

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA
UNIVERSITETI**

URAKOVA FERUZA ERKINOVNA

**MARGANES VA GERMANIY KIRISHMA ATOMLARI BILAN
LEGIRLANGAN KREMNIYNING MAGNIT XUSUSIYATLARI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA–MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2026

**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**

Urakova Feruza Erkinovna

Marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning
magnit xususiyatlari 3

Уракова Феруза Эркиновна

Магнитные свойства кремния легированного примесными атомами
марганца и германия..... 25

Urakova Feruza Erkinovna

Magnetic properties in silicon doped with impurity atoms of manganese and
germanium 49

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works..... 53

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA
UNIVERSITETI**

URAKOVA FERUZA ERKINOVNA

**MARGANES VA GERMANIY KIRISHMA ATOMLARI BILAN
LEGIRLANGAN KREMNIYNING MAGNIT XUSUSIYATLARI**

01.04.10 –Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA–MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2026

Dissertatsiya Islom karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.ispm.uz) va «ZiyoNet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziyounet.uz) joylashtirilgan.

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi. Jahonda ko‘plab olimlar va mutaxassislar tomonidan turli xil yarimo‘tkazgich materiallarining elektrofizik, fotoelektrik, optik va magnit xususiyatlari faol tadqiq qilinmoqda. Bu materiallarga kremniy va germaniy kabi elementar yarimo‘tkazgichlar hamda $A^{III}B^V$ va $A^{II}B^{VI}$ birikmali yarimo‘tkazgichlar, shuningdek, ko‘p qatlamli va ko‘p komponentli strukturalar kiradi. Bu xususiyatlarni, ayniqsa materiallarning magnit xususiyatlarini o‘rganishga qiziqish shundan iboratki, yarimo‘tkazgich asbobsozligida elektronlarning spinini boshqarish asosida tezkor va oson boshqariladigan qurilmalarni yaratishda muayyan istiqbolga ega. Magnit tizimlarni yarimo‘tkazgich mikroelektronikaga integratsiya qilish bo‘yicha olib borilayotgan tadqiqotlarning natijalarini amaliyotga tatbiq etish ham dolzarb muammolardan hisoblanadi. Magnit sezgir yarimo‘tkazgich materiallarda elektronlarning spinini oson boshqarish spin-elektron nanotranzistorlarni va ferromagnit-yarimo‘tkazgich tuzilishidagi gibrid materiallarning yupqa qatlamlarini olishga imkon beradi. Adabiyotlardan ma’lumki, magnit xususiyatlar atomlardagi elektronlarni d-orbita qobig‘idan s- yoki p-orbitalarga o‘tishi bilan bog‘liq. Yarimo‘tkazgich kremniy kristall panjarasiga d-guruh elementlarning kirishma atomlarini legirlash asosida materialning magnit xususiyatlarini o‘rganishga alohida e’tibor qaratilmoqda.

Jahonda kremniy sirtida va hajmida kirishma atomlarining nanoklasterlari hamda binar birikmalarini shakllantirish orqali yangi xususiyatli materiallarni olish, boshlang‘ich kremniyning fundamental parametrlarini maqsadli o‘zgartirish va olingan materiallarning fizik xossalarini boshqarishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu yo‘nalishda molekulyar-nurli epitaksiya va ion implantatsiyasi kabi qimmat zamonaviy texnologik qurilmalar hamda katta energiya sarfini talab qiladigan usullarni almashtiruvchi, kirishma atomlarining nanoo‘lchamli klasterlari va binar birikmalarini kremniy sirtida va hajmida gaz fazadan diffuzion legirlash usulida shakllantirish, ularning yetarlicha yuqori konsentratsiyasini ta’minlash hamda belgilangan element tarkibi va strukturaga ega materiallarni olish imkonini beruvchi diffuzion texnologiyalarni ishlab chiqish bo‘yicha tadqiqotlar ustuvor hisoblanmoqda. Shu bilan birga, kirishma atomlarining nanoklasterlari mavjud kremniyda kuzatiladigan yangi fizik hodisalarni chuqur o‘rganish, nanoklasterlar va binar birikmalarning fizik shakllanish sharoitlarini aniqlash hamda ularning elektrofizik parametrlarini boshqarish dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

O‘zbekiston Respublikasida so‘nggi yillarda yarimo‘tkazgich materiallarda kuzatilgan hodisalarning fizik mexanizmlarini ochib berish hamda ular asosida yaratilgan asboblardan elektronikaning turli sohalarida amaliyotda qo‘llashda ma’lum darajada ilmiy yutuqlarga erishilgan. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 19-martdagi “Fizika sohasidagi ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida” gi PQ-5032-son qarorida fizika sohasida ilmiy tadqiqot ishlarining natijalarini ishlab chiqish bilan uzluksiz aloqasining ko‘lamini kengaytirish, iqtisod sohalaridagi masalalarni hal

qilishga yo'naltirish, ilmiy tadqiqotlarni hamda innovatsion faoliyatning natijadorligi va amaliy ahamiyatini oshirish vazifalari qo'yilgan. Bu yo'nalishda yangi funksional imkoniyatlari mavjud, kam energiya talab etadigan yarimo'tkazgich asboblarni yaratish, sarf etiladigan energiyani tejashga hamda tannarxini kamaytirishga imkon beradi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2025-yil 22-yanvardagi "Elektrotexnika sanoatini rivojlantirishning yangi bosqichiga olib chiqish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi PQ-20-son¹ hamda 2021-yil 19-martdagi "Fizika sohasida ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-5032-son² shuningdek, 2023-yil 16-fevraldagi "Qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoychi texnologiyalarni jadal joriy etish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-57-son qarorlari³ hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarning ijrosini ta'minlashda ushbu dissertatsiya ishida olingan ilmiy natijalar muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur ilmiy-tadqiqot ishi O'zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlari bilan mos keladi va III. "Energetika, energiyani tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik" hamda zamonaviy elektronika, mikroelektronika va fotonika sohalariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Germaniya, Shveytsariya, AQSh, Kanada, Rossiya, Xitoy, Yaponiya va boshqa mamlakatlarning ilg'or ilmiy-tadqiqot markazlari va oliy ta'lim muassasalarida spintronika va magnitoelektronika sohalarida yuqori sezgir magnit datchiklarni yaratish uchun yarimo'tkazgich materiallar va strukturalarni ishlab chiqish hamda olish bo'yicha faol ilmiy tadqiqotlar olib borilgan.

John D. (AQSh), Limen Shen, Xi Zang, Gang Xiang (Xitoy), Jiafei Li (Singapur) va boshqa xorijiy olimlar magnit xossalari yarimo'tkazgichlarni tadqiq etish rivojiga katta hissa qo'shgan bo'lib, ular tomonidan Mn kirishma atomlari bilan legirlangan yupqa qatlamli SiGe namunalari xona haroratida ferromagnit xossalarga ega ekanligi va spintronika uchun datchiklar hamda qurilmalar yaratishda qo'llash mumkinligi ko'rsatib berilgan.

M.Yu. Melnikov, A.A. Shklyayev, A.V. Latyshev (Rossiya) kremniy sirtida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarni hosil bo'lishini gaz fazali epitaksiya usuli yordamida tadqiq qilganlar. Y.N. Parkhomenko va A.I. Belogoroxov (Rossiya) germaniy ionlarini ion implantatsiyasi usuli bilan kremniyda SiGe-nanoklasterlarini olishga erishganlar. Professor S.I. Rembeza (Rossiya) ilmiy ishlarida yarimo'tkazgichlarning kristall panjarasidagi kirishma atomlar va nuqsonlarning fizik xususiyatlarini elektron paramagnit rezonans va yadro magnit rezonans usullari asosida o'rganish natijalarini tizimlashtirgan va umumlashtirgan.

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2025-yil 22-yanvardagi "Elektrotexnika sanoatini rivojlantirishning yangi bosqichiga olib chiqish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi PQ-20-son qarori

² 2021-yil 19-martdagi "Fizika sohasida ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-5032-son qarori

³ 2023-yil 16-fevraldagi "Qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoychi texnologiyalarni jadal joriy etish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-57-son qarori

O'zbekiston Respublikasidagi taniqli akademiklaridan R.A. Muminov, M.S. Saidov, M.K. Bahodirxonov, S.Z. Zaynabidinov, A.T. Mamadalimov hamda olimlardan A.S. Saidov, Sh.B. Utamuradova, Q.P. Abdurahmonov, X.S. Daliyev va boshqalarning ilmiy tadqiqot ishlarida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarga ega kremniy magnit xususiyatlarini o'rganishda ideal material ekanligi hamda ularni magnitoelektronikada qo'llaniladigan asboblari va datchiklarni yaratishdagi imkoniyatlari ko'rsatib berilgan.

Ilmiy adabiyotlarning tahlili asosida germaniy va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xossalari o'rganish bo'yicha tadqiqotlar olib borilganiga qaramay, ularning strukturaviy, elektrofizik hamda ferromagnit holatlarining fizik mexanizmlari to'liq o'rganilmagan.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya Toshkent davlat texnika universitetining "Raqamli elektronika va mikroelektronika" kafedrasining ilmiy-tadqiqot ishlarining rejasiga kiritilgan bo'lib, OT-F2-55-raqamli "Kirishma atomlar nanoklasterlarini shakllantirish asosida hajmiy tuzilmaga ega kremniy olishning ilmiy asoslarini ishlab chiqish va ular asosida yangi funksional imkoniyatlarga ega nanomateriallarning yangi sinfini yaratish" mavzusidagi fundamental davlat granti dasturi doirasida, shuningdek, AL-202102215 raqamli "Kremniydagi ferromagnit nanoklasterlardan foydalangan holda aylanma o'sma hujayralarini ushlash uchun mikrofluidik kanallarni integrallashgan tizimi" (2022-2024-yillar) mavzusidagi xalqaro fundamental ilmiy loyiha dasturi doirasida Istanbul texnika universiteti (Turkiya) bilan hamkorlikda amalga oshirilgan tadqiqotlar asosida bajarildi.

Tadqiqotning maqsadi marganes va germaniy kirishma atomlarining nanoklasterlariga ega kremniy, shuningdek, $\text{Si}(\text{Mn}, \text{Ge})$ binar birikmalar va $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalarning magnit xususiyatlarini o'rganish hamda olingan namunalarning asosiy magnit parametrlarini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

marganes va germaniy kirishma atomlarini kremniyga kiritishning ikki bosqichli past haroratli diffuzion legirlash texnologiyasini takomillashtirish. Kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida marganes kirishma atomlari nanoklasterlarini hamda germaniy kirishma atomlarining $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarini hosil bo'lishining termodinamik shartlari hamda optimal texnologik bosqichlarini aniqlash;

diffuzion legirlash bilan marganes va germaniy kirishma atomlari kiritilgan kremniyning element tarkibini, kirishma atomlarining kremniydagi optimal konsentratsiyasini hamda kremniyda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar va $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalarni hosil bo'lishining termodinamik shartlarini aniqlash;

marganes va germaniy kirishma atomlari hosil qilgan nanoklasterlar hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar va $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalar mavjud bo'lgan kremniyning elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlarini tadqiq etish hamda marganes va germaniy kirishma atomlarining konsentratsiyasini o'zgartirish hisobiga bu xususiyatlarni boshqarish imkoniyatlarini ko'rsatish;

marganes va germaniy kirishma atomlari hosil qilgan nanoklasterli hamda

qo'shimcha marganes kirishma atomlari kiritilgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar va $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalar mavjud kremniyning magnit xususiyatlarini keng harorat oralig'ida o'rganish. Olingan namunalarning asosiy magnit parametrlarini harorat va qo'yilgan magnit maydon qiymatiga bog'liqligini aniqlash;

kremniyda marganes va germaniy kirishma atomlarining nanoklasterlarini hosil bo'lishining fizik mexanizmlarini tushuntirish hamda olingan materiallarning elektrofizik parametrlarini va ferromagnit xususiyatlarini boshqarish imkoniyatlarini ko'rsatish;

$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalari va $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalari mavjud kremniy namunasiga qo'shimcha marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy asosida spinoelektronikada sezgir magnit datchiklarni yaratish imkoniyatlarini taklif etish.

Tadqiqotning obyekti Choxralskiy usuli bilan o'stirilgan, p-tur o'tkazuvchanlikka ega KDB-10 markali bor kirishma atomlari konsentratsiyasi $N_B \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ga va KDB-0,5 markali bor kirishma atomlarining konsentratsiyasi $N_B \approx 6,2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo'lgan boshlang'ich monokristall kremniy, shuningdek, Choxralskiy usuli bilan o'stirilgan, bor kirishma atomlari $N_B = 2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ga va germaniy kirishma atomlarining konsentratsiyasi $N_{\text{Ge}} = 6,3 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo'lgan kremniy, shuningdek, kirishma atomlar sifatida 99,99 % tozalikdagi germaniy (GES-1) va marganes elementlaridan iborat.

Tadqiqotning predmeti marganes va germaniy kirishma atomlarining nanoklasterlari hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmali monokristall kremniy namunalari qo'shimcha marganes kirishma atomlari bilan legirlab, keng harorat oralig'ida $T = 1,8 \text{ K}$ va $T = 300 \text{ K}$ aniqlangan manfiy qarshilik (R_h), magnit to'yinganlik (M_s), qoldiq magnitlanish (M_r) va koertsitiv kuch (H_c) dan iborat.

Tadqiqotning usullari. Dissertatsiya ishida SEM Jeol JSM-IT200LA markali skanerlovchi elektron mikroskop, FSM-1202 markali Furiye-spektrometr, VUP-5 markali vakuum qurilmasi, Xoll effekti va Van-der-Pau usulidagi o'lchashlarda Ecopia HMS-7000 markali qurilma, Shimadzu XRD-6100 rusumidagi rentgen mikroanaliz qurilmasi, FM-Nanoview 1000 rusumidagi magnit-kuch mikroskopi hamda boshqa zamonaviy usullar va o'lchov asboblaridan namunalarning element tarkibini ishonchli aniqlash, elektrofizik, fotoelektrik va optik parametrlarini keng harorat oralig'ida baholash hamda marganes va germaniy kirishma atomlarining kremniy sirtida va sirt oldi qatlamlardagi taqsimotini aniqlashda qo'llanildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bor marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalari va $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalari mavjud kremniyga qo'shimcha marganes kirishma atomlarini kiritib elektrofizik, fotoelektrik, optik va magnit xususiyatlar aniqlangan.

ilk bor marganes va germaniy kirishma atomlarini kremniyga diffuziya usuli bilan kiritish imkonini beruvchi past haroratli ikki bosqichli texnologiya ishlab chiqilgan bo'lib, kirishma atomlarining nanoklasterlari hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalari mavjud turli solishtirma qarshilik va o'tkazuvchanlik turiga ega kremniy olingan;

ilk bor marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarida ferromagnit xususiyatlar nafaqat past haroratlarda ($T_{Kr} = 30$ K), balki nisbatan yuqori haroratlarda ($T_{Kr} = 300$ K) ham kuzatilgan;

ilk bor marganes va germaniy kirishma atomlarining nanoklasterlari hamda Si<Mn,Ge> binar birikmalari mavjud monokristall kremniy namunalarining magnit parametrlari, magnit to'yinganlik (M_s), qoldiq magnitlanish (M_r) va koertsitiv kuch (H_c) qiymatlari $T = 1,8$ K va $T = 300$ K haroratlarda aniqlangan;

kremniy sirti va sirt oldi qatlamlarida hosil bo'lgan Ge_xSi_{1-x} binar birikmalardagi kremniy-germaniy atomlari orasidagi bog'lanish energiyasi, germaniy-germaniy va kremniy-kremniy atomlari orasidagi bog'lanish energiyasidan farq qilishi aniqlangan;

Ge_xSi_{1-x} binar birikmalari va $Ge_xSi_{1-x}-Si_2$ geterovarizon strukturalari mavjud kremniyga qo'shimcha ravishda marganes kirishma atomlari kiritilgan namunalar asosida magneto- va spinoelektronikada sezgir magnit datchiklarni yaratish imkoniyatlari ko'rsatib berilgan.

Tadqiqotlarning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

yaratilgan past haroratli ikki bosqichli diffuzion legirlash texnologiyasi marganes va germaniy kirishma atomlaridan iborat Si<Mn,Ge> geterovarizon strukturali magnit sezgir materialni olish imkonini bergan;

kremniy namunalarida hosil qilingan nanoklasterlar va geterovarizon strukturalar asosida yuqori sezgir magnit datchiklar va sensorlar, shuningdek, quyosh nurlanishining keng spektrini yutuvchi samaradorligi yuqori quyosh elementlarini yaratish imkoniyatlari ko'rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchiligi zamonaviy usullar va o'lchov asboblariidan foydalanib, olingan natijalarning ilmiy asoslanganligi, tajriba natijalarining nazariy hisoblar hamda boshqa mualliflarning ishlari bilan mosligi, olingan ma'lumotlarni fundamental yarimo'tkazgichlar fizikasi nuqtai nazaridan izohlanishi bilan ta'minlandi.

Tadqiqot natijalarini ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlarini o'rganishda xona haroratida ($T = 300$ K) Si<Mn,Ge> geterovarizon strukturali ferromagnit kremniy olindi, marganes kirishma atomlarining nanoklasterlari hamda Si<Mn,Ge> geterovarizon strukturalari mavjud kremniy namunalarining magnit parametrlari, magnit to'yinganlik (M_s), qoldiq magnitlanish (M_r) va koertsitiv kuch (H_c) aniqlandi.

Amaliy jihatdan marganes va germaniy kirishma atomlarining nanoklasterlarini hamda Si<Mn,Ge> birikmalarini kremniyning sirtida eroziyasiz olish imkonini beruvchi, ikki bosqichli past haroratli diffuzion texnologiya yaratildi. Bu marganes kirishma atomlarining magnit domenlarini maksimal konsentratsiyasi mavjud materialni olishga imkon berdi. Olingan tajriba natijalari asosida namunalarni spinoelektronikada va kuchli elektron qurilmalarda kalit sifatida qo'llash hamda magnit sezgir datchiklar va magnit xotira elementlarini yaratish imkoniyatlari ko'rsatib berildi.

Tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy qilinishi. Germaniy va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlari bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

Marganes va germaniy kirishma atomlarining diffuziya haroratini bosqichma-bosqich oshirishga asoslangan texnologiya asosida olingan natijalar "FOTON" AJning ishlab chiqarish jarayoniga joriy etilgan ("FOTON" AJ ning 2024-yil 4-dekabrda № 214-son ma'lumotnomasi). Natijada ishlab chiqilgan diffuzion texnologiyani qo'llash kremniyga kirishma atomlarini kiritish jarayonini takomillashtirish hamda zamonaviy diod va tranzistorlar ishlab chiqarishda optimal p-n o'tishlarning hosil bo'lish imkoniyatini bergan.

Marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalardagi magnit momentning o'zgarishini tavsiflovchi ilmiy natijalar Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetida OT-F2-37 raqamli "Gaz aralashmasini tovushdan tez oqimidan foydalanib metallarni eritish, g'ovak metallar olish va ularning fizik xossalarini tadqiq qilish" mavzusidagi fundamental loyihani bajarishda joriy etilgan (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2025-yil 13-oktyabrda 02/01-01-398-son ma'lumotnomasi). Mazkur ilmiy natijalardan foydalanish olingan materiallarning fizik xususiyatlarini hamda magnit maydon ta'sirida ferromagnit holatga o'tishidagi Kyuri haroratini aniqlash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishini bajarishda olingan ilmiy natijalar 9 ta xalqaro va 6 ta respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda ma'ruza va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Jami 25 ta ilmiy ish, jumladan, dissertatsiya mavzusi bo'yicha 8 ta maqola O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa va fan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda, shundan 4 ta maqola Scopus bazasida chop etilgan hamda marganes kirishma atomlarini kremniyga diffuziya qilish jarayonini EHM yordamida hisoblash bo'yicha 2 ta dasturiy ta'minotga guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 37 ta rasm va 7 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda, 116 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiya ishining kirish qismida, tadqiqot mavzusining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, tadqiqot fan va texnika rivojlanishining asosiy ustuvor yo'nalishlari bilan bog'liqligi ko'rsatilgan hamda ilmiy muammoning yechimini hal qilish holati aniqlangan, dissertatsiyaning maqsadi, vazifalari, obyektlari va tadqiqot usullari asoslangan, dissertatsiyaning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati, shuningdek, olingan ilmiy natijalarning amaliyotda qo'llash imkoniyatlari ko'rsatilgan. Kirish qismini yakunida dissertatsiya tadqiqotlarining natijalarini xalqaro va respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy konferensiyalarda ma'ruza va muhokama qilinganligi, chop etilgan maqolalar hamda ishning hajmi va tuzilishi haqidagi ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiya ishining **“Binar birikmalarning magnit xususiyatlari, kremniyda marganes va germaniy kirishma atomlarining holati”** nomli birinchi bobi adabiyotlar sharhiga bag‘ishlangan bo‘lib, dissertatsiya ishi yo‘nalishidagi mavjud ilmiy adabiyotlarning tahlili berilgan. Bob oxirida dissertatsiya ishining maqsad va vazifalari aniqlangan.

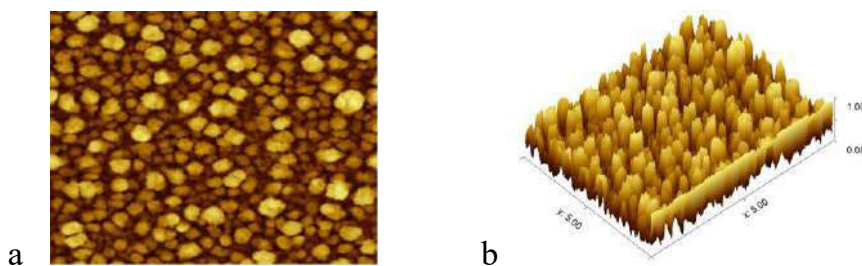
Dissertatsiya ishining ikkinchi bobi **“Kremniyda marganes va germaniy kirishma atomlarining nanoklasterlarini hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarini, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ va $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ geterovarizon strukturalarni olish texnologiyasi”** deb nomlangan bo‘lib, unda marganes kirishma atomlari nanoklasterlariga, binar birikmalarga $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, shuningdek, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ va $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ geterovarizon strukturalarga ega kremniy namunalarini olishdagi diffuziya jarayonining termodinamik shartlari hamda texnologik bosqichlar ko‘rsatilgan. Marganes va germaniy kirishma atomlarini kremniyga gaz fazasidan diffuziyalanish mexanizmlari hamda bu kirishma atomlarning kremniy atomlari va kristall panjara struktura nuqsonlari bilan o‘zaro ta’sirlanishining termodinamik shartlari, olingan nanoklasterlar, binar birikmalar va geterovarizon strukturalarning asosiy fizik-kimyoviy parametrlari hamda ularni tadqiq qilishda qo‘llanilgan zamonaviy usullar va uskunalarining ishlashi bayon etilgan. Bob oxirida marganes va germaniy kirishma atomlarini kremniyga kiritishdagi ishlab chiqilgan past haroratli ikki bosqichli diffuzion texnologiyaning ilmiy tahlili berilgan.

Dissertatsiyaning uchinchi bobi **“Kremniyda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarni hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ va $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ geterovarizon strukturalarning shakllanishi, ularning elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlari”** deb nomlanib, olingan namunalarda olib borilgan ilmiy tadqiqotlarning natijalari keltirilgan. Tajriba natijalari asosida marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarining elektrofizik parametrlari boshlang‘ich kremniyning elektrofizik parametrlaridan sezilarli darajada farq qilishi aniqlangan. Kremniy namunalarini gaz fazasidan marganes va germaniy kirishma atomlari bilan diffuzion legirlashda ishlab chiqilgan ikki bosqichli past haroratli diffuzion texnologiya asosida kremniyning sirti va sirt oldi qatlamida marganes kirishma atomlarining nanoklasterlari, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalar olingan.

Marganes kirishma atomlarining nanoklasterlarini hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarini olish uchun KDB-0,5, KDB-10 va KEF-100 markali boshlang‘ich monokristall kremniylar (Choxralskiy usuli bilan o‘stirilgan) dan foydalanilgan. Bu kremniy namunalarida boshlang‘ich bor va fosfor kirishma atomlarining konsentratsiyasi mos ravishda $6,2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ va $5 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo‘lgan. Germaniy kirishma atomlarini kremniyga kiritish past haroratli ikki bosqichli diffuzion texnologiya asosida amalga oshirilgan. Past haroratli diffuzion texnologiyaning asosiy bosqichlari quyidagilardan iborat: tadqiq qilinayotgan boshlang‘ich kremniy namunalari parallelepiped shaklida tayyorlandi va 99,99 % tozalikka ega bo‘lgan, ma’lum massali (massa kvarts ampula hajmiga bog‘liq) kukunsimon marganes va germaniy diffuzantlari kvarts ampulalarga joylashtirilgan hamda vakuum olingan (ampula ichidagi vakuum darajasi $P \approx 10^{-6} \text{ mm rt. st.}$ bo‘lgan). Germaniy kirishma atomlarini diffuziya qilish uchun kvarts ampulalar MG17–60/300 markali diffuzion elektr pechiga xona haroratida ($T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)

joylashtirildi. Elektr pechning harorati asta-sekin 5 grad/min tezlikda oshirildi. Bu jarayonda kremniy namunalariga germaniy kirishma atomlarining diffuziyasini birinchi bosqichi harorati $T = 800 \div 900$ °C gacha qizdirildi va shu haroratda $t = 2$ soat davomida ushlab turildi. So'ngra elektr pech harorati nisbatan tezroq, ya'ni $20 \div 30$ grad/min tezlikda germaniy kirishma atomlarining maksimal eruvchanlik haroratigacha ($T = 1200 \div 1250$ °C) ko'tarildi va bu haroratda namunalar $t = 5$ soat davomida ushlab turildi. Shundan so'ng kvarts ampulalar elektr pechdan chiqarib olindi va sovuq texnik moyga solish orqali 200 grad/sek tezlikda sovitildi. Xuddi shu kabi usul bilan boshlang'ich hamda germaniy kirishma atomlari kiritilgan kremniy namunalariga marganes kirishma atomlari kiritilib marganes kirishma atomlarining nanoklasterlari va $\text{Si} \langle \text{Mn, Ge} \rangle$ strukturalar mavjud namunalar olindi.

FM-Nanoview 1000 rusumli atom kuchlari mikroskopida kremniy sirtida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarning hosil bo'lishi o'rganildi (1-rasmga qarang).



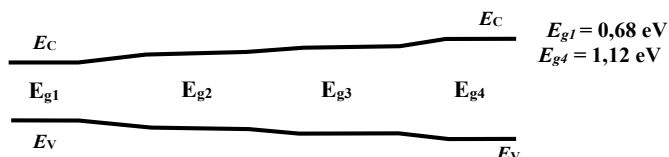
1-rasm. a - Kremniy sirtida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmali nanoklasterlarni va
b - $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarni 3 D-ko'rinishi.

Olingan tadqiqotlarning natijalarini tahlili asosida nisbatan past haroratlarda germaniy kirishma atomlarining diffuziya mexanizmi kremniy kristall panjarasida tugunlar bo'ylab sodir bo'lishi va natijada germaniy kirishma atomlari kremniy kristall panjarasining tugunlarida joylashishi, marganes kirishma atomlari esa kremniy kristall panjarasida tugunlararo joylashishi aniqlangan. Kremniy sirti va sirt oldi qatlamida germaniy kirishma atomlarining konsentratsiyasi skanerlovchi tunnel mikroskop (STM) yordamida mikrozonddli tahlil qilindi. Bunda kremniyning sirtini kimyoviy yemirish usuli bilan $\sim 0,5$ mkm qadam bilan qatlamma-qatlam olib tashlash orqali ~ 10 mkm chuqurlikkacha o'rganildi. Mikrozonddli tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, diffuziyadan so'ng germaniy kirishma atomlari kremniy sirtida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ tuzilishidagi geterovarizon strukturalardan iborat ko'plab orolchalarni hosil qilishi aniqlandi.

Tajriba natijalarining tahlili asosida germaniy kirishma atomlarining kremniyga optimal konsentratsiyasi kremniy sirtida taxminan $N_{\text{Ge}} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$ ga teng bo'lishi aniqlandi. Kremniy namunalariga qo'shimcha haroratli ishlov berilganda, germaniy kirishma atomlarining konsentratsiyasi ortdi ($N_{\text{Ge}} > 10^{20} \text{ sm}^{-3}$). Lekin $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmali namunalarning elektrofizik parametrlari keskin yomonlashdi.

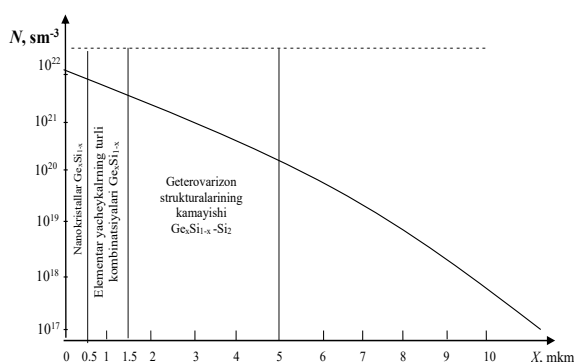
Germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalar shakllanishida taqiqlangan soha energiyasining qiymati sof monokristall germaniyni taqiqlangan soha $E_g = 0,68 \text{ eV}$ qiymatidan boshlab sof kremniyning

taqiqlangan soha energiyasi $E_{g4} = 1,12$ eV qiymatigacha o'zgarishi aniqlandi (2-rasmga qarang). Germaniy kirishma atomlarining konsentratsiyasi va texnologik bosqichlarga bog'liq muayyan qalinlik va zichlikka ega bo'lgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalarning kremniyda shakllanishi aniqlandi.



2-rasm. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalariga ega kremniyning sohalar diagrammasi.

Ishlab chiqilgan ikki bosqichli past haroratli diffuzion texnologiya yordamida kremniyning sirtida va sirt oldi qatlamida qalinligi $d = 10,2\text{-}11,5$ mkm gacha bo'lgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmali kremniy namunalari olindi. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarning konsentratsiyasi kremniy sirtidan chuqurlikka kirib borganda element tarkibiga (x -qiymatiga) bog'liq ravishda eksponensial kamaydi. Tajriba natijalarining tahlili asosida kremniy sirtida qalinligi $d \approx 0,3$ mkm gacha bo'lgan yupqa qatlamda germaniy kirishma atomlarining miqdori $\sim 30\%$ gacha yetishi aniqlandi, ya'ni $\text{Ge}_{0,30}\text{Si}_{0,70}$ tarkibli binar birikmalar shakllandi. Bu qatlamdan keyin germaniy atomlarining kremniydagi konsentratsiya eksponensial kamayadi. $d \geq 5$ mkm chuqurlikda kremniydagi binar birikmalarning element tarkibi $\text{Ge}_{0,05}\text{Si}_{0,95}$ nisbatida bo'lishi aniqlandi. Yaratilgan ikki bosqichli past haroratli diffuzion texnologiya yordamida kremniyning sirti va sirt oldi qatlamida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarni hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalarni shakllantirish mumkinligi aniqlandi.



3-rasm. Kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida hosil bo'lgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar hamda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalarni konsentratsion taqsimoti.

Germaniy kirishma atomlari asosida kremniyda shakllangan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar va $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalarning hosil bo'lishi hamda ularning kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida taqsimlanishi 3-rasmda keltirilgan. 3-rasmdan ko'rinib turibdiki, kremniyda hosil bo'lgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarning konsentratsiyasi taqsimoti eksponensial bog'lanishga ega ekan. Tadqiqot natijalari tahliliga asosan, kremniyning sirti va sirt oldi qatlamida $d \sim 0,3$ mkm chuqurlikkacha $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar maksimal konsentratsiyasida bo'lishi aniqlandi. Kremniy hajmiga yanada chuqurroq kirilganda, binar birikmalarni hosil qilishda ishtirok etuvchi germaniy kirishma atomlarining konsentratsiyasi eksponentsial tarzda

kamayadi. Kremniyda hosil bo'lgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarning konsentratsiya taqsimoti quyidagi to'rt qismdan iborat bo'lishi aniqlandi:

1. Kremniy sirtida hosil bo'lgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarning konsentratsiyasi kremniy atomlarining konsentratsiyasiga yaqin yoki undan biroz kam bo'ldi;

2. Binar birikmalarning konsentratsiyasi kamaydi va neytral-molekulyar $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalar hosil bo'la boshladi, ya'ni geterovarizon strukturalar shakllanishi boshlandi;

3. Hosil bo'lgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalarning konsentratsiyasi ortib, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarning konsentratsiyasi kamaydi;

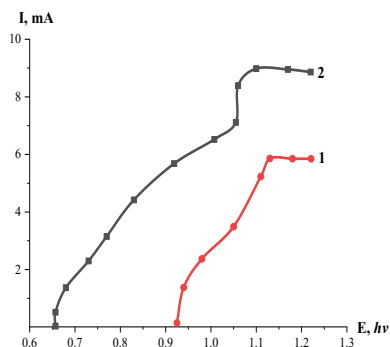
4. Asosan boshlang'ich kremniy atomlaridan tashkil topgan to'rtinchi qism. Bu qismda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar va $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalar bo'lishi mumkin, biroq ularning konsentratsiyasi kremniy atomlarining konsentratsiyasiga nisbatan ancha kam.

4-rasmdan ko'rinib turibdiki, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar bo'lgan kremniy namunalarida, germaniy kirishma atomlari kiritilmagan nazorat kremniy namunalaridan farqli ravishda, fotonlar energiyasini $h\nu = 0,75 \div 0,8$ eV oralig'ida fototokning qiymati sezilarli ortishi kuzatildi. Aniqlangan fotonlar energiyasining oralig'i sof germaniy materialining taqiqlangan soha energiyasi ($E_{g\text{Ge}} = 0,68$ eV) dan katta ekanligi aniqlandi. Tushayotgan fotonlar energiyasi $h\nu = 1,1$ eVga teng bo'lganda fototokning keskin ortishi kuzatilib, bu hodisa kremniydagi sohalararo optik o'tishlarning boshlanishi bilan izohlandi. Tushayotgan fotonlar energiyasining $h\nu = 0,75 \div 0,8$ eV oralig'ida fototokning ortishi asosida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalardagi germaniy va kremniy atomlari orasidagi bog'lanish energiyasi kremniyning taqiqlangan soha energiyasi qiymatidan kichik, ammo germaniyni taqiqlangan soha energiyasidan katta ekanligini ko'rsatdi.

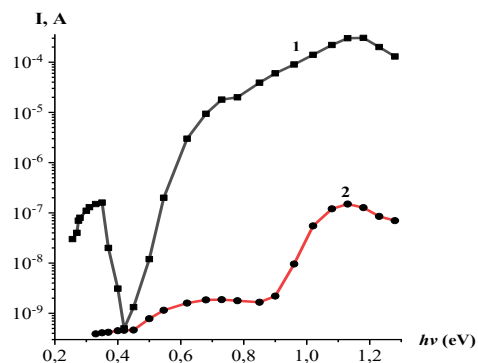
Fotonlar energiyasi $h\nu = 0,75$ eV ga teng bo'lganda kremniydagi $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar yoki $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalardan elektronlarning o'tkazuvchanlik sohasiga chiqishi boshlandi, bu germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarida fotosezgirlikning $h\nu = 0,75$ eV dan boshlanishiga sabab bo'ldi. Kuzatilgan hodisa kremniyda neytral $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarning hosil bo'lishi bilan bog'liq bo'lib, ularning taqiqlangan soha energiyasi $h\nu = 0,75 \div 0,8$ eV oralig'ida bo'lishi aniqlandi.

$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar hamda $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$ geterovarizon strukturalarga ega kremniyning fotoelektrik xossalari germaniy va marganes kirishma atomlarini gaz fazasidan diffuzion usulda kiritish orqali olingan namunalarda o'rganildi. Tadqiqotlar turli solishtirma qarshiliklar $\rho = 10^2 \div 10^5$ Om·sm oralig'idagi namunalarda harorat $T = 80$ K bo'lganda o'tkazildi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, marganes va germaniy kirishma atomlari kremniyda ion-kovalent $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$ birikmalar hosil qilib, optik faol kislorod atomlarining konsentratsiyasini taxminan ~ 10 % ga kamaytirishga olib keldi. Natijada, elektrofizik parametrlari haroratga barqaror va radiatsiyaga chidamli kremniy namunalarini olish mumkinligi aniqlandi. Germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyga qo'shimcha marganes kirishma atomlarini kiritib, $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$ geterovarizon strukturalar va nanoklasterlarni hosil qilish imkoni ko'rsatib berildi.

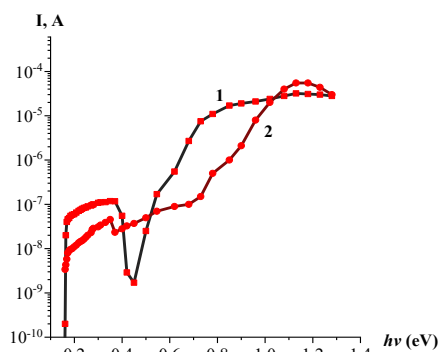
5, 6 va 7-rasmlarda germaniy hamda marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy, shuningdek, faqat marganes kirishma atomlari bilan legirlangan boshlang'ich kremniy namunalarini fotoo'tkazuvchanligining spektral bog'liqligi keltirilgan. Tadqiqotlar $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$ geterovarizon strukturali p-tur o'tkazuvchanlikka hamda turli solishtirma qarshiliklarga ($\rho = 10^2 \div 10^5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$) ega kremniy namunalarida o'tkazildi. Tadqiqotlar infraqizil IQ-nurli spektral fotoo'tkazuvchanlik sohasida, ya'ni tushayotgan fotonlar energiyasi kremniyning taqiqlangan soha energiyasidan kichik bo'lgan ($h\nu < E_g$) hollarda, elektr maydon qiymati $E = 20 \text{ V/sm}$ va harorat $T = 80 \text{ K}$ bo'lgan sharoitda amalga oshirildi.



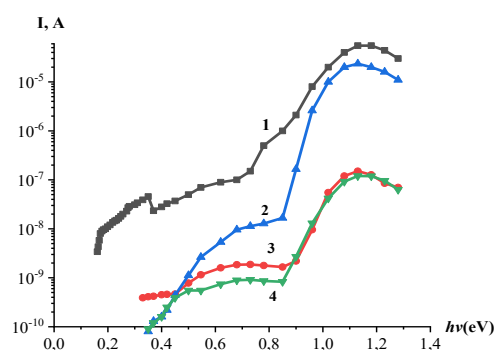
4-rasm. Kremniy namunalarining fotoo'tkazuvchanligini spektral bog'liqligi (1 - kremniy nazorat namunasi, 2 - $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar mavjud kremniy), $T = 80 \text{ K}$, $U = 20 \text{ V}$.



6-rasm. Kremniy namunalarining fotoo'tkazuvchanligining spektral bog'liqligi: 1 - $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$, $\rho = 4,1 \cdot 10^4 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ va 2 - $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$, $\rho = 5,7 \cdot 10^4 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, $T = 80 \text{ K}$, $U = 20 \text{ V}$.



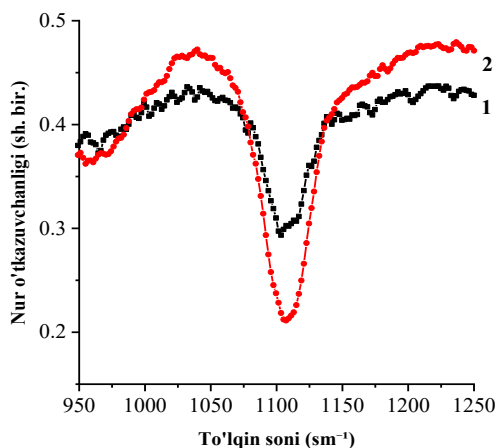
5-rasm. Kremniy namunalarining fotoo'tkazuvchanligini spektral bog'liqligi, 1- $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$, $\rho = 2,5 \cdot 10^2 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ va 2- $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$, $\rho = 4,3 \cdot 10^2 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, $T = 80 \text{ K}$, $U = 20 \text{ V}$.



7-rasm. Turli solishtirma qarshilikdagi $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$ strukturali kremniy namunalarining fotoo'tkazuvchanligining spektral bog'liqligi: 1 - $\rho = 5,7 \cdot 10^2 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, 2 - $\rho = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, 3 - $\rho = 7,5 \cdot 10^4 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, 4 - $\rho = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, $T = 80 \text{ Kda}$, $U = 20 \text{ V}$.

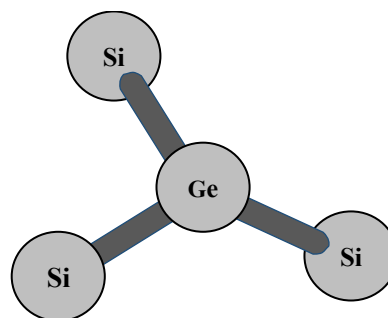
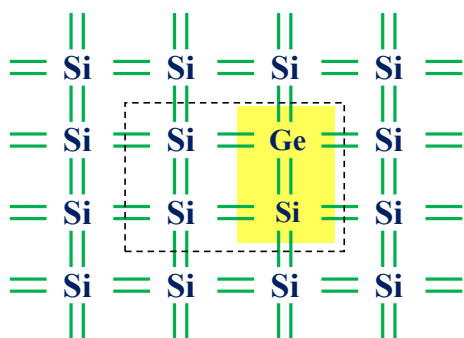
Germaniy va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarini hamda faqat germaniy atomlari bilan o'stirish jarayonida legirlangan kremniy nazorat namunalarida optik faol kislorod atomlarining konsentratsiyasini baholash, $\lambda \sim 620 \text{ nm}$ to'lqin uzunligidan boshlab IQ-nurlar sohasidagi o'tkazuvchanlik spektrlari oralig'ida amalga oshirildi. Spektrlar FSM-1200 markali

infraqizil Furiye spektrometri yordamida, xona haroratida $T = 300$ K da o'Ichandi (8-rasmga qarang).



8-rasm. Si<Mn,Ge> birikmalariga ega kremniy namunalarining fotoo'tkazuvchanligini tushayotgan nurlanish to'lqin uzunligiga bog'liqligi: 1 - Si<Mn,Ge>, 2 - o'stirilish jarayonida germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy nazorat namunasi Si<Ge>, $T = 300$ K.

Elektron skanerlovchi mikroskop yordamida o'tkazilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning sirt va sirt oldi qatlamining element tarkibida kremniyga germaniy kirishma atomlarining diffuziyasini texnologik rejimlari (harorat va vaqt)ni boshqarib $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalari hosil qilish mumkinligi aniqlandi. Turli xil $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarning kombinatsiyalaridan farqli ravishda, kremniy kristall panjarasida, tetraedrik shaklda germaniy atomini uchta kremniy atomlari o'ragan molekulyar–neytral birikmali yacheyka ham hosil bo'lishi mumkin ekan (9-rasmga qarang).



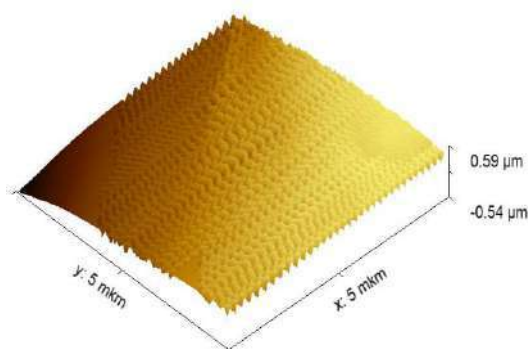
9-rasm. Kremniy va germaniy atomlarini kovalent bog'lanishi hamda elementar $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ tetraedrik yacheykani tuzilishi ($E_{g1}\text{-Si=Si}=1,12$ eV, $E_{g2}\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{Si}_2$, $E_{g3}\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{Si}_2$, $E_{g4}\text{-Ge=Ge}=0,68$ eV).

Tajriba natijalari tahlili asosida kremniyning sirt va sirt oldi qatlamida germaniy kirishma atomlari bilan boyitilgan soha shakllanib, kremniy kristall panjarasida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ tuzilishidagi geterovarizon strukturalarning hosil bo'lishiga olib kelar ekan. Hosil bo'lgan birikmalarning o'lchami germaniy kirishma atomlarining konsentratsiyasi va asosiy parametrlariga, shuningdek, diffuzion legirlashning termodinamik shartlariga bog'liq ekan.

Dissertatsiyaning to'rtinchi bobi **“Marganes kirishma atomlarining nanoklasterlari hamda Si<Mn,Ge> geterovarizon strukturalar mavjud kremniyning magnit xususiyatlari”** deb nomlanib, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarga ega hamda qo'shimcha ravishda marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy

namunalarining magnit va elektrofizik parametrlarini o'rganish bo'yicha olingan tajriba natijalari taqdim etilgan.

Germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan va qo'shimcha ravishda marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xossalarini o'rganish natijalari shuni ko'rsatdiki, kremniy sirti va sirt oldi qatlamlarida germaniy kirishma atomlarining to'yingan qatlamlari hosil bo'lishidan tashqari, $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ birikmalar ham shakllanishi aniqlandi. Marganes va germaniy kirishma atomlarining diffuziyasidan so'ng kremniy sirti rentgen energodispersiyali mikroanaliz qurilmasi yordamida o'rganilganda, germaniy kirishma atomlarining sirdagi konsentratsiyasi boshlang'ich kremniy atomlarining konsentratsiyasining deyarli yarmigacha yetishi aniqlangan. Yaratilgan ikki bosqichli past haroratli diffuzion texnologiya asosida kremniy hajmida marganes kirishma atomlarining elektrofaol konsentratsiyasi maksimal eruvchanligi $N_{\text{Mn}} = 2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ gacha yetdi. Shuningdek, germaniy va marganes kirishma atomlarining mavjudligi boshlang'ich kremniyning fundamental elektrofizik parametrlarini sezilarli darajada o'zgartirishiga olib kelishi aniqlandi.



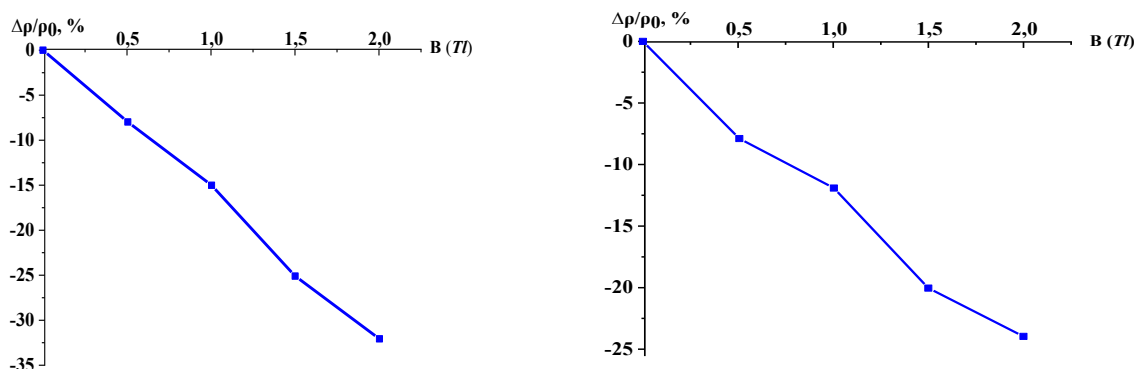
10-rasm. $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ birikmalarga ega kremniy namunalaridagi magnit domenlarining topologiyasi va magnit relyefining tasviri, $T = 300 \text{ K}$ da.

Marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalariga magnit maydon ta'sir qilinganda nisbatan yuqori haroratlarda ($T_{Kr} = 300 \text{ K}$) ferromagnit hodisasi kuzatildi. Birinchi marta marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarida asosiy fundamental magnit parametrlar aniqlandi, jumladan: M_s - to'yingan magnitlanish, M_r - qoldiq magnitlanish va H_c - koertsitiv kuch. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalariga ega va qo'shimcha ravishda marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarining magnit xossalari FM-Nanoview 1000 markali magnit kuchlari mikroskopi yordamida o'rganilgan va kremniy namunalarida submikron o'lchamdagi "magnit" relyef tasvirlari olingan (10-rasmga qarang).

Tadqiqot natijalarining tahlili shuni tasdiqladiki, germaniy va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarida ferromagnit xossalar nafaqat past haroratlarda ($T_{Kr} = 30 \text{ K}$), balki nisbatan yuqori haroratlarda ham ($T_{Kr} = 300 \text{ K}$) kuzatildi. $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ binar birikmali kremniy namunalarining magnit xossalarini o'rganish natijalari asosida g'ayrioddiy katta manfiy magnit qarshilik hosil bo'lishi kuzatildi (11-rasmga qarang).

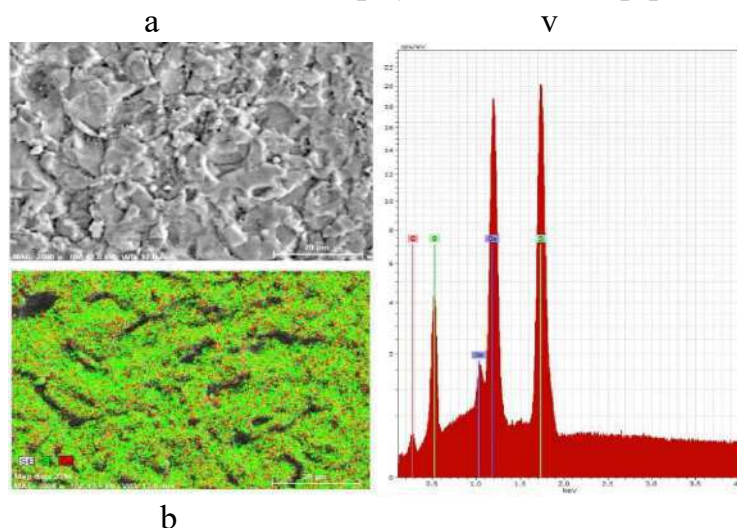
Ma'lumki, skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) materiallarning sirtini yuqori sifatli tasvirlarini olish va ularni tahlil qilish imkonini beradi. Bu usul tasvirlarning sifatini yaxshilaydi hamda yetarli darajada o'ta aniqlikdagi tasvirlarni olish uchun yuqori energiyali elektronlar oqimidan foydalanadi. 12-rasmning a va b

larida marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunasi sirtining topologiyasi JSM-IT 200 markali skanerlovchi elektron mikroskop yordamida olingan tasvirlari berildi.



11-rasm. Si<Mn,Ge> birikmali kremniy namunalarida manfiy magnit qarshilikning magnit maydoni kattaligiga bogʻliqligi: a - $T = 80$ K, b - $T = 300$ K, $E = 100$ V/sm.

Kremniyda germaniy va marganes kirishma atomlari ishtirokida Si<Mn,Ge> tuzilishidagi strukturalarning hosil boʻlishini tasdiqlash maqsadida FM-Nanoview 1000 markali atom kuchlari mikroskopi yordamida tadqiqotlar olib borildi.

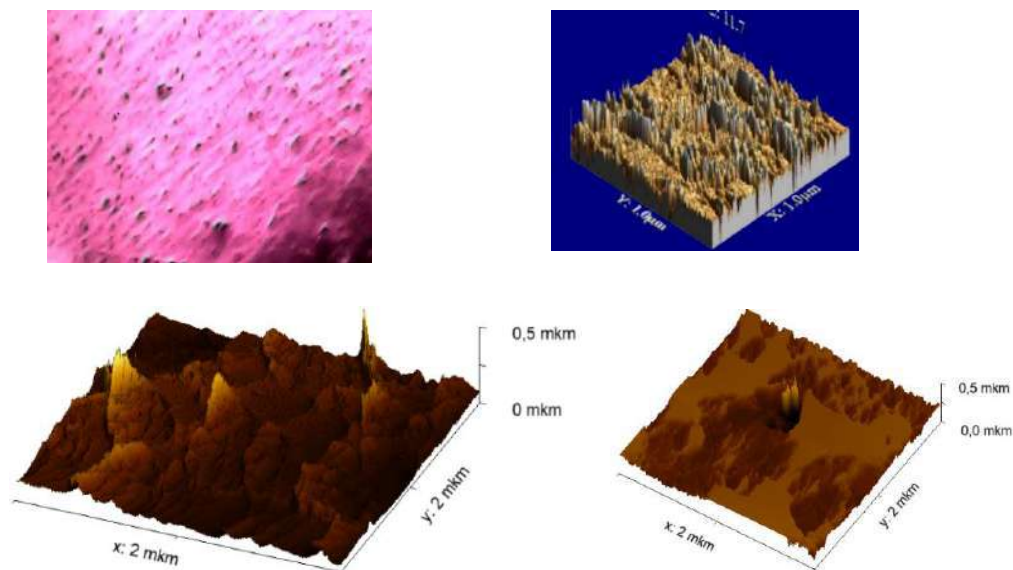


12-rasm. a va b - Si<Mn,Ge> binar birikmali kremniy namunasi sirtining topologiyasi, v-mikrorentgendispersion tahlil spektri (masshtab 20 mkm), $T = 300$ K da.

Tadqiqot natijalari shuni koʻrsatdiki, kremniy namunalarining sirtida va sirt oldi qatlamida hosil boʻlgan orolchalar asosan Si<Mn,Ge> ferromagnit birikmalaridan tashkil topgan ekan (13-rasmga qarang). Marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari qoʻshimcha ravishda IQ-mikroskop yordamida ham oʻrganildi. Tajriba natijalarining tahlili shuni koʻrsatdiki, hosil boʻlgan kremniy-germaniy binar birikmalarning (Si<Mn,Ge>) oʻlchami $1 \div 2$ mkm gacha yetishi hamda marganes kirishma atomlari hosil qilgan birikmalar kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida katta miqdorda mavjud ekanligi aniqlandi.

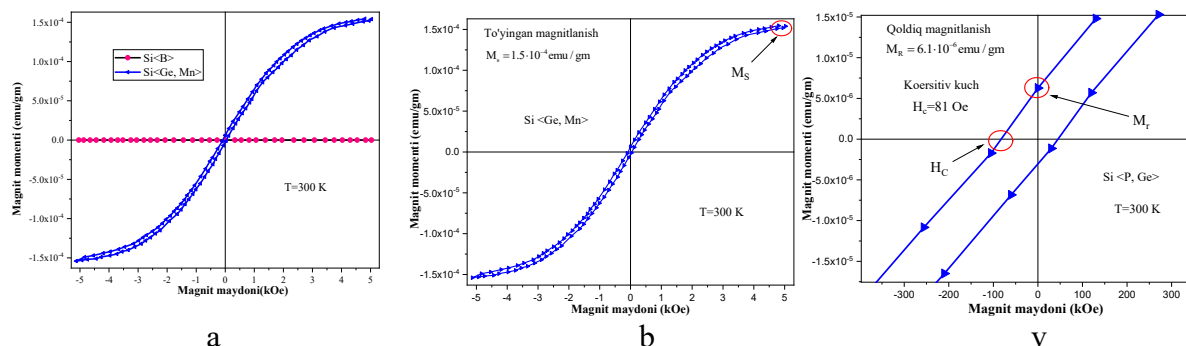
13-rasmdan koʻrinib turibdiki, kremniy namunalarining sirtida Si<Mn,Ge> birikmalaridan tashkil topgan orolchalar hosil boʻlishi oʻrtacha sirt qiyaligining kattalashishiga olib keladi. Bu shuni koʻrsatadiki, marganes kirishma atomlari

hisobiga kremniy namunalarining sirtida Si<Mn,Ge> ferromagnit birikmalar hosil bo‘ladi va bu germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyga nisbatan, elektr potensialining yuqori cho‘qqilarining paydo bo‘lishiga olib keldi.



13-rasm. Germaniy va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy sirtining tasvirlari.

Germaniy kirishma atomlarining $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalariga ega kremniy namunalariga marganes kirishma atomlari kiritilganda, $T = 300 \text{ K}$ haroratda ferromagnit holat kuzatildi (14-rasmga qarang).



14-rasm. Marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarining magnitlanishini magnit maydonga bog‘liqligi: a, b -Si<Mn,Ge> kremniy namunalari, $\rho = 4 \times 10^4 \text{ Om} \cdot \text{sm}$, p-tur o‘tkazuvchanlik (ko‘k rang) hamda boshlang‘ich kremniy germaniy kirishma atomlari bilan o‘stirish jarayonida legirlangandan so‘ng marganes kirishma atomlari kiritilgan Si<Mn,Ge> strukturali namunalar (qizil rang); v-ferromagnit parametrlari: M_s - to‘yingan magnitlanish, M_r - qoldiq magnitlanish va H_c - koertsitiv kuch, $T = 300 \text{ K}$.

Marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarining magnit momenti materialning solishtirma qarshiligiga bog‘liqligini o‘rganish natijalari shuni ko‘rsatdiki, yuqori qarshilikka ega bo‘lgan namunalarda, ya’ni, solishtirma qarshilik qiymati xususiy o‘tkazuvchanlikka yaqin bo‘lgan hollarda ($\rho \geq 10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$), shuningdek, $\rho < 4 \times 10^4 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo‘lgan namunalarda magnit momentning kamayishi kuzatildi. Bu namunalarda kuzatilgan manfiy magnit

qarshilik (MMQ) qiymatini sezilarli darajada kamayganini ko'rsatdi. Olingan natijalar asosida, kuzatilgan MMQ hodisasi kremniy namunalarida marganes kirishma atomlarining magnit domenlarini tartiblanishi bilan bevosita bog'liq ekanligi aniqlandi.

Tajriba tadqiqotlari asosida shuni aytish mumkinki, past haroratli ikki bosqichli diffuzion texnologiya jarayoni bosqichlarini boshqarish orqali $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar hamda qalinligi $d = 5-6$ mkm gacha bo'lgan qatlamida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ va $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ geterovarizon strukturalarni hosil qilish mumkin bo'lib, kremniy namunalarida germaniy va marganes kirishma atomlarining konsentratsiyasini maksimal darajaga yetkazishi ta'minlandi.

Kremniy kristall panjarasida turli kombinatsiyadagi $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalaridan tashqari, neytral-molekulyar tuzilishdagi $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ birikmalari ham hosil bo'lishi mumkin ekan. Bunday birikmalarda uchta kremniy atomlari o'zaro tetraedrik joylashgan holda bitta germaniy atomini o'rab turadigan tuzilishga ega elementar yacheyka hosil qilishi aniqlandi. Birikmalar hosil bo'lishi natijasida kremniy sirti va sirt oldi qatlamida $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ tuzilishdagi geterovarizon strukturalarning shakllanishi aniqlandi.

Tajriba natijalari asosida marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarida ilk marotaba $T = 300$ K haroratda ferromagnit hodisasi kuzatildi.

Tadqiqot natijalarining tahlili shuni ko'rsatdiki, marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarida magnit xossalari keng harorat oralig'ida ($T = 1,8-300$ K) o'rganilganda ferromagnit holat kuzatildi. Bu xona haroratida ishlaydigan sezgir magnit datchiklarni yaratish mumkinligini ko'rsatadi.

$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalari mavjud kremniy namunalariga qo'shimcha ravishda marganes kirishma atomlari bilan legirlangandan so'ng, magnit xossalar FM-Nanoview 1000 markali magnit kuchlari mikroskopi yordamida o'rganildi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ birikmalarining nanoklasterlari mavjud kremniy namunalarida $T_{Kr} = 300$ K (xona harorati)da ferromagnit holat nisbatan kuchli namoyon bo'lar ekan. Ta'kidlash joizki, xona haroratidagi ferromagnit hodisalar kuzatilgan kremniyda marganes va germaniy kirishma atomlarining birikmalari birinchi marta diffuziya texnologiyasi yordamida olingan materiallarda kuzatildi.

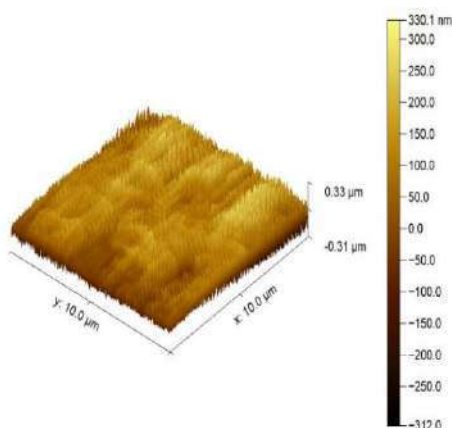
15-rasmda germaniy va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalaridagi magnit domenlarning topologiyasi ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, kremniy sirti butunlay germaniy va marganes kirishma atomlaridan iborat magnit domenlaridan tashkil topgan bo'lib, ular nafaqat kremniyning ferromagnit xossalarini kuchaytiradi, balki Kyuri haroratining T_{Kr} qiymatini ham yuqori haroratlarga siljitadi.

Tadqiqot natijalari asosida $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ birikmalariga ega kremniy namunalari xona haroratida paramagnit holatdan ferromagnit holatga o'tishi aniqlandi. Germaniy va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarida birinchi marta faqat marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy

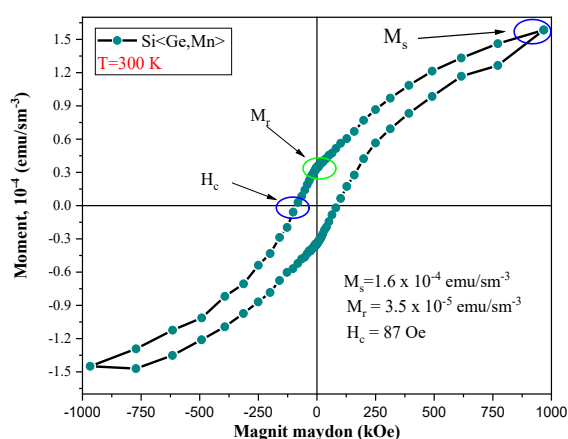
namunalaridan farqli ravishda ($T_{Kr} = 30$ K), ferromagnit xossalari $T_{Kr} = 300$ K da va undan yuqori haroratlarda kuzatilishi aniqlangan.

Tajriba natijalarini tahlil qilish shuni ko'rsatdiki, qo'shimcha $T = 800$ °C haroratda ishlov berilgan kremniy namunalarida maksimal Si<Mn,Ge> birikmalarining maksimal hosil bo'lishiga olib keldi, shuningdek, bu haroratda kremniy sirtidagi oksidlanish qatlami minimal darajaga yetdi.

Olingan tajriba natijalarining tahlili shuni ko'rsatdiki germaniy kirishma atomlari kiritilgan kremniyga marganes kirishma atomlarini qo'shimcha ravishda kiritish natijasida Si<Mn,Ge> tuzilishdagi magnit xossalarga ega uch komponentali birikmalarining nanoklasterlari shakllanar ekan. Tadqiqot natijalari Quantum Design MPMS-3 markali supero'tkazuvchan kvant interferensiya magnetometri yordamida olindi va tahlil qilindi. Olingan natijalar shuni ko'rsatdiki Si<Mn,Ge> tuzilishidagi birikmalar mavjud kremniy namunalarida yuqori haroratli ferromagnit hodisasi namoyon bo'lishiga olib keldi. Bu hodisa marganes kirishma atomlarining to'ldirilmagan d-orbitalari tufayli yuzaga kelib, magnit maydon ta'sirida elektronlarning spin yo'nalishlarining sezilarli o'zgarishi bilan izohlandi. Bu holatda kremniy materiali xona haroratida ferromagnit holatga o'tishi va Kyuri haroratining yuqoriroq qiymatlarga siljishi kuzatildi (16-rasmga qarang).



15-rasm. Marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalaridagi magnit domenlarning topologiyasi, $T = 300$ K.

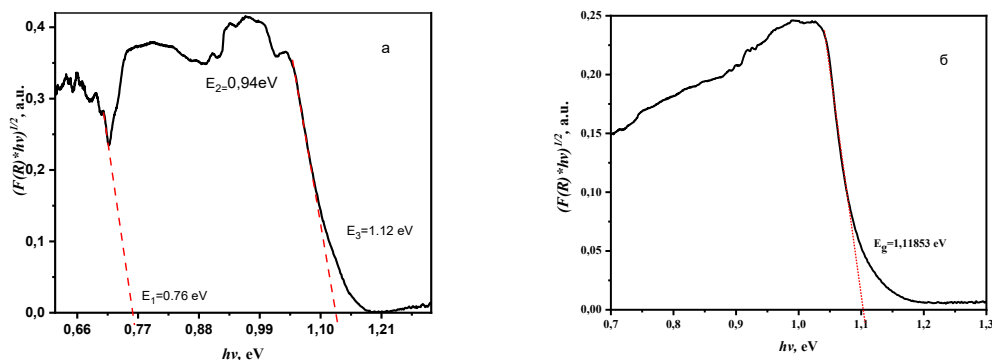


16-rasm. Marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit momentining magnit maydon kuchiga bog'liqligi, $T = 300$ K. $M_s = 1,6 \cdot 10^4 \text{ emu/sm}^3$, $M_r = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ emu/sm}^3$, $H_c = 87 \text{ E}$.

Boshlang'ich kremniyni germaniy va marganes kirishma atomlari bilan gaz fazasidan diffuziya usuli bilan legirlashda hosil qilingan Si<Mn,Ge> birikmalariga ega namunalarning optik xossalari o'rganish shuni ko'rsatdiki, bu texnologiya magnitoelektronika va spintronika sohasida yangi materialni olishga imkon berdi. Kuzatilgan bu fizik hodisalar olimlar va mutaxassislarda qiziqish uyg'otadi, chunki kremniy yarimo'tkazgich qurilmalarini ishlab chiqarishda asosiy material bo'lib, keng qo'llaniladigan planar texnologik bosqichlardan foydalanishga imkon beradi.

Tadqiqot uchun germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarini tanlab olindi va ular qo'shimcha $T = 800 \div 1000$ °C harorat va $t = 2$ soat vaqt oralig'ida qizdirildi. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalariga ega kremniy namunalarining

optik xossalari Lambda 950 UV/Vis/NIR markali spektrometr yordamida o'rganildi (17-rasmga qarang). Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalariga ega kremniy namunalarida boshlang'ich kremniyning asosiy fundamental parametrlaridan biri, atomlarning o'zaro kimyoviy bog'lanish energiyasining o'zgarishi aniqlandi. Kremniy-germaniy binar birikmalarning kimyoviy bog'lanish energiyasining o'zgarishi boshlang'ich kremniyning kristall panjarasi fundamental parametrlarining o'zgarishiga sabab bo'ldi. Tadqiqot natijalarining tahlili asosida diffuziyadan so'ng olingan namunalarning optik xossalari boshlang'ich kremniyga nisbatan sezilarli darajada o'zgargani aniqlandi.



17-rasm. a - $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmali kremniyning yutilish spektri, b - boshlang'ich monokristall kremniyning yutilish spektri, $T = 300$ K.

Olingan tadqiqot natijalari va Kubelka-Munk funksiyasi tenglamasining yechimi asosida, $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ birikmalarining kremniydagi kimyoviy bog'lanish energiyasi optik aks ettirilgan yorug'lik spektri ma'lumotlariga tayangan holda aniqlandi (1-formulaga qarang).

$$F_{KM} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1)$$

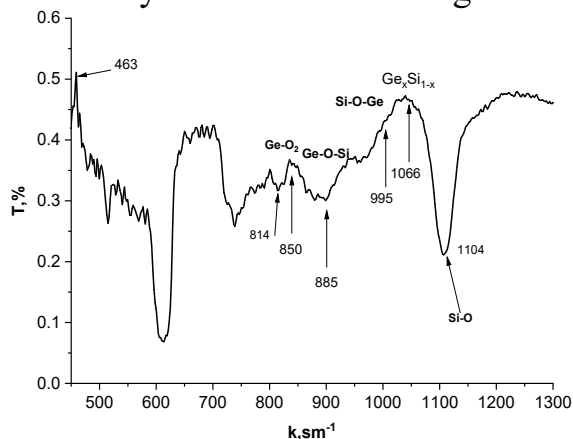
$$hv \cdot F_{KM}^{1/n} = A(hv - E_g)$$

Bunda: R - aks ettirish koeffitsiyenti, A - proporsionallik koeffitsiyenti, $h\nu$ - foton energiyasi, (spektr singdirishini egilish burchagi θ -ga bog'liq), E_g - taqiqlangan soha kengligi. Egilish burchagining qiymati θ va Kubelka-Munk funksiyasi tenglamasining yechimi asosida kremniyda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar hosil qilgan taqiqlangan soha energiyasining qiymati aniqlandi.

Hosil qilingan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarining tarkibi va optik xossalari FSM-1202 markali infraqizil Furiye spektrometri yordamida o'rganildi. Optik xossalarni o'rganishdan oldin, germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarning ikki qarama-qarshi sirti olmos pastasi yordamida jilolandi (polirovka qilindi). Qolgan to'rt tomoni esa ~ 50 mkm gacha mexanik silliqildi, bu germaniy kirishma atomlari bilan boyitilgan sirt qatlamini olib tashlash maqsadida amalga oshirildi. Bu tadqiqotlar $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmali kremniy sirti va sirt oldi qatlamining element tarkibini aniq o'lchash imkonini berdi (18-rasmga qarang).

Tadqiqotlarning natijalari tahlili shuni ko'rsatdiki, germaniy kirishma atomlari kremniyning asosiy atomlari bilan binar birikmalarni hosil qilishi 1066 cm^{-1} chastotada yutilish cho'qqisini hosil qilishiga olib keldi. Qiyosiy tahlil

natijasida 885 sm^{-1} va 850 sm^{-1} chastotalarda kuzatilgan cho‘qqilar germaniy oksidlariga (GeO_2), 1104 sm^{-1} dagi cho‘qqi kremniy-kislorod birikmalarining (Si-O) hosil bo‘lishiga mos kelishi aniqlandi. 1066 sm^{-1} dagi cho‘qqiga to‘g‘ri keladigan optik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti kremniyda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalarining mavjudligini ko‘rsatdi. Tadqiqotlar germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan hamda $T = 800\div 1000\text{ }^\circ\text{C}$ harorat oralig‘ida, $t = 2$ soat davomida qo‘shimcha haroratli ishlov berilgan kremniy namunalarida amalga oshirildi.



18-rasm. Germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy sirtining Furье spektri va element tarkibi, $T = 300\text{ K}$.

XULOSA

Dissertatsiya ishini bajarish davomida olingan tadqiqot natijalari asosida quyidagi ilmiy natijalar aniqlandi:

1. Birinchi bor germaniy va marganes kirishma atomlari bilan kremniyni legirlashning takrorlanuvchi past haroratli ikki bosqichli diffuzion texnologiyasi ishlab chiqilgan bo‘lib, bu marganes kirishma atomlarining maksimal konsentrasiyasi miqdoridagi nanoklasterlarni kremniyda olish hamda turli solishtirma qarshilik va o‘tkazuvchanlik turiga ega bo‘lgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ va $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ birikmalarni hosil qilish imkonini berdi.

2. Kremniy sirtida germaniy kirishma atomlarining optimal konsentrasiyasi $N_{\text{Ge}} \approx 1,5 \cdot 10^{20}\text{ sm}^{-3}$ ni tashkil etishi aniqlandi. Shuningdek, germaniy va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalariga qo‘shimcha haroratli ishlov berilganda germaniy atomlarining yuqori konsentrasiyasida kremniy atomlari bilan birikmalar hosil qilindi ($N_{\text{Ge}} > 10^{20}\text{ sm}^{-3}$) ammo bunda materiallarning elektrofizik va magnit xossalari keskin yomonlashuvi kuzatildi. Kremniyda $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalar va $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalar hosil bo‘lishining termodinamik shartlari aniqlandi.

3. Marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning elektrofizik, fotoelektrik, optik va magnit xossalarini o‘rganish natijalari shuni ko‘rsatdiki, sirt va sirt oldi qatlamda $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ birikmalaridan tashqari neytral holatda bo‘lgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ geterovarizon strukturalarni shakllanishi aniqlandi.

4. Marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarida birinchi bor ferromagnit xossalari nafaqat past haroratlarda ($T_{\text{Kr}} = 30\text{ K}$), balki nisbatan yuqori haroratda ($T_{\text{Kr}} = 300\text{ K}$) ham kuzatildi. Marganes

kirishma atomlarining nanoklasterlari mavjud bo'lgan $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ birikmali kremniyda g'ayrioddiy katta qiymatdagi manfiy magnit qarshilik kuzatildi.

5. Birinchi marta marganes va germaniy kirishma atomlari nanoklasterlari hamda $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ birikmalari mavjud monokristall kremniy namunalarida magnit parametrlar, ya'ni magnit to'yinganlik (M_s), qoldiq magnitlanish (M_r) va koertsitiv kuch (H_c) $T = 1,8 \text{ K}$ va $T = 300 \text{ K}$ haroratlarda aniqlandi.

6. Kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida hosil bo'lgan $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binar birikmalardagi kremniy-germaniy va germaniy-germaniy atomlari orasidagi bog'lanish energiyasi boshlang'ich materialdagi kremniy-kremniy atomlari orasidagi bog'lanish energiyasidan farq qilishi aniqlandi.

7. Kremniyda marganes va germaniy kirishma atomlarining nanoklasterlari hosil bo'lishining fizik mexanizmi taklif qilindi va olingan namunalarning magnit qarshiligi hamda ferromagnit parametrlarini boshqarish imkoniyati ko'rsatildi.

8. Kremniyning sirt va sirt oldi qatlamida shakllangan $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ binar nanoklasterlar asosida magnit sezgir datchiklar va sensorlarni yaratish imkoniyatlari mavjudligi ko'rsatildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc. 03/2025.27.12.FM/Т.01.06 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРО-
НИКИ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**
**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

УРАКОВА ФЕРУЗА ЭРКИНОВНА

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО
ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ МАРГАНЦА И ГЕРМАНИЯ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан под номером B2023.3.PhD/FM927.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и Информационно-образовательном портале «Ziyoueb» (www.ziyoueb.uz).

Научный руководитель:

Зикриллаев Нурулло Фатхуллаевич
доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич
доктор физико-математических наук, профессор

Мавлянов Абдулазиз Шавкатович
доктор физико-математических наук, с.н.с.

Ведущая организация:

Самаркандский государственный университет

Защита диссертации состоится «18» 09 2026 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-76-94; Факс: (998 71) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном Центре института (зарегистрирована за № 80) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.

Автореферат диссертации разослан «13» 09 2026 г.
(реестр протокола рассылки № 80 от 03.09 2026 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,
доктор философских наук (PhD), с.н.с.

Н.А. Тургунов
Председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность диссертационной работы. В мире многими учёными и специалистами бурно исследуются электрофизические, фотоэлектрические, оптические и магнитные свойства различных полупроводниковых материалов. К таким материалам относятся элементарные полупроводники кремния и германия, а также полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$, а также многослойные и многокомпонентные структуры. Интерес ученых и специалистов, изучающих эти свойства, особенно магнитные свойства материалов, вызван тем, что использование спина электронов в полупроводниковом приборостроении имеет определенную перспективу для создания быстродействующих устройств с легким управлением. В этом направлении интенсивно ведутся исследования для интеграции магнитных систем в полупроводниковую микроэлектронику. Легкое управление спинами электронов в магниточувствительных полупроводниковых материалах позволяет создать спин-электронные нанотранзисторы и тонкие пленки гибридных материалов со структурой ферромагнит-полупроводник. Из литературных данных известно, что магнитные свойства обусловлены d-орбитами электронной оболочки атомов с переходом их в s- или p-орбиты. Особое внимание уделяется изучению магнитных свойств материала на основе легирования кристаллической решетки полупроводникового кремния примесными атомами элементов d-группы.

В мире проводятся научные исследования, направленные на получение материалов с новыми свойствами путём формирования нанокластеров примесных атомов и бинарных соединений на поверхности и в объёме кремния, целенаправленного изменения фундаментальных параметров исходного кремния и управления физическими свойствами полученных материалов. В этом направлении приоритетными являются исследования по разработке диффузионных технологий, заменяющих методы молекулярно-лучевой эпитаксии и ионной имплантации, требующие дорогостоящего современного технологического оборудования и значительных энергетических затрат, формирующих наноразмерные кластеры примесных атомов и бинарные соединения на поверхности и в объёме кремния методом диффузионного легирования из газовой фазы, обеспечивающих их достаточно высокую концентрацию, а также позволяющих получать материалы с заданными элементным составом и структурой. Вместе с тем углублённое изучение новых физических явлений, наблюдаемых в кремнии с нанокластерами примесных атомов, позволяет определить физические условия формирования нанокластеров и бинарных соединений, а также управлять их электрофизическими параметрами, что является актуальной задачей.

В Республике Узбекистан достигнуты определенные научные результаты в области исследования физики полупроводниковых материалов и объяснены физические механизмы обнаруженных явлений, а также применения

разработанных приборов и устройств на их основе в различных практических областях электроники. В Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 от 19 марта 2021 года «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» отмечены задачи «...обеспечение неразрывной связи научных исследований в области физики с производством, расширение масштаба научных работ, направленных на решение проблем в отраслях экономики; повышение результативности и практического значения научных исследований и инновационной деятельности». В данном направлении большое научное значение имеет разработка новых полупроводниковых приборов с новыми функциональными возможностями с малым энергопотреблением, которые позволяют сэкономить затраты энергии, а также уменьшить себестоимость.

Проводимые исследования в данной диссертационной работе служат выполнению задач, предусмотренных Постановлением Президента Республики Узбекистан от 22 января 2025 года № ПП-20 «О дополнительных мерах по выводу электротехнической промышленности на новый этап развития»¹, Постановлением Президента Республики Узбекистан от 19 марта 2021 года № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики»², а также Постановлением Президента Республики Узбекистан от 16 февраля 2023 года № ПП-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий»³ и установленных другими нормативно-правовыми документами, относящимися к данной сфере деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Настоящая научно-исследовательская работа составлена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и техники Республики Узбекистан: III. «Энергетика, энергосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; выполнена в соответствии с современной электроникой, микроэлектроникой и фотоникой».

Степень изученности проблемы. В передовых научно-исследовательских центрах и учебных заведениях Германии, Швейцарии, США, Канады, России, Китая, Японии и других стран велись активные исследования по разработке и получению полупроводниковых материалов и структур для создания высокочувствительных магнитных датчиков в спинотронике и магнитоэлектронике.

Ряд известных зарубежных учёных, таких как John D. (США), Limen Shen, Xi Zang, Gang Xiang (Китай), Jiafei Li (Сингапур) и другие, внесли большой вклад в развитие исследований магнитных свойств полупроводников и продемонстрировали, что выращенные тонкие плёнки SiGe, легированные

¹ Постановлением Президента Республики Узбекистан от 22 января 2025 года № ПП-20 «О дополнительных мерах по выводу электротехнической промышленности на новый этап развития»

² Постановлением Президента Республики Узбекистан от 19 марта 2021 года № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики»

³ Постановлением Президента Республики Узбекистан от 16 февраля 2023 года № ПП-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий»

примесными атомами Mn, обладают ферромагнитными свойствами при комнатной температуре и пригодны для создания датчиков и приборов спинтроники.

Российские учёные М.Ю. Мельников, А.А. Шкляев и А.В. Латышев исследовали образование твёрдых растворов бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ на поверхности кремния, полученного методом газофазной эпитаксии. Ю.Н. Пархоменко и А.И. Белогорохов (Россия) методом ионной имплантации ионов германия получили SiGe-бинарные наноструктуры в кремнии. В работах профессора С.И. Рембезы (Россия) систематизированы и обобщены результаты исследований физических и магнитных свойств примесных атомов и дефектов кристаллической решётки полупроводников методами электронного парамагнитного и ядерного магнитного резонанса.

В научных трудах известных академиков Республики Узбекистан Р.А. Муминова, М.С. Саидова, М.К. Баходирханова, С.З. Зайнабидинова, А.Т. Мамадалимова, а также профессоров А.С. Саидова, Ш.Б. Утамурадовой, К.П. Абдурахмонова, Х.С. Далиева и других достигнуты значительные результаты и показано, что кремний с бинарными соединениями является идеальным материалом для исследования магнитных свойств, а также продемонстрированы возможности создания на их основе приборов и датчиков в магнитоэлектронике.

На основе анализа научной литературы установлено, что, несмотря на проведенные исследования по изучению магнитных свойств кремния, легированного примесными атомами германия и марганца, физические механизмы структурных, электрофизических и ферромагнитных состояний до конца не изучены.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ, где выполнена диссертация. Диссертация включена в план научных исследований кафедры «Цифровая электроника и микроэлектроника» Ташкентского государственного технического университета и выполнена на основе исследований, проведённых в рамках программы фундаментального государственного гранта ОТ-Ф2-55 «Разработка научных основ получения объёмно-структурированного кремния на основе формирования нанокластеров примесных атомов как нового класса наноматериалов с новыми функциональными возможностями», а также в рамках программы международного фундаментального научного проекта AL-202102215 «Интегрированная система микрожидкостных каналов для захвата циркулирующих раковых клеток с использованием ферромагнитных нанокластеров в кремнии» (2022–2024 гг.), реализованного совместно со Стамбульским техническим университетом (Турция).

Целью диссертационной работы является исследование магнитных свойств кремния с нанокластерами примесных атомов марганца и германия, а также бинарных соединений $\text{Si}<\text{Mn,Ge}>$ и гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ и определение основных магнитных параметров полученных образцов.

Задачи исследования:

усовершенствование двухэтапной низкотемпературной диффузионной технологии легирования кремния примесными атомами марганца и германия. Определение оптимальных термодинамических условий и технологических режимов диффузии для получения максимальных концентраций на поверхности и в приповерхностном слое кремния нанокластеров примесных атомов марганца и бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$;

определение элементного состава диффузионно-легированного кремния с примесными атомами марганца и германия, установление оптимальной концентрации этих примесных атомов в кремнии, а также термодинамические условия образования бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ в кремнии;

исследование электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств кремния с нанокластерами примесных атомов марганца и германия, а также с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонными структурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ и показание возможности управления этими свойствами за счёт изменения концентрации примесных атомов марганца и германия;

исследование магнитных свойств кремния с нанокластерами примесных атомов марганца и германия, а также с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонными структурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$, дополнительно легированными примесными атомами марганца, в широком интервале температур. Определение основных магнитных параметров полученных образцов в зависимости от температуры и величины приложенного магнитного поля;

объяснение физических механизмов образования нанокластеров примесных атомов марганца и германия в кремнии, а также показать возможности управления электрофизическими параметрами и ферромагнитными свойствами полученных материалов;

предложить возможности создания чувствительных магнитных датчиков в спиновой электронике на основе образцов кремния, легированных дополнительными примесными атомами марганца, с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонными структурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$.

Объектами исследования состоит из монокристаллического кремния, выращенного методом Чохральского р-типа проводимости, марки КДБ-10 с концентрацией примесных атомов бора $N_B \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и марки КДБ-0,5 с концентрацией примесных атомов бора $N_B \approx 6,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, кремний, предварительно легированный примесными атомами бора $N_B \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и германия с концентрацией $N_{\text{Ge}} = 6,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ выращенный методом Чохральского, а также элементов германия (ГЭС-1) и марганца чистотой 99,99 %, использованных в качестве примесных атомов.

Предметом исследования являются нанокластеры примесных атомов марганца и германия, а также образцы монокристаллического кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, дополнительно легированные примесными атомами марганца, в которых в широком интервале температур $T = 1,8 \text{ К}$ и $T = 300 \text{ К}$ определены отрицательное сопротивление (R_h), магнитное насыщение (M_s), остаточная намагниченность (M_r) и коэрцитивная сила (H_c).

Методы исследований. В диссертационной работе были применены сканирующий электронный микроскоп SEM Jeol JSM-IT200LA, Фурье-спектрометр ФСМ-1202, вакуумная установка ВУП-5, установка Escoria HMS-7000 для измерений методом эффекта Холла и методом Ван-дер-Пау, установка рентгеновского микроанализа Shimadzu XRD-6100, магнитно-силовой микроскоп FM-Nanoview 1000, а также другие современные методы и измерительные приборы для достоверного определения элементного состава образцов, оценки электрофизических, фотоэлектрических и оптических параметров в широком интервале температур, а также определения распределения примесных атомов марганца и германия на поверхности и в приповерхностных слоях кремния.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые определены электрофизические, фотоэлектрические, оптические и магнитные свойства образцов кремния, легированного примесными атомами марганца и германия, а также кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонными структурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$, дополнительно легированными примесными атомами марганца;

впервые разработана воспроизводимая низкотемпературная двухэтапная диффузионная технология легирования примесных атомов марганца и германия в кремний, в результате получены нанокластеры примесных атомов, а также бинарные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в кремнии с различными удельными сопротивлениями и типами проводимости;

впервые в образцах кремния легированного примесными атомами марганца и германия, ферромагнитные свойства наблюдались не только при низких температурах ($T_{\text{кр}} = 30 \text{ K}$), но и при относительно высоких температурах ($T_{\text{кр}} = 300 \text{ K}$);

впервые определены магнитные параметры, такие как магнитная насыщенность (M_s), остаточная намагниченность (M_r) и коэрцитивная сила (H_c), в образцах монокристаллического кремния с нанокластерами примесных атомов марганца и германия, а также в соединениях $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ при температурах $T = 1,8 \text{ K}$ и $T = 300 \text{ K}$;

определено, что энергия связи между атомами кремния-германия в бинарных соединениях $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, образованных на поверхности кремния и в приповерхностных слоях, отличается от энергии связи между атомами германия-германия, а также между атомами кремния-кремния;

показаны возможности создания чувствительных магнитодатчиков в магнито- и спинэлектронике на основе кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонными структурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ дополнительно легированного примесными атомами марганца.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработанная воспроизводимая низкотемпературная двухэтапная диффузионная технология легирования примесными атомами марганца и германия позволила получить магниточувствительный материал с гетероваризонными структурами $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$;

показаны возможности создания высокочувствительных магнитных датчиков и сенсоров, а также эффективных солнечных элементов, поглощающих широкий спектр солнечного излучения на основе нанокластеров и гетероваризонных структур, сформированных в образцах кремния.

Достоверность результатов исследований обеспечена использованием современных методов и измерительных приборов, научной обоснованностью полученных результатов, соответствием результатов экспериментов теоретическим расчётам и работам других авторов, а также интерпретацией полученных данных с точки зрения фундаментальной физики полупроводников.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований заключается в выявлении магнитных свойств кремния, легированного примесными атомами марганца и германия, в получении ферромагнитного кремния с гетероваризонными структурами $\text{Si}(\text{Mn,Ge})$ при комнатной температуре ($T_{\text{кр}} = 300 \text{ K}$), а также в определении магнитной насыщенности (M_s), остаточной намагниченности (M_r) и коэрцитивной силы (H_c) полученных образцов кремния с нанокластерами примесных атомов марганца и гетероваризонных структур $\text{Si}(\text{Mn,Ge})$.

С практической точки зрения разработана двухэтапная низкотемпературная диффузионная технология получения на поверхности кремния без эрозии нанокластеров примесных атомов марганца и германия, а также соединений $\text{Si}(\text{Mn,Ge})$. Это позволило получить материал с максимальной концентрацией магнитных доменов примесных атомов марганца. На основе полученных экспериментальных результатов показаны возможности применения образцов в спинэлектронике и силовых электронных устройствах в качестве ключей, а также создания магниточувствительных датчиков и элементов магнитной памяти.

Внедрение результатов исследования. На основе научных результатов, полученных при исследовании магнитных свойств кремния, легированного примесными атомами германия и марганца:

Результаты, полученные с использованием технологии, основанной на поэтапном повышении температуры диффузии примесных атомов марганца и германия, внедрены в производственный процесс АО «ФОТОН» (справка АО «ФОТОН» № 214 от 4 декабря 2024 г.). В результате применения разработанной диффузионной технологии удалось усовершенствовать процесс введения примесных атомов в кремний, а также обеспечить возможность формирования оптимальных p–n-переходов при производстве современных диодов и транзисторов.

Научные результаты, характеризующие изменение магнитного момента в образцах кремния, легированного примесными атомами марганца, внедрены при выполнении фундаментального проекта № ОТ-Ф2-37 по теме «Плавление металлов с использованием сверхзвукового потока газовой смеси, получение пористых металлов и исследование их физических свойств» в Самаркандском

государственном университете имени Шарофа Рашидова (справка Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан № 02/01-01-398 от 13 октября 2025 года). Использование данных научных результатов позволило определить физические свойства полученных материалов, а также температуру Кюри перехода материалов в ферромагнитное состояние под воздействием магнитного поля.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 международных и 6 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 25 научных трудах, из них 8 статей вышли в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 4 статьи опубликованы в базе данных Scopus, а также получены 2 свидетельства на программное обеспечение для расчёта на ЭВМ процесса диффузии примесных атомов марганца в кремний.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы. Объём диссертации составляет 116 страниц, включая 37 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и необходимость темы исследования, показана связь исследования с основными приоритетными направлениями развития науки и техники, а также определено состояние решения научной проблемы, обоснованы цель, задачи, объекты и методы исследования, показаны научная новизна и практическая значимость диссертации, а также возможности применения полученных научных результатов на практике. В конце введения приведены сведения об апробации результатов диссертационного исследования на международных и республиканских научно-практических конференциях, опубликованных статьях, а также об объеме и структуре работы.

Первая глава диссертационной работы «**Магнитные свойства бинарных соединений, поведение примесных атомов марганца и германия в кремнии**» посвящена обзору литературы, в котором представлен анализ существующей научной литературы по направлению диссертационной работы. В конце главы определены цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава диссертационной работы под названием «**Технология получения нанокластеров примесных атомов марганца и германия, а также бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ и $\text{Si}(\text{Mn},\text{Ge})$ в кремнии**» посвящена термодинамическим условиям диффузионного процесса и технологическим этапам получения образцов кремния с нанокластерами примесных атомов марганца, бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, а также гетероваризонными структурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ и

$\text{Si} \langle \text{Mn, Ge} \rangle$. Описаны механизмы диффузии примесных атомов марганца и германия в кремний из газовой фазы, а также термодинамические условия взаимодействия этих примесных атомов с атомами кремния и структурными дефектами кристаллической решётки. Изложены основные физико-химические параметры полученных нанокластеров, бинарных соединений и гетероваризонных структур, а также современные методы исследования и принципы работы оборудования, использованного при их исследовании. В конце главы приведён научный анализ разработанной низкотемпературной двухэтапной диффузионной технологии введения примесных атомов марганца и германия в кремний.

В третьей главе диссертации под названием **«Образование бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ и $\text{Si} \langle \text{Mn, Ge} \rangle$, а также их электрофизические и фотоэлектрические свойства»** приведены результаты научных исследований, проведённых на полученных образцах. На основе экспериментальных результатов установлено, что электрофизические параметры образцов кремния, легированных примесными атомами марганца и германия, существенно отличаются от электрофизических параметров исходного кремния. На основе разработанной двухэтапной низкотемпературной диффузионной технологии при легировании образцов кремния примесными атомами марганца и германия из газовой фазы на поверхности и в приповерхностном слое кремния были получены нанокластеры примесных атомов марганца, бинарные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, а также гетероваризонные структуры $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$.

Для получения нанокластеров примесных атомов марганца и бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ использовались исходные монокристаллические образцы кремния марок КДБ-0,5, КДБ-10 и КЭФ-100, выращенные методом Чохральского (Cz-Si). Концентрации исходных примесных атомов бора и фосфора в этих образцах кремния составляли соответственно $6,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Введение примесных атомов германия в кремний осуществлялось с использованием разработанной двухэтапной низкотемпературной диффузионной технологии. Основные этапы низкотемпературной диффузионной технологии заключались в следующем: исследуемые исходные образцы кремния подготавливались в форме параллелепипеда, а порошкообразные диффузенты марганца и германия чистотой 99,99 % и определённой массы (масса зависела от объёма кварцевой ампулы) помещались в кварцевые ампулы, после чего в них создавался вакуум (степень вакуума внутри ампулы составляла $P \approx 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$). Для диффузии примесных атомов германия кварцевые ампулы помещались в диффузионную электрическую печь марки MG17–60/300 при комнатной температуре ($T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$). Температура электрической печи постепенно повышалась со скоростью 5 град/мин. При этом на первом этапе диффузии примесных атомов германия в образцы кремния температура повышалась до $T = 800 \div 900 \text{ }^\circ\text{C}$, и образцы выдерживались при этой температуре в течение $t = 2 \text{ ч.}$ Затем температура электрической печи повышалась с относительно высокой скоростью, составляющей $20 \div 30 \text{ }^\circ\text{C/мин}$, до температуры максимальной

растворимости примесных атомов германия ($T = 1200 \div 1250$ °C), и при этой температуре образцы выдерживались в течение $t = 5$ ч. После этого кварцевые ампулы извлекались из электрической печи и охлаждались со скоростью 200 град/с путём погружения в холодное техническое масло. Аналогичным методом примесные атомы марганца вводились как в исходные образцы кремния, так и в образцы кремния, содержащие примесные атомы германия, в результате чего были получены образцы с нанокластерами примесных атомов марганца и структурами $\text{Si} \langle \text{Mn, Ge} \rangle$.

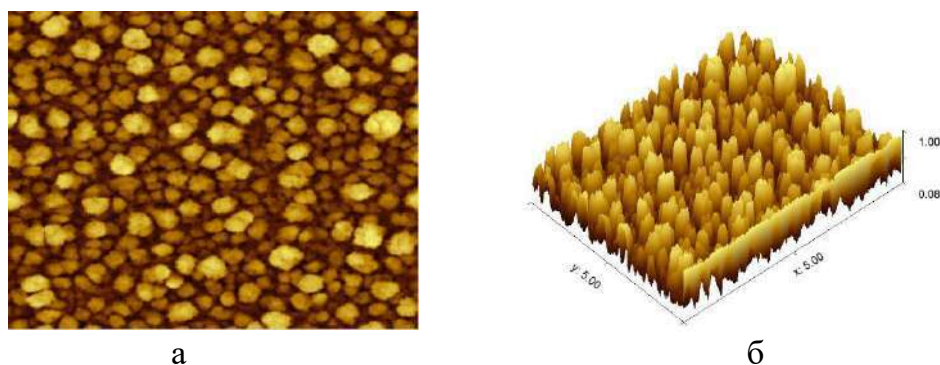


Рис. 1. а-нанокластеры бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ на поверхности кремния, б- 3D-изображение бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$.

С помощью атомно-силового микроскопа марки FM-Nanoview 1000 было исследовано образование бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ на поверхности кремния (см. на рис.1).

На основании анализа полученных результатов исследований установлено, что при относительно низких температурах диффузия примесных атомов германия происходит по узлам кристаллической решётки кремния, в результате чего примесные атомы германия располагаются в узлах кристаллической решётки кремния, а примесные атомы марганца - в междоузельных положениях кристаллической решётки кремния. Концентрация примесных атомов германия на поверхности и в приповерхностном слое кремния исследовалась методом микрозондового анализа с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). При этом поверхность кремния исследовалась до глубины ~ 10 мкм путём послойного удаления поверхностного слоя методом химического травления с шагом $\sim 0,5$ мкм. Результаты микрозондового анализа показали, что после диффузии примесные атомы германия на поверхности кремния образуют множество островков, состоящих из бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$.

На основании анализа результатов эксперимента установлено, что оптимальная концентрация примесных атомов германия в кремнии у его поверхности составляет примерно $N_{\text{Ge}} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. При дополнительной термической обработке образцов кремния концентрация примесных атомов германия увеличивалась ($N_{\text{Ge}} > 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Однако электрофизические параметры образцов с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ резко ухудшались.

На основании анализа результатов исследования установлено, что в образцах кремния, легированных примесными атомами германия, при формировании бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ ширина запрещённой зоны изменяется от значения $E_{g1} = 0,68$ эВ, соответствующего чистому монокристаллическому германию, до значения $E_{g4} = 1,12$ эВ, соответствующего чистому кремнию (см. на рис. 2). Установлено, что в зависимости от концентрации примесных атомов германия и технологических этапов в кремнии формируются бинарные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонные структуры $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ определённой толщины и плотности.

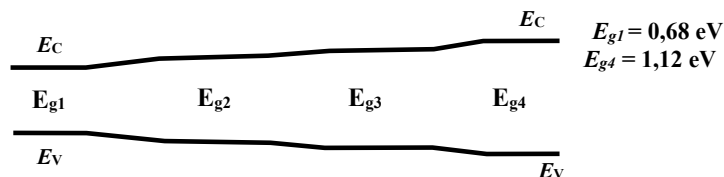


Рис. 2. Зонная диаграмма кремния с гетероваризонными структурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$.

Разработанная двухэтапная низкотемпературная диффузионная технология позволила получить образцы кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ на поверхности и в приповерхностном слое толщиной $d = 10,2\text{--}11,5$ мкм. Концентрация бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ экспоненциально уменьшалась по мере проникновения в глубину от поверхности кремния в зависимости от их элементного состава (величины x). Анализ экспериментальных результатов показал, что на поверхности кремния в тонком слое толщиной до $d \approx 0,3$ мкм содержание примесных атомов германия достигает $\sim 30\%$, т.е. образуются бинарные соединения с элементным составом $\text{Ge}_{0,30}\text{Si}_{0,70}$. После этого слоя концентрация атомов германия в кремнии экспоненциально уменьшается. При глубине $d \geq 5$ мкм установлено, что элементный состав бинарных соединений в кремний соответствует соотношению $\text{Ge}_{0,05}\text{Si}_{0,95}$. Установлено, что с помощью разработанной двухэтапной низкотемпературной диффузионной технологии на поверхности и в приповерхностном слое кремния можно сформировать бинарные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонные структуры $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$.

Формирование бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$, образованных в кремнии на основе примесных атомов германия, а также их распределение на поверхности и в приповерхностном слое кремния приведены на рис. 3. Как видно из рис. 3, распределение концентрации бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, образованных в кремнии, имеет экспоненциальную зависимость. На основании анализа результатов исследования установлено, что на поверхности и в приповерхностном слое кремния вплоть до глубины $d \sim 0,3$ мкм бинарные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ имеют максимальную концентрацию. При дальнейшем углублении в объём кремния концентрация примесных атомов германия, участвующих в образовании

бинарных соединений, экспоненциально уменьшается. Установлено, что распределение концентрации бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, образованных в кремнии, состоит из следующих четырёх участков:

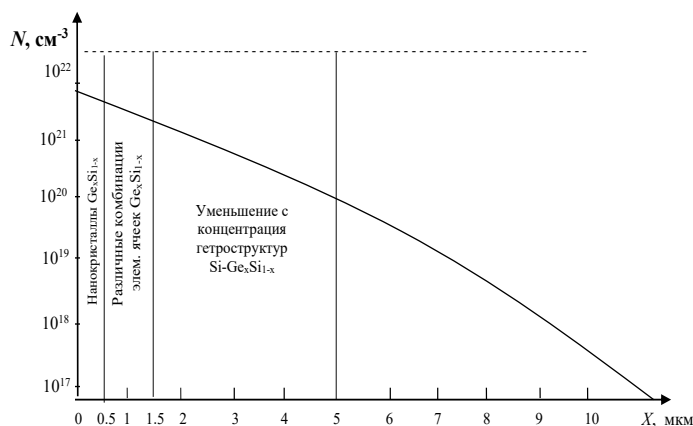


Рис. 3. Концентрационное распределение бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$, образованных на поверхности и в приповерхностном слое кремния.

1. Концентрация бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, образованных на поверхности кремния, была близка к концентрации атомов кремния или несколько ниже неё;

2. Концентрация бинарных соединений уменьшалась, и начинали образовываться нейтрально-молекулярные гетероваризонные структуры $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$, то есть начиналось формирование гетероваризонных структур;

3. Концентрация образованных гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ увеличивалась, а концентрация бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ уменьшалась;

4. Четвёртый участок, состоящий в основном из атомов исходного кремния. На этом участке могут присутствовать бинарные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонные структуры $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$, однако их концентрация значительно ниже концентрации атомов кремния.

Как видно из рис. 4, в образцах кремния, содержащих бинарные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, в отличие от контрольных образцов кремния, не содержащих примесных атомов германия, наблюдалось заметное увеличение фототока при энергии фотонов $h\nu = 0,75 \div 0,8$ эВ. Установлено, что значения энергии фотонов в указанном диапазоне превышает ширину запрещенной зоны чистого монокристаллического германия ($E_{g\text{Ge}} = 0,68$ эВ). При энергии падающих фотонов $h\nu = 1,1$ эВ наблюдалось резкое увеличение фототока, что объясняется началом межзонных оптических переходов в кремнии. На основании увеличения фототока в диапазоне энергии падающих фотонов $h\nu = 0,75 \div 0,8$ эВ установлено, что энергия связи между атомами германия и кремния в бинарных соединениях $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ меньше ширины запрещённой зоны кремния, но больше ширины запрещённой зоны германия.

При энергии фотонов $h\nu = 0,75$ эВ начинался переход электронов из бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ или гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ в кремнии в зону проводимости, что обусловило начало фоточувствительности

в образцах кремния, легированных примесными атомами германия, начиная $h\nu = 0,75$ эВ.

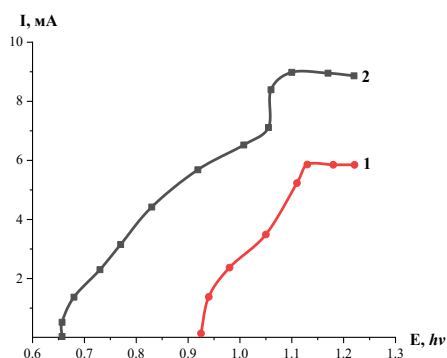


Рис. 4. Спектральная зависимость фотопроводимости образцов кремния: 1 - контрольный образец кремния, 2 - кремний, содержащий бинарные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, при $T = 80$ К, $U = 20$ В.

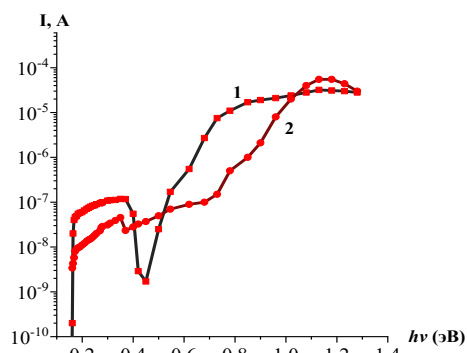


Рис. 5. Спектральная зависимость фотопроводимости образцов кремния: 1-Si<Mn>, $\rho = 2,5 \cdot 10^2$ Ом·см, 2-Si<Mn,Ge>, $\rho = 4,3 \cdot 10^2$ Ом·см, при $T = 80$ К, $U = 20$ В.

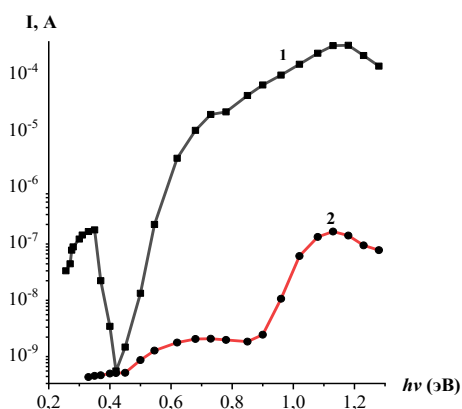


Рис. 6. Спектральная зависимость фотопроводимости образцов кремния: 1-Si <Mn>, $\rho = 4,1 \cdot 10^4$ Ом·см, 2-Si<Mn,Ge>, $\rho = 5,7 \cdot 10^4$ Ом·см, при $T = 80$ К, $U = 20$ В.

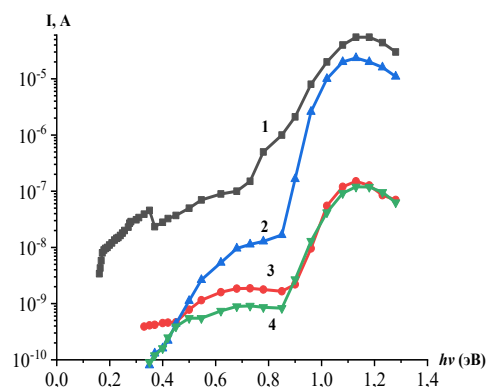


Рис. 7. Спектральная зависимость фотопроводимости образцов кремния со структурой Si<Mn,Ge> с различными удельными сопротивлениями: 1- $\rho = 5,7 \cdot 10^2$ Ом·см, 2- $\rho = 1,5 \cdot 10^5$ Ом·см, 3- $\rho = 7,5 \cdot 10^4$ Ом·см, 4- $\rho = 1,5 \cdot 10^4$ Ом·см, при $T = 80$ К, $U = 20$.

Исследование фотоэлектрических свойств кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонными структурами Si<Mn,Ge>, дополнительно легированными примесными атомами марганца, проводилось на образцах, полученных диффузионным методом из газовой фазы, с различным удельным сопротивлением $\rho = 10^2 \div 10^5$ Ом·см при температуре $T = 80$ К. Результаты исследований показали, что примесные атомы германия и марганца в кремнии образуют ионно-ковалентные соединения Si<Mn,Ge> и приводят к уменьшению концентрации оптически активного кислорода примерно на ~ 10 %. В результате установлено, что возможно получение

образцов кремния с термостабильными и радиационно-стойкими электрофизическими параметрами. Дополнительное введение примесных атомов марганца в образцы кремния, легированные атомами германия, позволило сформировать гетероваризонные структуры $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ и нанокластеры.

На рисунках 5, 6 и 7 представлены спектральные зависимости фотопроводимости образцов кремния, легированного примесными атомами германия и марганца, а также исходных образцов кремния, легированных только примесными атомами марганца. Исследования проводились на образцах кремния p-типа проводимости с гетероваризонными структурами $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ и различными значениями удельного сопротивления $\rho = 10^2 \div 10^5$ Ом·см. Измерения выполнялись в инфракрасной области спектральной фотопроводимости, то есть в условиях, когда энергия падающих фотонов была меньше ширины запрещённой зоны кремния ($h\nu < E_g$), при напряжённости электрического поля $E = 20$ В/см и температуре $T = 80$ К.

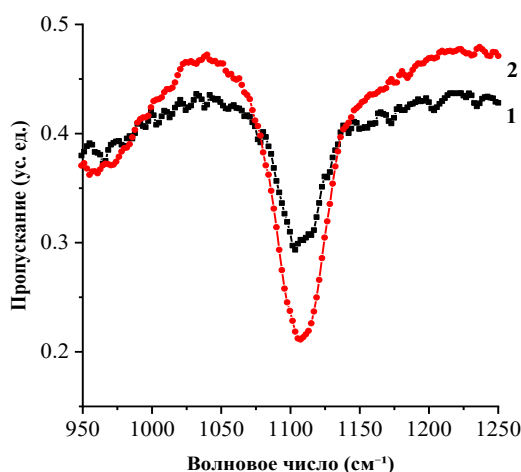


Рис. 8. Зависимость фотопроводимости образцов кремния с соединениями $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ от длины волны падающего излучения: 1- $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$, 2- контрольный образец кремния $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$, легированный примесными атомами германия в процессе выращивания, при $T = 300$ К.

Оценка концентрации оптически активных атомов кислорода в образцах кремния, легированных примесными атомами германия и марганца, а также в контрольных образцах кремния, легированных только примесными атомами германия в процессе выращивания, проводилась по спектрам пропускания в инфракрасной области, начиная с $\lambda \sim 620$ см⁻¹. Спектры измерялись с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра ФСМ-1200 при комнатной температуре $T = 300$ К (см. на рис. 8).

Исследования, проведённые с помощью сканирующего электронного микроскопа, показали, что в элементном составе поверхности и приповерхностного слоя кремния, легированного примесными атомами германия, возможно образование бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ путём управления технологическими режимами диффузии примесных атомов германия в кремний, в частности температурой и временем процесса. В отличие от различных комбинаций бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в кристаллической решётке кремния также возможно образование молекулярно-нейтральной ячейки тетраэдрической конфигурации, в которой атом германия окружён тремя атомами кремния (см. на рис. 9).

Анализ экспериментальных результатов показал, что на поверхности и в приповерхностном слое кремния формируется область, обогащённая примесными атомами германия, что приводит к образованию в кристаллической решётке кремния гетероваризонных структур состава $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$. Установлено, что размеры образующихся соединений зависят от концентрации и основных параметров примесных атомов германия, а также от термодинамических условий диффузионного легирования.

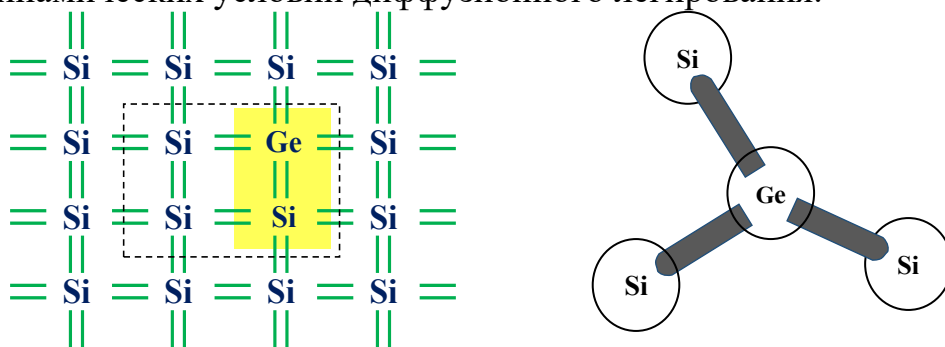


Рис. 9. Ковалентная связь атомов кремния и германия и структура элементарной тетраэдрической ячейки $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ в кремнии ($E_{g1}\text{-Si=Si}=1,12\text{ eV}$, $E_{g2}\text{-Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, $E_{g3}\text{-Si}_2\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, $E_{g4}\text{-Ge=Ge}=0,68\text{ eV}$).

В четвертой главе диссертации под названием «Магнитные свойства кремния с нанокластерами примесных атомов марганца, а также гетероваризонными структурами $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ » представлены экспериментальные результаты исследования магнитных и электрофизических параметров образцов кремния, содержащих бинарные соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и дополнительно легированных примесными атомами марганца.

Результаты исследования магнитных свойств кремния, легированного примесными атомами германия и дополнительно легированного примесными атомами марганца, показали, что наряду с образованием насыщенных примесными атомами германия слоёв на поверхности и в приповерхностной области кремния формируются также соединения $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$. При исследовании поверхности кремния после диффузии примесных атомов германия и марганца с помощью установки рентгеновского энергодисперсионного микроанализа установлено, что концентрация примесных атомов германия на поверхности достигает почти половины концентрации атомов исходного кремния. На основе разработанной двухстадийной низкотемпературной диффузионной технологии электроактивная концентрация примесных атомов марганца в объёме кремния достигла значения их максимальной растворимости $N_{(\text{Mn})} = 2 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$. Установлено также, что присутствие примесных атомов германия и марганца приводит к существенному изменению фундаментальных электрофизических параметров исходного кремния.

Из результатов исследования установлено, что в образцах кремния, легированных примесными атомами марганца и германия, наблюдаются ферромагнитные свойства при относительно высоких температурах ($T_{\text{кр}} = 300$

К). Впервые в этих образцах кремния, легированных примесными атомами марганца и германия, были определены основные фундаментальные магнитные параметры, такие как M_s - намагниченность насыщения, M_r - остаточная намагниченность и H_c - коэрцитивная сила. Исследование магнитных свойств полученных образцов кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, дополнительно легированных примесными атомами марганца, проводилось с помощью магнитно-силового микроскопа марки FM-Nanoview 1000. На субмикронном уровне были получены «магнитные» изображения рельефа исследуемых образцов кремния (см. на рис. 10).

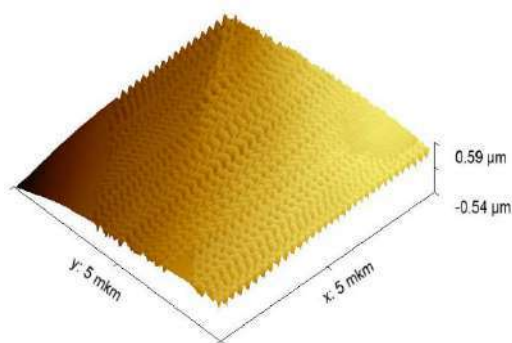


Рис. 10. Топология магнитных доменов и изображение магнитного рельефа в образцах кремния, содержащих соединения $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$, при $T = 300 \text{ K}$

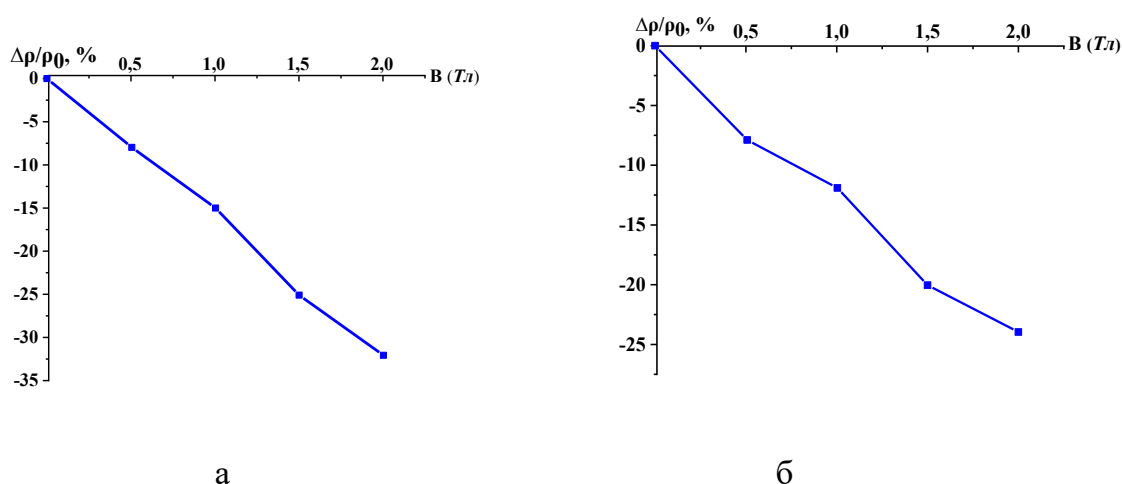


Рис. 11. Зависимость отрицательного магнитосопротивления от величины магнитного поля в образцах кремния, содержащих соединения $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$: при а- $T = 80 \text{ K}$; б- $T = 300 \text{ K}$; $E = 100 \text{ В/см}$.

Из анализа результатов исследований установлено, что в образцах кремния, легированных примесными атомами марганца и германия, наблюдаются ферромагнитные свойства не только при низких температурах ($T_{\text{кр}} = 30 \text{ K}$), но и при относительно высоких температурах ($T_{\text{кр}} = 300 \text{ K}$). По результатам исследования магнитных свойств образцов кремния, содержащих бинарные соединения $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$, установлено, что в этих образцах наблюдается аномально большое отрицательное магнитосопротивление (см. на рис. 11).

Как известно, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ, Scanning Electron Microscopy) позволяет получать высококачественные изображения

поверхности материалов и проводить их анализ позволяет улучшить качество изображений и использует поток высокоэнергетических электронов для получения изображений с достаточно высоким разрешением.

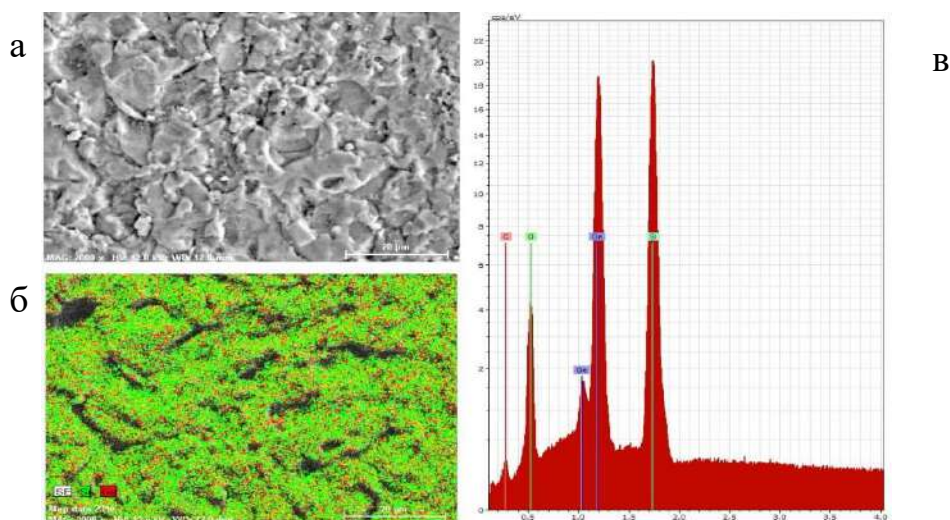


Рис. 12. а и б- топология поверхности кремния с бинарными соединениями; $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, в-спектр микрорентгендисперсионного энергодисперсионного анализа (масштаб 20 мкм), при $T = 300$ К.

На рис. 12, а и б, представлены изображения топологии поверхности образца кремния, легированного примесными атомами марганца и германия, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-IT 200.

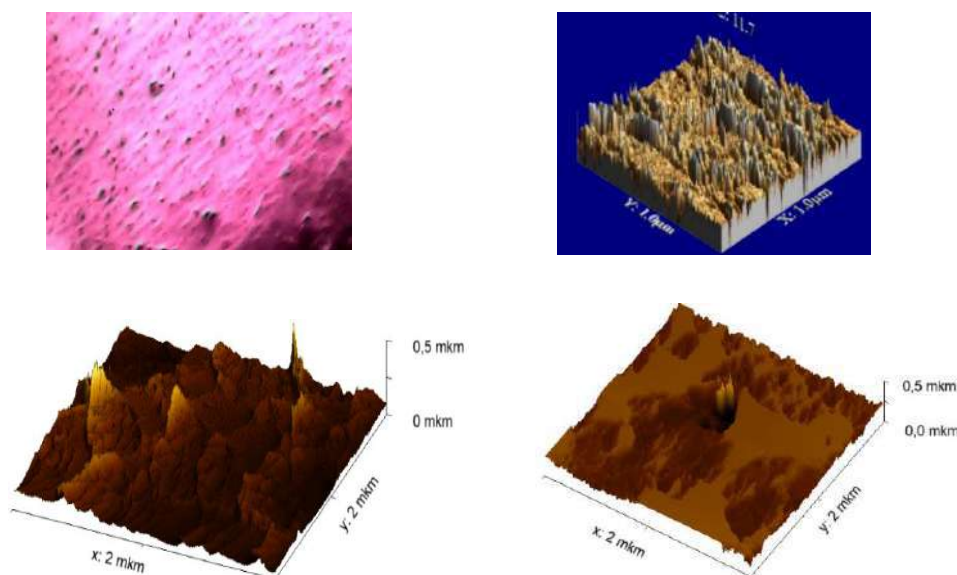


Рис. 13. Изображения поверхности образца кремния, легированного примесными атомами марганца и германия.

Для подтверждения образования в кремнии структур $\text{Si}(\text{Mn}, \text{Ge})$ с участием примесных атомов германия и марганца были проведены исследования с помощью атомно-силового микроскопа FM-Nanoview 1000. Результаты исследований показали, что островковые образования, сформировавшиеся на поверхности и в приповерхностном слое образцов

кремния, преимущественно состоят из ферромагнитных соединений $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ (см. на рис. 13). Образцы кремния, легированные примесными атомами марганца и германия, дополнительно исследовались методом ИК-микроскопии. Анализ экспериментальных результатов показал, что размеры сформировавшихся кремний-германиевых бинарных соединений $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ достигают $1\div 2$ мкм, а соединения, образованные примесными атомами марганца, присутствуют в значительном количестве на поверхности и в приповерхностном слое кремния.

Как видно из рис. 13, образование на поверхности образцов кремния островков, состоящих из соединений $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$, приводит к увеличению среднего наклона поверхности. Это показывает, что за счёт примесных атомов марганца на поверхности образцов кремния образуются ферромагнитные соединения $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$, что по сравнению с кремнием, легированным примесными атомами германия, приводит к появлению высоких пиков электрического потенциала.

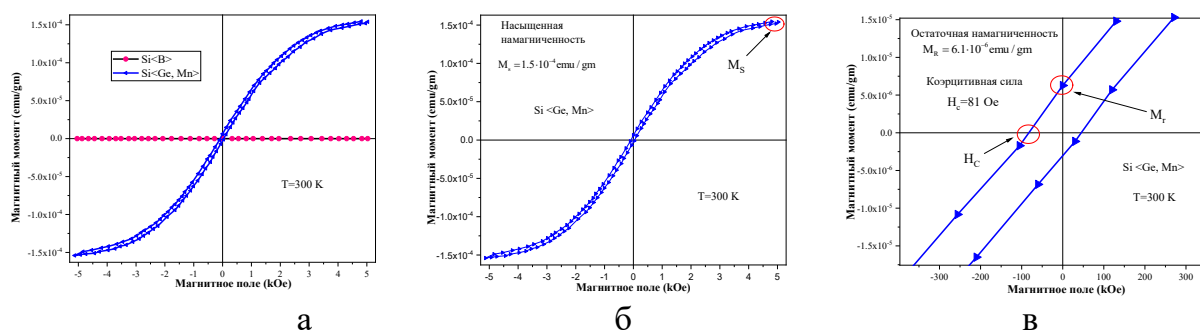


Рис. 14. Зависимость намагниченности от магнитного поля в образцах кремния, легированных примесными атомами марганца и германия, при $T = 300$ К:
а, б-образцы кремния $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$, $\rho = 4 \times 10^4$ Ом·см, p -типа проводимости (синий цвет) а также образцы с соединениями $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$, полученные после легирования исходного кремния примесными атомами германия в процессе выращивания с последующим введением примесных атомов марганца (красный цвет);
в - ферромагнитные параметры: M_s - намагниченность насыщения, M_r - остаточная намагниченность и H_c - коэрцитивная сила.

При введении примесных атомов марганца в образцы кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, образованными с участием примесных атомов германия, при температуре $T = 300$ К наблюдалось ферромагнитное состояние (см. на рис. 14).

Результаты исследования зависимости магнитного момента образцов кремния, легированных примесными атомами марганца и германия, от удельного сопротивления материала показали, что в высокоомных образцах, то есть при значениях удельного сопротивления, близких к области собственной проводимости ($\rho \geq 10^5$ Ом·см), а также в образцах с $\rho < 4 \times 10^4$ Ом·см наблюдалось уменьшение магнитного момента. Это свидетельствовало о значительном уменьшении величины отрицательного магнитосопротивления (ОМС), наблюдаемого в данных образцах. На основании полученных результатов установлено, что наблюдаемое явление

ОМС непосредственно связано с упорядочением магнитных доменов примесных атомов марганца в образцах кремния.

На основании экспериментальных исследований можно заключить, что путём управления этапами процесса низкотемпературной двухэтапной диффузионной технологии возможно формирование бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, а также гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ и $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ в слое толщиной до $d = 5\text{--}6$ мкм, при этом обеспечивается достижение максимальной концентрации примесных атомов германия и марганца в образцах кремния.

В кристаллической решётке кремния, помимо бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ различных комбинаций, могут также образовываться соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ нейтрально-молекулярной структуры. Установлено, что в таких соединениях три атома кремния, располагаясь тетраэдрически относительно друг друга, образуют элементарную ячейку, в которой они окружают один атом германия. В результате образования этих соединений на поверхности и в приповерхностном слое кремния установлено формирование гетероваризонных структур типа $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$.

На основании экспериментальных результатов в образцах кремния, легированных примесными атомами марганца и германия, впервые при температуре $T = 300$ К наблюдалось явление ферромагнетизма.

Анализ результатов исследований показал, что при изучении магнитных свойств образцов кремния, легированных примесными атомами марганца и германия, в широком диапазоне температур ($T = 1,8\text{--}300$ К) наблюдалось ферромагнитное состояние. Это свидетельствует о возможности создания чувствительных магнитных датчиков, работающих при комнатной температуре.

Исследование магнитных свойств проводилось в образцах кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, дополнительно легированных примесными атомами марганца. Магнитные свойства изучались с помощью магнитно-силового микроскопа марки FM-Nanoview 1000. Результаты исследования показали, что в образцах кремния, содержащих нанокластеры соединений $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$, ферромагнитное состояние относительно сильно проявляется при температуре $T_{\text{кр}} = 300$ К (комнатной температуре). Следует отметить, что соединения примесных атомов марганца и германия в кремнии, в котором наблюдались ферромагнитные явления при комнатной температуре, впервые наблюдались в материалах, полученных с помощью диффузионной технологии.

На рис. 15 показана топология магнитных доменов в образцах кремния, легированного примесными атомами германия и марганца. Как видно из рисунка, поверхность кремния полностью состоит из магнитных доменов, образованных примесными атомами германия и марганца, которые не только усиливают ферромагнитные свойства кремния, но и смещают значение температуры Кюри $T_{\text{кр}}$ в область более высоких температур.

Из результатов исследования установлено, что образцы кремния с соединениями $\text{Si}\langle\text{Mn,Ge}\rangle$ при комнатной температуре переходят из парамагнитного состояния в ферромагнитное. В образцах кремния,

легированных примесными атомами германия и марганца, впервые установлено, что, в отличие от образцов кремния, легированных только примесными атомами марганца ($T_{Kp} = 30$ K), ферромагнитные свойства наблюдаются при $T_{Kp} = 300$ K и при более высоких температурах.

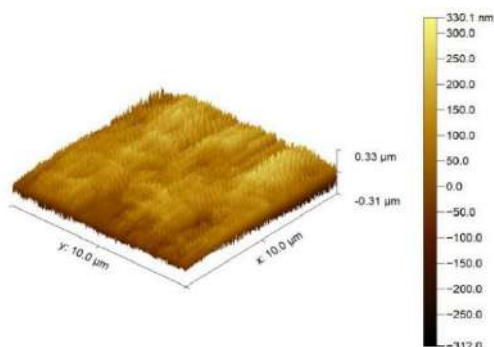


Рис. 15. Топология магнитных доменов в образцах кремния, легированных примесными атомами марганца и германия, при $T = 300$ K.

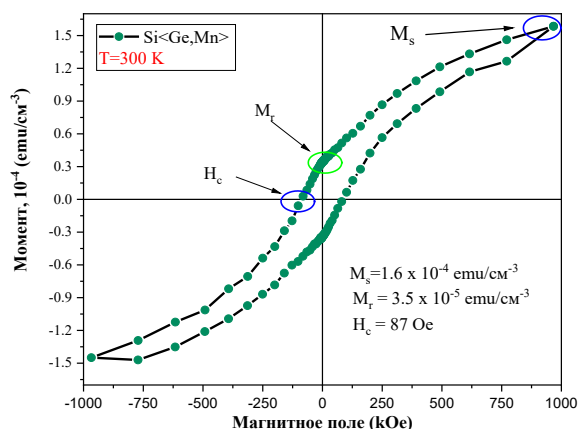


Рис. 16. Зависимость магнитного момента образцов кремния, легированных примесными атомами марганца и германия, от напряжённости магнитного поля при $T = 300$ K. $M_s = 1.6 \cdot 10^4$ эму/см³, $M_r = 3.5 \cdot 10^5$ эму/см³, $H_c = 87$ Э.

Анализ экспериментальных результатов показал, что дополнительная термическая обработка образцов кремния при температуре $T = 800$ °C приводит к максимальному образованию соединений Si<Mn,Ge>. Кроме того, при этой температуре оксидный слой на поверхности кремния достигает минимального уровня.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что в результате дополнительного введения примесных атомов марганца в кремний, содержащий примесные атомы германия, формируются нанокластеры трёхкомпонентных соединений структуры Si<Mn,Ge>, обладающих магнитными свойствами. Результаты исследований были получены и проанализированы с помощью сверхпроводящего квантового интерференционного магнитометра марки Quantum Design MPMS-3. Полученные результаты показали, что наличие в образцах кремния соединений структуры Si<Mn,Ge> приводит к проявлению высокотемпературного ферромагнитного явления. Данное явление обусловлено незаполненными d-орбиталями примесных атомов марганца и объясняется значительным изменением ориентации спинов электронов под воздействием магнитного поля. При этом наблюдается переход кремния в ферромагнитное состояние при комнатной температуре и смещение температуры Кюри к более высоким значениям (см. на рис. 16).

Исследование оптических свойств образцов кремния с соединениями Si<Mn,Ge>, полученных методом диффузионного легирования исходного кремния примесными атомами германия и марганца из газовой фазы,

показало, что данная технология позволяет получить новый материал для магнитоэлектроники и спинтроники. Наблюдаемые физические явления вызывают интерес у учёных и специалистов, так как кремний является основным материалом при изготовлении полупроводниковых приборов и позволяет использовать широко применяемые этапы планарной технологии.

Для исследования были отобраны образцы кремния, легированные примесными атомами германия и подвергнутые дополнительной термообработке в интервале температур $T = 800 \div 1000$ °C в течение $t = 2$ ч.

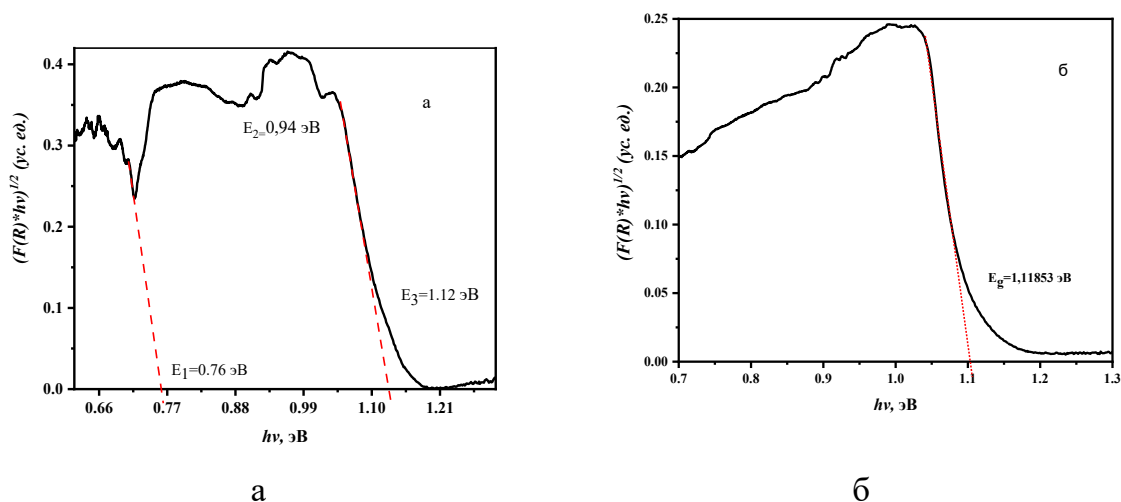


Рис. 17. а-спектр поглощения кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, б-спектр поглощения исходного монокристаллического кремния, при $T = 300$ К.

Исследование оптических свойств образцов кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ проводилось с помощью спектрометра марки Lambda 950 UV/Vis/NIR (см. на рис. 17). Из результатов исследований установлено, что в образцах кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ выявлено изменение одного из основных фундаментальных параметров исходного кремния - энергия химической связи между атомами. Изменение энергии химической связи бинарных соединений кремний–германий привело к изменению фундаментальных параметров кристаллической решётки исходного кремния. Анализ результатов исследования показал существенное изменение оптических свойств образцов, полученных после диффузии, по сравнению с исходным кремнием.

На основании полученных результатов исследования и решения уравнения функции Кубелки–Мунка была определена энергия химической связи бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в кремнии на основе данных оптического спектра отражённого света (см. на формулу 1).

$$F_{KM} = \frac{(1-R)^2}{2R}$$

$$hv \cdot F_{KM}^{1/n} = A(hv - E_g) \quad (1)$$

где: R - коэффициент отражения, A - коэффициент пропорциональности, hv - энергия фотона, зависящая от угла θ наклона спектра поглощения, E_g - ширина запрещённой зоны. На основании значения угла наклона θ и решения уравнения функции Кубелки–Мунка была определена величина энергии

запрещённой зоны, обусловленной образованием бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в кремнии.

Состав и оптические свойства полученных бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в кремнии исследовались с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра марки ФСМ-1202. Перед исследованием оптических свойств образцов кремния, легированных примесными атомами германия, две противоположные поверхности образцов полировались алмазной пастой, а остальные четыре стороны кремния механически шлифовались до ~ 50 мкм с целью удаления поверхностного слоя, обогащённого примесными атомами германия. Эти исследования позволили точно измерить элементный состав поверхности и приповерхностного слоя кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ (см. на рис. 18).

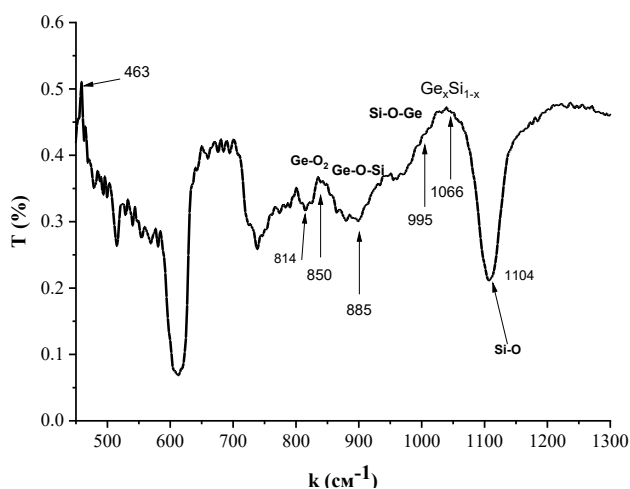


Рис. 18. Фурье-спектр и элементный состав поверхности кремния, легированного примесными атомами германия, при $T = 300$ К.

Анализ результатов исследований показал, что образование бинарных примесными атомами германия бинарных соединений с основными атомами кремния приводит к появлению пика поглощения при частоте 1066 см^{-1} . В результате сравнительного анализа установлено, что пики, наблюдаемые при частотах 885 см^{-1} и 850 см^{-1} , соответствуют оксидам германия (GeO_2), а пик при 1104 см^{-1} образованию соединений кремний–кислород (Si-O). Коэффициент оптического пропускания, соответствующий пику при 1066 см^{-1} , о свидетельствует наличии в кремнии бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$. Исследования проводились на образцах кремния, легированных примесными атомами германия и дополнительно подвергнутых термической обработке в интервале температур $T = 800 \div 1000$ °С в течение $t = 2$ ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационной работы на основе проведенных исследований определены следующие научные результаты:

1. Впервые разработана воспроизводимая низкотемпературная двухэтапная диффузионная технология легирования кремния примесными атомами марганца и германия, которая позволила получить образцы кремния

с максимальными концентрациями нанокластеров примесных атомов марганца, а также соединения $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$ с различными удельными сопротивлениями и типом проводимости.

2. Определена оптимальная концентрация внедрённых примесных атомов германия, которая составляла порядка $N_{\text{Ge}} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ на поверхности кремния, а также концентрация нанокластеров атомов марганца. Установлено, что при дополнительной термообработке образцов кремния, легированного примесными атомами германия, можно получить образцы с бинарными соединениями более высокой концентрацией ($N_{\text{Ge}} > 10^{20} \text{ см}^{-3}$), однако при этом наблюдается резкое ухудшение электрофизических и магнитных свойств полученных материалов. Определены термодинамические условия формирования бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и гетероваризонных структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ в кремнии.

3. Результаты исследований электрофизических, фотоэлектрических, оптических и магнитных свойств кремния, легированного примесными атомами марганца и германия, показали, что на поверхности и в приповерхностной области, помимо образования соединений $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$, формируются также гетероваризонные структуры $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ находящиеся в нейтральном состоянии.

4. В образцах кремния легированного примесными атомами марганца и германия, впервые обнаружены ферромагнитные свойства не только при низких температурах ($T_{\text{кр}} = 30 \text{ К}$), но и при относительно высоких температурах ($T_{\text{кр}} = 300 \text{ К}$). Показано, что в образцах кремния с нанокластерами примесных атомов марганца, а также с соединениями $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$ наблюдается аномально большое значение отрицательного магнитосопротивления.

5. Впервые определены магнитные параметры, такие как намагниченность насыщения (M_s), остаточная намагниченность (M_r) и коэрцитивная сила (H_c) в образцах монокристаллического кремния с нанокластерами примесных атомов марганца и германия, а также с соединениями $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$, при температурах $T = 1,8$ и $T = 300 \text{ К}$.

6. Установлено, что в образованных на поверхности и в приповерхностном слое кремния в бинарных соединениях $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, энергия связи атомов кремния-германия и энергия связи между атомами германия-германия отличаются от энергии связи атомов кремния-кремния в исходном материале.

7. Предложен физический механизм образования нанокластеров примесных атомов марганца и германия в кремнии и показана возможность управления магнитосопротивлением и ферромагнитными параметрами полученных образцов.

8. Полученные результаты показали возможность создания магниточувствительных датчиков и сенсоров на основе кремния с бинарными нанокластерами $\text{Si}\langle\text{Mn},\text{Ge}\rangle$ сформированными на поверхности и в приповерхностном слое.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc. 03/ 2025.27.12.FM/T.01.06 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF
SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELECTRONICS AT THE
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY NAMED
AFTER ISLAM KARIMOV**

URAKOVA FERUZA ERKINOVNA

**MAGNETIC PROPERTIES IN SILICON DOPED WITH IMPURITY
ATOMS OF MANGANESE AND GERMANIUM**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Tashkent - 2026

The topic of the dissertation of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical sciences has been registered with the Higher Attestation Commission at the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under registration number B2023.3. PhD/FM927.

Dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University

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

Scientific supervisor:

Zikrillaev Nurullo Fatkhullaevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Official opponents:

Onarkulov Karimberdi Egamberdievich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Mavlyanov Abdulaziz Shavkatovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher.

Leading organization:

Samarkand State University

The dissertation will be defended on «18» 09 2026, at 10⁰⁰ hours at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 at the Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan. Address: 100057, Toshkent city, Uzbekistan. Yangi Olmazor str., 20. Tel. (99871) 248-79-91; fax: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.

The dissertation can be found at the Information Resource Center of the Institute (registered under No. 80). Address: Yangi Olmazor str., 20, 100057, Toshkent city, Uzbekistan. Tel. (99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on «13» 09 2026.
(Registry record No. 80 dated «03» 09 2026)



Sh.B. Utamuradova,
Chairwoman of the Scientific Council for the
award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and
Mathematical Sciences, Professor

J.J. Hamdamov
Scientific Secretary of the Scientific Council for
the Award of Scientific Degrees, Doctor of Philosophy (PhD)
on Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

N.A. Turgunov
Chairman of the Scientific Seminar at the
Scientific Council for the Awarding of Scientific Degree,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the study is to investigate the magnetic properties of silicon containing nanoclusters of manganese and germanium impurity atoms, binary $\text{Si}<\text{Mn,Ge}>$ compounds, and $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ heterovarizone structures, as well as to determine the main magnetic parameters of the obtained samples.

The object consisted of Czochralski-grown single-crystal silicon of p-type conductivity, grade KDB-10 with a boron impurity concentration of $N_B \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and grade KDB-0,5 with a boron impurity concentration of $N_B \approx 6,2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; Czochralski-grown silicon pre-doped with boron impurity atoms at a concentration of $N_B \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and germanium at a concentration of $N_{\text{Ge}} = 6,3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ as well as germanium (GES-1) and manganese of 99,99% purity, used as impurity elements.

The scientific novelty of the research consists of the following:

the electrophysical, photoelectric, optical, and magnetic properties of silicon samples doped with manganese and germanium impurity atoms, as well as silicon containing $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binary compounds and $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ heterovarizone structures additionally doped with manganese impurity atoms, were determined;

for the first time, a reproducible low-temperature two-stage diffusion technology for doping silicon with manganese and germanium impurity atoms was developed. As a result, nanoclusters of impurity atoms, as well as $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binary compounds, were formed in silicon with different electrical resistivities and conductivity types;

for the first time, ferromagnetic properties were observed in silicon samples doped with manganese and germanium impurity atoms not only at low temperatures $T_C = 30 \text{ K}$, but also at relatively high temperatures $T_C = 300 \text{ K}$;

for the first time, magnetic parameters such as saturation magnetization (M_s), remanent magnetization (M_r), and coercive force (H_c) have been determined in single-crystal silicon samples containing nanoclusters of manganese and germanium impurity atoms, as well as in $\text{Si}<\text{Mn,Ge}>$ compounds, at temperatures of $T_C = 1,8 \text{ K}$ and $T_C = 300 \text{ K}$;

it was determined that the bond energy between silicon and germanium atoms in $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binary compounds formed on the silicon surface and in near-surface layers differs from the bond energies between germanium-germanium and silicon-silicon atoms;

the possibility of developing highly sensitive magnetic sensors for magnetoelectronics and spintronics based on silicon containing $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ binary compounds and $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}_2$ heterovarison structures additionally doped with manganese impurity atoms has been demonstrated.

Implementation of the research results.

Based on the scientific results obtained from the investigation of the magnetic properties of silicon doped with germanium and manganese impurity atoms:

The results obtained using the technology based on the stepwise increase of the diffusion temperature of manganese and germanium impurity atoms have been implemented in the production process of JSC "PHOTON" (Certificate of JSC

“PHOTON” No. 214 dated December 4, 2024). As a result of applying the developed diffusion technology, it became possible to improve the process of introducing impurity atoms into silicon, as well as to ensure the possibility of forming optimal p–n junctions in the production of modern diodes and transistors.

The scientific results characterizing the variation of the magnetic moment in silicon samples doped with manganese impurity atoms were implemented in the execution of Fundamental Research Project No. OT-F2-37, entitled “Melting of Metals Using a Supersonic Gas Mixture Flow, Production of Porous Metals, and Investigation of Their Physical Properties,” at Sharof Rashidov Samarkand State University (Certificate of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan No. 02/01-01-398 dated October 13, 2025). The use of these scientific results made it possible to determine the physical properties of the obtained materials, as well as the Curie temperature of the transition of the materials to the ferromagnetic state under the influence of a magnetic field.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, and a list of references. The dissertation is 116 pages long, including 37 figures and 7 tables.

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

I bo'lim (I часть, part I)

1. Н.Ф. Зикриллаев, Ф.Э. Уракова, М.М. Шоабдурахманова, Д.А. Абдуазимов. Диффузионная технология получения бинарных соединений $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в кремнии // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. № 6. 2024. с.19-23 (01.00.00; № 7), <https://academy.uz/ru/journals/maruzalar>.
2. N.F. Zikrillayev, K.S. Ayupov, F.E. Urakova, G.A. Kushiyeu, N. Norkulov, O. Nematov. Silicon with Binary $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ Compounds // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. Vol. 60. No. 1. 2024. pp. 75-88 (01.00.00; № 14, № 3; Scopus. IF=0,24), <https://doi.org/10.3103/S106837552470039X>.
3. N.F. Zikrillayev, Kh.F. Zikrillayev, F.E. Urakova, G.A. Kushiyeu, E.B. Saitov, D.M. Shukurova, B.Kh. Ibragimova. Photovoltaic Cells Based on Silicon with Binary Compounds $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. Vol. 61. No 2. 2025. pp. 234-239 (01.00.00; № 14, № 3; Scopus. IF=0,24), <https://doi.org/10.3103/S1068375525700127>.
4. N.F. Zikrillayev, F.E. Urakova, A.R. Toshev, G.A. Kushiyeu, T.B. Ismailov, N. Norkulov. Physical and magnetic Properties of silicon doped with impurity germanium atoms // East European Journal of Physics. No 1. 2025. pp. 184-189 (01.00.00; № 3; Scopus. IF=0,27), <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-1-18>.
5. Н.Ф. Зикриллаев, Э.Б. Саитов, Н. Норкулов, К.С. Аюпов, У.Х. Курбанова. Ф.Э. Уракова. Особенности кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ полученные методом диффузии // Научный вестник Бухарского государственного университета. № 6. 2025. с. 186-191 (01.00.00; № 3), https://buxdu.uz/media/jurnallar/ilmiy_axborot/ilmiy_axborot_6_2025_1.pdf.
6. N.F. Zikrillayev, N. Norkulov, F.E. Urakova. Electrophysical and photoelectric properties of cremnium containing $\text{Si}_2\text{GeMn}_{1-x}$ type connections// Science and education in Karakalpakstan. № 1/1. 2025. pp. 21-23 (01.00.00; № 11), https://drive.google.com/file/d/1Bh_pbg4H4llifZO_gLcyEHRMZVxQTVSS/view?usp=drivesdk.
7. N.F. Zikrillayev, G.M. Mavlonov, F.E. Urakova, U.Kh. Kurbonova, B.K. Ismailov, G.A. Kushiev, S.E. Urakov. Optical and Magnetic Properties of Silicon with Binary $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ Nanocompounds // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2025. Vol.17. No 5. pp.05013-1-5. (01.00.00; № 19, № 3; Scopus. IF=0,716), [https://doi.org/10.21272/jnep.17\(5\).05013](https://doi.org/10.21272/jnep.17(5).05013).
8. Н.Ф. Зикриллаев, У.Х. Курбанова, У.Х. Содиков, Ф.Э. Уракова, Г.А. Кушиев, О.С. Ньматов. Фотоэлектрические свойства кремния с соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ и $\text{Si}_2\text{Mn}_x\text{Ge}_{1-x}$ // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2024. Т 6. В 5. с. 31-36 (01.00.00; № 16).

II bo'lim (II часть; part II)

1. N.F. Zikrillayev, F.E. Urakova, Y.A. Abdug'aniyev. Kremniyda germaniy va marganes kirishma atomlarini binar birikmalarini hosil bo'lishini taqsimotini hisoblash dasturi // O'zbekiston Respublikasi Adliya Vazirligi Huzuridagi Intellektual Mulk agentligi №DGU27530. 18.07.2023. Talabnoma raqami: DGU 20235899. 1 b.
2. N.F. Zikrillayev, F.E. Urakova. Marganes va germaniy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlarini hisoblash dasturi// O'zbekiston Respublikasi Adliya Vazirligi Huzuridagi Intellektual Mulk agentligi. № DGU41800. 23.07.2024. Talabnoma raqami: DGU 202409653. 1 b.
3. Н.Ф. Зикриллаев, У.Х. Курбанова, Г.А. Кушиев, Ф.Э. Уракова, М.М. Шоабдурахимова. Исследования кремния с бинарными соединениями кремний-германий // Новые материалы и гелиотехнологии международная конференция. Паркент. 15-16 май 2023. с.102-105.
4. N.F. Zikrillaev, U.Kh. Kurbanova, G.A. Kushiev, F.E. Urakova, M.M. Shoabdurakhimova, Y.A. Abduganiev. Studies of silicon with binary silicon-germanium compounds // Nanophotonics, metamaterials and photovoltaics" III international conference. Samarkand. 23-27th May 2023. pp.13-15.
5. Н.Ф. Зикриллаев, К.С. Аюпов, Ф.Э. Уракова, Г.А. Кушиев, О.С. Неъматов. Образование $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ соединений в кремнии // Актуальные проблемы физики и электроники. 3–4 ноября 2023. с. 348-349.
6. Н.Ф. Зикриллаев, К.С. Аюпов, Г.А. Кушиев, Ф.Э. Уракова, Д.М. Шукурова, М.С. Миркомилова. Распределения бинарных соединения GaP в кремнии // Полупроводниковая опто-и наноэлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы Республиканская конференция. 2023. с. 57-59.
7. Н.Ф. Зикриллаев, У.Х. Курбанова, С.Б. Исамов, Ф.Э. Уракова, А.А. Сатторов, Д.М. Шукурова, Т.Э. Рашидов. Гетероваризонные структуры на основе кремния с GaP бинарными соединениями // Фундаментальные и прикладные проблемы физик полупроводников, микро-и наноэлектроники материалы II-международной конференции. Ташкент. 27-28 октября. 2023. с. 187-190.
8. Н.Ф. Зикриллаев, К.С. Аюпов, Ф.Э. Уракова, Н.У. Абдуллаева. Фотоэлементы на основе кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ // VI Международная конференция по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро-и наноструктурах. 28-30 сентября 2023. с. 90-91.
9. Н.Ф. Зикриллаев, Ф.Э. Уракова, А.А. Сатторов, О.С. Неъматов. Эффективные солнечные элементы на основе кремния легированного примесными атомами германия // XXVII международная научно-практическая конференция "Инновация-2023". 26-27 октября. 2023. с. 90-93.
10. Н.Ф. Зикриллаев, Ў.Х. Курбонова, Г.А. Кушиев, Ф.Э. Уракова, М.М. Шоабдурахимова. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ бирикмалари мавжуд кремний асосидаги

фотоэлементлар // Рақамли саноат ва авоматлаштириш: технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришни бошқариш тизимларида инновацион ечимлар. 18-19 апрель. 2025. 702-707 б.

11. Н.Ф. Зикриллаев, Н. Норкулов, Ф.Э. Уракова, А.А. Сатторов, Т.Б. Исмаилов, Т.Э. Рашидов. Фотоэлементы на основе кремния легированного примесными атомами германия // Энергетика комплексининг долзарб муаммолари. 25-26 апрел. 2024. 432-437 б.
12. Н.Ф. Зикриллаев, У.Х. Курбанова, Ф.Э. Уракова, К.И. Вахобо, Б.У. Алиев, Т.Э. Рашидов. Кремний с бинарными соединениями атомов фосфора и галлия // Practical problems and solutions to the use of theoretical laws in the science o the 21 st century PPSUTLSC. May 6-8. 2024. pp.1226-1229.
13. Н.Ф. Зикриллаев, М.М. Шоабдурахимова, Ф.Э. Уракова. Создание фотоэлементов на основе кремния с бинарными соединениями $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг IV Республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-IV). 25-май. 2024. 200-202 б.
14. Н.Ф. Зикриллаев, С.Б. Исамов, У.Х. Курбанова, А.А. Сатторов, Н.Ф. Зикриллаев, У.Х. Курбанова, Ф.Э. Уракова, Д.М. Шукурова, Б.С. Ибрагимова. Эффективные фотоэлементы на основе кремния с бинарными соединениями GaP // Физиканинг замонавий муаммолари ва ривожланиш истикболлари I халқаро илмий-амалий анжумани. 22-23 октябрь. 2024. 110-111 б.
15. Н.Ф.Зикриллаев, Ф.Э. Уракова, М.М. Шоабдурахимова. Ферромагнитные свойства кремния легированного примесными атомами германия// Конденсирланган ҳолат физикасининг долзарб муаммолари ва янги юқори технологиялар. 29-30 ноябрь. 2024. 117-118 б.
16. Н.Ф. Зикриллаев, С.Б. Исамов, Ф.Э. Уракова, Н. Норкулов, Б.У. Алиев. Получения бинарных соединений атомов фосфора и галлия в кремнии // Материалы и структуры современной электроники XI-международной научной конференции. Минск. 16-18 октябрь. 2024. стр.444-448.
17. N.F. Zikrillaev, F.E. Urakova, M.M. Shoabdurahimova, A.A. Sattorov. Efficient photocells based on silicon with $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-Si}$ heterostructures // XXVI International Scientific and Practical Conference Renewable energy and energy efficiency in the XXI century. Ukraine. Kyiv. May 21-23. 2025. pp. 273-275.

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” – “Преподавание языка и литературы” –
“Language and literature teaching” DM jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib,
o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.
(25.08.2026).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturası.
Shartli bosma tabog‘i: 3,5. Adadi 70. Buyurtma № 66.
Guvohnoma reestr № 10-4434
Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika
ilmiy-tadqiqot instituti bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh.,
Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy

