

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI URGANCH DAVLAT
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**BERDAQ NOMIDAGI QORAQALPOQ DAVLAT UNIVERSITETI
ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA
UNIVERSITETI**

ISMAILOV TIMUR BAXRAMOVICH

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

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Urganch – 2025

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiyasi avtoreferatining mundarijasi**

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

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

Ismailov Timur Bahramovich

Nikel va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlari..... 3

Исмаилов Тимур Бахрамович

Магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами никеля и марганца..... 23

Ismailov Timur Bahramovich

Magnetic properties of silicon doped with impurity atoms of nickel and manganese..... 43

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 47

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI URGANCH DAVLAT
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**BERDAQ NOMIDAGI QORAQALPOQ DAVLAT UNIVERSITETI
ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA
UNIVERSITETI**

ISMAILOV TIMUR BAXRAMOVICH

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

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Urganch – 2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.3.PhD/FM813 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Berdaq nomidagi Qoraqalpoq davlat universiteti va Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetlarida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (<https://urdu.uz/uz>) hamda "ZiyoNet" Axborot-ta'lim portalida (www.ziyounet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: Zikrillayev Nurulla Fatxullayevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: Gulyamov Gafur
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Razzakov Alijon Shonazarovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot: Samarqand davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil "11" iyul soat 10:00 dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 220100, Urganch sh., H.Olimjon ko'chasi, 14-uy (Tel.: (998-62) 224-67-00, Faks: (998-62) 224-66-16 Web-site: www.urdu.uz, e-mail: info@urdu.uz) universiteti majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Urganch davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (818 raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 220100, Urganch sh., H.Olimjon ko'chasi, 14-uy (Tel.: (998-62) 224-67-00, Faks: (998-62) 224-66-16 Web-site: www.urdu.uz e-mail: arm@urdu.uz

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil " 30 " iyun kuni tarqatildi.
(2025-yil " 30 " iyundagi 9 - raqamli reyestr bayonnomasi)



U.O.Kutliyev

Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash raisi,
fizika-matematika fanlari doktori, professor

K.R.Yakubov

Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash kotibi,
fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

K.A.Ismaylov

Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash qoshidagi
ilmiy seminar raisi, fizika-matematika fanlari
doktori, professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasiga avtoreferat)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda qayta tiklanuvchi energiya manbalari, xususan, quyosh energiyasi asosida elektr energiyasini ishlab chiqarish XXI asrga kelib keng ko‘lamda rivojlanmoqda. Rivojlangan mamlakatlarda kremniy asosida diodlar, tranzistorlar, mikrochiplar, yuqori foydali ish koefitsientiga (22 % dan katta) ega quyosh elementlari, shuningdek, yuqori sezgirlikka ega magnit sensorlar va magnit diodlarni yaratish va amaliyotda foydalanish masalalariga alohida ahamiyat berilmoqda. Yarimo‘tkazgich kremniyni o‘tish guruhi elementlarining atomlari (Ni va Mn) bilan legirlash uni mikroelektronikada qo‘llash imkoniyatlari sezilarli darajada kengaytirish imkonini beradi, chunki bu elementlar kremniy kristall panjarasida magnit va elektr faol tuzilmalarni shakllantiradi. Bunday texnologik yechim shu kabi olib borilayotgan ilmiy tadqiqotlarning samaradorligini oshirib noyob magnit va elektrofizik xususiyatga ega tubdan yangi kremniy materiallarni olishga alohida e‘tibor qaratilmoqda.

Jahonda hozirgi kunda kremniy zamoniy spintorinka va magnitoelektronikada asosiy material hisoblanadi. Dunyoning yetakchi mamlakatlarida Si asosidagi materiallarning magnit va magnitoptik xossalari yaxshilash maqsadida Ni va Mn atomlari bilan legirlangan strukturalar, xususan $MnSi_{1.7}$, $Si<B,Mn>$ va Ni-Si tarkibli birikmalar, implantatsiya hamda molekulyar nur dastali epitaksiya (MBE) texnologiyalari yordamida sintez qilinmoqda. Kremniy kristall panjarasida 1 nm – 1 mkm oralig‘ida shakllanuvchi ushbu strukturalar magnit tartiblanish va magnitoptik effektlarni (Kerr, Faradey) boshqarish imkoniyatlari tadqiq qilinmoqda. Ushbu yo‘nalishda, jumladan, materiallarning magnit xususiyatlariga harorat, magnit maydon va termik ishlov berishning ta’sirlarini o‘rganish yuqori texnologiyalarida qo‘llaniladigan qurilmalar uchun yangi funksional materiallarni ishlab chiqish va olishdagi tadqiqotlar ustuvor hisoblanmoqda. Dunyo ilmiy hamjamiyatida olib borilayotgan so‘nggi tadqiqotlar shuni ko‘rsatmoqdaki, nikel va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda ferromagnitlik holati, magnit momentlarning joylashuvi (M_s , M_r , H_c), magnit klasterlarning shakllanishi, hamda haroratga bog‘liq magnit susayish kabi holatlar hali to‘liq o‘rganilmagan. Ayniqsa, bu kirishmalar kremniy panjarasida qanday energetik afzallik bilan joylashishi (E_a), klasterlashgan holatdagi magnit o‘zaro ta’sirlar, hamda elektron spektrga ta’siri (l , s va j) - bugungi kunda fundamental va amaliy jihatdan ustuvor hisoblanmoqda.

Respublikamizda so‘nggi yillarda magnitoelektronika sohasini amaliyotda qo‘llashga alohida e‘tibor qaratilmoqda, shu munosabat bilan kirishma atomlarining klasterlari kremniyning fizik parametrlariga ta’sirini o‘rganish hamda magnit klasterlarga ega yangi ferromagnit materiallarni yaratish muhim ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etadi. Yangi O‘zbekistonning 2022–2026-yillarga mo‘ljallangan Taraqqiyot strategiyasida innovatsion loyihalarni amalga oshirish uchun barcha yo‘nalishlarda keng imkoniyatlar yaratish, ilmiy izlanishlar va innovatsion tashabbuslarni qo‘llab-quvvatlashga qaratilgan zamonaviy mexanizmlarni joriy etish vazifalari belgilangan bo‘lib, ayniqsa, nanotexnologik yondashuvlarga asoslangan, iqtisodiy jihatdan arzon materiallardan foydalangan holda samarali texnologiyalarni ishlab chiqish va ularni chuqur tadqiq qilish hozirgi davrning eng dolzarb ilmiy

yo‘nalishlaridan biri sifatida e‘tirof etilmoqda. Mazkur jarayonlarda xalqaro hamkorlikning ahamiyati ortib bormoqda, xususan, O‘zbekiston va Malayziya o‘rtasidagi strategik sheriklik doirasida 2025 yil iyun oyida yarimo‘tkazgichlar, mikroelektronika va yuqori texnologiyalar sohasida ishlab chiqarish, ilmiy-tadqiqot ishlari hamda kadrlar tayyorlashni birlashtiruvchi qo‘shma loyihalarni yo‘lga qo‘yish bo‘yicha kelishuvga erishilgani muhim ahamiyat kasb etadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2025-yil 22-yanvardagi PQ-20-son “Elektrotexnika sanoatini rivojlantirishning yangi bosqichiga olib chiqish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi Qarori, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-son “Fizika sohasidagi ta‘lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarori, shuningdek O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 16-fevraldagi PQ-57-son “Qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoyvchi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarorida hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiyani bajarishdagi tadqiqotlar muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarni rivojlanishining III. “Energetika, energiya resurslarini tejash, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronikasi, mikroelektronikasi, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish” ustuvor yo‘nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Dunyoning ilg‘or ilmiy-tadqiqot markazlarida, shuningdek, universitet va institutlarida (AQSH, Xitoy, Yaponiya, Germaniya, Janubiy Koreya, Rossiya) spintronika va magnitoelektronikada qo‘llash uchun mo‘ljallangan monokristalli kremniy olishning yangi texnologiyalarini yaratish bo‘yicha faol izlanishlar olib borilmoqda.

Hozirgi kunga qadar nikel va marganes kirishma atomlarining diffuziya mexanizmlari, ularning kristall panjaradagi joylashuvi, monokristall kremniyning magnit va elektrofizik xossalari ta‘siri, shuningdek, nanoklasterlar va komplekslar hosil bo‘lishining fizik mexanizmlari ko‘plab xorijiy olimlar, jumladan, M. Bolduc, C. Awo-Affouda, A. Stollenwerk (AQSH) va boshqalar tomonidan batafsil o‘rganilgan.

O‘zR FA akademiklari M. Baxodirxonov, S. Zaynabiddinov, R. Mo‘minov va A. Mamadalimov ilmiy maktablarida, shuningdek, professorlar Q. Abdurahmonov, Q. Ismaylov va E. Arziqulovning shogirdlari kremniy kristall panjarasiga turli kirishma atomlarni kiritish hamda olingan materiallarning elektrofizik, fotoelektrik, optik va shu jumladan magnit xossalari o‘rganish bilan bog‘liq muhim tadqiqotlar olib borganlar.

Marganets va nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy parametrlarini o‘rganishda erishilgan natijalarga qaramay, nanoklasterlar va komplekslar shakllangan monokristall kremniyning magnit va elektrofizik xususiyatlari hanzgacha yetarlicha o‘rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi.

Dissertatsiya tadqiqoti Qoraqalpoq davlat universiteti va Toshkent davlat texnika

universitetida O‘zbekiston Respublikasi Davlat ilmiy-tadqiqot ishlari dasturi hamda Turkiya bilan hamkorlikda AL-202102215 “Ferromagnit nano-klasterli Si bilan aylanna saraton hujayralarni tutib qoluvchi mikro suyuqlik kanalli integrallashgan tizim” mavzusidagi davlatlararo grant dasturi doirasida 2022-2024-yillarda bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi: Nikel va marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlarini o‘rganishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

marganets kirishma atomlari bilan legirlangan p - va n -tur o‘tkazuvchanlikka ega monokristall kremniyning magnit xususiyatlarini turli haroratlarda tadqiq qilish;

marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlariga bor kirishma atomlari bilan boyitilgan sirt qatlamning (p^+ qatlam) ta’sirini o‘rganish;

marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlari mexanizmlarini tushuntiruvchi fizik modelni ishlab chiqish;

nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlarini tadqiq qilish;

sirti teksturalangan, nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda shakllangan klasterlarning konsentratsiyasini magnit xususiyatlariga ta’sirini o‘rganish;

Tadqiqotning obekti sifatida Choxraliskiy usuli bilan o‘stirilgan monokristall kremniy (Cz-Si, p -tur o‘tkazuvchanlikka ega) bor kirishma atomlarining konsentratsiyasi $N_p=(2 \cdot 10^{15} \div 4 \cdot 10^{16}) \text{ cm}^{-3}$, fosfor kirishma atomlari (Cz-Si, n -tur o‘tkazuvchanlikka ega) konsentratsiyasi $N_n=2 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ hamda maxsus tayyorlangan p^+p strukturaga ega bo‘lgan monokristall kremniy namunalari olingan.

Tadqiqotning predmeti sifatida nikel va marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarning magnit va elektrofizik xususiyatlarining magnit maydon ta’sirida ($B=0 \div 9 \text{ T}$) va keng haroratlar oralig‘ida ($T=1,8 \div 400 \text{ K}$) o‘zgarishi, shuningdek, qo‘shimcha termik ishlov berishning turli rejimlarida keyingi magnit va elektrofizik parametrlarining o‘zgarishlari hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. namunalarning kimyoviy tarkibi, namunalar sirti va qalinligi bo‘ylab taqsimlanishini aniqlashda ikkilamchi ionlar mass spektrometriyasi va energo-dispersion rentgen spektroskopiya usullaridan, namunalar sirtining relyefini aniqlashda skanerlovchi elektron mikroskopiya va atom kuch mikroskopiya usullaridan, zaryad tashuvchilarning harakatchanligini aniqlashda Xoll usulidan, namunalarning optik xossalarini aniqlashda infraqizil mikroskopiya usullaridan, namunalarning asosiy magnit parametrlarini aniqlashda o‘ta o‘tkazuvchan magnetometriya usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

namunalarning magnit parametrlarini boshqarish imkonini beruvchi kremniy kristallining hajmiy va sirtga yaqin qatlamlarida nikel hamda marganes kirishma atomlarining magnit nanoklasterlarini hosil qiluvchi yangi texnologiya ishlab chiqilgan;

marganes kirishma atomlari bilan legirlangan n -tur o‘tkazuvchanlikdagi kremniyda gisterezis hodisalari va magnit qarshilik yo‘qligi kuzatildi, bu zaryad tashuvchi elektronlarning marganesning magnit momentlari bilan o‘zaro ta’sirining

kichik darajaga bo'lishi bilan tushuntirilgan;

ilk bora p^+ -Si<B,Mn> strukturalarining magnit parametrlarining p -Si<B,Mn> namunalariга nisbatan ancha yuqori ekani, xususan, to'yingan magnitlanish (M_s) va qoldiq magnitlanish (M_r) mos ravishda 7–8 va 5–6 marta ortganligi aniqlangan, bu kremniy sirtida magnit markazlarning butun hajmga nisbatan ortishi bilan tushuntirilgan;

p^+ -Si<B,Mn> strukturalaridagi magnit momentining haroratga bog'liq o'zgarishini tavsiflovchi to'rt bosqichli (lokal ferromagnit ($T_1=1,8-30$ K), ferromagnit ($T_2=30-50$ K), superparamagnit ($T_3=50-290$ K) va paramagnit ($T_4>290$ K)) fizik model taklif qilingan, bunday faza o'tishlari haroratning oshishida magnit domenlarining yo'qolishi bilan tushuntirilgan;

olingan kremniy namunalarning magnit xossalarini ($\mu=(10-15)\mu_B$) tushuntiruvchi kremniy panjarasida marganes atomlarining klasterlarini hosil bo'lishining fizik modeli ishlab chiqilgan;

ilk bor, nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda xona haroratida ($T=300$ K) submikron klasterlarning ferromagnit xususiyatlari namoyon bo'lishi ko'rsatib berilgan;

ilk bor, kremniy sirtining teksturalanishi natijasida nikel klasterlari kontsentratsiyasining ortishi bilan magnit parametrlar – to'yingan magnitlanish (M_s) 5–6 marta, qoldiq magnitlanish (M_r) 5–6 marta va koersitiv kuch (H_c) 3–4 marta oshganligi aniqlangan, bu sirt strukturasini boshqarish orqali yarimo'tkazgich magnit materiallarning xossalarini bosqarishga imkon bergan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quydagilardan iborat:

namunalarning magnit xossalarini sezilarli darajada yaxshilash imkonini beruvchi kremniy kristallida nikel va marganes kirishma atomlarining nanoklasterlarini hosil qilishga mo'ljallangan maqbul texnologiya ishlab chiqilgan;

ilk bor nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy sirtining teksturalanishi materialning ferromagnit xususiyatlarini oshirishi ko'rsatildi, bunda to'yingan magnitlanish (M_s) 5-6 marta, qoldiq magnitlanish (M_r) 4-6 marta va koersitiv kuch (H_c) 2-4 marta ortishi kuzatilgan;

$T=150$ K haroratda bor kirishma atomlari bilan boyitilgan (p^+ -Si<B,Mn>) kremniy strukturasining ferromagnit xususiyatlari (p -Si<B,Mn>) kremniy namunalariга nisbatan: to'yingan magnitlanish (M_s) 7 marta, qoldiq magnitlanish (M_r) esa 5-6 marta yuqori ekanligi aniqlangan;

marganes bilan legirlangan p -turdagi kremniyda (p -Si<B,Mn>) magnit momentning haroratga bog'liq o'zgarishini tavsiflovchi fizik model ishlab chiqilgan. Model uchta fazani o'z ichiga oladi: ferromagnit ($T_1=1.8-30$ K), superparamagnit ($T_2=30-240$ K) va paramagnit ($T_3=240-300$ K) fazalar bo'lib, bu olingan namunalarning spintronikada keng harorat oralig'ida amaliyotda qo'llash mumkinligini asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy usullar va o'lchov asboblari dan foydalanish, tajriba va hisoblash ma'lumotlarini nazariy natijalar hamda boshqa mualliflarning ishlari bilan solishtirish, shuningdek, olingan ma'lumotlarni zamonaviy fizik modellar asosida tahlil qilish orqali asoslandi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati nikel va marganets kirishma atomlari bilan legirlangan (shu jumladan, bor bilan boyitilgan qatlam mavjud bo'lganda p^+ -Si) kremniyning magnit xossalari ta'sirining fizik mexanizmlari yaratilgan, hamda marganets kirishma atomlari hosil qilgan magnit nanoklasterlar tuzilishining fizik modellari ishlab chiqish bilan izohlandi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, yaratilgan texnologiya nikel va marganets kirishma atomlarining nanoo'lchamli klasterlari mavjud monokristall kremniy sirtini teksturalash imkonini berdi, bu spintronikada magnit datchiklar, magnit xotira elementlari va kuchli elektron qurilmalarda ishlatiladigan magnit kalitlarni yaratishda zarur bo'lgan faol sirt yuzasini sezilarli darajada oshirishga imkon yaratishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Nikel va marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlari bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida quyidagi yechimlar ishlab chiqildi va amaliyotga joriy etildi:

kremniy sirtiga vakuum sharoitida marganes kirishma atomlarini purkab hosil qilingan qatlamdan diffuziya yo'li bilan marganes kirishma atomlari bilan boyitilgan nanoklasterlarni ($N=10^{19} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyada) hosil qilishga asoslangan yangi diffuzion texnologiya «FOTON» AJda amaliyotga joriy etildi («FOTON» aksionerlik jamiyatining 2024-yil 26-noyabrdagi 207-son ma'lumotnomasi). Natijada diodlar (magnit diodlari) va tranzistorlarni ishlab chiqarish jarayonini takomillashtirish va asosiy parametrlarini 2 marta yaxshilash imkonini bergan;

marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy (p^+ -Si) namunalarda magnit momentining o'zgarishini tavsiflovchi fizik modeli Buxoro davlat universitetining F2-FA-0-83921/F2-FA-F0383 raqamli "O'ta o'tkazgichlar va magnit materiallarda kuchli korrelyatsiyalangan o'zaro ta'sirlar va ularning kritik parametrlarini hisoblash» mavzusidagi fundamental loyihada foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2025-yil 29-yanvardagi 02/01-01-35-sonli ma'lumotnomasi). Natijada kritik past $T=1,8 \text{ K}$ haroratda aniqlangan to'yingan magnitlanish (M_s) boshlang'ich namunalarga nisbatan 4-5 marta, qoldiq magnitlanish (M_r) 7-8 marta ortgan;

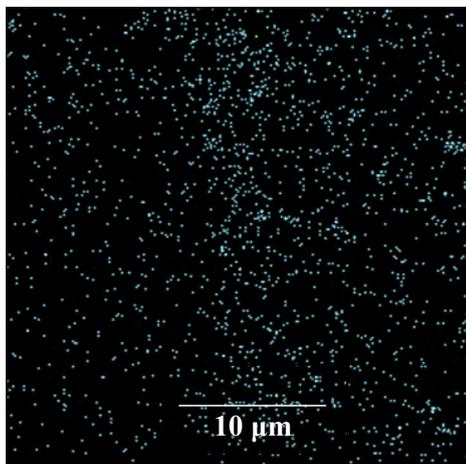
Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishi natijalari 15 ta xalqaro va respublika anjumanlarida ma'ruzalar qilingan va ilmiy seminarlarda muhokamalardan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya ishining mavzusi bo'yicha olingan natijalar asosida 25 ta ilmiy ish nashr qilingan. Bulardan 7 tasi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan jurnallarda, 2 tasi xalqaro jurnallarda e'lon qilingan bo'lib, shulardan 1 tasi Scopus bazasiga kiritilgan jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya kirish qismi, to'rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Umumiy hajmi 117 bet bo'lib, unda 50 ta rasm va 15 ta jadval keltirilgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, respublika fan va texnologiyalarni rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan, muammoning o‘rganilganlik darajasi ochib berilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari, obyekti, predmeti va metodlari keltirilgan, ishning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, tadqiqot natijalarini



1-rasm. $T_{diff}=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ diffuziya harorati hamda $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ da qo‘shimcha harorat bilan ishlov berilgandan so‘ng kremniy sirtida nikel kirishma atomlari klasterlarining taqsimoti.

amaliyotga joriy qilish, ishning aprobatsiyasi, nashr etilgan ilmiy ishlar, shuningdek dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi haqida qisqacha ma‘lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Kremniy hajmida hosil bo‘ladigan kirishma atomlarining nanoklasteri”** deb nomlangan birinchi bobida nikel va marganes kirishma atomlarining monokristall kremniyda diffuziyalanish xususiyatlari, magnit maydon va harorat ta‘sirida kremniyning magnit va elektrofizik xususiyatlarining o‘zgarishi ko‘rib chiqilgan. Mavjud nazariy va tajriba ma‘lumotlarning tahlil qilish asosida dissertatsiya ishini asosiy vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning **“Kremniy kristall panjarasida nikel va marganets kirishma atomlarining nanoklasterlarini shakllantirish texnologiyasi va tadqiqot usullari”** deb nomlangan ikkinchi bobi dissertatsiya ishini bajarishda qo‘llanilgan tajriba qurilmalari hamda

kremniyni nikel va marganets kirishma atomlari bilan legirlash texnologiyasiga bag‘ishlangan. Shuningdek, nikel va marganes atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit hamda elektrofizik parametrlarini o‘rganish uchun qo‘llaniladigan zamonaviy tadqiqot usullari va tegishli qurilmalar tahlil qilingan.

Dissertatsiyaning **“Nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning ferromagnit xususiyatlari”** deb nomlangan uchinchi bobida nikel kirishma atomlarining kremniyda klaster hosil qilish imkoniyatlari va olingan namunalarning magnit xususiyatlari ko‘rib chiqilgan.

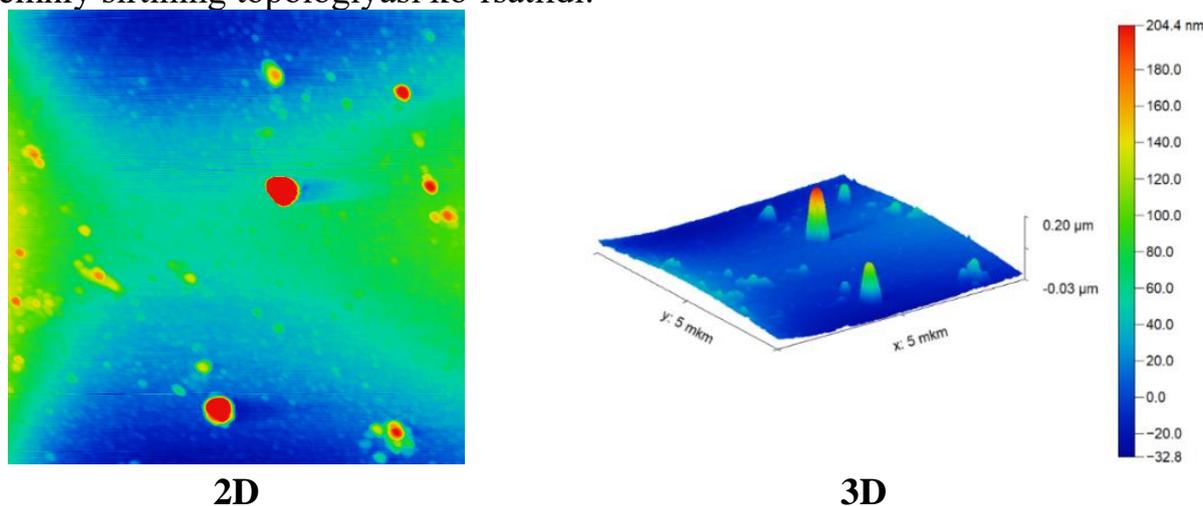
Kremniyning kristall panjarasidagi nikel kirishma atomlari uning elektrofizik va magnit xossalari o‘zgarishida muhim rol o‘ynashi aniqlandi. Diffuziya harorati $T_{diff}=800-1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bo‘lganda, nikel kirishma atomlari kremniy panjarasida tugun va tugunlararo holatlarni egallab nano va mikroo‘lchamli klasterlarni hosil qilishi mumkinligi ko‘rsatildi.

Olib borilgan tadqiqotlar natijalari shuni ko‘rsatdiki, nikel kirishma atomlari klasterlarini tuzilishi va o‘lchamlari qo‘shimcha termik ishlov berish sharoitlariga bog‘liq ekan. Masalan, ishlov berish haroratining pasayishi nanoklasterlar o‘lchamlarining kattalashishiga olib keldi, klasterlar bir necha mikrometrgacha yetishi mumkin va aksincha harorat ortishi bilan kichiklashib nanometrlarda bo‘lishi

aniqlandi.

1-rasmda kremniy sirtida hosil bo'lgan nikel kirishma atomlarining klasterlarining shakllanishi keltirilgan. Klasterlarning o'lchami taxminan 50 nanometrdan 500 nanometrgacha ekanligi aniqlandi. Bu rasm harorat bilan ishlov berish jarayonlari natijasida hosil bo'lgan nikel kirishma atomlari klasterlarini kremniy sirti va hajmida tarqalish xususiyati va o'lchamlarini ko'rsatadi hamda ularning tuzilishi va fizik xossalarini tahlil qilishda asos bo'lib xizmat qildi.

2-rasmda $T=850^{\circ}\text{C}$ haroratda nikel kirishma atomlarining diffuziyasidan keyin kremniy sirtining topologiyasi ko'rsatildi.



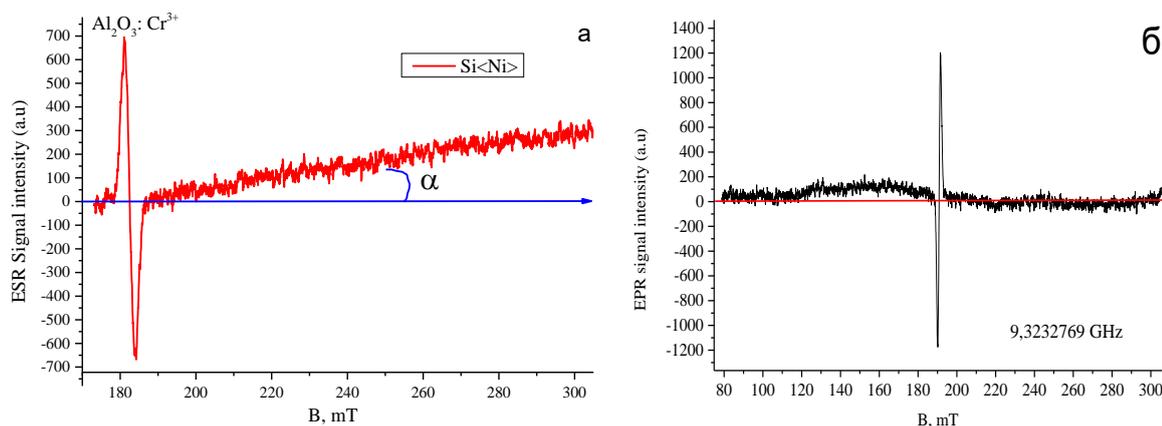
2-rasm. $T=850^{\circ}\text{C}$ haroratda nikel kirishma atomlarini diffuziyasidan so'ng kremniy sirtining topologiyasi

Tadqiqot natijalari nikel atomlarining klasterlarini hosil bo'lishi natijasida kremniy sirti topologiyasini o'zgarishini ko'rsatadi. Rasmdan ko'rinib turibdiki, kremniy sirtida balandligi 32,8 dan 204,4 nm gacha bir jinsli bo'lmagan qatlam bilan qoplangan. 3D tasvirda alohida balandliklar aniq ko'rinib turibdi, bu nikel atomlarini lokal klasterlari hosil bo'lganligini ko'rsatadi.

Elektron paramagnit rezonans (EPR) yordamida nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xossalarini o'rganish nikel kirishma atomlarining klasterlaridan tashkil topgan magnit domenlar hosil bo'lishini ko'rsatdi.

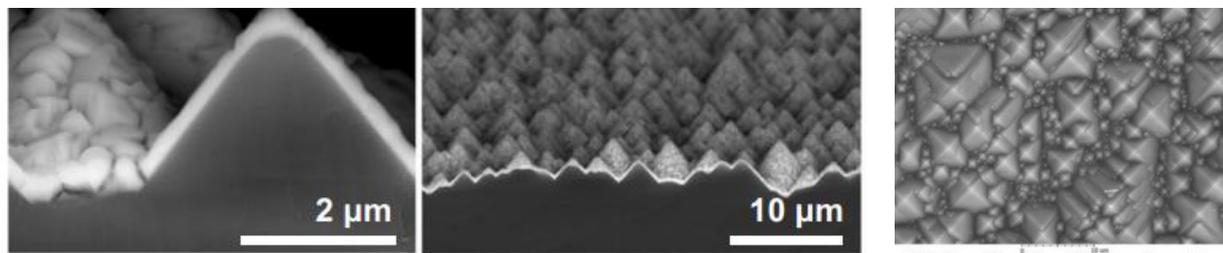
Hosil bo'lgan klasterlarning konsentratsiyasi va o'lchamlarini boshqarish magnitoelektronika uchun xususiyatlari yaxshilangan yangi materiallarni yaratish imkoniyatlarini ochib beradi.

Kremniy asosida yangi magnit materillar olish usuli namunalar sirtini teksturalashga asoslangan bo'lib, bu usul namunalarning sirt yuzasini sezilarli darajada oshiradi. Kremniy sirti yaqinida joylashgan nikel atomlarining yuqori konsentratsiyasi materialning magnitlanishini sezilarli darajada oshiradi.



3-rasm. Kremniyning EPR spektri
a) Si<Ni> namuna uchun b) boshlang'ich namuna

Kremniy sirtini piramidal struktura bilan teksturlash sirt yuzasini boshlang'ich tekislikka nisbatan kamida $\sim 1,5-2$ marta kattalashtirishi aniqlandi.

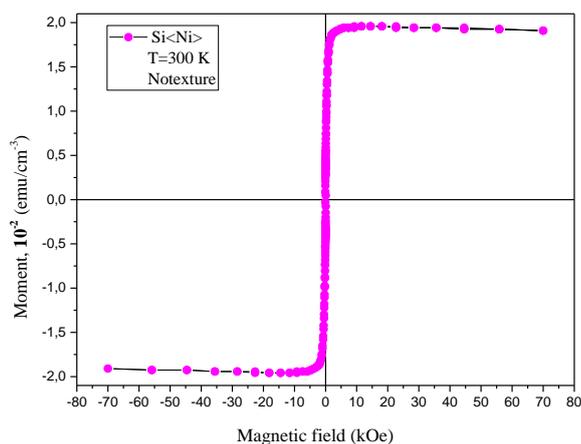


4-rasm. Kremniy sirtidagi tekstura

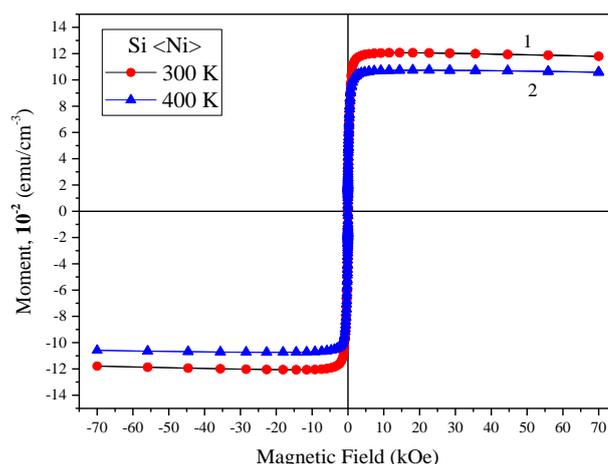
Kremniyning teksturalangan sirtidagi nikel kirishma atomlari hosil qilgan ferromagnit nanoklasterlar kremniyning tekis sirtidagi nanoklasterlarga nisbatan yuqori konsentratsiyada bo'lib, kuchliroq magnit xususiyatlarni namoyon qildi.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, tarkibida nikel kirishma atomlari bo'lgan klasterlar kremniyning hajmda hamda nikel atomlari bilan sezilarli darajada boyitilgan sirt qatlamida hosil bo'ldi. Spintronikada ham hajmiy, ham sirtidagi nikel klasterlari mavjud kremniydan foydalanish mumkinligi ko'rsatilgan.

Tarkibida kremniy, kislorod va nikel, ehtimol, marganets atomlari bo'lgan magnit klasterlarni shakllantirish imkoniyati alohida qiziqish kasb etadi. 5-rasmda xona haroratida ($T=300$ K) nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarning ferromagnit xususiyatlari ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, teksturlanmagan namunaning to'yinish magnitlanishi $M_s=0,019$ em/cm³ ga teng bo'lgan. 6-rasmda $T=300$ K va $T=400$ K haroratlarda magnit maydon kuchlanganligiga bog'liq holda teksturali Si<Ni> namunaning magnit momentining o'zgarishi ko'rsatilgan. Olingan natijalarning tahlili shuni ko'rsatadiki, harorat oshishi bilan magnit momentning qiymati biroz kamayishiga qaramay, uning o'zgarishi tekis xarakterga ega va asosiy parametrlari materialning magnit xususiyatlarining barqarorligini ta'minlaydigan qiymatlarga yaqin bo'ldi. Harorat $T=300$ K da to'yinish magnit



5-rasm. Nikel kirishma atomlari bilan legirlangan (teksturasiz) kremniy namunasining magnet momenti qiymati $T_1=300$ K haroratda



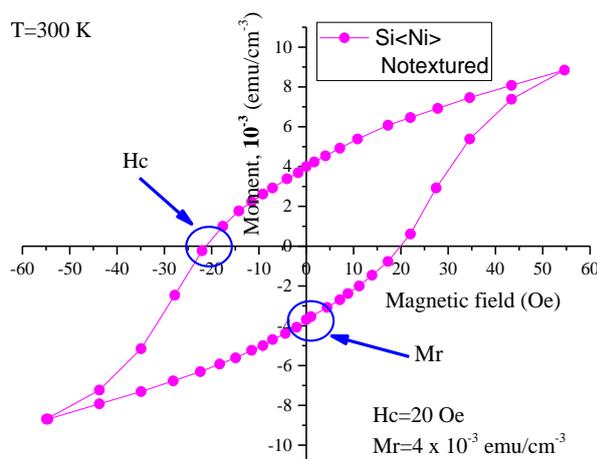
6-rasm. Nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunasining (teksturali) magnet momentining qiymati $T_1=300$ K va $T_1=400$ K haroratlarda

momenti $1,2 \cdot 10^{-2}$ emu/cm³ gacha, harorat $T=400$ K da $1,1 \cdot 10^{-2}$ emu/cm³ gacha yetishi aniqlandi.

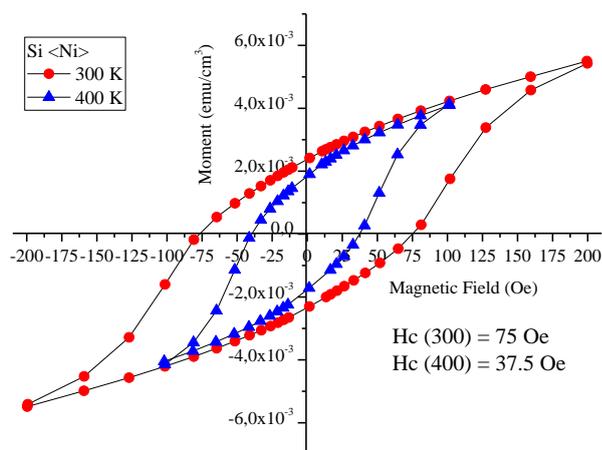
Xulosa o‘rnida sirt yuzasi teksturalangan kremniyning magnet xususiyati bir xil haroratda ($T=300$ K) teksturalanmagan kremniy namunalarga nisbatan katta bo‘lar ekan.

Kichik maydonlar sohasidagi ma’lumotlarni qayta ishlash gisterezisning oddiy halqasini hosil bo‘lishini ko‘rsatadi (7-rasm va 8-rasm).

7-rasmda teksturasiz kremniy Si<Ni> namunasining $T=300$ K haroratdagi gisterezis halqasi keltirilgan bo‘lib, rasmdan ko‘rinib turibdiki, materialning koersitiv kuchi $H_c=20$ Oe bo‘lib, bu uning magnet yumshoq xususiyati va kichik magnetlanishga qarshiligini ko‘rsatadi, qoldiq magnetlanish esa $M_r=4 \cdot 10^{-3}$ emu/cm³ ga teng bo‘lib, bu to‘yinish magnetlanishidan taxminan ikki baravar kam.



7-rasm. $T=300$ K da nikel kirishma atomlari bilan legirlangan (teksturali) kremniy namunasining gisterezis halqasi.



8-rasm. Nikel atomlari bilan legirlangan teksturali kremniyning $T=300$ K va $T=400$ K dagi gisterezis halqasi.

8-rasmda nikel kirishma atomlari bilan legirlangan teksturali kremniy namunasining gisterezis halqasi $T=300$ K va $T=400$ K haroratlarda kuzatilgan tajriba natijalari keltirilgan. $T=400$ K haroratda koersitiv kuch $T=300$ K dagi $H_c=75$ Oe dan $H_c=37,5$ Oe gacha, qoldiq magnitlanish $M_r=2,4 \cdot 10^{-2}$ emu/cm³ dan $M_r=1,8 \cdot 10^{-2}$ emu/cm³ gacha kamayishi aniqlandi. Bu kristall panjaradagi atomlarning issiqlik tebranishlari kuchayib, magnit tartiblanishlarni susaytirishini ko'rsatdi.

Koersativ kuchning (H_c) kamayishiga qaramay, material yetarlicha o'z qiymatini saqlab qoldi, bu uni haroratga barqarorligini va yuqori haroratlarda magnit xotira qurilmalarida foydalanish yaroqliligini tasdiqlaydi. Gisterezis halqasining shakli simmetrik bo'lib, bu magnit xususiyatlarning barqarorligini ko'rsatadi. Umuman olganda, nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy xona haroratida ferromagnit tartiblanishi tajribada aniqlandi.

1-jadvalda nikel kirishma atomlari bilan legirlangan ikki turdagi (sirti teksturali va teksturasiz) kremniy namunalarning magnit parametrlari taqqoslangan.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, $T=300$ K haroratda to'yingan magnitlanish (M_s) teksturlanmagan kremniy namunalarga nisbatan 6-7 marta, qoldiq magnitlanish (M_r) 6-8 marta va koersitiv kuch 3-4 martagacha katta bo'ldi. Bu o'zgarishlar sirt yuzasining ortishi materialning magnit xossalriga katta ta'sir ko'rsatishini tasdiqladi.

1-jadval

Kremniy namunalarning magnit parametrlari - sirti teksturali va teksturasiz

Harorat, K	M_s to'yingan magnitlanganlik, 10^{-2} emu/cm ⁻³	M_r qoldiq magnitlanganlik, 10^{-3} emu/cm ⁻³	H_c koersitiv kuch, Oe
300 (teksturasiz)	1.9	4	20
300 (teksturali)	12.06	24	75
<i>Nisbat</i>	6.35	6	3.75
400 (teksturali)	10.71	18	37.5
<i>Nisbat</i>	5.64	4.5	1.87

Dissertatsiyaning “**Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlari**” deb nomlangan to'rtinchi bobida marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarning magnit va elektrofizik parametrlarini o'rganish natijalari keltirilgan.

O'tkazilgan tadqiqotlar natijalari shuni ko'rsatdiki, diffuziya harorati va vaqtini boshqarish orqali marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning solishtirma qarshiligini $\rho = 1,3 \cdot 10^5$ Om·cm dan $\rho = 1,8 \cdot 10^2$ Om·sm gacha bo'lgan p -turdagi o'tkazuvchanlikda hamda $\rho = 1,1 \cdot 10^5$ Om·cm dan $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ Om·cm gacha bo'lgan n -turdagi o'tkazuvchanlikka ega namunalarni olish mumkinligi aniqlandi.

O'tkazuvchanligi p -tur bo'lgan kremniy Si<B,Mn> namunalarda yuqori (100% dan ortiq) manfiy magnit qarshilik kuzatiladi. Shuningdek, Si<B,Mn> namunalarda magnit qarshilikning qiymati qo'yilgan elektr (E) va magnit (B) maydonlarining qiymati oshishi bilan sezilarli darajada oshishi aniqlandi. 9-rasmda $T=100-380$ K harorat oralig'ida Si<B,Mn> $\Delta\rho/\rho$ namunalarda magnit qarshiligining haroratga bog'liqligini o'rganishda

olingan tajriba natijalari keltirilgan.

2-jadval

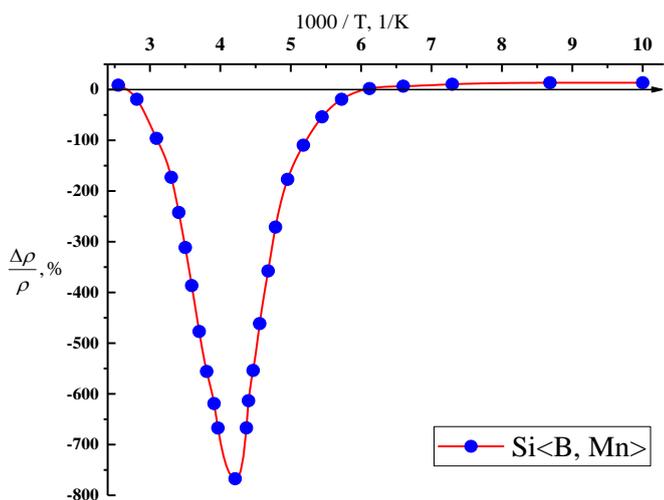
Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunasining elektrofizik xususiyatlari.

Namuna	Diffuziya harorati $T, ^\circ\text{C}$	O'tkazuvchanlik turi	Solishtir-ma elektr qarshilik, $\rho, \text{Om}\cdot\text{cm}$	Zaryad tashuvchilar konsentratsiya-si, p, n, cm^{-3}	Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi, $\mu, \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$
Si	–	p	3	$6.7\cdot 10^{15}$	305
Si<B, Mn>	1095	n	$2.7\cdot 10^3$	$2.1\cdot 10^{12}$	1110
Si<B, Mn>	1090	n	$5\cdot 10^4$	$1.42\cdot 10^{11}$	1198
Si<B, Mn>	1085	n	$1.1\cdot 10^5$	$6.72\cdot 10^{10}$	962
Si<B, Mn>	1080	p	$1.3\cdot 10^5$	$3.3\cdot 10^{11}$	160
Si<B, Mn>	1075	p	$3\cdot 10^4$	$1.6\cdot 10^{12}$	95
Si<B, Mn>	1070	p	$1.5\cdot 10^4$	$3.9\cdot 10^{12}$	82
Si<B, Mn>	1065	p	$1.2\cdot 10^4$	$6.7\cdot 10^{12}$	76
Si<B, Mn>	1060	p	$7.4\cdot 10^3$	$1.24\cdot 10^{13}$	65
Si<B, Mn>	1055	p	$8.2\cdot 10^2$	$7.9\cdot 10^{13}$	88
Si<B, Mn>	1050	p	$2.7\cdot 10^2$	$1.3\cdot 10^{14}$	165
Si<B, Mn>	1045	p	$1.8\cdot 10^2$	$1.7\cdot 10^{14}$	192

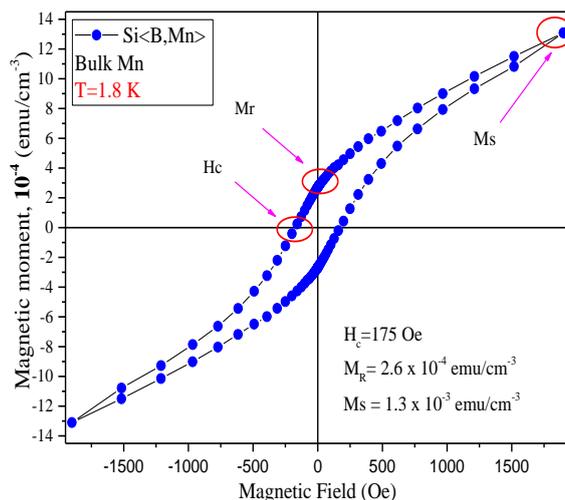
O'tkazilgan tadqiqot natijalaridan ma'lum bo'ldiki, haroratning pasayishi bilan p -Si<B,Mn> namunalarida manfiy magnit qarshilikning qiymati ortdi va $T=240\text{ K}$ da o'zining maksimal qiymatiga ($\Delta\rho/\rho\sim 800\%$) yetdi. Haroratning keyingi pasayishi manfiy magnit qarshilikning qiymatini sezilarli tez pasayishiga olib keldi va $T=160\div 170\text{ K}$ haroratlarda magnit qarshilik ishorasining inversiyasi sodir bo'ldi, ya'ni manfiy magnit qarshilikdan musbat magnit qarshilikga o'tdi, musbat magnit qarshilikning qiymati haroratning bu sohasida haroratning qiymatiga kam bog'liq bo'ldi. Xona haroratida manfiy magnit qarshilikning 50% gacha yetadigan sezilarli kattaligi asosida magnit o'lchashlarda sezgir magnitarezistiv datchiklarni yaratish imkonini mavjudligini ko'rsatdi.

Tadqiqot natijalarining tahlili shuni ko'rsatdiki, $T=1,8\text{ K}$ haroratda marganes kirishma atomlari bilan legirlangan p -turdagi o'tkazuvchanlikka ega kremniy namunalarida ferromagnit xususiyatlar kuzatildi. Magnit momentning magnit maydonga bog'liqlik egri chizig'i gisterezis halqasi bilan xarakterlanadi, va bu ferromagnit tartiblanishni tasdiqladi.

$T=1.8\text{ K}$ haroratda olingan kremniy namunalarining gisterzis halqasining asosiy parametrlari aniqlandi: koersitiv kuchi $H_c=175\text{ Oe}$, qoldiq magnitlanishi $M_r=2,6\cdot 10^{-4}\text{ emu/cm}^3$ va to'yingan magnitlanish $M_s=1,3\cdot 10^{-3}\text{ emu/cm}^3$ ga teng bo'ldi. Marganes kirishma atomlari kremniyning kristall panjarasida, kovaklar bilan o'zaro ta'sirlashuvchi lokal magnit momentlarni hosil qilib ferromagnit holatga o'tishi aniqlandi.



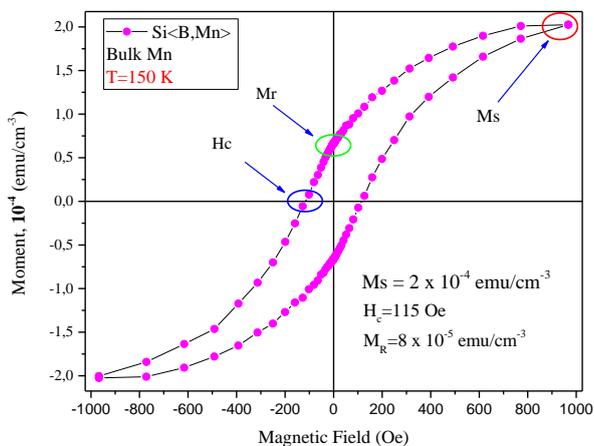
9-rasm. p -Si<B,Mn> namunalari uchun magnit qarshiligining haroratga bogʻliqligi, bunda $E=200$ V/cm va $B=2$ Tl



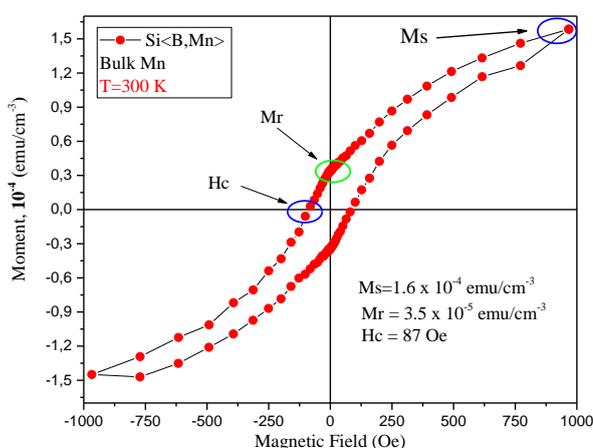
10-rasm. $T=1.8$ K haroratda marganes kirishma atomlari bilan legirlangan p -tipdagi oʻtkazuvchanlikka ega boʻlgan kremniyning magnit momenti va magnit maydoni orasidagi bogʻliqlik

Marganets kirishma atomlari momentlar kovaklar bilan oʻzaro taʼsirlashuvchi, local ferromagnit holatga oʻtkazadi. 11(a)-rasmda $T = 150$ K haroratda p -Si<B,Mn> kremniy namunasining gisterezis halqasi tasvirlangan. Bu uning ferromagnit xususiyatga ega ekanligini va harorat oshgan taqdirda ham magnit xususiyatlarini saqlab qolishini koʻrsatdi.

Bunda toʻyingan magnitlanishning qiymati $M_s=2 \cdot 10^{-4}$ emu/cm³ ga teng boʻlib, yuqori tashqi maydondagi maksimal magnit momentiga mos keladi. Qoldiq magnitlanishning qiymati $M_r=8 \cdot 10^{-5}$ emu/cm³ ga teng boʻlib, tashqi magnit maydon olinganidan soʻng material 40% gacha magnitlanishni saqlab qolishi aniqlandi.



a



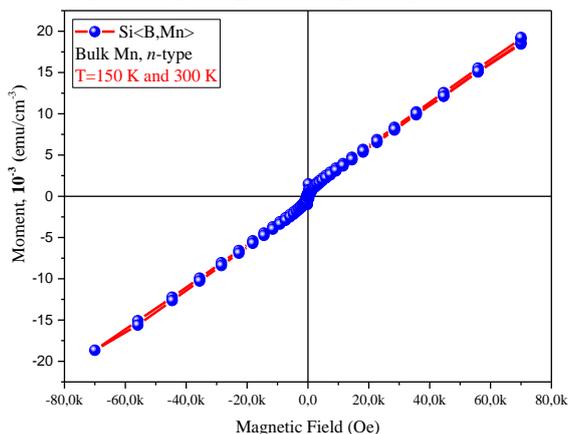
b

11-rasm. Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan p -turdagi oʻtkazuvchanlikka ega kremniy namunasini magnit momentining $T=150$ K (a) va $T=300$ K (b) haroratlarda magnit maydonga bogʻliqligi

Aniqlangan koersitiv kuchning qiymati $H_c = 115$ Oe ga teng. Koersitiv kuch (H_c) — bu moddaning magnitlanishini nolga tushirish uchun unga qarama-qarshi yoʻnalishda qoʻllanilishi zarur boʻlgan magnit maydon kuchlanganligi qiymatidir.

Oʻtkazilgan tajriba natijalarini shuni koʻrsatadiki, harorat xona haroratigacha ($T = 300$ K) koʻtarilganda ham material $T=150$ K da olingan natijalarga nisbatan sezilarli magnitlanishini saqlab qoldi va barqaror magnit xususiyatlarini namoyon qildi. Bu maʼlumotlar olingan materillarni haroratga bogʻliq magnit qurilmalarda qoʻllashda istiqbolli ekanligini koʻrsatadi.

12-rasmda $T = 150$ K va $T = 300$ K haroratlarda n -turda n -Si<B, Mn> kremniy namunasi uchun magnit momentining magnit maydonga bogʻliqligi koʻrsatilgan. Rasmdan koʻrinib turibdiki, magnit momentining magnit maydonga bogʻliqligi chiziqli xarakterga ega boʻlib, gisterezis halqasining yoʻqligi materialning paramagnit ekanligini tasdiqlaydi. Shunday qilib, marganets kirishma atomlari bilan legirlangan n -turda kremniy namunalari $T=150$ K va $T=300$ K haroratlarda paramagnit holatda boʻlishini namoyon qildi. Bu esa uni paramagnit xususiyatlar talab qilinadigan tizimlarda qoʻllashda qulay ekanligini, biroq xona haroratida ferromagnit xususiyatlarga ega boʻlgan qurilmalarda foydalanish imkoniyatini cheklaydi.



12-rasm. Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan n -turda kremniyning magnit momentini $T=150$ K va $T=300$ K haroratlarda magnit maydonga bogʻliqligi

Olingan tadqiqot natijalari shuni koʻrsatadiki, ferromagnit xususiyatlar faqat marganets kirishma atomlari bilan legirlangan p -tur (kovakli) oʻtkazuvchanlikka ega kremniy namunalarida kuzatildi. Bu xulosalar shuni tasdiqlaydiki, olingan materiallarning ferromagnit xossalari kovaklar konsentratsiyasiga bogʻliq boʻlar ekan.

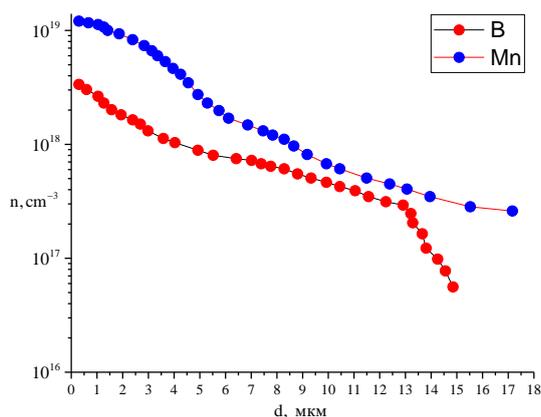
Kremniy namunalarida ferromagnit holat nanooʻlchamli magnit klasterlar mavjud boʻlganda kuzatildi. Ularning konsentratsiyasi kritik past haroratlarda, yaʼni $T = 1,8$ K, $T = 150$ K va $T = 300$ K da kremniydagi marganets kirishma atomlarining eruvchanligi $N \sim 10^{15}$ cm $^{-3}$

gacha boʻlishi bilan bogʻliqligi aniqlanadi.

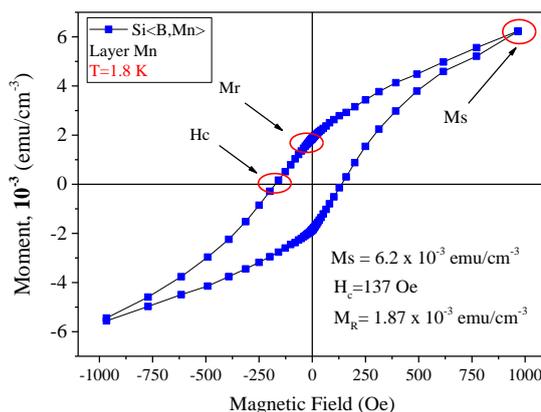
Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning ferromagnit xususiyatlarini oʻrganish shuni koʻrsatdiki, uning magnit xususiyatlari kristall panjaradagi kovaklar konsentratsiyasiga va oʻzaro taʼsiriga bogʻliq ekan. Ferromagnit holatning shakllanishiga marganets kirishma atomlari kremniy kristall oanjerasida tugun yoki tugunlar oraligʻida joylashishiga bogʻliq boʻladi.

Marganets kirishma atomlarining elektronlar bilan toʻldirilgan d -qobigʻi materialning ferromagnit xususiyatlarini belgilovchi magnit momentlarni hosil qiladi. Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan p -tur oʻtkazuvchanlikdagi kremniy namunalarining ferromagnit xususiyatlari xona haroratida ($T = 300$ K) qoldiq magnitlanganlik $M_r=3,5 \cdot 10^{-5}$ emu/cm 3 va koersitiv kuch $H_c=87$ Oe qiymatlari bilan namoyon boʻlishi aniqlandi. Ferromagnit parametrlari kuchayishi harorat $T=150$ K

gacha pasayganda ($M_s=2 \cdot 10^{-4}$ emu/cm³, $H_c=115$ Oe) kuzatildi va harorat $T=1,8$ K da koersitiv kuchning maksimal qiymati $H_c=175$ Oe ga teng bo'ldi.



13-rasm. Kremniy namunasida chuqurlik bo'yicha bor va marganets kirishma atomlari konsentratsiyalarini taqsimoti



14-rasm. Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan, p^+ -Si<B,Mn> strukturaning magnet momentini $T = 1.8$ K haroratda magnet maydonga bog'liqligi

13-rasmda kremniy kristall panjarasida bor va marganets kirishma atomlarining konsentratsiyalarini taqsimoti ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, marganets kirishma atomlarining konsentratsiyasi (qizil nuqtalar - Mn) sirt yaqinida maksimal darajada ($\sim 10^{20}$ cm⁻³) bo'lib chuqurlikga kirib borishi bilan 15 μ m gacha keskin kamaydi. Ko'k uchburchaklar bilan bor kirishma atomlarining konsentratsiyasi taqsimlanishi ko'rsatildi.

Bor kirishma atomlarining maksimal konsentratsiyasi ($\sim 10^{19}$ cm⁻³) taxminan 12 μ m chuqurlikgacha kuzatildi, shundan so'ng u asta-sekin kamaydi.

Olingan natijalarning tahlili shuni ko'rsatadiki, bor kirishma atomlarining taqsimlanishi ularning diffuziya natijasida ma'lum bir chuqurlikka kirib borganini aks ettiradi, bunda eng yuqori konsentratsiya aynan sirtida kuzatiladi. Kremniy kristall panjarasidagi marganets kirishma atomlari esa, aksincha, asosan sirtida to'planib, deyarli ichkariga kirmasdan qoladi. Bu marganets kirishma atomlarining kremniy hajmida eruvchanligi kamligini va kremniy sirtida kuchli o'zaro ta'sirga ega ekanligini ko'rsatdi. Marganets kirishma atomlarining sirt kremniyning sirt qatlamida yuqori konsentratsiyada bo'lishi bor kirishma atomlarining oshishi bilan tushuntirildi.

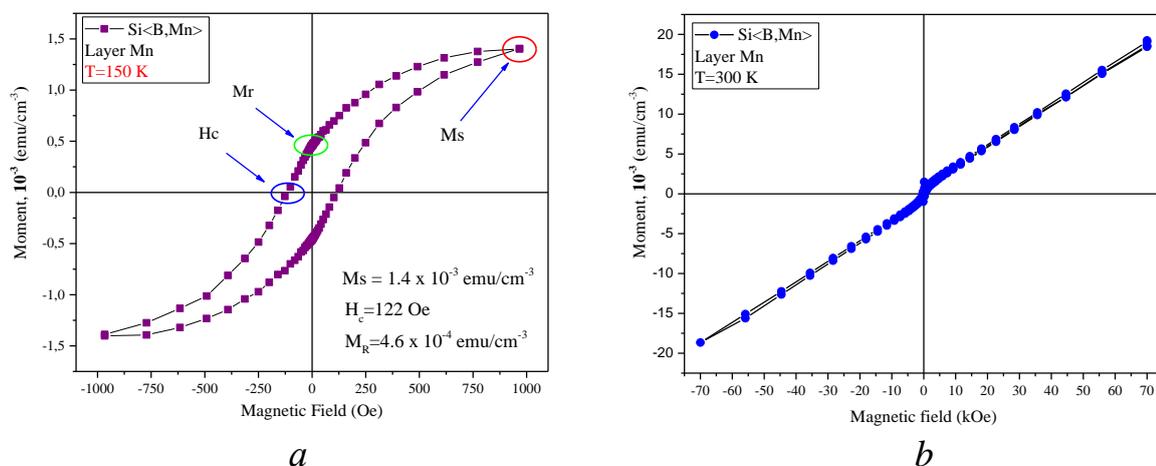
14-rasmda bor kirishma atomlari bilan boyitilgan va marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari uchun $T= 1,8$ K haroratda o'lgangan $M(B)$ magnetlanishini chiziqlari berildi. Bu egri chiziqlar gisterezis halqasini namoyon etdi va $T=1,8$ K haroratda p^+ -Si<B,Mn> kremniy strukturalarida ferromagnetizm mavjudligidan dalolat berdi. Biroq p^+ -Si<B,Mn> kremniy strukturalari uchun to'yinish magnetlanishi Si<B,Mn> kremniy namunalari qaraganda 10 marta yuqori ekanligini aniqlandi (11-rasmda ko'rsatilgan).

Magnit parametrlarning yuqori qiymatlari kremniyning kristall panjarasidagi marganets kirishma atomlarini nanoklasterlarining lokal magnet momentlarini kuchli o'zaro ta'sirini ko'rsatdi. Magnit momentlarning bunday kollektiv o'zaro ta'siri past

haroratlarda ferromagnetiklarga xos boʻlgan barqaror tartibli magnit holatga oʻtishini koʻrsatdi.

$T=150$ K haroratda (15a-rasm) p -turdagi p^+ -Si<B, Mn> strukturalarning ferromagnit xususiyatlarini saqlab qoldi, bu magnit momentlari oʻrtasidagi oʻzaro taʼsirning davom etayotganligidan dalolat beradi. $T=300$ K xona haroratida boʻlganda (15b-rasm) gisterezis halqasi kuzatiladi, bunda magnit momentning tashqi magnit maydonga chiziqli bogʻlanishi kuzatildi.

15b-rasmda magnit momentini magnit maydon qiymatiga bogʻlanishi koordinatalar boshidan oʻtdi, bu esa marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarning paramagnit holatga oʻtganligini koʻrsatadi. Bu holatda issiqlik energiyasi magnit momentlarining tartiblanishini butunlay buzadi, natijada magnit momenti tashqi magnit maydoniga proporsional boʻlib qoladi.



15-rasm. Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan, p -tur oʻtkazuvchanlikdagi va bor (B) kirishma atomlari bilan sirt qatlami boyitilgan p^+ -Si<B,Mn> strukturalarning magnit momentini $T = 150$ K (a) va $T = 300$ K (b) haroratlarda magnit maydonga bogʻliqligi

p^+ -Si<B, Mn> kremniy asosidagi strukturalarda p -Si<B, Mn> kremniy namunalari nisbatan sezilarli darajada yuqori ferromagnit holat kuzatilishi aniqlandi. p^+ -Si<B, Mn> kremniy strukturalarida maksimal toʻyingan magnitlanishi (M_s) $T=150$ K haroratda p -Si<B, Mn> kremniy namunalari nisbatan 7-8 marta, $T=1,8$ K haroratda 4-5 marta yuqori ekanligi aniqlandi.

$T = 150$ K haroratda p^+ -Si<B, Mn> strukturalardagi qoldiq magnitlanish (M_r) p -Si<B, Mn> namunalari nisbatan 5-6 marta, $T = 1,8$ K haroratda esa 7-8 marta yuqori boʻldi. Bu hodisa p^+ -Si<B, Mn> strukturalarda bor kirishma atomlarining konsentratsiyasini yuqoriligi tufayli ferromagnit tartiblanishning kuchayganligini koʻrsatadi.

16-rasmda p -tur oʻtkazuvchanlikka ega p^+ -Si<B, Mn> strukturalarning magnit momentini haroratga bogʻliqligi tasvirlangan. Tadqiq etilgan harorat oraligʻi $T = 1,8$ K dan $T = 300$ K gacha boʻlib, juda past (kriogen) haroratdan xona haroratigacha boʻlgan oraliqni qamrab oldi.

Past haroratlarda kremniy tarkibidagi marganes kirishma atomlari kuchli oʻzaro taʼsir etuvchi lokal magnit momentlarini hosil qildi. Atomlarning tartibsiz joylashuvi

tufayli ularning spinlari tasodifiy yo‘nalgan bo‘lib, harorat pasayishi bilan tizim spin-shisha holatiga o‘tishi mumkin ekan. Bu holat ZFC (magnit maydonisiz sovutish) va FC (magnit maydonida sovutish) egri chiziqlari orasidagi farqda namoyon bo‘ldi: ZFC rejimida magnit momentlari eng past energiya holatida “muzlab qoldi”, FC rejimida esa tashqi magnit maydon ularning bir yo‘nalishga kelishiga olib keldi.

3-jadval

Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan p va n -tur o‘tkazuvchanlikga ega kremniy namunalarning ferromagnit xususiyatlarining haroratga bog‘liq holda o‘zgarishi

Namuna	T, K	$M_s,$ emu/cm ³	$M_r,$ emu/cm ³	$H_c,$ Oe	μ/μ_B
$p^+-Si<B,Mn>$	150 K	1.4×10^{-3}	4.6×10^{-4}	122	140
$p-Si<B, Mn>$		2×10^{-4}	8×10^{-5}	115	114
Nisbat		7	5.75	1.06	1.23
$p^+-Si<B,Mn>$	1.8 K	6.2×10^{-3}	$1.87 \cdot 10^{-3}$	172	421
$p-Si<B, Mn>$		1.3×10^{-3}	$2.6 \cdot 10^{-4}$	175	311
Nisbat		4.76	7.2	1	1.35

$T=30-50$ K haroratlar oralig‘ida kuzatiladigan ikkinchi soha marganets atomlarining domenlarini alohida magnit momentlarini asta-sekin tartibsizlanishi bilan bog‘liq bo‘ldi.

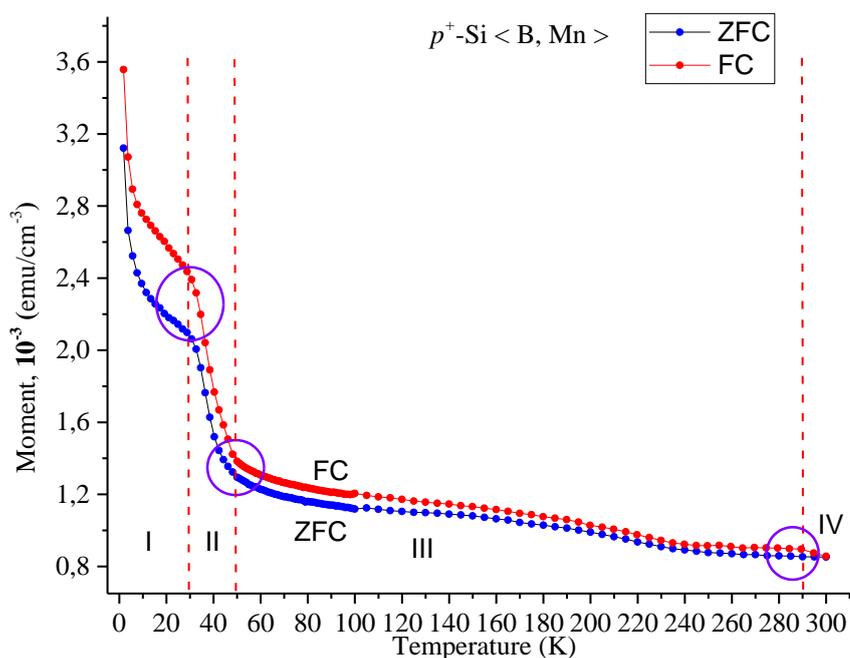
Harorat $T < 50$ K (Kyuri harorati) dan pasayganda kremniy namunalarning butun hajmida ferromagnit holatga o‘tishi kuzatildi. Bunda magnit domenlar marganets kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning barcha qismini egalladi. Magnitlanganlik magnit domenlarning o‘lchamlari o‘zgarishi hisobiga ortdi, bu harorat pasayishi bilan namunalarning magnit momenti tez o‘shishida tushuntirildi.

$T > 50$ K dan yuqori haroratlarda kremniy kristall panjarasida marganets kirishma atomlarining magnit momentlari mustaqil paramagnit zarralar sifatida namoyon bo‘ldi. Harorat $T < 50$ K dan pastga tushganda qo‘shni marganets atomlarining magnit momentlari orasidagi almashuvni o‘zaro marganets atomlarining ta’siri tufayli ferromagnit tartiblanish jarayoni boshlandi. Bu marganets atomlarining umumiy (jamoaviy) bir xil magnit spinlarini yo‘nalishiga olib keladi va ferromagnit holatga o‘tadi hamda domenlarni shakllanishiga olib keladi. Haroratni $T=30-50$ K oralig‘ida namunadagi marganets atomlarining magnit domenlarning o‘lchamlari qayta taqsimlandi. Bunda magnit domenlarning o‘lchamlari kattalashdi, energetik jihatdan samarasiz bo‘lgan domenlarni chegaralari qisqardi, tartiblangan magnit momentlar ulushining ko‘payishi hisobiga namunaning magnit momenti ortdi.

Harorat ko‘tarilishi bilan lokal magnit momentlar qisman “parchalandi” va bunda izolyatsiyalangan domenlar saqlanib qolsa-da, ularning issiqlik ta’sirida yo‘nalishlarini o‘zgarishi kuchaydi. O‘zaro ta’sirining susayishi klasterlarning mustaqil magnit dipollar kabi bo‘lishiga olib keladi va ular superparamagnit xususiyatlarni namoyon etdi. Tashqi magnit maydon ta’sirida magnit momentlar vaqtincha tenglashadi, maydon yo‘g‘ida tartibsiz holatga qaytdi. ZFC va FC egri chiziqlar orasidagi farqni

kamayishi magnit momentlarning tartibsizlanishidan dalolat beradi.

$T > 290$ K haroratda issiqlik energiyasi ustunlik qila boshlaydi va magnit momentlar butunlay tartibsizlanadi. Klasterlarning magnit domenlari yo‘qolib, material paramagnit holatga o‘tadi. Marganets kirishma atomlarining magnit momentlari issiqlik tebranishlari ta’sirida xaotik harakatlanadi. Almashuvni o‘zaro ta’siri issiqlik energiyasi tomonidan to‘liq yo‘q qilinib, p^+ -Si<B, Mn> namunalarda magnit tartiblanish kuzatilmaydi. ZFC va FC egri chiziqlar bir-biriga to‘liq mos keladi, chunki yuqori haroratlarda tashqi magnit qutbi magnit momentlarni to‘g‘rilay olmaydi. Olingan natijalar bor va marganets kirishma atomlarining o‘zaro ta’siri tufayli kremniy materiallarining magnit xususiyatlarini yaxshilash uchun yangi imkoniyatlarni ochadi. Bu ularni spintronika sohasida qo‘llanilish istiqbollarini ochib beradi.



16-rasm. Bor bilan boyitilgan va marganets kirishma atomlari bilan legirlangan p -tur o‘tkazuvchanlikdagi kremniy namunasining ZFC va FC rejimlarida $T=1,8$ K dan $T=300$ K gacha harorat oralig‘idagi magnit momentining o‘zgarishi

Xulosada ilmiy rahbarim, **professor N.F. Zikrillayev** va **K.A. Ismaylovga**, shuningdek, Toshkent Davlat Texnika Universiteti “Raqamli elektronika va mikroelektronika” kafedrasida hamda Qoraqalpoq Davlat Universiteti “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi” kafedrasida jamoalariga dissertatsiya ishimi bajarishda ko‘rsatgan yordamlari va qo‘llab-quvvatlaganliklari uchun o‘z minnatdorchiligimni bildiraman.

XULOSA

“Nikel va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyatlari” nomli falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar natijasida quyidagi natijalar olindi va xulosalar qilindi:

1. Nikel va marganets kirishma atomlarining nanoklasterlarini o‘z ichiga olgan magnit xususiyatli kremniy namunalari olishning yangi optimal texnologiyasi ishlab chiqildi. Bu kremniy hajmida va uning sirtiga yaqin qatlamida nikel va marganets kirishma atomlarining magnit klasterlari shakllanishi bilan bog‘liqligi ko‘rsatildi.

2. Ilk bor nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy sirtini teksturalash hisobiga sirdagi klasterlar konsentratsiyasini oshirish va materialning ferromagnit xususiyatlarini yaxshilashga olib kelishi ko‘rsatildi. Nikel kirishma atomlari bilan legirlangan, teksturalanmagan dastlabki kremniy namunalari nisbatan sirti teksturalangan kremniy namunalari to‘yingan magnitlanish (M_s) 5÷6 marta, qoldiq magnitlanish (M_r) 4÷6 marta va koersitiv kuch (H_c) 2÷4 marta oshishi aniqlandi.

3. Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan n -turdagi kremniy namunalari gisterezis hodisalari va sezilarli magnit qarshilik kuzatilmaligi aniqlandi, bu elektronlarning marganets kirishma atomlarining magnit momentlari bilan o‘zaro ta‘sirini kichik darajadagi bilan tushunturildi.

4. Birinchi marta bor (B) kirishma atomlari bilan boyitilgan p^+ -Si<B,Mn> kremniy asosidagi strukturaning ferromagnit xususiyatlari p -Si<B,Mn> kremniy namunalari qiymatlaridan sezilarli darajada yuqori ekanligi aniqlandi. Bunda $T=150$ K haroratda maksimal to‘yingan magnitlanish (M_s) 7÷8 marta, qoldiq magnitlanish (M_r) 5÷6 marta, magnit momenti 1,5÷2 marta yuqori ekanligi ko‘rsatildi.

5. Bor (B) kirishma atomlarining yuqori konsentratsiyasi ($\sim 10^{19}$ cm⁻³) kristall panjarada marganets atomlarining domenlarini magnit momentlari o‘zaro ta‘sirini kuchaytirishi aniqlandi. Bu kremniyning ferromagnit xususiyatlarini sezilarli darajada oshirishga olib keldi ($\mu \sim 500\mu_B$ gacha).

6. Marganets kirishma atomlari bilan legirlangan (p^+ -Si<B,Mn>) kremniy namunalari magnit momentini o‘zgarishini tavsiflovchi fizik modeli ishlab chiqildi. Bu model to‘rtta harorat sohasini o‘z ichiga oldi: $T=1,8-30$ K oralig‘idagi lokal ferromagnit faza, $T=30-50$ K oralig‘idagi ferromagnit faza, $T=50-240$ K oralig‘idagi superparamagnit faza va $T=240-300$ K oralig‘idagi paramagnit faza.

7. Ilk bor kremniyda marganets kirishma atomlarining eruvchanligi bor kirishma atomlari ($N = 10^{19}$ cm⁻³) hisobiga oshirishga erishildi bu faqat marganets kirishma atomlarini diffuziya usuli bilan kremniyga kiritilganda kuzatildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ УРГЕНЧСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**

**КАРАКАЛПАКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ БЕРДАХА
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

ИСМАИЛОВ ТИМУР БАХРАМОВИЧ

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО
ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ НИКЕЛЯ И МАРГАНЦА**

01.04.10 - Физика полупроводников

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

Ургенч – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номер B2024.3.PhD/FM813.

Диссертация выполнена в Каракалпакском государственном университете Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета по адресу (<https://urdu.uz>) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziynet.uz.

Научный руководитель: Зикриллаев Нурулла Фатхуллаевич
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Гулямов Гафур
доктор физико-математических наук, профессор
Раззаков Алижон Шоназарович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Самаркандский государственный университет

Защита диссертации состоится « 11 » июля 2025 года в 10:00 часов на заседании Научного совета PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 при Ургенчского государственного университет имени Абу Райхана Беруни. (Адрес:220100, г. Ургенч, ул. Х. Алимджана, дом 14. Тел.: (99862)224-66-11, факс: (99862) 224-67-00, e-mail: fizelektronika.urdu@umail.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ургенчского государственного университет имени Абу Райхана Беруни (зарегистрирована за № 818). (Адрес: 220100, г. Ургенч, ул. Х.Алимджана, дом 14. Тел.: (99862) 224-66-11, факс: (99862) 224-67-00). e-mail: arm@urdu.uz.

Автореферат диссертации разослан « 30 » июня 2025 года.

(протокол рассылки № 9 от « 30 » июня 2025 года).



У.О.Кутлиев,
Председатель научного совета по
присуждению научных степеней,
доктор физико-математических наук,
профессор

Я.Р.Якубов,
Учёный секретарь Научного совета по
присуждению научных степеней,
кандидат физико-математических
наук, доцент

К.А.Исмайлов,
Председатель научного семинара при
Научном совете по
присуждению научных степеней,
доктор физико-математических наук,
профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация к диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы. В мире производство электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии, в частности, солнечной энергии, в XXI веке получило широкое развитие. В развитых странах особое внимание уделяется созданию и практическому применению диодов, транзисторов, микрочипов на основе кремния, солнечных элементов с высоким КПД (более 22%), а также высокочувствительных магнитных датчиков и магнитных диодов. Легирование полупроводникового кремния атомами элементов переходной группы (Ni и Mn) позволяет значительно расширить возможности его применения в микроэлектронике, поскольку эти элементы формируют магнитные и электрически активные структуры в кристаллической решетке кремния. Такое технологическое решение повышает эффективность проводимых научных исследований, и особое внимание уделяется получению принципиально новых кремниевых материалов с уникальными магнитными и электрофизическими свойствами.

В настоящее время в мире кремний считается основным материалом в современной спинтронике и магнитоэлектронике. В ведущих странах мира для улучшения магнитных и магнитооптических свойств материалов на основе Si синтезируются структуры, легированные атомами Ni и Mn, в частности, соединения состава $MnSi_{1.7}$, $Si<B,Mn>$ и Ni-Si, с использованием технологий имплантации и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Исследуются возможности управления магнитным упорядочением и магнитооптическими эффектами (Керра, Фарадея) этих структур, формирующихся в кристаллической решетке кремния в диапазоне от 1 нм до 1 мкм. В этом направлении приоритетными являются исследования по разработке и получению новых функциональных материалов для устройств, применяемых в высоких технологиях, в частности, изучение влияния температуры, магнитного поля и термической обработки на магнитные свойства материалов. Последние исследования, проводимые мировым научным сообществом, показывают, что такие явления, как ферромагнитное состояние, расположение магнитных моментов (M_s , M_r , H_c), образование магнитных кластеров, а также температурно-зависимое магнитное затухание в кремнии, легированном никелем и марганцем, еще не полностью изучены. В частности, то, как эти примеси располагаются с энергетическим преимуществом в решетке кремния (Ea), магнитные взаимодействия в кластерном состоянии, а также их влияние на электронный спектр (l , s и j) - на сегодняшний день считаются фундаментальным и практическим приоритетом.

В последние годы в нашей республике особое внимание уделяется практическому применению магнитоэлектроники, в связи с чем изучение влияния кластеров примесных атомов на физические параметры кремния и создание новых ферромагнитных материалов с магнитными кластерами приобретает важное научное и практическое значение. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы поставлены задачи по созданию широких возможностей для реализации инновационных проектов во всех направлениях,

внедрению современных механизмов, направленных на поддержку научных исследований и инновационных инициатив. В частности, разработка и глубокое исследование эффективных технологий на основе нанотехнологических подходов с использованием экономически выгодных материалов признаются одним из наиболее актуальных научных направлений современности. В этих процессах возрастает значение международного сотрудничества. В частности, важное значение имеет достижение соглашения в рамках стратегического партнерства между Узбекистаном и Малайзией о запуске в июне 2025 года совместных проектов, объединяющих производство, научно-исследовательские работы и подготовку кадров в области полупроводников, микроэлектроники и высоких технологий.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-20 от 22 января 2025 года «О дополнительных мерах по выводу электротехнической промышленности на новый этап развития», Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 от 19 марта 2021 года «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики», а также в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-57 от 16 февраля 2023 года «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий», а также в других нормативно-правовых документах, относящихся к данной деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан – III. «Энергетика, энерго - и ресурсосбережение, транспорт, машино - и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. В передовых научно-исследовательских центрах мира, а также в университетах и институтах (США, Китай, Япония, Германия, Южная Корея, Россия) ведутся активные исследования по разработке новых технологий получения монокристаллического кремния, предназначенного для применения в спинтронике и магнитоэлектронике.

До настоящего времени механизмы диффузии примесных атомов никеля и марганца, их положение в кристаллической решётке, влияния их на магнитные и электрофизические свойства монокристаллического кремния, а также физические механизмы образования нанокластеров и комплексов были подробно исследованы многими зарубежными учёными, среди которых M. Bolduc, C. Awo-Affouda, A. Stollenwerk (США) и другие.

В научных школах академиков АН РУз М. Бахадирхонова, С. Зайнабиддинова, Р. Муминова и А. Мамадалимова, а также профессоров К. Абдурахманова, К. Исмайлова и Э. Арзикулова и их ученики провели значительные исследования, связанные с внедрением различных примесных атомов в кристаллическую решётку кремния и изучением его электрофизических, фотоэлектрических, оптических и, в том числе, магнитных

свойств полученных материалов.

Несмотря на достигнутые результаты в исследовании параметров кремния, легированного примесными атомами марганца и никеля, магнитные характеристики монокристаллического кремния при формировании кластеров и комплексов до сих пор остаются недостаточно изученными.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнялось в Каракалпакском государственном университете и Ташкентском государственном техническом университете в рамках Государственной программы научно-исследовательских работ Республики Узбекистан и программы межгосударственного гранта AL-202102215 «Интегрированная система микрожидкостных каналов для захвата циркулирующих раковых клеток с использованием ферромагнитных нанокластеров в кремнии» в период 2022–2024 гг. совместно с Турцией.

Целью исследования: Изучение магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами никеля и марганца.

Задачи исследования:

- исследование магнитных свойств кремния p - и n -типа проводимости, легированного примесными атомами марганца при разных температурах;
- исследование влияния обогащения бором слоя (слой p^+) на магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами марганца;
- разработать физическую модель, объясняющие магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами марганца;
- исследования магнитных свойств кремния, легированного примесными атомами никеля.
- исследование влияния текстурирования поверхности кремния, легированного примесными атомами никеля, с целью выявления его воздействия на концентрацию и магнитные свойства формирующихся кластеров.

Объектом исследования являются исходный материал – монокристаллический кремний p - и n - типа проводимости (выращенный методом Чохральского (Cz-Si), с концентрацией бора $N_p=2 \cdot 10^{15} \div 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и фосфора $N_n=2 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и специально изготовленные структуры типа p^+-p с концентрацией дырок в области $p^+=3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ толщиной $d \approx 10-15 \text{ мкм}$ порядка.

Предметом исследования являются изменения магнитных и электрофизических параметров образцов кремния, легированных примесными атомами никеля и марганца, под воздействием магнитного поля ($B=0 \div 9 \text{ Т}$) в широком температурном диапазоне ($T=1,8 \div 400 \text{ К}$), а также после проведения дополнительной термической обработки в различных режимах.

Методы исследований: для исследования химического состава образцов и их распределения по поверхности и глубине были использованы методы масс-спектрометрии вторичных ионов и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Для исследования рельефа поверхности образцов применялись методы сканирующей электронной микроскопии и атомно-силовой

микроскопии. Подвижность носителей заряда определялась методом Холла. Оптические свойства образцов изучались методами инфракрасной микроскопии. Для исследования основных магнитных параметров образцов использовались методы сверхпроводящей магнитометрии.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана новая технология формирования магнитных нанокластеров примесных атомов никеля и марганца в объемных и приповерхностных слоях кристалла кремния, позволяющая управлять магнитными параметрами образцов; установлено отсутствие гистерезисных явлений и значимого магнитосопротивления в n -Si, легированного примесными атомами марганца, что связано с низкой степенью взаимодействия электронов с магнитными моментами марганца;

впервые установлено, что магнитные параметры структур p^+ -Si<B, Mn> значительно выше, чем у образцов p -Si<B, Mn>, в частности, намагниченность насыщения (M_s) и остаточная намагниченность (M_r) увеличились в 7-8 и 5-6 раз соответственно, что объясняется увеличением концентрации магнитных центров на поверхности кремния по отношению ко всему объему;

предложена четырехступенчатая (локальная ферромагнитная ($T_1=1,8-30$ К), ферромагнитная ($T_2=30-50$ К), суперпарамагнитная ($T_3=50-290$ К) и парамагнитная ($T_4>290$ К)) физическая модель, описывающая температурные изменения магнитного момента в структурах p^+ -Si<B, Mn>, такие фазовые переходы объясняются потерей магнитных доменов с повышением температуры;

разработана физическая модель кластерообразования атомов марганца в решетке кремния, объясняющая его магнитные свойства ($\mu_{\text{един}}=(10-15)\mu_B$) полученные образцов;

впервые показано, что кремний, с кластерами примесных атомов никеля, проявляет ферромагнитные свойства при комнатной температуре ($T = 300$ К);

впервые установлено, что в результате текстурирования поверхности кремния с увеличением концентрации кластеров никеля магнитные параметры значительно возрастают: намагниченность насыщения (M_s) и остаточная намагниченность (M_r) увеличиваются в 5-6 раз, а коэрцитивная сила (H_c)-в 3-4 раза. Это позволяет управлять свойствами полупроводниковых магнитных материалов путём контроля структуры поверхности.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана оптимальная технология формирования нанокластеров примесных атомов никеля и марганца в кристалле кремния, позволяющая значительно улучшить магнитные свойства образцов.

впервые показано, что текстурирование поверхности кремния, легированного примесными атомами никеля, повышает ферромагнитные свойства материала при этом: насыщенная намагниченность (M_s) увеличивается в 5-6 раз, остаточная намагниченность (M_r)-в 4-6 раз, а коэрцитивная сила (H_c)-в 2-4 раза.

выявлено, что образцы p^+ -Si<B, Mn>, обогащённые атомами бора, демонстрируют ферромагнитные характеристики, значительно превосходящие образцов p -Si<B, Mn>: M_s при температуре $T=150$ К выше в 7 раз, а M_r - в 5-6

раза.

разработана физическая модель, описывающая температурную зависимость магнитного момента в кремнии p -типа, легированного примесными атомами марганцем (p -Si<B, Mn>). Модель включает три фазы: ферромагнитную ($T_1=1,8-30$ К), суперпарамагнитную ($T_2=30-240$ К) и парамагнитную ($T_3=240-300$ К), что свидетельствует о возможности практического применения полученных образцов в спинтронике в широком диапазоне температур.

Достоверность результатов исследования подтверждается:

обоснована использованием современных методов и измерительных приборов, сопоставлением экспериментальных и расчётных данных с теоретическими результатами и работами других авторов, а также интерпретацией полученных данных с позиции современных физических моделей.

Научная и практическая значимость диссертации.

Научная значимость полученных результатов заключается в выявлении физических механизмов влияния марганца и никеля (в том числе при наличии слоя, обогащённого бором) на магнитные свойства кремния, а также в разработке физических моделей структуры магнитных кластеров, образованных атомами марганца.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанная технология позволяет текстурировать поверхность монокристаллического кремния с наноразмерными кластерами примесных атомов никеля и марганца, что даёт возможность значительно увеличить площадь активной поверхности. Это объясняется необходимостью создания магнитных датчиков в спинтронике, элементов магнитной памяти и магнитных ключей, используемых в мощных электронных устройствах.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных данных (результатов) по магнитным свойствам кремния, легированного примесными атомами никеля и марганца, были разработаны и внедрены следующие решения:

новая диффузионная технология, основанная на формировании нанокластеров, обогащенных примесными атомами марганца (с концентрацией $N=10^{19}$ см⁻³), путем диффузии из слоя, созданного напылением примесных атомов марганца на поверхность кремния в вакуумных условиях, внедрена в производство на АО «FOTON» (справка акционерного общества «FOTON» № 207 от 26 ноября 2024 г.). В результате это позволило усовершенствовать процесс изготовления диодов (магнитных диодов) и транзисторов, а также улучшить их основные параметры в 2 раза;

Физическая модель, описывающая изменение магнитного момента в образцах кремния (p^+ -Si), легированного примесными атомами марганца, была внедрена в фундаментальный проект Бухарского государственного университета № F2-FA-0-83921/F2-FA-F0383 на тему «Сильно коррелированные взаимодействия в сверхпроводниках и магнитных материалах и расчет их критических параметров» (Справка Министерства высшего образования, науки

и инноваций Республики Узбекистан № 02/01-01-35 от 29 января 2025 г.). В результате насыщенная намагниченность (M_s), определенная при критически низкой температуре $T=1,8$ К, увеличилась в 4-5 раз, а остаточная намагниченность (M_r) - в 7-8 раз по сравнению с исходными образцами.

Апробация научных исследований. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 15 конференциях, в том числе на 13 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследований. Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 25 научных трудах. Из них 7 статей вышли в научных журналах, в том числе 2 в зарубежных (1 из которых индексируются в базе Scopus). Все указанные журналы рекомендованы Высшей аттестационной комиссией при министерстве Высшего образования, науки и инновации Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Структура и объем диссертации. Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации содержит 117 страниц текста, включая 50 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан, раскрыта степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, приведены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна и практическая значимость исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации и публикации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием **«Нанокластерные примесные атомы, образующиеся в объёме кремния»** рассмотрены особенности диффузии примесных атомов никеля и марганца в монокристаллическом кремнии, изменение магнитных и электрофизических параметров кремния под действием магнитного поля и температуры. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием **«Технология формирования кластеров примесных атомов никеля и марганца в кристаллической решётке кремния и методы исследований»** описаны используемые измерительные приборы, а также технология легирования кремния примесными атомами никеля и марганца. В этой же главе рассматриваются методики исследования магнитных и электрофизических параметров, полученных образцов кремния легированного примесными атомами никеля и марганца.

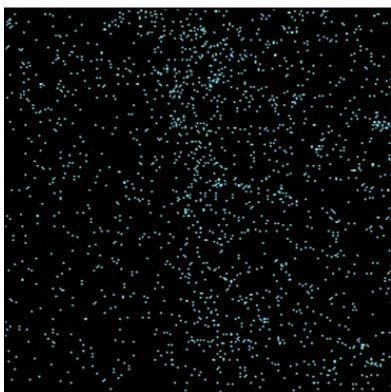


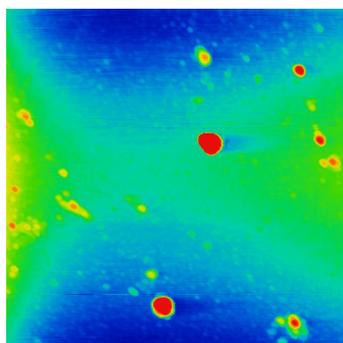
Рис. 1. Распределения кластеров примесных атомов никеля на поверхности кремния, после диффузии $T_{дифф}=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ и дополнительного термоотжига при $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В третьей главе диссертации под названием «**Ферромагнитные свойства кремния, легированного примесными атомами никеля**», рассмотрены возможности кластерообразования примесных атомов никеля в кремнии и магнитные свойства полученных образцов.

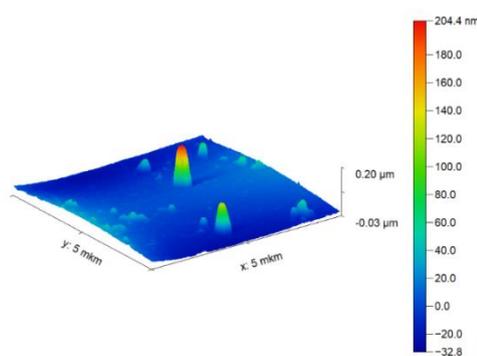
Установлено, что примесные атомы никеля в кристаллической решётке кремния играют важную роль в изменении его электрофизических и магнитных свойств. При температуре диффузии $T_{дифф}=800\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ примесные атомы никеля могут занимать узельные и межузельные позиции в решётке кремния и создают кластеры с нано и микро размерами.

Исследования показали, что структура и размеры кластеров атомов никеля зависят от условий дополнительной термообработки. Например, уменьшение температуры отжига приводит к увеличению размеров образованных кластеров, которые могут достигать нескольких микрометров.

На рис. 1. представлена фотография образованных кластеров примесных атомов никеля, сформированных на поверхности кремния. Установлено, что размер кластеров составляет примерно от 50 до 500 нанометров. Это изображение демонстрирует характер распределения и размеры кластеров



2D



3D

Рис. 2. Топология поверхности кремния после диффузии примесных атомов никеля при температуре $T=850\text{ }^{\circ}\text{C}$

примесных атомов никеля, образованных в результате термических процессов, и служит основой для дальнейшего анализа их структурных и физических параметров.

Полученные результаты важны для понимания поведения легирующих примесных атомов в кремнии, а также для разработки технологий получения новых материалов с улучшенными магнитными характеристиками.

На рис. 2. представлена топография поверхности кремния после диффузии примесных атомов никеля при температуре $T=850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Полученные результаты

демонстрируют изменения топологии поверхности кремния, вызванные образованием кластеров атомов никеля. Из рисунка видно, что поверхность кремния покрыта неоднородностями, высота которых варьируется от 32,8 до 204,4 нм. На 3D-изображении отчётливо видны отдельные возвышенности, что указывает на образование локальных кластеров примесных атомов никеля.

Исследования магнитных свойств кремния, легированного примесными атомами никеля, с помощью электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) показали образование магнитных доменов, состоящих из нанокластеров примесных атомов никеля. Управление концентрацией и размерами образованных кластеров открывает возможности для создания новых материалов с улучшенными свойствами для магнитоэлектроники.

Новый метод получения магнитного кремния основан на текстурировании поверхности образцов, что значительно увеличивает их площадь. Высокая концентрация атомов никеля вблизи поверхности способствует существенному росту намагниченности кремния легированного атомами никеля.

Показано что, текстурирование кремниевой поверхности пирамидальной структурой увеличивает площадь поверхности как минимум в $\sim 1,5-2$ раза по сравнению с плоской.

Ферромагнитные кластеры, образованные примесными атомами никеля, в текстурированной поверхности имели относительно высокую концентрацию по сравнению с кластерами на плоской поверхности кремния и демонстрировали более выраженные магнитные свойства.

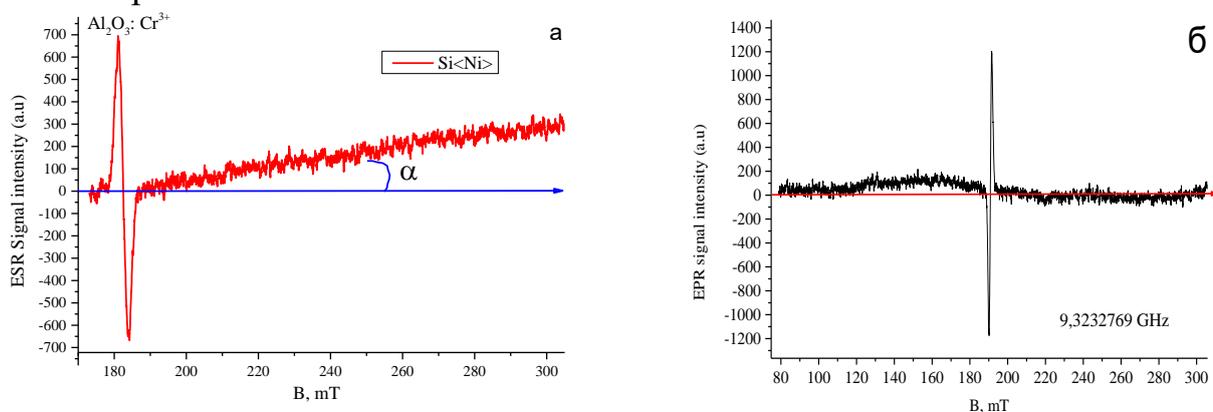


Рис. 3. Спектр ЭПР в образцах кремния а) Si<Ni> б) контрольный

Установлено, что кластеры, содержащие атомы никеля, образуются как в объёме, так и в приповерхностном слое кремния, значительно обогащёнными кластерами атомов никеля.

Показано, что в спинтронике возможно использование кремния, содержащего как объёмные, так и поверхностные кластеры никелевых атомов. Особый интерес представляет возможность формирования магнитных кластеров, содержащих атомы кремния, кислорода и никеля, а возможно, и марганца. На рис. 5 показано что ферромагнитные свойства образцов кремния легированные примесными атомами никеля при комнатной температуре ($T=300$ К). Из рисунка видно, что намагниченность насыщения безтекстурированного образца достигает $M_s=0,019$ етм/см⁻³. На рис. 6 продемонстрировано поведение магнитного момента текстурного образца Si<Ni> в зависимости от

напряженности магнитного поля при температурах $T=300$ К и $T=400$ К.

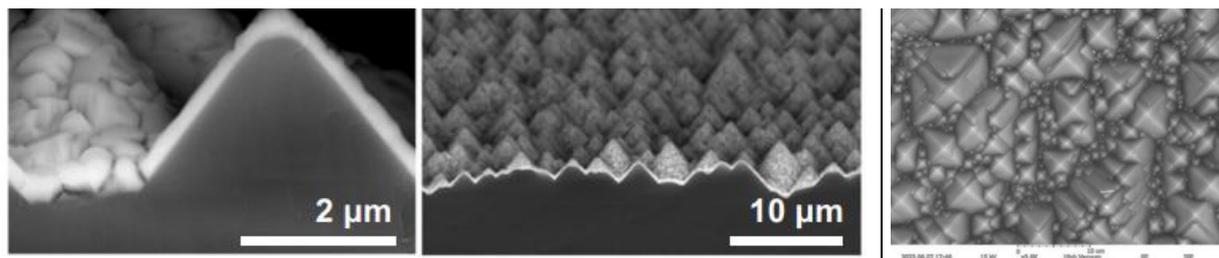


Рис. 4. Текстура на поверхности кремния

Анализ полученных результатов показывает, что, несмотря на некоторое снижение магнитного момента при повышении температуры, его изменения носят плавный характер, а основные параметры остаются вблизи значений, обеспечивающих стабильность магнитных свойств материала. Установлено, что магнитный момент насыщения при температуре $T = 300$ К достигает $M_s = 12 \cdot 10^{-2}$ emu/cm³, а при температуре $T = 400$ К — $M_s = 11 \cdot 10^{-2}$ emu/cm³.

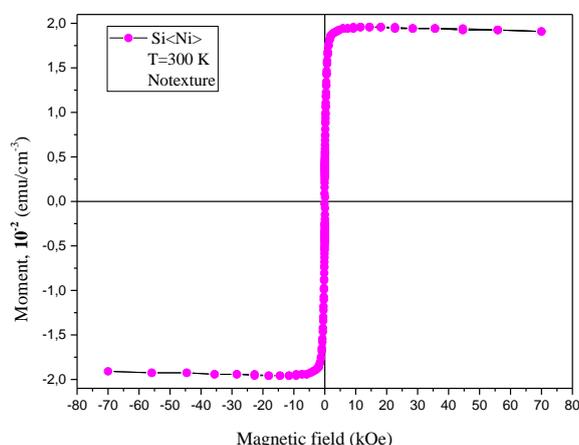


Рис. 5. Зависимость магнитного момента образца кремния без текстурирования, легированного примесными атомами никеля, при температуре $T_l = 300$ К

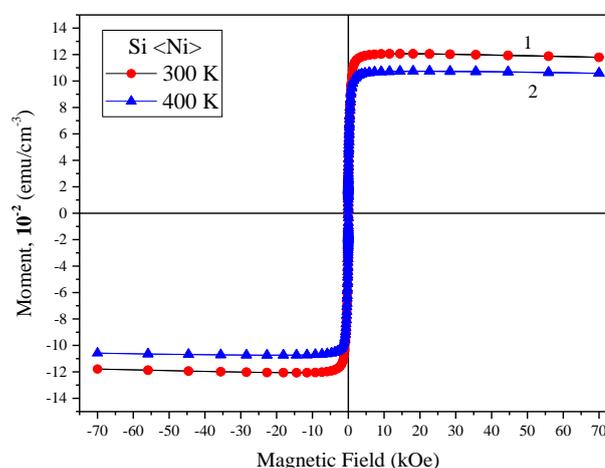


Рис. 6. Зависимость магнитного момента текстурированного образца кремния, легированного примесными атомами никеля, при температурах $T_l = 300$ К и 400 К

Анализ полученных результатов исследования в области малых полей показывает образование типичной петли гистерезиса. (рис.8 и рис.9).

На рис. 7 представлена гистерезисная петля образца Si<Ni> при температуре $T=300$ К, из которой видно, что коэрцитивная сила материала составляет $H_c=75$ Oe, что указывает на его магнитномягкий характер и низкое сопротивление размагничиванию, а остаточная намагниченность равна $M_r=2.4 \cdot 10^{-2}$ emu/cm³, что примерно в один раз меньше чем намагниченности насыщения.

На рис. 8 представлена гистерезисная петля образца текстурного кремния, легированного примесными атомами никеля, при $T=300$ К и $T=400$ К. Установлено, что при температуре $T= 400$ К коэрцитивная сила снижается до $H_c = 37,5$ Oe по сравнению с $H_c = 75$ Oe при $T = 300$ К, а остаточная намагниченность уменьшается до $M_r = 1,8 \cdot 10^{-2}$ emu/cm³ по сравнению с $M_r = 2,4 \cdot 10^{-2}$ emu/cm³ при $T = 300$ К . Это связано с усилением тепловых колебаний атомов в

кристаллической решетке, ослабляющих магнитное упорядочение.

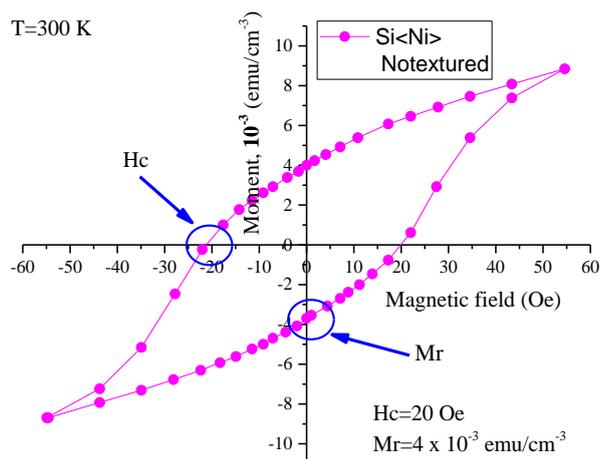


Рис. 7. Гистерезисная петля при $T=300$ К, без текстурного кремния, легированного атомами никелем

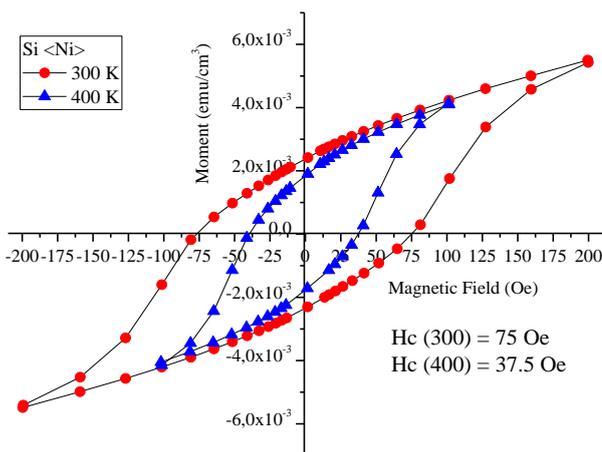


Рис. 8. Гистерезисная петля при $T=300$ К и $T=400$ К текстурного кремния, легированного атомами никелем

Несмотря на снижение коэрцитивной силы H_c , материал сохраняет достаточное значение этого параметра, что подтверждает его термическую устойчивость и пригодность для использования в магнитной памяти при относительно высоких температурах. Форма гистерезисной петли остаётся симметричной, что свидетельствует об однородности магнитных свойств. В таблице - 2 показано сравнительные параметры двух типов образцов – с текстурой на поверхности и без.

Таблица-1

Магнитные параметры образцов – с текстурой на поверхности и без.

Температура, К	M_s намагниченность насыщения, 10^{-2} emu/cm ³	M_r остаточная намагниченность 10^{-3} emu/cm ³	H_c коэрцитивная сила, Oe
300 (без текстуры)	1.9	4	20
300 (текстура)	12.06	24	75
Соотношение, раз	6.35	6	3.75
400 (текстура)	10.71	18	37.5
Соотношение, раз	5.64	4.5	1.87

Таким образом, установлено, что применение разработанной новой технологии, обеспечивающей текстурирование поверхности образцов кремния, приводит к значительному улучшению их магнитных свойств по сравнению с контрольными образцами (без текстурирования). Результаты исследования при температуре $T = 300$ К показали, что намагниченность насыщения (M_s) увеличивается в 6–7 раз, остаточная намагниченность (M_r) — в 6 раз, а коэрцитивная сила — в 3–4 раза по сравнению с безтекстурированными образцами. Эти изменения подтверждают значительное влияние увеличенной площади поверхности на магнитные свойства материала.

В четвертой главе диссертации под названием «**Магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами марганца**» представлены результаты исследования магнитных и электрофизических параметров образцов кремния, легированных примесными атомами марганца.

Таблица-2

Электрофизические свойства кремния легированного примесными атомами марганца.

Образец	Конечная температура диффузии $T, ^\circ\text{C}$	Тип проводимости	Удельное сопротивление, $\rho, \text{Ом}\cdot\text{см}$	Концентрация носителей заряда, $p, n, \text{см}^{-3}$	Подвижность носителей заряда, $\mu, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
Исходный Si	–	p	3	$6.7 \cdot 10^{15}$	305
Si<B, Mn>	1095	n	$2.7 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^{12}$	1110
Si<B, Mn>	1090	n	$5 \cdot 10^4$	$1.42 \cdot 10^{11}$	1198
Si<B, Mn>	1085	n	$1.1 \cdot 10^5$	$6.72 \cdot 10^{10}$	962
Si<B, Mn>	1080	p	$1.3 \cdot 10^5$	$3.3 \cdot 10^{11}$	160
Si<B, Mn>	1075	p	$3 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^{12}$	95
Si<B, Mn>	1070	p	$1.5 \cdot 10^4$	$3.9 \cdot 10^{12}$	82
Si<B, Mn>	1065	p	$1.2 \cdot 10^4$	$6.7 \cdot 10^{12}$	76
Si<B, Mn>	1060	p	$7.4 \cdot 10^3$	$1.24 \cdot 10^{13}$	65
Si<B, Mn>	1055	p	$8.2 \cdot 10^2$	$7.9 \cdot 10^{13}$	88
Si<B, Mn>	1050	p	$2.7 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^{14}$	165
Si<B, Mn>	1045	p	$1.8 \cdot 10^2$	$1.7 \cdot 10^{14}$	192

Исследованиями установлено, что, управляя температурой и временем диффузии, можно получить образцы кремния p -типа проводимости, легированные примесными атомами марганца, с удельным сопротивлением от $\rho = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ до $\rho = 1,8 \cdot 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, и n -типа проводимости - с удельным сопротивлением от $\rho = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ до $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

В образцах Si<B,Mn> p -типом проводимостью наблюдались высокое (более 100%) отрицательное магнетосопротивление (ОМС). При этом установлено, что величина ОМС в образцах Si<B,Mn> существенно увеличивается с ростом величины приложенных электрического (E) и магнитного (B) поля. На рис. 9 представлены результаты исследования температурной зависимости магнитного сопротивления ($\Delta\rho/\rho$) образцов Si<B,Mn> в интервале температур $T=100\text{--}380 \text{ К}$.

Из результатов исследования установлено, что с понижением температуры значение ОМС в образцах p -Si<B,Mn> увеличивается и достигает своего максимального значения (около $\sim 800\%$) при $T=240 \text{ К}$. Дальнейшее понижение температуры приводит достаточно быстрому уменьшению ОМС и при температурах $T=160\text{--}170 \text{ К}$ происходит инверсия знака магнетосопротивления т.е. ОМС переходит к ПМС, при этом величина ПМС в этой области температур слабо зависит от температуры.

Значительная величина ОМС, достигающая при комнатной температуре до 50%, которые показывает возможности создания чувствительные магниторезистивные датчики для магнитных измерений.

Анализ результатов исследования показал, что при температуре $T=1,8$ К наблюдаются ферромагнитные свойства кремния p -типа проводимости, легированного атомами марганца.

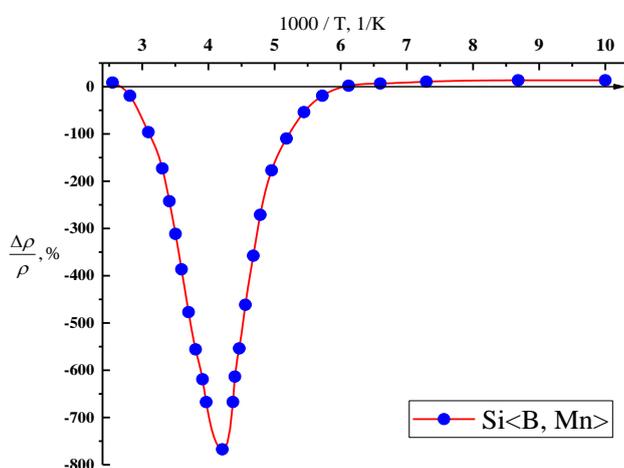


Рис. 9. Зависимость магнетосопротивления от температуры для образцов: Si<B, Mn> при $E=200$ В/см, $B=2$ Тл

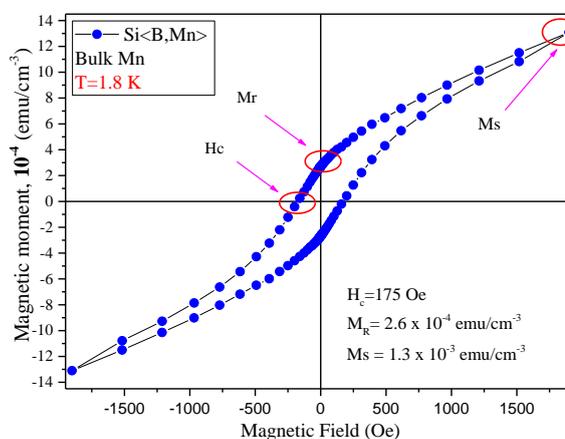


Рис. 10. Зависимости магнитного момента кремния p -типа проводимостью, легированного примесными атомами марганца от магнитного поля при температуре $T=1.8$ К

Кривая зависимости магнитного момента от магнитного поля характеризуется гистерезисом, что подтверждает ферромагнитное упорядочение.

Были определены основные параметры полученных образцов кремния, такие как коэрцитивная сила $H_c=175$ Oe, остаточная намагниченность $M_r=2,6 \cdot 10^{-4}$ emu/cm³ и магнитный момент насыщения $M_s=1,3 \cdot 10^{-3}$ emu/cm³. Установлено, что примесные атомы марганца, внедряясь в кристаллическую решётку кремния, формируют локальные магнитные моменты, которые взаимодействуют с дырками, обеспечивая ферромагнитное состояние. На рис. 11 (а) показана петля гистерезиса образца p -Si<B, Mn> при температуре $T=150$ К, что свидетельствует о его ферромагнитных свойствах.

На рис. 11 (б) изображена петля гистерезиса образца Si<B, Mn> при температуре $T=300$ К, показывающая его ферромагнитные свойства при комнатной температуре. Значение насыщенной намагниченности при этом было равно $M_s=1.6 \cdot 10^{-4}$ emu/cm³.

Полученные результаты показывают, что даже при повышении температуры до комнатной ($T = 300$ К) материал сохраняет значимую намагниченность по сравнению с результатами, полученными при $T = 150$ К, демонстрируя стабильные магнитные свойства. Эти данные подчёркивают его перспективность для применения в температурно-зависимых магнитных устройствах.

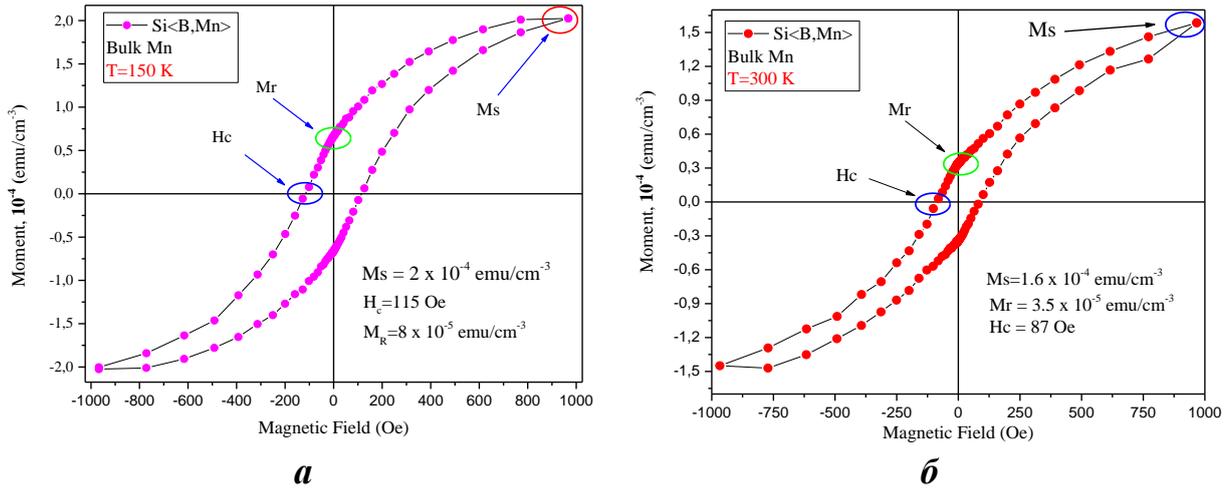


Рис. 11. Зависимость магнитного момента кремния p -типа проводимости, легированного примесными атомами марганца, от магнитного поля при $T=150\text{ K}$ (а) и $T=300\text{ K}$ (б)

На рис. 12 представлена зависимость магнитного момента от магнитного поля для образца n -Si<B, Mn> при температурах $T=150\text{ K}$ и $T=300\text{ K}$. Как видно из рисунка, зависимость магнитного момента от магнитного поля имеет почти линейный характер и отсутствует гистерезис, что указывает на парамагнитные свойства материала. Таким образом, в образцах кремний, легированный примесными атомами марганца n -типом проводимости, проявляет парамагнитное поведение при $T=150\text{ K}$ и $T=300\text{ K}$, что делает его пригодным для применения в системах, требующих парамагнитных свойств, но исключает использование в устройствах с ферромагнитными требованиями при комнатной температуре.

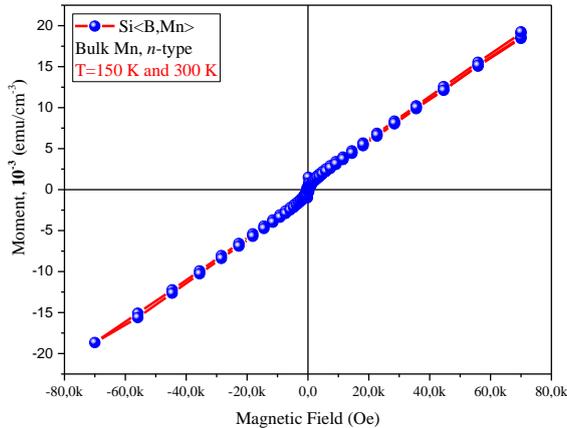


Рис. 12. Зависимости магнитного момента кремния n -типа проводимостью, легированного примесными атомами марганца от магнитного поля при температурах $T=150\text{ K}$ и $T=300\text{ K}$

Обработка полученных результатов исследования показала, что ферромагнитные свойства наблюдаются только в образцах кремния p -типа (дырочной) проводимости, легированного примесными атомами марганца. Эти выводы указывают, что ферромагнитные свойства полученных материалов принципиально зависят от концентрации дырок.

Ферромагнитное состояние наблюдается в образцах кремния при наличии наноразмерных магнитных кластеров, концентрация которых определяется растворимостью атомов марганца в кремнии (достигающей значений до $N \sim 10^{15}\text{ cm}^{-3}$) при низких температурах $T = 1,8\text{ K}$, $T = 150\text{ K}$ и $T = 300\text{ K}$.

Исследование ферромагнитных свойств кремния, легированного примесными атомами марганца, показывает, что его магнитные характеристики зависят от концентрации дырок и обменного взаимодействия в кристаллической решётке.

Расположение марганца в узлах или междоузлиях структуры кремния влияет на формирование ферромагнитного состояния: то есть d -оболочка атомов марганца, заполненная электронами, создаёт магнитные моменты, которые приводит к ферромагнитному состоянию материала.

Выявлено, что ферромагнитные свойства образцов кремния p -типа проводимости, легированного примесными атомами марганца, проявляются при комнатной температуре ($T = 300$ К) с остаточной намагниченностью $M_r = 3,5 \cdot 10^{-5}$ emu/cm³ и коэрцитивной силой $H_c = 87$ Oe. Установлено, что усиление ферромагнитных параметров происходит при снижении температуры до $T = 150$ К ($M_s = 2 \cdot 10^{-4}$ emu/cm³, $H_c = 115$ Oe) с достижением максимального значения коэрцитивной силы $H_c = 175$ Oe при $T = 1,8$ К.

На рис. 13 представлены два распределения концентраций атомов бора и марганца в кристаллической решётке кремния.

Как видно из рисунка, концентрация примесных атомов марганца (красные точки - Mn) достигает максимума ($\sim 10^{20}$ см⁻³) вблизи поверхности и резко уменьшается с увеличением глубины до 15 мкм. Синие треугольники соответствуют распределению концентрации примесных атомов бора.

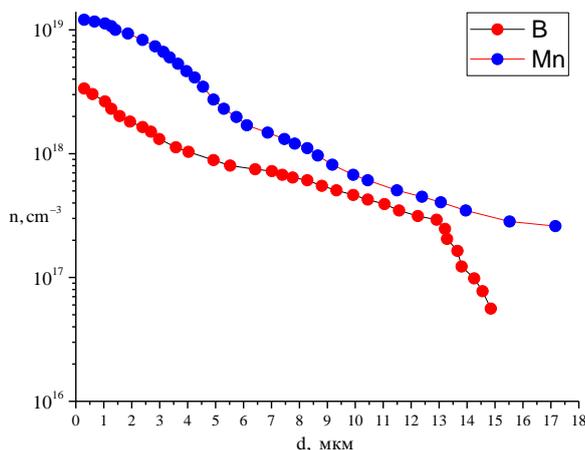


Рис. 13. Распределение концентраций примесных атомов бора и марганца по глубине образца кремния

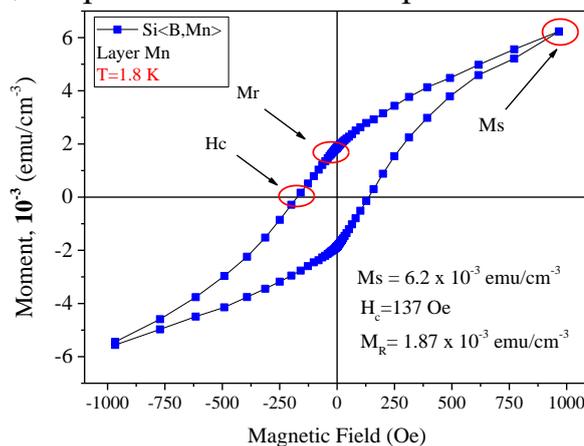


Рис. 14. Зависимости магнитного момента обогащенного бора в кремнии p -типа проводимостью, легированного примесными атомами марганца от магнитного поля при $T = 1.8$ К

Максимальная концентрация примесных атомов бора (примерно $\sim 10^{19}$ см⁻³) наблюдается на глубине около 10 мкм, после чего она постепенно уменьшается.

Анализ полученных результатов показывает, что распределение примесных атомов бора свидетельствует о их проникновении на определённую глубину в результате диффузии, при этом максимальная концентрация достигается на самой поверхности. Примесные атомы марганца в кристаллической решётке кремния, наоборот, скапливаются преимущественно на поверхности и практически не проникают вглубь, что указывает на низкую растворимость марганца в объёме кремния и его сильное взаимодействие на поверхности.

На рис. 14 представлены кривые намагниченности $M(H)$, измеренные при

температуре $T=1,8$ К для образцов кремния, обогащённого бором и легированного примесными атомами марганца. Эти кривые демонстрируют

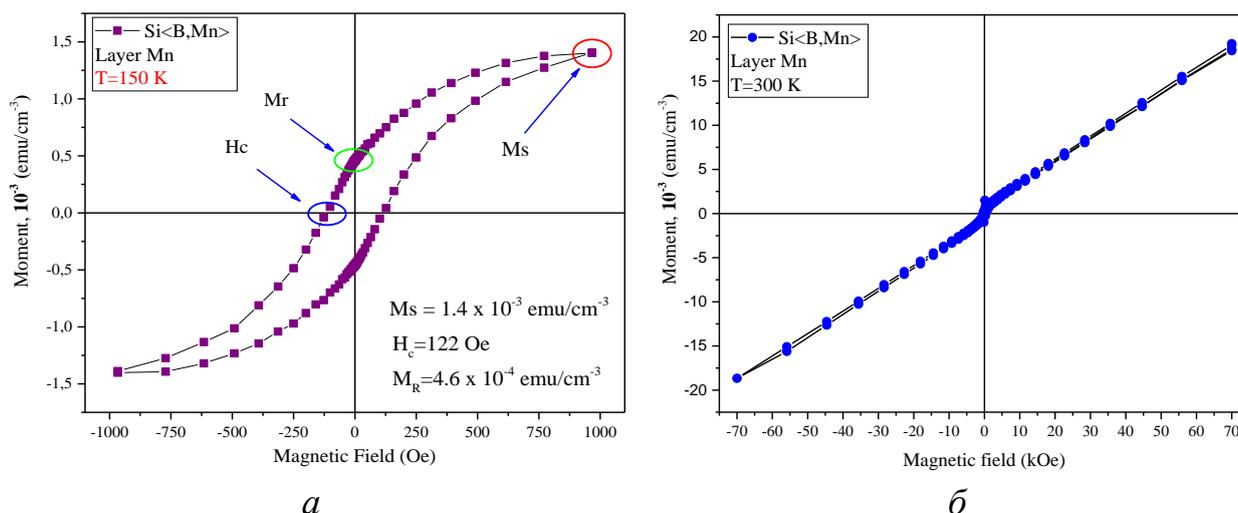


Рис. 15. Зависимости магнитного момента обогащенном атомами бора в кремнии p -типа проводимостью, легированного примесными атомами марганца от величины магнитного поля при температуре $T=150$ К (а) и $T=300$ К (б)

гистерезисную петлю, что свидетельствует о наличии ферромагнетизма в образцах $p^+-Si<B,Mn>$ при температуре $T=1,8$ К. Однако намагниченность насыщения для образцов $p^+-Si<B, Mn>$ на порядок выше, чем у образцов $Si<B, Mn>$ (показано на рис. 11).

Таблица-3

Изменения ферромагнитных параметров образцов кремния p - и n -типа проводимости, легированного примесными атомами марганца в зависимости от температуры

Образец	T , К	M_s , emu/cm ³	M_r , emu/cm ³	H_c , Oe	μ/μ_B
$p^+-Si<B,Mn>$	150 К	1.4×10^{-3}	4.6×10^{-4}	122	140
$p-Si<B, Mn>$		2×10^{-4}	8×10^{-5}	115	114
Соотношение		7	5.75	1.06	1.23
$p^+-Si<B,Mn>$	1,8 К	6.2×10^{-3}	$1.87 \cdot 10^{-3}$	172	421
$p-Si<B, Mn>$		1.3×10^{-3}	$2.6 \cdot 10^{-4}$	175	311
Соотношение		4.76	7.2	1	1.35

Высокие значения магнитных параметров указывают на сильное взаимодействие локальных магнитных моментов атомов марганца, встроенных в кристаллическую решётку кремния. Такое коллективное взаимодействие магнитных моментов обеспечивает устойчивое упорядоченное магнитное состояние, характерное для ферромагнетиков при низких температурах. При температуре $T=150$ К (рис. 15а) образцы $p^+-Si<B, Mn>$ p -типа сохраняют ферромагнитные свойства, что свидетельствует о продолжающемся

взаимодействии между магнитными моментами. Однако при комнатной температуре $T = 300$ К (рис. 15б) наблюдается линейная зависимость магнитного момента от внешнего магнитного поля без наличия петли гистерезиса.

На рис. 15 б показано зависимость магнитного момента проходит через начало координат, что свидетельствует о переходе образцов кремния, легированного примесными атомами марганца, в парамагнитное состояние. В этом состоянии тепловая энергия полностью разрушает коллективное упорядочение магнитных моментов, в результате чего магнитный момент становится пропорционален внешнему магнитному полю.

Установлено, что образцы $p^+ \text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ обладают значительно более высокими ферромагнитными характеристиками по сравнению с образцами $p \text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$. Определено, что максимальная намагниченность насыщения (M_s) в структурах $p^+ \text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ при $T = 150$ К превышает относительно от образцов $p \text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ в 7 раз, а при температуре $T = 1,8$ К в 4–5 раз.

Остаточная намагниченность (M_r) в структурах $p^+ \text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ при $T = 150$ К выше в 5–6 раз, а при температуре $T = 1,8$ К — в 7–8 раз по сравнению с образцами $p \text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$. Это свидетельствует об усиленном ферромагнитном упорядочении в структурах $p^+ \text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$, обусловленном повышенной концентрацией атомов бора.

На рис. 16 представлена зависимость магнитного момента (в единицах 10^{-3} эму/см³) от температуры для образца $p^+ \text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ p -типа проводимости. В исследованном интервале температур от $T = 1,8$ К до $T = 300$ К, охватывая как критически низкие (криогенные), так и комнатные температуры.

При низких температурах примесные атомы марганца в кремнии формируют локальные магнитные моменты, между которыми возникают сильные обменные взаимодействия. Из-за случайного расположения атомов марганца их спины ориентированы хаотично, однако при снижении температуры система может переходить в спин-стеклянную фазу. Вторая область, наблюдаемая в интервале температур $T = 30\text{--}50$ К, связана с постепенным разупорядочиванием изолированных доменов магнитных моментов атомов марганца. При понижении температуры ниже $T < 50$ К в кремнии, легированном марганцем, возникает ферромагнитное состояние — магнитные домены заполняют весь объем, и магнитный момент резко возрастает за счёт увеличения их размеров. В диапазоне 30–50 К происходит перераспределение доменов: их размеры растут, границы уменьшаются, что усиливает общий магнитный момент. Выше $T > 50$ К магнитные моменты атомов марганца ведут себя как независимые парамагнитные частицы, но при снижении температуры начинается обменное взаимодействие и коллективная ориентация спинов, что ведёт к ферромагнитному упорядочиванию. С повышением температуры локальные магнитные моменты частично распадаются, при этом, хотя и сохраняются изолированные домены, их тепловая разориентация усиливается. Ослабление обменного взаимодействия приводит к тому, что кластеры ведут себя как независимые магнитные диполи, демонстрируя суперпарамагнитное поведение. Под действием внешнего поля магнитные моменты временно выравниваются, но без него возвращаются в хаотическое состояние. Разница между кривыми ZFC и FC уменьшается, указывая на разупорядочивание магнитных моментов.

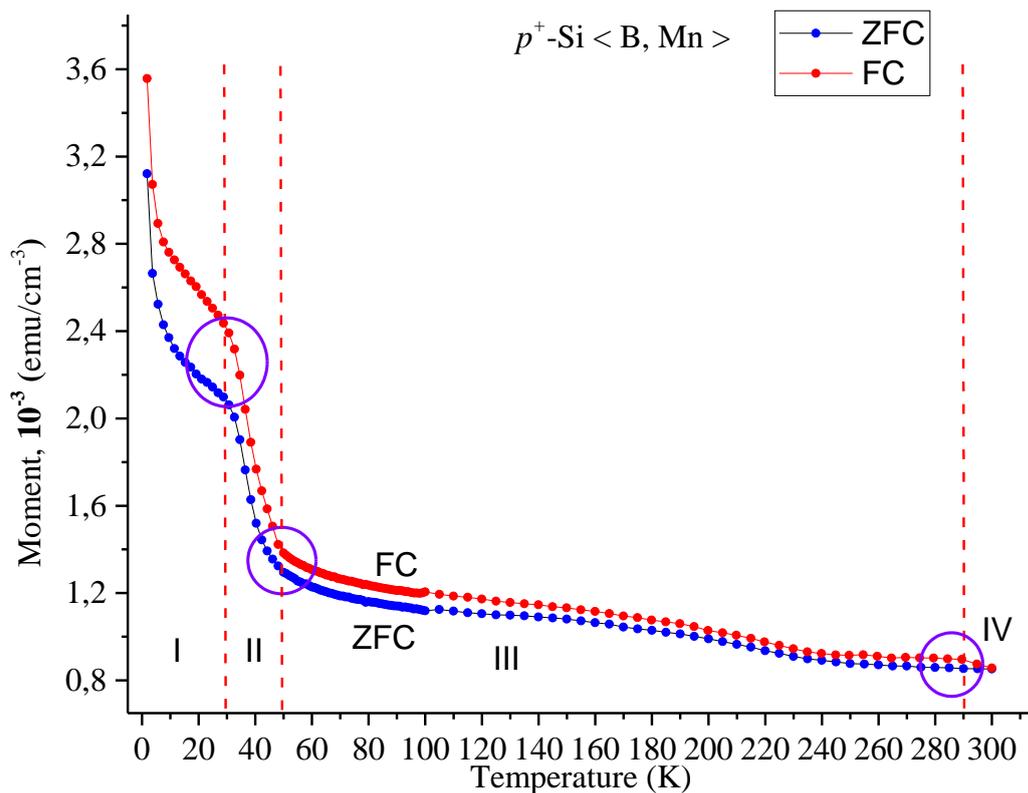


Рис. 16. Зависимость магнитного момента от температуры в структурах $p^+ - \text{Si} < \text{B}, \text{Mn} >$ в режимах ZFC и FC.

При температуре $T > 290$ К тепловая энергия становится доминирующей, и магнитные моменты полностью разупорядочиваются. Магнитные домены кластеров исчезают, и материал переходит в парамагнитную фазу. Магнитные моменты примесных атомов марганца движутся хаотично под воздействием тепловых колебаний. Обменное взаимодействие полностью подавляется от тепловой энергии, поэтому в образцах $p^+ - \text{Si} < \text{B}, \text{Mn} >$ отсутствует магнитная упорядоченность. Кривые ZFC и FC полностью совпадают, так как при высоких температурах внешний магнитный полюс не способен выравнять магнитные моменты.

Полученные результаты открывают новые возможности для улучшения магнитных свойств кремниевых материалов за счет взаимодействия атомов бора и марганца, что подчеркивает их перспективность для применения в области спинтроники.

В заключение хочу выразить благодарность моему научному руководителю, **профессору Н. Ф. Зикриллаеву** и **К. А. Исмайлову**, а также всему коллективу кафедры «Цифровая электроника и микроэлектроника» Ташкентского государственного университета и кафедры «Физика полупроводников» Каракалпакского государственного университета за оказанную помощь и поддержку при выполнении моей диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов диссертационной работы (PhD) по физико-математическим наукам на тему: «Магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами никеля и марганца» представлено следующее заключение:

1. Разработана новая оптимальная технология получения кремниевых образцов с магнитными свойствами, содержащих магнитные кластеры примесных атомов никеля и марганца. Показано, что это связано с формированием магнитных кластеров атомов примесей никеля и марганца в объёме кремния и вблизи его поверхности.

2. Впервые показано, что текстурирование поверхности кремния, легированного примесными атомами никеля, увеличивает концентрацию кластеров на поверхности, что приводит к улучшению ферромагнитных свойств материала. Установлено, что в образцах кремния с текстурированным насыщенная намагниченность (M_s) возрастает в $5\div 6$ раз, остаточная намагниченность (M_r) — в $4\div 6$ раз, а коэрцитивная сила (H_c) — в $2\div 4$ раза по сравнению с исходным образцом кремния легированного примесными атомами никеля (без текстуры).

3. Установлено отсутствие гистерезисных явлений и значимого магнитосопротивления в образцах кремния n -типом проводимости легированного примесными атомами марганца, что связано с низкой степенью взаимодействия электронов с магнитными моментами марганца.

4. Впервые обнаружено, что структурах p^+ -Si<B,Mn> обогащенного атомами бора наблюдается ферромагнитные свойства, значительно превышающими значения для образцов p -Si<B,Mn>. Установлено, что при температуре $T=150$ К в полученных структурах максимальная намагниченность насыщения (M_s) растет в 7 раз, остаточная намагниченность (M_r) — в $5\div 6$ раза, магнитного момента $1,5\div 2$ раза.

5. Установлено, что высокая концентрация атомов бора ($\sim 10^{18}$ см⁻³) усиливает взаимодействие магнитных моментов доменов марганца с кристаллической решёткой, что приводит к значительному росту ферромагнитных характеристик кремния (до $\mu \sim 500\mu_B$).

6. Разработана физическая модель изменения магнитного момента кремния, легированного примесными атомами марганца, которая включает четыре температурные области: локальную ферромагнитную фазу $T=1,8\div 30$ К, ферромагнитную фазу $T=30\div 50$ К, суперпарамагнитную фазу $T=50\div 240$ К и парамагнитную фазу при $T=240\div 300$ К.

7. Впервые показано, что растворимость примесных атомов марганца в кремнии увеличивается за счёт примесных атомов бора ($N = 10^{18}$ см⁻³), но только при их высокой концентрации, достигнутой методом дополнительного легирования посредством диффузии из напыленного слоя.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC
DEGREES PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 URGENCH STATE UNIVERSITY
NAMED AFTER ABU RAYHON BERUNIY**

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

ISMAILOV TIMUR BAXRAMOVICH

**MAGNETIC PROPERTIES OF SILICON DOPED WITH
IMPURITY ATOMS OF NICKEL AND MANGANESE**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Urgench – 2025

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Higher Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2024.3.PhD/FM813.

The dissertation was prepared at Karakalpak State University and Tashkent State Technical University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the scientific council website (<https://urdu.uz/uz>) and on the website of "Ziyonet" Information and educational portal www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor: **Zikrillayev Nurulla Fatxullayevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Official opponents: **Gulyamov Gafur**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Razzakov Alijon Shonazarovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Leading organization: **Samarkand State University**

The defense will take place on " 11 " July 2025 at 10:00 at the meeting of scientific council number PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 at the Urgench State University named after Abu Raykhan Beruni. (Address: 220100, Uzbekistan, Urgench, st. Kh. Alimjana, house 14.. Phone: (99862)224-66-11. Fax: (99862) 224-67-00, e-mail: fizelektronika.urdu@umail.uz).

The doctoral dissertation is possible to review in Information-resource centre at the Urgench State University named after Abu Raykhan Beruni. (is registered № 818). (Address: 220100, Uzbekistan, Urgench, st. Kh. Alimjana, house 14. Phone: (99862)224-66-11. Fax: (99862) 224-67-00. e-mail: arm@urdu.uz

The dissertation abstract was distributed on " 30 " june 2025.
(mailing report № 9 on " 30 " june 2025).



U.O.Kutliev
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical Sciences, professor

K.R.Yakubov
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, candidate of physical and mathematical Sciences, dotsent

K.A.Ismaylov
Chairman of scientific Seminar under scaintific Council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (Abstract for the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD))

The purpose of the study. Study of the magnetic properties of silicon doped with impurity atoms of nickel and manganese.

The object of the research work are the initial material - monocrystalline silicon of p - and n -type conductivity (grown by the Chohralski method (Cz-Si), with a boron concentration of $N_p=2\cdot 10^{15}\div 4\cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and phosphorus concentration of $N_n=2\cdot 10^{14}\div 3\cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and specially manufactured structures of p^+p type with a hole concentration in the p^+ region ($d\approx 10\text{-}15 \mu\text{m}$) of the order $N_p=3\cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

The scientific novelty of the research work is as follows:

a new technology has been developed for the formation of magnetic nanoclusters of nickel and manganese impurity atoms in the volume and near-surface layers of a silicon crystal, which allows controlling the magnetic parameters of the samples;

in n -type silicon doped with manganese impurity atoms, hysteresis phenomena and the absence of magnetoresistance were observed, which is attributed to the weak interaction between charge-carrying electrons and the magnetic moments of manganese;

for the first time, it was discovered that the magnetic parameters of $p^+\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ structures are significantly higher compared to $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ samples. Specifically, the saturated magnetization (M_s) and residual magnetization (M_r) increased by 7-8 and 5-6 times, respectively. This phenomenon is attributed to the increase in magnetic centers on the silicon surface relative to the entire volume;

a four-stage (local ferromagnetic ($T_1=1.8\text{-}30 \text{ K}$), ferromagnetic ($T_2=30\text{-}50 \text{ K}$), superparamagnetic ($T_3=50\text{-}290 \text{ K}$) and paramagnetic ($T_4>290 \text{ K}$)) physical model describing the temperature-dependent change in magnetic moment in $p^+\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ structures is proposed, such phase transitions are explained by the loss of magnetic domains with increasing temperature;

additionally, a physical model of manganese atom clustering in the silicon lattice has been proposed to explain its magnetic properties, with individual moment values of $\mu_{\text{unit}} = (10\text{-}15)\mu_B$ for the obtained samples;

for the first time, it has been shown that nickel-doped silicon exhibits ferromagnetic cluster properties at room temperature ($T = 300 \text{ K}$);

for the first time, it was found that with an increase in the concentration of nickel clusters as a result of the texture of the silicon surface, the magnetic parameters - saturated magnetization (M_s) increased 5-6 times, residual magnetization (M_r) 5-6 times, and the coercive force (H_c) 3-4 times, which made it possible to control the properties of semiconductor magnetic materials by controlling the surface structure.

Implementation of research results.

Based on the obtained scientific data (results) on the magnetic properties of silicon doped with nickel and manganese atoms, the following solutions were developed and implemented:

a new diffusion technology based on the formation of nanoclusters enriched with manganese impurity atoms (at a concentration of $N=10^{19} \text{ cm}^{-3}$) by diffusion from the layer formed by spraying manganese impurity atoms on the silicon surface under

vacuum conditions has been introduced into practice at JSC "FOTON" (certificate of JSC "FOTON" №. 207 dated November 26, 2024). As a result, it was possible to improve the production process of diodes (magnetic diodes) and transistors and improve their main parameters by 2 times;

the physical model describing the change in magnetic moment in silicon (p^+ -Si) samples doped with manganese impurity atoms was implemented in the fundamental project №. F2-FA-0-83921/F2-FA-F0383 of Bukhara State University on the topic "Strongly correlated interactions in superconductors and magnetic materials and calculation of their critical parameters" (Reference №. 02/01-01-35 of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan dated January 29, 2025). As a result, the saturated magnetization (M_s), determined at a critical low temperature $T=1.8$ K, increased by 4-5 times, and the residual magnetization (M_r) by 7-8 times compared to the initial samples;

Structure and scope of the thesis.

The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, and a list of references. The text spans 117 pages and includes 50 figures and 16 tables.

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

I bo'lim (I часть, part I)

1. Zikrillayev N. F, Mavlonov G. K, Trabzon L, Koveshnikov S. V, Kenzhaev Z. T, Ismailov T. B, Abduganiev Y. A. Magnetic Properties of Silicon with Paramagnetic Impurity Atoms // East European Journal of Physics, 2023, (3), pp. 380-384. (№ 3. Scopus Q3, CiteScore: 1.1)

2. Зикриллаев Н.Ф., Ковешников С.В., Левент Трабзон, Мавлонов Г.Х., Исмаилов Б.К., Исмаилов Т.Б., Уракова Ф.Э. Ферромагнитные свойства кремния, легированного атомами марганца. // Электронная обработка материалов, 2024, том 60, № 3, стр. 28–33. (01.00.00. Crossref. № 35)

3. Зикриллаев Н.Ф., Кенжаев З.Т., Исмаилов Т.Б. Магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами марганца // ДАН Узбекистан, 2024, №5(12), стр. 58-60. (01.00.00. №7).

4. Zikrillaev N.F., Kenzhaev, Z. T., Ismailov, T. B. Phase Magnetic Transitions in Silicon Doped with Manganese at Low Temperatures // Actual problems of modern science, education and training. November, 2024-11. issn 2181-9750. pp. 95-97 (01.00.00. №10).

5. Zikrillaev N.F., Mavlonov G.H., Trabzon L., Zikrillaev X.F., Isamov S.B., Ismailov T.B., Ollamberganov Sh.Z., Nematov O.S. Ferromagnetic properties of silicon doped with impurity manganese atoms // Science and Education in Karakalpakstan, 2023, №4/1, pp. 13–18. (01.00.00. №11)

6. Zikrillaev N.F., Ismaylov K.A., Kamalov X.U., Ismailov T.B. Magnetic properties of silicon doped with impurity nickel atoms // Science and Education in Karakalpakstan, 2024, №3/2, pp. 112–116. (01.00.00. №11)

7. Исмаилов К.А., Исмаилов Т.Б., Оламберганов Ш.З., Камалов Х.У., Нурымбетова Г.С., Сапаров А.К., Зикриллаев Х.Ф. Ферромагнитные свойства кремния, легированного примесными атомами марганца при низких температурах // Fan va Jamiyat, 2024, №5, стр. 9–11. (01.00.00. №15)

II bo'lim (часть II; part II)

8. Zlixa Saparniyazova, Temur Ismaylov, Gulnaza Abdireymova, Gulnaz Turmanova, T. Kh. Hakimov. Influence of γ -radiation on the properties of silicon with clusters impurity atoms of manganese and nickel // E3S Web of Conferences, vol. 289, 07020, 2021. (№ 3 Scopus)

9. Зикриллаев Н. Ф., Аюпов К. С., Сайтов Э. Б., Исамов С. Б., Кенжаев З.Т., Исмаилов Б. К., Исмаилов Т. Б. Влияние термообработки и радиационного излучения на параметры фотоэлементов на основе кремния, легированного примесными атомами никеля. // Приборы, 2022. № 12 (270). С. 6-10.

10. Зикриллаев Н.Ф., Курбанова У.Х., Мавлонов Г.Х., Кенжаев З.Т., Исмаилов Б.К., Исмаилов Т.Б. Магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами марганца // Альтернативная энергетика, 2024, №1(12), стр. 9-17.

11. Зикриллаев Н.Ф., Исмаилов К.А., Кенжаев З.Т., Исмаилов Б.К., Исмаилов Т.Б., Олламберганов Ш.З. Магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами никеля // Материалы и структуры современной электроники: матер. XI Междунар. науч. конф. Минск, 16–18 окт. БГУ, 2024. С. 264–268.

12. Зикриллаев Н.Ф., Исмаилов Т.Б., Курбанова У.Х., Кенжаев З.Т., Исмаилов Б.К., Камалов Х.У. Магнитные свойства кремния с примесными атомами марганца в критически низких температурах // Материалы и структуры современной электроники: матер. XI Междунар. науч. конф., Минск, 16–18 окт. 2024 г. С. 269–273.

13. Зикриллаев Н.Ф., Мавлонов Г.Х., Кенжаев З.Т., Исмаилов Т.Б. Ферромагнитные свойства кремния, легированного примесными атомами марганца при комнатной температуре // Материалы и структуры современной электроники: матер. XI Междунар. науч. конф., Минск, 16–18 окт. 2024 г. С. 274–278.

14. N.F. Zikrillayev, K.A. Ismailov, G.Kh. Mavlonov, Z.T. Kenzhaev, T.B. Ismailov, Sh.Z. Ollamberganov. Magnetic properties of silicon with magnetic impurity atoms // Kogherent optika va lazer fizikasining dolzarb muammolari xalqaro ilmiy anjumani materiallari. Toshkent, 2024, pp. 235-238.

15. Н.Ф. Зикриллаев, К.А. Исмаилов, З.Т. Кенжаев, Б.К. Исмаилов, Т. Б. Исмаилов, Ш.З. Олламберганов. Ферромагнитные свойства кремния, легированного примесными атомами никеля при температуре выше комнатной // Яримўтказгичлар физикасининг ривожланиши ва истиқболлари, Республика илмий-амалий семинари материаллари. Андижон, 2024, pp. 12-14.

16. Н.Ф. Зикриллаев, К.А. Исмаилов, Т.Б. Исмаилов, Ш.З. Олламберганов. Исследования нанокластеров в кремний с помощью современными методами // Физиканинг замонавий муаммолари ва ривожланиш истиқболлари, I халқаро илмий-амалий конференция материаллари, Наманган, 2024, с. 83-84.

17. Н.Ф. Зикриллаев, К.А. Исмаилов, Т.Б. Исмаилов, Ш.З. Олламберганов. Магнитные свойства кремния, примесными атомами // Физиканинг замонавий муаммолари ва ривожланиш истиқболлари, I халқаро илмий-амалий конференция материаллари, Наманган, 2024, с. 85-86.

18. Н.Ф. Зикриллаев, К.А. Исмаилов, Х.У. Камалов, Т.Б. Исмаилов. Магнитные свойства кремния примесными атомами марганца и никеля // IV Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы системы электроснабжения», Сборник научных трудов, ТГТУ-КГУ, 2024, с. 529-531.

19. К.А. Исмаилов, У.Х. Курбанова, Х.У. Камалов, З.Т. Кенжаев, Б.К. Исмаилов, Т.Б. Исмаилов. Магнитные свойства кремния, примесными атомами марганца // Международная научно-практическая конференция “Физика полупроводников, фундаментальные и практические проблемы современной электроники и энергетики. Наманган, 2024, с. 381-385.

20. Н.Ф. Зикриллаев, К.А. Исмаилов, З.Т. Кенжаев, Х.У. Камалов, Т.Б. Исмаилов, Ш.З. Олламберганов. Магнитные свойства кремния, примесными атомами марганца // III Международная научная конференция «Современные

тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы», Ташкент, 2024, 26-27 сентября, с. 26-28.

21. Н.Ф. Зикриллаев, Ғ.Ҳ. Мавлонов, Т.Б. Исмаилов, Ш.З. Олламбергенов. Исследования нанокластеры марганца в кремнии с помощью атомно-силового микроскопа // III Международная научная конференция «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы», Ташкент, 2024, 26-27 сентября, с. 70-72.

22. Н.Ф. Зикриллаева, К.А. Исмаилов, Х.У. Камалов, З.Т. Кенжаев, Т.Б. Исмаилов, Ш.З. Олламбергенов. Магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами // Международная научно-практическая конференция «STAFF TRAINING IN SOLAR ENERGY: TECHNOLOGIES, METHODS AND INSTRUMENTS», Фергана, 20-21 сентября 2024 года, стр. 67-71.

23. К.А. Исмаилов, Н.Ф. Зикриллаев, З.Т. Кенжаев, Ш.З. Олламбергенов, Т.Б. Исмаилов. Technology of texture production on monocrystalline silicon wafers // Международная научно-практическая конференция «STAFF TRAINING IN SOLAR ENERGY: TECHNOLOGIES, METHODS AND INSTRUMENTS», Фергана, 20-21 сентября 2024 года, с. 91-94.

24. Х.Ф. Зикриллаев, Ғ.Ҳ. Мавлонов, Левент Трабзоне, З.Т. Кенжаев, Б.К. Исмаилов, Т.Б. Исмаилов, Ш.З. Олламбергенов. Магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами марганца // Международная научно-техническая конференция «Энергетика комплексининг долзарб муаммолари: ишлаб чиқариш, узатиш ва экология», Карши, 25-26 апреля 2024 г, с. 467-471.

25. Н.Ф. Зикриллаев, К.А. Исмаилов, Т.Б. Исмаилов. Магнитные свойства кремния примесными атомами марганца и никеля // Научная конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния», Бухара, 27 февраля 2024 года, стр. 37-39.

Dissertatsiya avtoreferati “Khwarezm publication” nashriyotida tahrir qilindi.

Bosishga ruxsat etildi: 28.06.2025-yil.
Bichimi 60x84^{1/16}, “Times New Roman”
garniturada raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tabog‘i 3,2. Adadi: 100. Buyurtma: № 105
“Khwarezm travel” bosmaxonasida chop etildi
220502, Xorazm, Urganch tumani, Zargarlar mahallasi,
Marvarid ko‘cha 7-yo‘lak 4-uy

