1000 °C harorat bilan qizdirilganidan keyin kobalt disilitsid qatlami hosil bo'lganligi juda aniq ko'rinadi.



9-rasm. Co ning 40 keV energiyali va 10^{17} ion/sm² dozali Si da qizdirishdan oldin va keyingi taqsimlash profillari

Sirtning kristall tuzilishi va ion legirlangan qatlamlarning elektrofizik xossalari birgalikda o‘rganildi. 9-rasmda Si sirtidan ion legirlashdan oldin va ion legirlashdan keyingi, shuningdek har xil haroratda termik ishlov berishdan keyin olingan elektron ko‘rinishlari keltirilgan.

Bir vaqtning o‘zida, ion-legirlangan qatlamlarning kristall strukturasi va elektrofizik xususiyatlari tadqiq etildi. 10-rasmda Si yuzasidan ion legirlashgacha va undan keyingi, shuningdek turli haroratlarda termik ishlovdan keyin olingan elektron suratlar ko‘rsatilgan.



10-rasm. Sof kremniy (a) va ion-legirlangan Co⁺ yuzalarning (b) elektron-mikroskopik sur‘atlari

Rasmdagi ko‘rilganidek, sof kremniy bo‘lish holatida elektron surat yaxlit va bir tekis ko‘rinishiga ega, chunki namunalar jilvirlangan va silliqqlangan bo‘lgan (10.a.-rasm). Ion legirlanishdan keyin, nurlanish dozasi va ionlar iuriga bog‘liq ravishda ko‘rinishi silliq yuzadan g‘adir-budir yoki jilosiz xira ko‘rinishiga o‘tadi (10.b.-rasm). Nurlanish dozasi kichik qiymatlarida va termik yumshatishda, Co 800 °C gacha bo‘lish holatida elektron suratda jiddiy o‘zgarishlar sodir bo‘lmaydi. 800 °C dan yuqori haroratda suratda monokristallarga xos bo‘lgan ba’zi hoshiyalangan sohalar kuzatiladi.

Ushbu hoshiyalanganliklarni elektron Oje-spektroskopiya uslubida element tahlili ular asosan Si va Co atomlaridan va qisman kisloroddan tashkil topganligini

ko'rsatdi. Kremniy va kobaltning Oje cho'qqilari amplitudasi qiymatlari, bu sohalar CoSi_2 turdagi silitsidlar deb tasdiqlanish imkonini beradi.

Yuqori dozalarda legirlangan kremniy namunalarda mutlaqo boshqa natijalar olinadi. 11-Rasmda 10^{17} ion/ sm^2 dozadagi Co ionlari bilan legirlangan kremniy yuzasini 950°C haroratda qizdirilishidan keyin olingan elektrik suratlari keltirilgan. Rasmdan ko'rilganidek, hoshiyalangan sohalar, ko'psonli nuqsonlarga ega monokristall ko'rinishidagi yaxlit qatlam hosil qilgan holda go'yoki qo'shilib (quyulib) ketgan ko'rinishiga ega.



11-rasm. 10^{17} ion/ sm^2 miqdorli Co⁺ionlari bilan legirlangan kremniy yuzasining 950°C haroratda termik qizdirilishidan keyingi yuz mikrofotosurati

Qizdirish haroratini 1100°C gacha oshirilishi yuzaning holatini jiddiy o'zgarishiga olib keladi. Elektron surat "epitaksial" dan amorf yuzaga o'tadi (12-rasm).



12-rasm 10^{17} ion/ sm^2 miqdorda Co⁺ionlari bilan legirlangan kremniy yuzasining 1100°C haroratda qizdirilishidan keyin olingan mikrofotosurati

10^{17} ion/ sm^2 nurlanish dozali kobalt uchun 800°C dan yuqori haroratda qizdirilishidan keyin, nurlanish miqdori va yumshatish haroratiga bog'liq ravishda strukturaviy o'zgarishlarda yuzada ko'psonli nuqsonlarga ega monokristall ko'rinishidagi qatlam hosil bo'ladi. Haroratni 1100°C gacha ko'tarilishi yuzada amorf qatlam hosil bo'lishiga olib keladi.

XULOSA

1. Birinchi marta kremniyning sirtiga yaqin sohalar, energiyasi 40 KeV, dozalari $10^{15} - 10^{17}$ sm^{-2} sohada bo'lgan Fe va Co ionlarini implantatsiyalash orqali, kengligi 100 \AA bo'lgan temir va kobalt atomlarining yupqa qatlamlarini hosil qilish

va implantatsiyadan keyin 800 °C haroratdandan yuqori haroratlarda termik ishlov berish orqali silitsid qatlamlarini hosil qilish texnologiyasi yaratilgan;

2. Barcha o'rganilgan namunalarda legirlangan kirishma atomlarining taqsimlanishi profillari gauss shakliga ega ekanligi aniqlandi. Maksimal taqsimlanish chuqurligi nurlanish miqdori va ion energiyasiga bog'liq. Konsentratsiyaning oshib borishi Rp ning 395 Åga pasayishiga olib keladi. Tuzilmalarning termik qizdirilishi kirishmani legirlangan taqsimoti profillariga ta'siri ko'rsatilgan. III va V guruhlarining elementlaridan farqli o'laroq, issiqlik bilan ishlov berishdan keyin, o'tish guruhlari elementlarining sirt konsentratsiyasi oshmaydi, aksincha kamayadi. Sezilarli diffuziya 600 °C dan yuqori haroratlarda boshlanadi. Bunday holda, maksimumning namuna chuqurligi sari siljishi diffuziya qonunlariga muvofiq sodir bo'ladi.

3. Kremniy sirtiga yaqin sohalarda ion-implantatsiya usuli bilan Fe va Co kirishma atomlarining yupqa qatlamini olishning optimal sharoitlari aniqlandi. Aniqlanishicha, 10^{15} ion/sm² dozada legirlangan namunalarni qizdirishda 650 °C haroratda faollashuv kuzatiladi. T=750 °C da issiqlik bilan ishlov berishda Si dagi elektrfaol kobalt atomlarining konsentratsiyasi $(2\div 5)\cdot 10^{15}$ sm⁻³ gacha oshadi, bu diffuziyali legirlash bilan solishtirganda 4÷5 marta yuqori ekanligi aniqlandi.

4. 1000 °C dan yuqori haroratlarda elektrfaol kirishma atomlar konsentratsiyasining keskin pasayishiga olib keladi.

5. 800 °C dan yuqori qizdirish haroratida ion bombardimoni bilan legirlashdan so'ng notekis bo'lgan sirt yuzasida monokristallarga xos bo'lgan qirrali hududlar hosil bo'lishi aniqlandi.

6. Strukturaviy o'zgarishlar nurlanish miqdori va qizdirish haroratiga bog'liqligi aniqlandi. Masalan, nurlanish dozasi 10^{17} ion/sm² bo'lgan temir uchun 800 °C haroratda qizdirilgandan keyin, sirt yuzasida juda ko'p nuqsonli monokristall shaklidagi qatlam hosil bo'ldi, haroratni yana 1100 °C gacha ko'tarilishi esa sirt yuzasida amorf qatlam hosil bo'lishi aniqlandi.

7. Olingan natijalar asosida kremniyning sirtiga yaqin sohalarda Fe atomlarining yupqa silitsid qatlamlarini hosil qilish mexanizmlari ishlab chiqilgan. Avval kremniyning sirtiga yaqin sohalarda, energiyasi 40 KeV, dozalari $10^{15} - 10^{17}$ sm⁻² bo'lgan Fe ionlarini implantatsiyalash orqali, sirtidan 300 Å chuqurlikda qalinligi 100 Å bo'lgan temir atomlarining yupqa qatlamlarini hosil qilish, implantatsiyadan keyin 800 °C haroratdan yuqori haroratlarda termik ishlov berish orqali temirning silitsid qatlamlarini hosil qilish mexanizmi o'rnatilgan;

8. Olingan natijalar asosida kremniyning sirtiga yaqin sohalarda Co atomlarining yupqa silitsid qatlamlarini hosil qilish mexanizmlari ishlab chiqilgan. Avval kremniyning sirtiga yaqin sohalarda, energiyasi 40 KeV, dozalari $10^{15}-10^{17}$ sm⁻² bo'lgan Co ionlarini implantatsiyalash orqali, sirtidan 100 Å chuqurlikda qalinligi 50 Å bo'lgan kobalt atomlarining yupqa qatlamlarini hosil qilish, implantatsiyadan keyin 950 °C haroratdan yuqori haroratlarda termik ishlov berish orqali kobaltning (CoSi₂) silitsid qatlamlarini hosil qilish mexanizmi o'rnatilgan;

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/Т.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРО-
НИКИ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА УЗБЕКИСТАНА**

САЙФУЛЛОЕВ ШОХРУХ АМИН УГЛИ

**ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ СИЛИЦИДОВ FeSi_2 И
 CoSi_2 НА КРЕМНИИ, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2023

Тема доктора философии (Doctor of Philosophy) диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2019.2.PhD/FM381.

Диссертация выполнена на научно-исследовательском институте Физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета по адресу www.ispm.uz и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyo.net

Научный руководитель: Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Мамадалимов Абдугофир Тешабоевич
доктор физико-математических наук, профессор
Абдурахманов Кахар Паттахович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Наманганский инженерно-строительный институт

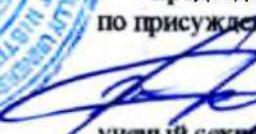
Защита диссертации состоится «29» 05 2023 г. в 11⁰⁰ часов на заседании Научного Совета Dsc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана по адресу: 100057, г.Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел./Факс: (+99871) 248-79-91 / (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.

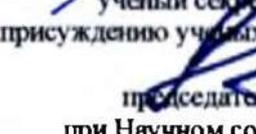
С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (зарегистрирована за № _____), по адресу: 100057, Узбекистан, г.Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел./Факс: (+99871) 248-79-91/(+99871) 248-79-92.

Автореферат диссертации разослан «13» 05 2023 года
(протокол рассылки № 44 от «13» 05 2023 г.)




Ш.Б. Утамурадова,
председатель Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф-м.н., профессор


Ж.Ж.Хамдамов,
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней, PhD, с.н.с.


Н.Тургунов,
председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф-м.н., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время из мировой практики известно, что кремний может образовывать на поверхности как стабильные силициды металлов, так и нестабильные соединения. Наблюдается образование силицидов в процессе диффузии атомов металлов. Образование нестабильных фаз обусловлено процессом диффузии атомов металла через газовую фазу или последующей термической обработки металлического слоя напыленного на поверхность кремния. При ионном легировании атомов металла в кремний с последующей термической обработкой также образуются силицидные слои.

Эти процессы очень сложны и их исследовании представляют большой научный интерес, поскольку нестабильные фазы могут обладать аномальными свойствами. Теории, позволяющей объяснить разнообразие фазовых переходов в рассматриваемых системах, пока не существует. Экспериментальные результаты различных авторов не совпадают. Поэтому проблема ранних стадий образования силицидных слоев в системах Fe / Si и Co / Si обсуждается в научной литературе и требует проведения дальнейших исследований.

Процесс образования силицидных слоев атомов переходных металлов в кремнии играют важную роль в современной технологии больших (БИС) и сверхбольших (СБИС) интегральных схем. Эти слои эффективно используются в создании диодов Шоттки, качественных омических контактов в активных зонах больших интегральных схем, тонких слоев между элементами с малым сопротивлением, устойчивыми к высоким температурам, затворов металлодиэлектрических полупроводниковых транзисторов.

В нашей Республике одним из наиболее информативных и перспективных методов решения этой проблемы является анализ поверхности кремния с помощью вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС) и обратного рассеяния Резерфорда (РОР). Сегодня существует ряд работ, в которых ВИМС используется для изучения процесса образования силицидов железа и кобальта на поверхности кремния. Научный анализ результатов проведенных исследований показывает, что энергия связи электронов $2p$ в кремнии очень чувствительна к фазовому составу образовавшихся слоев. Однако значения энергий связи, данные для одних и тех же фаз в разных работах, сильно отличаются друг от друга.

Эти различия могут быть связаны с неспособностью используемых устройств измерять достаточно высокие энергии. Как правило, значения энергии находятся в диапазоне 0,15-0,3 эВ, что затрудняет разделение базовых оснований на компоненты. Кроме того, поверхности монокристаллического кремния в различных состояниях в качестве базовой основы также имеют важное научное значение.

В Указах Президента Республики Узбекистан от 14 июля 2018 года “О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности” ПП-3855 от 29

октября 2020 г. ПФ-6097 “Об утверждении Концепции развития науки до 2030 г”. ПП-5032 от 19 марта 2021 г. ПП-5032 “Повышение качества образования в области физики и развитие научных исследований 28 января 2022 года № ПФ-60 “о новой стратегии развития Узбекистана на 2022-2026 годы”, а также к решению задач, поставленных в иных нормативно-правовых актах, принятых в данной области, данное диссертационное исследование в определенной степени соответствует выполнению.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данное исследование было проведено в рамках программы Республики Узбекистан III-3 “Энергетика, энергосбережение и ресурсосбережение, транспорт, развитие машиностроения, современной электроники и микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения” в соответствии с приоритетными направлениями науки и техники.

Степень изученности проблемы. На сегодняшний день возможности применения МЛЭ при создании многослойных композиционных материалов и гетероструктур на основе кремния изучены в следующих научных центрах: одними из первых ИФП СО РАН (Стенин С.И., Пчеляков О.П. и другие), МНИРМ (Минск), ЛФТИ (Алферов Ж.И., лаборатория Коперова П.С., группа Соколова Н.С.) ИРЕ (Группы Дворянкина В.Ф. , Митягина А. Й., Мокерова В.Г.) НИИ МЕ и НИИФП (Зеленоград), ФГУП “НПО Орион” (Осадчев Л.А.), СНИТИ (Житовский В.Д.) ИПТМ (Вяткин А.Ф.) ИОФАН и ФИАН (все – город Москва) и другие ученые тоже занимались этим вопросом

В работах известных ученых Узбекистана С.З. Зайнабидинова, А.Т.Мамадалимова, М.К. Бахадырханова, К.П.Абдурахманова, Ш.Б.Утамурадовой, Х.С. Далиева и др. подробно исследованы влияния дефектов, образованных примесными атомами, на электрофизические, фотоэлектрические и оптические свойства монокристалла кремния, легированного элементами 3D-металлической группы, а также влияние внешних факторов на состояние таких примесных дефектов. Представлены работы авторов, которые занимались созданием многослойных композиционных материалов и гетероструктур на основе кремния. Но по теме механизмы образования силицидов Mn, Co, Ni в кремнии. фазовые состояния, состояния равновесия (механизмы образования обогащенных металлами нижних силицидов, богатых кремнием верхних силицидов через спектральные отражения связи спектра рентгеновских лучей и оптического коэффициента отражения) впервые были изучены старшим научным сотрудником института Прикладной физики Т.С.Камиловым.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено на основе координационного проекта Кабинета Министров Республики Узбекистан по прикладному проекту 4.2.1 по теме “Контроль физических свойств твердых тел в ионно-

плазменной технологии и изучение возможности их применения в микроэлектронике” (2017-2020).

Целью исследования является установлении механизмов образования тонкослойных силицидов FeSi_2 и CoSi_2 в кремнии с помощью ионного легирования.

Задачи исследования:

- Изучение влияния имплантации ионов Fe, Co большими дозами и последующего термического нагрева на состав элементов, кристаллическую структуру в при областях, к поверхностных образцов монокристаллов кремния;

- определение оптимальных условий образования тонких монокристаллических силицидных слоев, определение распределения плотностей электронных состояний в валентной зоне и проводимости;

- выявление механизмов образования новых поверхностных структур (силицидных слоев), наблюдаемых в результате кратковременного термического нагрева образцов ионно-имплантированного кремния;

- определение с помощью методов ВИМС, ОЭС и POP режимов нагрева в зависимости от влияния температуры на дозу и распределение имплантированных атомов переходной группы в кремнии .

- атомов анализ профилей концентрации и влияния термического нагрева переходных групп Fe и Co в кремнии на состояние ионно-имплантированных доменов;

Объектом исследования является тонкие силицидные слои переходных элементов, образующиеся в при поверхностной области кремния при ионной имплантации.

Предметом исследования является технологический метод получения тонких слоев переходных элементов на поверхности кремния методом ионной имплантации через аналитическую камеру, Оже-электронная спектроскопия, метод дифракции быстрых электронов, метод измерения обратного рассеяния Резерфорда.

Методы исследований. В работе использованы следующие методы: рентгеновский микрозондовый анализ (JEOL Super Probe JXA-8800 R / RL), метод эффекта Холла, четырех зондовый метод и методы (ВИМС), (ОЭС), (POP).

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– впервые создана технология формирования силицидных слоев в при к поверхностной области кремния, путем имплантации ионов Fe и Co с энергией 40 кэВ, дозами в диапазоне $10^{15} \div 10^{17} \text{ см}^{-2}$; формирования тонких слоев атомов железа и кобальта толщиной 100 Å и термической обработки при температурах выше 800 °С после имплантации;

– при легировании монокристаллов Si, легированных методом ионной имплантации, ионами Fe с энергией 40 кэВ и дозой облучения $10^{15} \div 10^{17} \text{ ион/см}^2$ концентрация атомов Fe на глубине 350÷450 Å от

поверхности Si достигает высокое значение, 25÷30 ат.% от поверхностной концентрации, определяли его образование на основании анализа спектра РТС;

- Установлено, что при легировании образцов Si ионами Fe с дозой облучения 10^{15} - 10^{17} ион/см² интервал ионной имплантации формируется в слое шириной $d \approx 100$ Å и этот слой в основном состоит из соединений типа FeSi₂;

- Было обнаружено, что при нагревании имплантированного кремния с ионами Co⁺ до температур выше 800 °С образуются тонкие слои CoSi₂/Si;

- Установлено, что слои силицида CoSi₂ образуются при термической обработке при температурах выше 950 °С при ионной имплантации.

Практические результаты исследования заключаются в следующем: разработаны оптимальные режимы получения ионно-легированных слоев силицидов в различных структурных сочетаниях установлено, что создание силицидов на определенной глубине от поверхности материалов позволяет регулировать параметры силицид, полученные методом ионной имплантации, исследование на предмет их применения при создании чувствительных электронных устройств и структур, таких как фотодатчики СВЧ - транзисторы, низкоомные контакты.

Достоверность результатов исследования обосновывается использованием технологии формирования тонких слоев силицида в при поверхностной кремния с помощью методов МЛЭ, ТФЭ и РЭ при энергии 40 кэВ и имплантации ионов Fe и Co со скоростью излучения 10^{15} - 10^{17} ионов/см², рентгеновского микрозондового анализа при получении научных результатов (Jeol Super Probe JXA-8800 R/RL), Оже электрон спектроскопии, обозначается применением методов дифракции быстрых электронов и обратного рассеяния Резерфорда.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в также развитии теоретических и экспериментальных представлений об образовании тонких силицидных слоев кобальта и железа в приповерхностной области кремния. Выявление механизмов, приводящих к электронным изменениям поверхности при ионной имплантации и определение характера, природы валентных электронов, имеет большое значение для теории влияния заряженных частиц на твердые тела. Практическая значимость результатов исследований состоит в применении выявленного эффекта введения атомов железа и кобальта под оксидный слой для улучшения морфологических свойств ультратонких слоев дисилицидов железа и кобальта, образующихся в поверхности кремния, и эти слои могут быть применения для создания впечатляющих электронных приборов: термо-фотодатчиков, СВЧ - транзисторов, низкоомных контактов.

Внедрение результатов исследования.

На основании полученных научных результатов по механизмов образования новых поверхностных структур, наблюдаемых в процессе

кратковременного термического отжига ионно-имплантированных образцов кремния:

определение механизмов получения полупроводниковых материалов имеющих стабильные электрофизические параметры с контролируемой наноразмерной структурой, в кремнии ионно-имплантированном с кобальтом, основанное на получении энергетической диаграммы тонкого слоя кремния кобальта, отражающей реальную электронную структуру, определении энергетических характеристик тонкого слоя кремния кобальта применено Ионно-плазменных и лазерных технологий в институте в Академии Наук Республики Узбекистан в прикладном № ОТ-ФЗ-13 проекте «Изучение механизмов образования свободный многослойных нанопленочных структур кремния–силицида–металла и их электронных и кристаллических структур » использовано “определение основных энергетических свойств слоев CoSi_2 полученных по различным технологиям” (справочник Рес.Уз.АН от 7 ноября 2022 г. №2/1255-2798).

Научные результаты позволили определить механизмы получения полупроводниковых материалов с контролируемой наноразмерной структурой со стабильными электрофизическими параметрами.

Для железа и кобальта, имеющих количество излучения 10^{17} ион/см² образование слоя в виде монокристалла с многочисленными дефектами на поверхности при температуре 800⁰С, время нагрева для температур и доз излучения выбрано 30 минут, максимальное количество электроактивных атомов железа, нагретых при $T=800^0\text{C}$, определяется как при увеличении концентрации железа в 1-3 раза; в “ФОТОН” АО при повышении температуры до 1000⁰С значение концентрации железа составляющий 20at.% используется для изготовления полупроводниковых электронных устройств на основе кремния. 24 января 2022 года АО “Узэлтехсаноат” (от 24 января 2022 года) Справочник № 04-3/128). Результаты работ позволили использовать его для создания электронных устройств и фотосенсоров, микроволновых транзисторов, контактов с низким сопротивлением.

(В редакции устава акционерного общества “Узэлтехсаноат” от 24 января 2022 года Справочник № 04-3/128). Результаты работ позволили использовать его для создания электронных устройств и фотосенсоров, микроволновых транзисторов, контактов с низким сопротивлением.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 2 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 14 научных трудах, из них 7 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 6 статьи в зарубежных международных реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 112 страниц, включая 28 рисунков, 100 наименований литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и необходимость темы диссертации, выявляется связь исследования с приоритетными направлениями развития науки и техники в республике, раскрывается степень изученности проблемы, излагаются цели и задачи, приводятся объекты, темы и методы исследования, излагается научная новизна и практическая значимость исследования, осуществляется внедрение результатов, апробация и публикация результатов работы, а также краткое изложение объема и структуры диссертации.

В первой главе «**Структура и свойства силицидов железа и кобальта в кремнии (анализ литературы)**» представлены научные данные, посвященные изучению основных закономерностей образования силицидов переходных металлов, особенностей кристаллического и электронного строения, а также электрофизические свойства силицидов. Проанализированы проблемы роста ионно-легированных слоев на поверхности Si, термодинамические аспекты эпитаксии, определяющие различные механизмы роста, взаимосвязь условий роста с морфологией, стехиометрией, структурными дефектами и электрофизическими свойствами слоев.

Во второй главе «**Условия проведения эксперимента и методы измерения**» представлены результаты исследований по установлению и методов проведения поверхностного Оже-анализа в эксперименте и по определению дисперсионных распределений входных данных по глубине пробы. В качестве исходного материала использовался кремний марки КДБ с концентрацией Бора $2 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$ выращенный методом Чохральского. Ионная имплантация железа и кобальта проводилась в Институте Атомной энергии им. Курчатова на установке ИЛУ-3. Условия легирования были следующими: на полированную поверхность кремниевых пластин направлялись ионы с энергией 40 кэВ, с плотностью тока 50мкА/см^2 и дозами от 10^{15} до 10^{17} ионов/ см^2 . Процессе имплантации проводился при комнатной температуре.

Основным методом изучения структуры создаваемых слоев является метод дифракции быстрых электронов (TED), позволяющий изучать структуру поверхности и ее эволюцию непосредственно в процессе роста

Сверхчистые условия выращивания имплантируемых слоев были достигнуты за счет применения безмасляных методов создания вакуума (мембранные, сорбционные, магниторазрядные и титановые сублимационные насосы), использования криопанелей с жидким азотом, применения специальных мер по охлаждению прибора. Для анализа состава атмосферы

остаточных газов камера роста оснащена четырехугольным масс-спектрометром

Аналитическая камера служит для исследования эпитаксиальных структур, сформированных методами ОЭС, РОР и ВИМС. Метод ВИМС использовался для анализа элементного состава слоев, метод ОЭС для изучения морфологии и стехиометрии слоев. Получена аналитическая зависимость, связывающая коэффициент покрытия базового основания слоем CoSi_2 с интенсивностью Оже - сигналов Co и Si при Оже -профилировании.

Важной особенностью описываемых экспериментов было то, что исследуемые образцы переносились из камеры выращивания в аналитическую камеру без нарушения вакуума .

В третьей главе **«Технология формирования тонких ионно-имплантированных слоев с атомами железа на поверхности кремния»** представлены результаты экспериментов по изучению распределений концентраций атомов железа по глубине для систем $\text{Si}\langle\text{Fe}\rangle$.

Измерения режимов распределения железа в кремнии проводились на вторичном ионном масс-спектрометрическом приборе LAS-2200 компании “RIBER” и приборе, описанном в данной диссертационной работе.

Можно видеть, что максимальная концентрация атомов Fe, имплантированных в Si лежит на глубинах 180,0 – 200,0 nm, при легирующей дозе $1 \cdot 10^{16}$ ионов/ cm^2 . В зависимости от дозы и энергии излучения ионная имплантация приводит к значительным изменениям состава, структуры и свойств полупроводниковых материалов. Монокристалл кремния, легированный ионом железа при энергии $E=20$ (40 кэВ), представляет особый интерес, поскольку при низких значениях излучения ($D < 10^{15} \text{sm}^2$) образуются высокие концентрации, которые не могут быть получены термодиффузионным методом, в то время как при высоких количествах ионов образуются силициды металлов с новыми физическими свойствами. Однако такие силициды в настоящее время получают методами МЛЭ и ТФЭ.

С другой стороны, именно рентгеновские рефлексы, связанные с интересующей нас глубиной, очень трудно определить аналитически. Поэтому, не вдаваясь в подробности типа структуры и ее параметров, для обнаружения структурных изменений использовали обычную растровую электронную микроскопию РЭМ-2000.

Были проведены экспериментальные исследования концентрационного распределения атома железа, имплантированного в кремний с энергией $E_0=40\text{keV}$, с дозой излучения в диапазоне $10^{15} \div 10^{17}$ ионов/ cm^2 . В качестве исходного материала использовался кремний с удельным сопротивлением $\rho=10 \text{Om}\cdot\text{sm}$ в марки KDB. Исследования проводились с использованием методов вторичной ионной масс-спектрометрии, обратного рассеяния Резерфорда и электронной Оже – микроскопии.

При имплантировании атомов железа с дозой 10^{15} ион/ cm^2 , на поверхности образца будет 83% кремния, 15% кислорода и 2% железа за счет атомных единиц. В диапазоне чувствительности метода железо наблюдается

на глубине до 600 Å. На глубине 400 Å, когда количество излучения составляло 10^{17} ион/см², пропорции элементов были следующими: кремний 76%, кислород 18% и железо 6% за счет атомных единиц. На глубине 400 Å, когда количество излучения составляло 10^{17} ион/см², пропорции элементов были следующими: Si-82%, O-3% и Fe-15% в расчете на атомные единицы. Температурный нагрев оказывает значительное влияние на процентное содержание элементов. Например, для легированных образцов с дозой облучения 10^{16} ион/см² максимум распределения смещается на глубину 800 Å.

На рисунке 1 приведены результаты ROP спектры ионов He⁺ в монокристалле Si, легированном ионами Fe с энергией 40 кэВ и излучением 10^{15} - 10^{17} ион/см². Как видно из рисунка 1, Пиковая характеристика Fe проявляется в спектре при дозе $D \approx 10^{15}$ ион/см². Одновременно изучалось кристаллическое строение поверхности и электрофизические свойства ионно-легированных слоев. Результаты эксперимента показали, что при $D \leq 10^{15}$ ион/см² еще не наблюдается значительного расширения поверхностных слоев у поверхности, концентрация электрофильных атомов Fe не превышает $\sim 5 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Увеличение дозы до $5 \cdot 10^{15}$ ион/см² практически не приводит к увеличению концентрации электроактивных атомов Fe. На поверхности, близкой к поверхности, будет частичный беспорядок, пик обратного рассеяния Fe будет более выраженным и сильным.

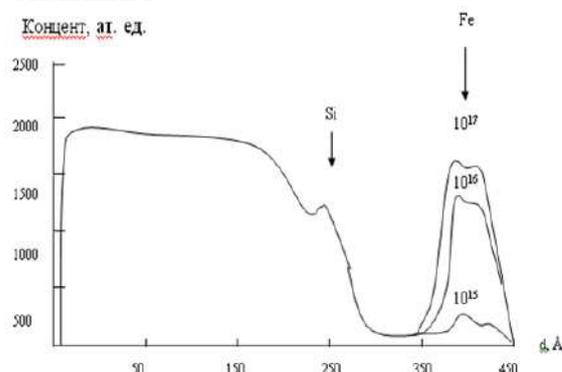


Рис.1. ROP спектры ионов He⁺ в монокристалле Si, легированном ионами Fe с энергией 40 кэВ и излучением 10^{15} - 10^{17} ион/см²

При величине излучения $D \approx 10^{16}$ ион/см² происходит аморфизация поверхностного слоя вблизи поверхности и значительное увеличение пика Fe, кластерные фазы Fe+si начинают появляться в определенных местах слоя с ионным легированием. Эти изменения происходят до количестве $(8 \div 10) \cdot 10^{16}$ ион/см². Последующее увеличение количества не приводит к значительному изменению относительной интенсивности пиков Si и Fe. Следовательно, за количество насыщения можно принять количеству $D \approx 10^{17}$ ион/см². В приведенном выше случае наибольшая концентрация электроактивных атомов достигла до $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Представляет интерес распределение атомов металла по глубине в Si в зависимости от количества излучения. При средних дозах облучения ($D = 10^{15} \div 10^{16}$ см⁻²) профиль распределения имеет очень сложную форму с несколькими максимумами. В качестве примера на рисунке 2 показана зависимость концентраций Fe и Si от глубины для количества ионов $D = 10^{16}$ ион/см².

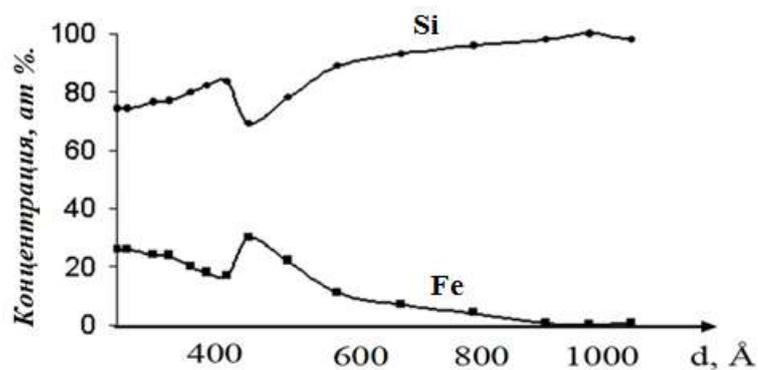


Рис.2. Профили распределения ионов Fe в Si с энергией 40 кэВ и излучением 10^{16} ион/см²

Как видно из рисунка 2, концентрация Fe в течение первого максимального периода достигнет до ($d=100\text{Å}$) 25÷30 ат.%. Основная масса имплантированных атомов находится на поверхности до глубины $d=300\text{Å}$. при $d=400\text{Å}$ с увеличением d концентрация железа резко уменьшается, а при глубине 800÷850 его ценность не превышает от 1÷2 ат.%. При высоких дозах облучения ($D>10^{17}$ ион/см²) вместо нескольких максимумов возникает один максимум, и концентрация железа на поверхности резко снижается. Последнее обстоятельство объясняется увеличением скорости рассеяния поверхностных атомов. Распределение Fe в $D\approx 10^{17}$ ион/см² имеет Гауссовскую форму, с максимальной поверхностью, образующейся в слоях $d\approx 400\div 450\text{Å}$. Содержание железа в максимуме $\sim 30\div 35$ ат.%. Дальнейшее увеличение ионных доз приводит к смещению максимума к поверхности и его расширению. Это обусловлено как интенсивным опылением поверхностных слоев, так и увеличением плотности их приплоскостных слоев за счет образования силицидов металлов. При этом концентрация железа в широкой максимальной области будет равно к 35÷40 ат.%. В этих слоях в основном образуются соединения типа FeSi_2 .

Другой вид наблюдается при нагревании легированных образцов с высоким содержанием ионов ($D>10^{16}$ ион/см²). На рисунке 3 показана зависимость $\frac{C_{\text{Fe}}(d)}{C_{\text{Fe}}(0)}$, легированного ионами Fe^+ при $D=10^{16}$ ион/см², от $C_{\text{Fe}}(d)$, полученного после нагревания при различных температурах.

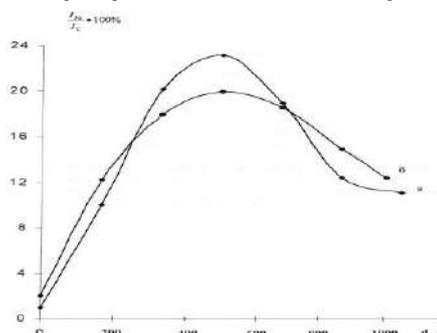


Рисунок 3. Профили распределения Fe в Si при имплантации с энергией 40 кэВ и объемом 10^{17} ион/см². а-без размягчения; б-после нагревания в температуры 1200°C

Основные изменения состава и структуры легирующего слоя при нагревании происходят в течение 25÷30 минут. Термическая обработка, проведенная специальной методикой в диапазоне температур в диапазоне $T=600\div 1200^{\circ}\text{C}$, показала, что при температуре 600°C происходит значительная активация атомов железа, о чем можно судить по увеличению поверхностного сопротивления образцов. При изотермическом нагреве эффективность имплантации увеличивается с увеличением количества имплантата, независимо от температуры.

Из этого видно, что в спектре начинает появляться характерный для Fe пик дозы $D\approx 10^{15}$ ион/см². Одновременно с этим изучалось кристаллическое строение поверхности и электрофизические свойства ионно-легируемых слоев. Результаты этих экспериментов показали, что при $D \leq 10^{15}$ ион/см² еще не проявляется беспорядок в поверхностных слоях, концентрация электроактивных атомов Fe составляет $\sim 5 \cdot 10^{13}$ см⁻³.

Проведены эксперименты по исследованию концентрационных распределений имплантированных атомов железа в кремнии с энергией $E_0=40$ keV, изменяющей количество излучения в интервале $10^{15}\div 10^{17}$ ион/см². В качестве исходного материала использовался кремний типа KDB с удельным сопротивлением $\rho=10$ Ом·см. Исследования показали, что вторичный Ион масс-спектрокопия, дифракция с быстрым электронным отталкиванием, было проведено с использованием методов обратного рассеяния Резерфорда, ВИМС и электронной Оже-микроскопии.

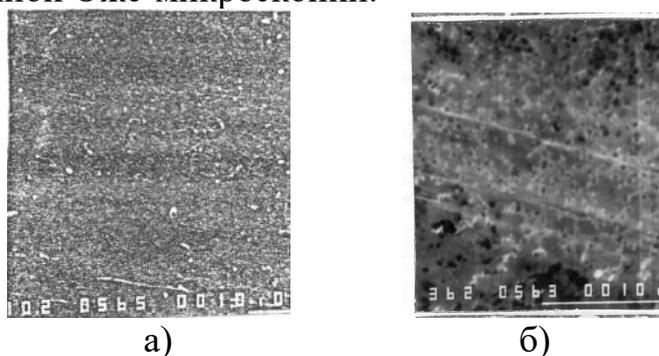


Рис.4 представлены электронно-микроскопические изображения поверхности чистого кремния (а) и поверхности ионного легирования Fe+ (б)

Как видно из рисунка 4, в случае чистого кремния электронное изображение выглядит целостным и однородным, поскольку образцы были мерцающий и отполированы (4.a.- рисунок). После ионного легирования, в зависимости от дозы облучения и типа ионов, внешний вид электронного изображения сильно меняется. Изображение переходит от гладкой поверхности к негладкой поверхности (4.b.рисунок).

Некоторые поля обрамления, характерные для монокристаллов на снимке при температуре выше 800°C элементный анализ методом электронной Оже – спектроскопии показал, что они состоят в основном из атомов Si и Fe и частично из кислорода. Амплитудное положение пиков Оже кремния и железа позволяет подтвердить, что эти области являются силицидами типа FeSi_2 .

Точно такие же проявления наблюдаются в случае присутствия Fe с ионами Fe при дозе излучения 10^{16} ионов/ см^2 , при этом обрاملенные области появляются при температуре 800°C и выше (рис.5).

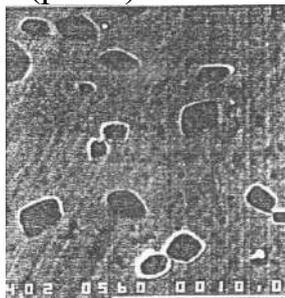


Рис.5. Электронно-микроскопическое изображение облученной поверхности с ионами Fe в количестве 10^{16} ионов/ см^2 после термической обработки при 800°C

Сложные поверхностные процессы зависят от типа, температуры и дозировки легирующих включений. Совершенно иные результаты получаются при легировании образцов кремния в больших количествах. На рисунке 6 показаны электронные изображения поверхности кремния, легированного ионами Fe в количестве 10^{17} ионов/ см^2 , после нагрева до температуры 800°C .

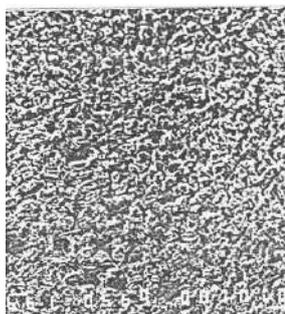


Рис.6. Электронно-микроскопическое изображение поверхности, легированной ионами Fe в количестве излучения 10^{17} ионов/ см^2 , после термического нагрева 800°C

Анализ полученных результатов показывает, что как на поверхности образца, так и на глубине максимум распределения железа в процессе ионной имплантации изменяется в основном за счет изменения содержания и концентрации кислорода. Поглощение ионов железа кремнием в основном вытесняет кислород. Ионное легирование оказывает сильное влияние на структуру поверхности в зависимости от дозы и энергии ионов. После пайки поверхность остается гладкой. На эту конструкцию сильно влияет температурный нагрев. При температуре выше 800°C образуются некоторые обрاملенные области, характерные для монокристалла.

Структурные изменения зависят от количества излучения и температуры нагрева. Например, для железа с величиной излучения 10^{17} ион/ см^2 при температуре 800°C на поверхности образуется слой в виде монокристалла с многочисленными дефектами. Дальнейшее повышение температуры до 1100°C приводит к образованию на поверхности аморфного слоя.

В четвертой главе «Металлографические и электрофизические свойства тонких ионно-имплантированных слоев с атомами кобальта на

поверхности кремния» представлены результаты экспериментальных исследований по определению концентрационных распределений диффузии атомов Со, имплантированных в кремний, с изменением количества излучения в пределах $10^{15} \div 10^{17} \text{см}^{-2}$. Исследования проводились с использованием методов ВИМС, РОР и ОЭС в сочетании с ионной очисткой. В зависимости от количества и энергии излучения ионная имплантация приводит к значительному изменению состава, структуры и свойств полупроводниковых материалов. Монокристалл кремния, легированный Ионом Со с энергией 20-50 кэВ, представляет особый интерес, поскольку при низких уровнях излучения ($D \leq 10^{15} \text{см}^{-2}$) могут образовываться высококонцентрированные электроактивные центры, которые не создаются методом термической диффузии; при высоких дозах ионов образуется силицид металла с новыми физическими свойствами. Оже-профили образца показаны на рисунке 7, а режимы роста силицидов и результаты анализа – в таблице 1. Результаты ОЭС-анализа режима роста, Стехиометрии и морфологии поверхностного сопротивления слоев CoSi_2/Si (100)

Таблица 1

Обр азец №	Основа Базовый тип	Å	Тип эпитаксии	$T_s, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{отл}}, \text{min}$	Скорос ть оседания,	$I_{\text{Co}}/I_{\text{Si}}$	$I_{\text{Si}}/I_{\text{Si}}$ i П	θ	$R_s, \text{MkO м}\cdot\text{см}$
1	KDB-7,5	105 105	РЭ	633 660	—	2 2	0,52	0,93	0,43	18
2	KDB -7,5	210	ТФЭ	575	5	2	0,47	0,88	0,87	25
3	KEF-4,5	210	ТФЭ	610	7	2	0,54	0,87	0,83	25
4	KEF-4,5	105 105	РЭ РЭ	580 562	—	2 2	0,89	0,78	0,95	8
5	KDB -12	210	ТФЭ	630	7	2	0,65	0,94	0,29	23

Анализ слоев, выращенных в разных стилях, показывает, что морфология и стехиометрия слоев критически зависят от условий выращивания. CoSi_2/Si слои можно разделить на три основных типа с точки зрения морфологии:

- 1) интегрированные слои CoSi_2 ;
- 2) микроскопические перфорированные занавеси;
- 3) остроугообразные занавеси.

Стехиометрия CoSi_2 делится на две фазы по дифференциации:

- 1) ($\text{CoSi}_2\text{-Si}$) обогащенный кремнием CoSi_2 ;
- 2) ($\text{CoSi}_2\text{-Co}$) обогащенный кобальтом CoSi_2 ;

Изученные связи между морфологией, стехиометрией и условиями роста структур CoSi_2/Si имеют большое значение для создания инструментальных структур на основе данных эпитаксиальных складок. В большинстве случаев вопрос о получении максимальных обменных слоев выдвигается вперед, но в ряде применений представляет интерес образование пористых слоев в субмикронных измерениях с контролируемыми морфологическими

характеристиками. Предложен способ изготовления транзистора с абсорбирующей базой, в котором роль отверстий на металлической основе играют естественные субмикронные поры в слое CoSi_2 . α – предложено выражение, связывающее коэффициент передачи тока транзистора с коэффициентом покрытия Θ из системы CoSi_2/Si ;

$$\alpha = \frac{\xi}{\gamma + \xi}, \quad (1)$$

в этом,

$$\gamma = \frac{1 - \theta}{\theta}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \kappa T / e \Delta_0 [\exp(e \Delta_0 / kT) - 1] \quad (3)$$

При этом Δ_0 – изменение величины барьера Шоттки в центре отверстия ($\Delta_0 = f(x)$; x – средний диаметр отверстий).

Таким образом, изменяя условия роста слоя CoSi_2 , можно будет контролировать величины x и Θ и, следовательно, коэффициент передачи тока α . Стехиометрия завес CoSi_2 влияет на электрофизические свойства, включая высоту барьера Шоттке и удельное сопротивление.

Следует отметить, что формула (1) была получена на основе очень больших приближений, в частности, что при изменении стехиометрии не нарушаются объем и поверхностная плотность атомов, т.е. при нарушении стехиометрии атомы одного типа обмениваются в узлах кристаллической решетки с другими, не учитывается появление атомов на пересечении узлов. Например, в образцах А и D формула (1) дает явно уменьшенные значения коэффициента покрытия. С другой стороны, еще более низкие показатели: h_{CoSi_2} – толщина слоя кобальта, при котором основание оседает на основание; T_s – температура основания при эпитаксии. $t_{\text{омж}}$ – время размягчения во время ТФЭ. Размер образца d выборки подтверждается данными ТФЭ. В дифракционном представлении наблюдались рефлексы, соответствующие восстановленной поверхности Si (100)2×1, а также рефлексы с монокристаллической поверхности CoSi_2 , что указывает на большую объемную площадь основания кремния, не покрытую силицидным слоем. Таким образом, формула (1) позволяет качественно анализировать полученные коэффициенты покрытия по различным режимам роста.

Оже-распределения (рис.7) свидетельствуют о том, что при определенных условиях роста на поверхности силицида кобальта образуется тонкий слой чистого кремния. Причиной этого эффекта может быть либо диффузия атомов кобальта от поверхности к глубине образца, либо диффузия атомов кремния от основания к поверхности. Первый механизм кажется более надежным. В любом случае образование слоя кремния на поверхности силицида энергетически целесообразно, поскольку свободная поверхностная энергия Si относительно меньше, чем у CoSi_2 . Образование слоя чистого кремния в CoSi_2 может оказать благотворное влияние на производство транзисторов на металлической основе, где необходимо выращивать слой

эпитаксиального кремния поверх структуры CoSi_2/Si . В этом случае было обнаружено, что присутствие тонкого буферного слоя кремния на поверхности CoSi_2 улучшает кристаллическое совершенство эпитаксиального слоя кремния. Как видно из профилей на рисунке 5, поверхностный слой кремния образуется только при определенных условиях роста. Таким образом, есть возможность контролировать этот процесс.

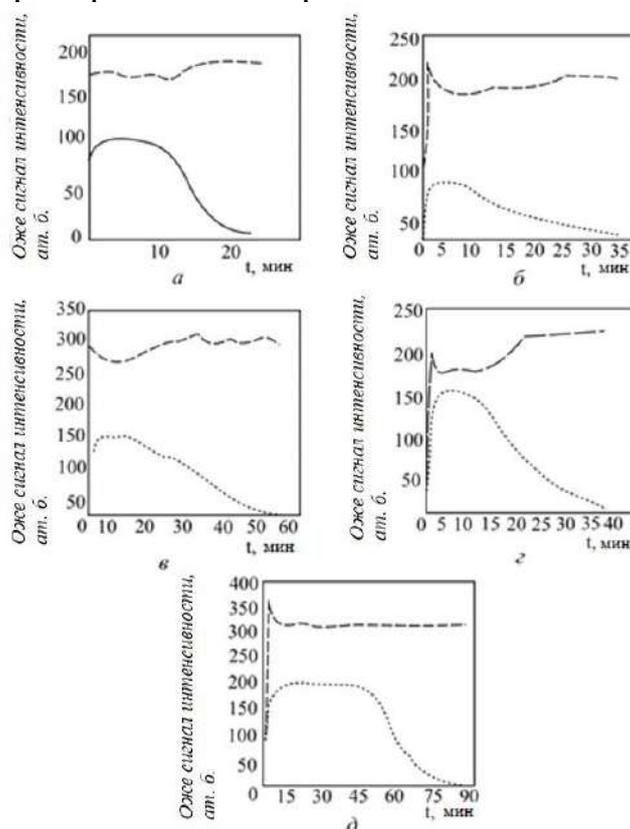


Рис.7. CoSi_2/Si режим роста и Оже - распределения образцов (цифры 1-5 образцов в таблице соответствуют Оје-распределениям на рисунке В)

Измерения поверхностного сопротивления показали, что сопротивление слоев CoSi_2 , выращенных при $T > 600^\circ\text{C}$ (Образец 4), приводит к трехкратному снижению сопротивления. Данные OES показывают, что в этих условиях образуется $\text{CoSi}_2\text{-CoSi}_2\text{-Co}$, обогащенный кобальтом. Возможность образования $\text{CoSi}_2\text{-Co}$ при пониженной температуре реакции также была показана в работе. Аномально низкое значение сопротивления CoSi_2 указывает на то, что электрические свойства фазы $\text{CoSi}_2\text{-Co}$ значительно отличаются от CoSi_2 и $\text{CoSi}_2\text{-Co}$.

При нагревании образцов, легированных в дозе 10^{15} ат/см², наблюдается активация при температуре $T = 750^\circ\text{C}$, концентрация электроактивного атома кобальта в кремнии увеличивается до $(2-5) \cdot 10^{15}$ см⁻³, что в 4-5 раз больше, чем при диффузионном легировании. Температура нагрева выше 1200°C приводила к резкому снижению концентрации электроактивных входов. При температурах выше 800°C на поверхности образуются некоторые граненые области, характерные для монокристалла. Структурные изменения наблюдаются в зависимости от количества излучения и температуры нагрева. Например, для имплантации железа с дозой облучения 10^{17} ат/см² после

нагрева до температуры 800 °С образуется слой монокристаллической формы с большим количеством дефектов на поверхности. Повышение температуры еще на 1100 °С приводит к образованию на поверхности аморфного слоя.

Другой вид наблюдается на рисунке 8. Показано обратное рассеяние ионов He^+ из имплантированного монокристалла $\text{Si}(111)$ ионами Co^+ в количестве $10^{15} \div 10^{17}$ ионов/ см^2 с энергией 40 КэВ. Результаты эксперимента РОР-спектры представлены ниже в виде. Пик, специфичный для Co , начинает проявляться в количестве $D \approx 10^{15}$ ионов/ см^2 , кобальт углублен, максимум распределения находится на расстоянии около 120 Нм, что согласуется с данными, полученными с помощью ВИМС. С увеличением количества увеличивается пик, соответствующий рассеянию ионов гелия в кобальте, а также изменяется форма спектра на входной глубине проникновения (уменьшается выход рассеяния в матрице).

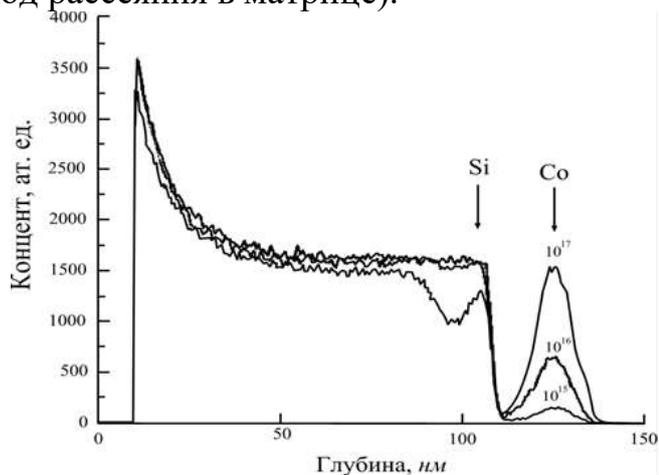


Рис.8. Спектр РОР ионов He^+ в имплантированном монокристалле Si с дозой ионов Co^+ до 10^{15} - 10^{17} ионов/ см^2 при энергии 40 кэВ

После 30 минут термического нагрева при температуре 1000 °С профиль распределения кобальта значительно сужается, а концентрация в распределительном центре увеличивается. При этом концентрация кобальта в широком максимальном поле составляла $30 \div 35$ ат%. Соединения типа CoSi_2 образуются в основном в этих слоях. Однако для кремния резкое уменьшение спектра указывает на значительный нагрев радиационных дефектов в кремнии. Небольшие пики видны в спектре кремния после того, как все спектры были нагреты это кислород. Вакуум был недостаточно хорош во время термообработки, что привело к образованию оксида кремния SiO_2 в образцах.

На рисунке 9 показаны профили распределения для тока 10 мкА, которые мы видели в экспериментальном спектре, достаточном для самовсасывания тока. Профили образцов также показаны здесь, но очень ясно видно, что после нагревания с температурой 1000 °С образовался слой дисилицида кобальта.

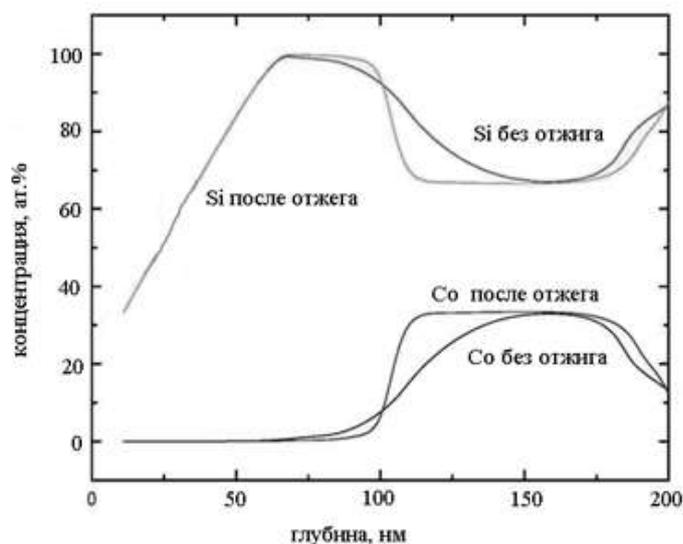
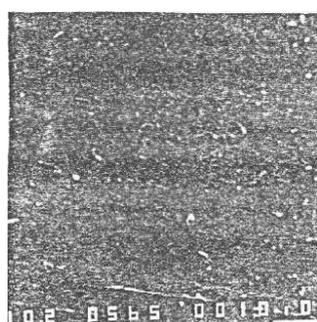


Рисунок 9 . Профили распределения Co до и после нагрева при энергии 40 КэВ и дозе 10^{17} ионов/см² в Si

Кристаллическая структура поверхности и электрофизические свойства ионно-легированных слоев изучались совместно. На 9-рисунке показаны электронные проявления, полученные с поверхности Si до ионного легирования и после ионного легирования, а также после термической обработки при различных температурах.

Одновременно исследовались кристаллическое строение и электрофизические свойства ионно-легированных слоев. На 10-рисунке показаны электронные снимки, сделанные с поверхности Si до и после ионного легирования, а также после термической обработки при различных температурах.



а)



б)

Рис.10. Электронно-микроскопические изображения чистого кремния (а) и ионно-легированных поверхностей Co^+ (б)

Как видно на рисунке, в состоянии чистого кремния электронное изображение выглядит целостным и однородным, поскольку образцы были мерцающий и отполированы (10.а.-рисунок). После ионного легирования, в зависимости от дозы облучения и внутри ионов, внешний вид переходит от гладкой поверхности к тусклой или неглазированной 10.б.-rasm. При малых значениях дозы облучения и при термическом смягчении, в случае деления Co до 800 °С существенных изменений в электронном снимке не происходит. При

температуре выше 800 °С на снимке наблюдаются некоторые обрамленные области, характерные для монокристаллов.

Элементный анализ этих обрамлений методом электронной Оже-спектроскопии показал, что они состоят в основном из атомов Si и Co и частично из кислорода. Значения амплитуды пиков Оже кремния и кобальта позволяют утверждать, что эти области являются силицидами типа CoSi_2 .

В образцах кремния, легированных в высоких дозах, получаются совершенно разные результаты. На рисунке 11 показаны электрические снимки, сделанные после нагрева поверхности кремния, легированного ионами Co в дозе 10^{17} ионов/см², при температуре 950 °С. Как видно из рисунка, обрамленные области выглядят так, как будто они присоединяясь, образуя единый слой в виде монокристалла с многочисленными дефектами.



Рис.11. Микрофотоснимок поверхности после термического нагрева Кремниевой поверхности, легированной ионами Co^+ в количестве 10^{17} ионов/см² при градусы 950 °С

Повышение температуры нагрева до 1100 °С приводит к значительному изменению состояния поверхности. Электронный образ переходит от “эпитаксиального” к аморфной поверхности (Рис. 12).

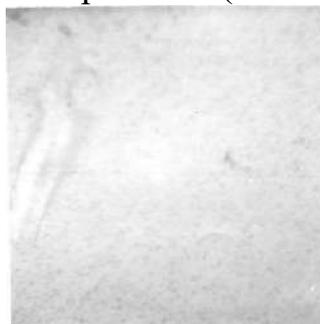


Рис.12. микрофотография поверхности кремния, легированного ионами Co^+ в количестве 10^{17} ионов/см², сделанная после нагрева до температуры 1100 °С

Для кобальта с дозой облучения 10^{17} ионов/см² после нагревания выше 800 °С на поверхности образуется слой в виде монокристалла с многочисленными дефектами в структурных изменениях в зависимости от количества облучения и температуры размягчения. Повышение температуры до 1100 °С приводит к образованию на поверхности аморфного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые была создана технология формирования силицидных слоев в полях, близких к поверхности кремния, путем имплантации ионов Fe и Co с

энергией 40 КэВ, дозами в поле $10^{15} \div 10^{17} \text{см}^{-2}$, образования тонких слоев атомов железа и кобальта шириной 100 \AA и термической обработки при температурах выше $800 \text{ }^\circ\text{C}$ после имплантации;

2. Установлено, что профили распределения легированных входных атомов во всех изученных образцах имеют гауссовскую форму. Максимальная глубина распределения зависит от количества излучения и энергии ионов. Увеличение концентрации приводит к снижению R_p до 395 \AA . Показано влияние термического нагрева конструкций на профили легирования входных данных. В отличие от элементов III и V групп, после термической обработки поверхностная концентрация элементов переходных групп не увеличивается, а уменьшается. Значительная диффузия начинается при температурах выше $600 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом смещение максимума в сторону глубины образца происходит по законам диффузии.

3. Определены оптимальные условия получения тонкого слоя входных атомов Fe и Co методом ионной имплантации в областях, близких к поверхности кремния. Было обнаружено, что при нагревании легированных образцов с дозой 10^{15} ионов/ см^2 активация происходит при температуре $650 \text{ }^\circ\text{C}$. При термообработке при $T=750 \text{ }^\circ\text{C}$ концентрация электроактивных атомов кобальта в Si увеличивается до $(2 \div 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что в $4 \div 5$ раз выше, чем при диффузионном легировании.

4. При температурах выше $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ электроактивный вход приводит к резкому снижению концентрации атомов.

5. Установлено, что при температуре нагрева выше $800 \text{ }^\circ\text{C}$ на неровной поверхности после легирования ионно-бомбардирующего сплава образуются граненые участки, характерные для монокристаллов.

6. Установлено, что структурные изменения зависят от количества излучения и температуры нагрева. Например, для железа с дозой облучения 10^{17} ионов/ см^2 после нагрева при температуре $800 \text{ }^\circ\text{C}$ на поверхности образовывался слой в виде монокристалла с большим количеством дефектов, а при дальнейшем повышении температуры до $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ было обнаружено, что на поверхности образуется аморфный слой.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELEC-
TRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

**SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS
AND MICROELECTRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

SAYFULLOYEV SHOHRUH AMIN O'G'LI

**STUDY OF THE FORMATION MECHANISMS OF FeSi₂ AND CoSi₂
SILICIDES ON SILICON OBTAINED BY IONIC DOPING**

01.04.10-Physics of semiconductors

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT-2023

The theme of the doctoral dissertation (PhD) registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2019.2.PhD/FM381.

Dissertation has been prepared at Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation is posted in three (Uzbek, Russian, English) languages on the website of the Scientific Council at www.ispm.uz and on the website of «ZiyoNet» information-educational portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor: Egamberdiyev Bahrom Egamberdiyevich
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents: Mamadalimov Abdugofur Teshaboyevich
doctor of physical and mathematical sciences, professor.
Abdurakhmanov Khakhor Pattakhovich
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Leading organization: Namangan engineering-construction institute

The dissertation will be defended on 27 05 2023 at 11⁰⁰ hours at the meeting of the Scientific Council Dsc.03/12.30.2019.FM/T.01.12 at the Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics of the National University of Uzbekistan at the address: 100057, Tashkent, st. Yangi Almazar, house 20. Tel./Fax: (+99871) 248-79-91 / (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.

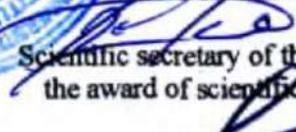
The doctoral dissertation can be looked through in the Information Resource Center of the Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (registered under No. _____), at the address: 100057, Uzbekistan, Tashkent, st. Yangi Almazar, house 20. Tel./Fax: (+99871) 248-79-91 / (+99871) 248-79-92

The abstract of the dissertation was sent out "13" "05" 2023
(distribution protocol No. 48 dated "13" "05" 2023)




Sh.B. Utamuradova

Chairman of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor


J.J. Khamdamov
Scientific secretary of the Scientific Council for the award of scientific degrees, (PhD), Senior Researcher


N.A. Turgunov
Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council for the awarding of academic degrees, Doctor of Physics and Mathematics, associate Professor.

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The purpose of the research: to establish the mechanisms of formation of FeSi₂ and CoSi₂ thin layer silicides in silicon using ion alloying.

The object of research is thin layers of transition elements formed near the silicon surface by ion implantation.

The scientific novelty of the research

- for the first time, by implanting Fe and Co ions with an energy of 40 KeV and doses in the range of $10^{15} \div 10^{17} \text{ sm}^{-2}$ in areas near the surface of silicon, forming thin layers of iron and cobalt atoms with a thickness of 100 Å and after implantation at a temperature of 800 °C the technology of forming silicide layers by thermal treatment at high temperatures has been created;

- when alloying Si single crystals doped by ion implantation with Fe ions with an energy of 40 keV and a radiation dose of $10^{15} \div 10^{17} \text{ ion/sm}^2$, the concentration of Fe atoms at a depth of 350-450 Å from the surface of Si reaches a high value, 25÷30 at.% of the surface concentration its formation was determined based on the RTS spectrum analysis;

- It was determined that when alloying Si samples with Fe ions having a radiation dose of $10^{15} \div 10^{17} \text{ ions/sm}^2$, the ion implantation gap is formed in a layer with a width of $d \approx 100 \text{ Å}$ and that this layer mainly consists of compounds of the FeSi₂ type;

- CoSi₂/Si thin layers are formed when silicon implanted with Co⁺ ions is heated at temperatures above 800 °C;

- silicon samples with large doses ($10^{15} \div 10^{17} \text{ ions/sm}^2$) of Co⁺ ions It has been determined that CoSi₂ silicide layers are formed by thermal treatment at temperatures above 950 °C during ion-implantation.

Implementation of research results Based on the scientific results obtained on the mechanisms of the formation of new surface structures observed as a result of short-term thermal heating of ion-implanted samples of silicon:

To determine the mechanisms of obtaining semiconductor materials with controlled nanoscale structure with stable electrophysical parameters in cobalt ion-implanted silicon, obtaining an energy diagram reflecting the actual electronic structure of a cobalt silicon thin film, determining the energetic characteristics of a cobalt silicon thin film. In the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. OT-F3-13 "Mechanisms of formation of silicon-silicide-metal free multilayer nanofilm structures and their electronic and crystal structures" practical project "CoSi₂ obtained using various technologies" used to determine the main energetic properties of films" (reference No. 2/1255-2798 of the FA of the Republic of Uzbekistan dated November 7, 2022). The scientific results made it possible to determine the mechanisms of obtaining semiconductor materials with a controlled nanoscale structure with stable electrophysical parameters.

The physical and chemical aspects and technology of alloying silicon with transition elements have been developed, the determination of the values of the

binding energies of Si 2p electrons of iron silicides, the practical application of the photoelectron spectroscopy method, the absorption of iron and cobalt atoms under the oxide layer at “FOTON” JSC used in electronic devices based on semi-conductor silicon produced (the “Ozeltexanoat” joint-stock company dated January 24, 2022 reference number 04-3/128). It is shown that the use of scientific results can be used to create sensitive electronic devices and structures, photosensitive devices, transistors, low resistance contacts.

The structure and volume of the dissertation, four chapters, a conclusion and a list of cited literature. The total volume of the dissertation is 112 pages, including 28 figures, as well as a list of references from 100 titles.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть, part I)

1. А. Эгамбердиев Б.Э., Сайфуллоев Ш.А., “Особенности диффузии в эпитаксиальной пленке CoSi_2 , выращенной на поверхности флюорита” // Semiconductor Physics and Microelectronics. 2019, Volume 1, Issue 2 С. 53-57. (01.00.00 №16).

2. A. Egamberdiyev B.E., Xamidjonov I.X., Mavlyanov A.Sh., Sayfulloyev Sh.A., “Effect of Annealing on the Crystal Structure of $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100)$ Formed By MBE, SSE and RE Epitaxy Techniques”// International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). October 2019. Volume-9 Issue-1, P. 4813-4818. (SJ2019:0.104) (№3 Scopus, Scopus CiteScore:0.17).

3. A. Egamberdiyev B.E., Mallayev A.C., Rakhmatov M., Ramazanov A., Sayfulloyev Sh.A., “The effect of annealing on the crystal structure of the surface of silicon doped with cobalt ions”// Journal of Critical Reviews. – 2020. Vol 7, Issue 3, P.307-311. (№3, Scopus CiteScore:0.6).

4. A. Egamberdiyev B.E., Nurmatov N.A., Akbarov A.A., Sayfulloyev Sh.A., “Study of mechanisms of formation of silicides of CoSi_2 on silicon surface by ion implantation”// Solid State Technology. – 2020. Volume: 63 Issue: 6 Publication P.9611-9626. (SJR:0.115) (№41, Scopus CiteScore:0.3).

5. A. Egamberdiyev B.E., Mallayev A.C., Rakhmatov M., Sayfulloyev Sh.A., “Study of the Iron Distribution Profile and the Influence of Annealing on the Structure Implanted in Silicon”// AIP Conference Proceeding. (SJR:0.189) (№3, Scopus CiteScore:0.8).

6. A. Egamberdiyev B.E., Rakhmatov M., Sayfulloyev Sh.A., “ The Electron-spectroscopic investigations of the epitaxial CoSi_2 films on silicon”// The scientific heritage (Budapest, Hungary).– 2021. VOL 1. No 64 (64) (2021) p.15-18. (№23 SJIF:5.78).

7. A. Egamberdiyev B.E., Mallayev A.S., Akbarov A.A., Sayfulloyev Sh.A. “The Effect of Annealing On The Crystal Structure of the Surface of Silicon Doped With Iron And Cobalt Ions” //Turkish Journal of Computer and Mathematics Education Vol.12 No.3(2021), p.3148-3155 (SJR:0.218)(№41, Scopus CiteScore:0.3)

II bo'lim (II часть; part II)

8 A. Egamberdiyev B. E. Bozorbayev I.I., Sayfulloyev Sh.A., Исследование свойств поверхностных и приповерхностных слоев кремния имплантированного элементами переходной группы. Qarshi davlat universitetida “Qayta tiklanuvchi energiya manbalari va barqaror atrof muhit fizikasi” Respublika ilmiy-texnik anjumani. 2019 yil 24-25 aprel b.64-65.

9 A. Egamberdiyev B. E. Mallayev A.S., Sayfulloyev Sh.A., Создание детекторов ионизирующих излучений на основе эпитаксиальных

гетероструктур $\text{CaF}_2\text{-CoSi}_2\text{-Si}$. Qarshi davlat universitetida “Qayta tiklanuvchi energiya manbalari va barqaror atrof muhit fizikasi” Respublika ilmiy-texnik anjumani. 2019 yil 24-25 aprel b. 65-67.

10 A. Egamberdiyev B.E., Sayfulloyev Sh.A., Исследование профилей распределения ионно-легированных примесей с глубокими уровнями в кремнии. Qarshi davlat universitetida “Qayta tiklanuvchi energiya manbalari va barqaror atrof muhit fizikasi” Respublika ilmiy-texnik anjumani. 2019 yil 24-25 aprel B.63-64.

11 A. Egamberdiyev B.E., Sayfulloyev Sh.A., Изучение профиля распределения железа и влияние отжига на структуру, имплантированного в кремний. Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti. Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo'tkazgich materiallar xalqaro ilmiy anjumani. 2020 yil 9-10 Oktyabr B.408-412.

12 A. Egamberdiyev B. E. Mallayev A.S., Otamurodov G'.R. Sayfulloyev Sh.A., Issiqlik ta'sirida kremniy sirtining temir ionlari bilan birikmasidagi kristallik tuzilishi. Andijon davlat universiteti. Yarimutkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti. Zamonaviy mikroelektronikaning rivojlanishida fan, ta'lim va innovatsiya integratsiyasi Respublika ilmiy-uslubiy anjumani materiallari Akademik S.Z. Zaynabidinovning 75 yillik tavalludiga bag'ishlanadi. Andijon-2020 yil 24-25 dekabr B.116-118.

13 A. Egamberdiyev B. E. Mallayev A.S., Otamurodov G'.R. Sayfulloyev Sh.A., Study of the distribution profile of mechanisms gland with implantation method. Washington University in st. Louis Danforth Campus. “Innovation in the modern education system” International scientific-online Conference. Washington, USE 25th December 2020 p. 91-100.

14 A. Egamberdiyev B.E., Sayfulloyev Sh.A., Влияния отжига профилей распределения железа поверхности и при поверхности имплантированного в кремнии “Yosh olimlar va fizik talabalarning» I-Respublika ilmiy anjumani (YOFTRIA-I). 2021 yil 21 aprel. B.39-41.

Avtoreferat “O‘zMU xabarlari” jurnali taxririya-tida taxrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi (10.05.2023 yil).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturasida.
Shartli bosma tabog‘i: 3,25. Adadi 60. Buyurtma №44.
Guvohnoma reester №10-4434.
Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika
ilmiy-tadqiqot instituti bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh.,
Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy.

