

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

---

**MIRZO ULUG‘BEK NOMIDAGI O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI**

**ISAYEV MAXMUDXODJA SHARIPOVICH**

**MARGANETS, XROM, KOBALT SILITSIDLARI VA ULAR ASOSIDA  
YARATILGAN STRUKTURALARNING ELEKTROFIZIK XOSSALARINI  
TADQIQ ETISH**

**01.04.10 – yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI  
AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2023**

**Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора наук (DSc)**

**Contents of the abstract of dissertation doctor of science (DSc)**

**Isayev Maxmudxodja Sharipovich**

Marganets, xrom, kobalt silitsidlari va ular asosida yaratilgan strukturalarning elektrofizik xossalarini tadqiq etish..... 3

**Исаев Махмудходжа Шарипович**

Исследование электрофизических свойств силицидов марганца, хрома, кобальта и структур на их основе..... 31

**Isaev Makhmudkhodja Sharipovich**

Research of electrophysical properties of silicides of manganese, chrome, cobalt and structures on its basic..... 61

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ

List of published works..... 65

**O'ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO'TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY  
DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI  
ILMIY KENGASH**

---

**MIRZO ULUG'BEK NOMIDAGI O'ZBEKISTON MILLIY UNIVERSIT'I**

**ISAYEV MAXMUDXODJA SHARIPOVICH**

**MARGANETS, XROM, KOBALT SILITSIDLARI VA ULAR ASOSIDA  
YARATILGAN STRUKTURALARNING ELEKTROFIZIK XOSSALARINI  
TADQIQ ETISH**

**01.04.10 – yarimo'tkazgichlar fizikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI  
AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2023**



## **Kirish (doktorlik dissertatsiya (DSc) annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Zamonaviy jahon ilmiy texnik taraqqiyoti mikroelektronika va nanoelektronikaning rivojlanishi bilan sezilarli darajada aniqlanadi, bu rivojlanish fundamental fanlarning yutuqlari bilan, birinchi navbatda qattiq jismlar fizikasi va yarimo'tkazgichlar fizikasi bilan to'g'ridan-to'g'ri bog'langan. Bu sohalardagi so'nggi yutuqlar legirlangan yarimo'tkazgichlar fizikasi, nano va optoelektronika, kompyuter va o'lchov texnikasi, aloqa vositalari ehtiyojlari uchun yangi funksional imkoniyatlarga ega bo'lgan mikro - va nanostrukturalar yaratish texnologiyalarini ishlab chiqish bilan bog'liq. Shu nuqtai nazardan monokristallik yarimo'tkazgich, xususan chuqur sathlar hosil qiluvchi va berilgan elektrofizik, termoelektrik, fotoelektrik va optik xossalarga ega bo'lgan kompensatsiyalangan materiallarni olish mumkin bo'lgan kirishmalarni diffuzion legirlash jarayonida kremniy hajmida va sirt oldi qatlamlarida sodir bo'ladigan fizik jarayonlarni tadqiq etish bugungi kunning dolzarb masalalaridan hisoblanadi.

Hozirgi vaqtda berilgan elektrofizik, fotoelektrik va optik xossalarga ega bo'lgan diffuzion legirlangan monokristallardan foydalanish zamonaviy mikroelektronikada dolzarb masala hisoblanadi. Zero, kremniy monokristallini o'stirishning yaxshi ishlab chiqilgan texnologiyasi, uning asosida yaratiladigan integral asboblari planar texnologiyasi, kremniyda kichik o'lchamli obyektlarni hosil qilishning tubdan yangi texnologiyasi mavjudligi, uning xossalari turli usullar bilan modifikatsiya qilish, shuningdek kremniy sirtida hajmiy qismiga xos bo'lmagan yangi fizik hodisalarning aniqlanganligi kremniy mikro - va nanoelektronika ehtiyojlari uchun faol material sifatida ishlatilishida mutaxassislarining jiddiy e'tiborini tortadi.

Hozirgi vaqtda o'tishli metall silitsidlari o'zining agressiv muhitlarga va yuqori temperaturali ishlovlarga chidamliligi bilan kelasi avlod yangi, istiqbolli sxemalari uchun asosiy material bo'lib bormoqda. Shuning uchun kirishma atomlarining kristall hajmiga kirish mexanizmini, ularning kristall matrisa atomlari bilan va texnologik kirishmalar bilan o'zaro ta'sirini kompleks tadqiq qilish dolzarb hisoblanadi. Shu nuqtai nazardan diffuzion legirlash jarayonida sirt oldi sohasida silitsidlarning hosil bo'lishini tadqiq etish va ular asosida yangi yarimo'tkazgich asboblarni yaratish mikro - va nanoelektronika uchun yangi materiallar qidirib topishda alohida ilmiy ahamiyatga ega.

Ushbu dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi farmoni, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 2-martdagi PQ-5011-son "Elektrotexnika va elektronika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi, 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-son «Ta'lim sifatini oshirish va fizika sohasida ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi qarorlari, shuningdek, ushbu sohada qabul qilingan boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga muayyan darajada xizmat qiladi.

**O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlariga tadqiqot ishlarining mosligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III. “Energiya, energiya tejamkorligi, transport, mashinasozlik va asbobsozlik; zamonaviy elektrotexnika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish” ustuvor yo‘nalishlariga muvofiq bajarilgan.

**Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha horijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi<sup>1</sup>.** Hozirgi kunda kichik o‘lchamli strukturalar sohasidagi fundamental va amaliy tadqiqotlar bilan yetakchi ilmiy markazlar va universitetlar shug‘ullanishadi, chunonchi: Spintronika markazi (Vashington sh., AQSh); Pekin milliy laboratoriyasida o‘ta o‘tkazuvchanlikning (Pekin sh., XXR); Xitoy Fanlar akademiyasi kondensirlangan holat fizikasi bo‘yicha Pekin milliy laboratoriyasi (Pekin sh., XXR); Merilend universiteti (Merilend shtati, AQSh); Yaqin Sharq texnika universiteti (Anqara sh., Turkiya); Oslo universiteti (Oslo sh., Norvegiya); Ion dastalar va Materialshunoslik fizikasi instituti (Drezden sh., Germaniya); Tokio universiteti (elektr kommunikatsiyalar bo‘yicha ilmiy-tadqiqot universiteti); (Tokio sh., Yaponiya), Jozef Furiye nomli universitet (Grenobl sh., Fransiya); Kaliforniya universiteti fizika va astronomiya departamenti (Los Anjeles sh., AQSh); Albanidagi Nyu York shtati universiteti (Albani, Nyu-York sh., AQSh); Myunxen texnika universiteti qoshidagi Valter Shottki nomidagi institut nanotexnologiyalar va nanomateriallar markazi (Myunxen sh., Germaniya); Koreya universiteti spintronika materiallari laboratoriyasi (Pshong sh., Janubiy Koreya); Kopengagen universiteti (Kopengagen sh., Daniya); Prinston universiteti (Prinston sh., AQSh); Ayova universiteti (Ayova-Siti sh., AQSh); Illinoy universiteti (Chikago sh., AQSh); Mikroelektronikaning kimyoviy muammolar instituti (Moskva sh., RF); RFAning mikroelektronika va o‘ta toza materiallar texnologiyalar instituti (Chernogolovka sh., RF); Lomonosov nomidagi MDU (Moskva sh., RF); Tomsk davlat texnika universiteti (Tomsk sh., RF); N.I.Lobachevskiy nomidagi Nijegorod universiteti (Nijniy Novgorod sh., RF); I.P.Bardin nomidagi qora metallurgiya Markaziy ilmiy-tadqiqot instituti (Moskva sh., RF); va boshqalar.

Yuqorida nomlari keltirilgan tadqiqotlar markazlarida bugunga kelib kichik o‘lchamli yarimo‘tkazgichlar olish texnologiyalari bo‘yicha va ularning fizika hamda kimyoviy xossalarini o‘rganish bo‘yicha bir qator masalalar yechilgan (Prinston universiteti, Prinston sh., Ayova universiteti, Ayova-Siti sh., Illinoy universiteti, Chikago sh., AQSh). Qator ilmiy markazlarda temirning o‘tish guruhi elementlari (temir, xrom, kobalt, nikel, marganets)ni kremniyga ion implantasiyasi usuli bilan kiritilgan namunalarda xona haroratidagi ferromagnetizmni o‘rganish bo‘yicha tadqiqot ishlari bajarilgan va bu tadqiqotlar asosida hodisaga fizikaviy interpretatsiya berilgan (Pekin o‘ta o‘tkazuvchanlik milliy laboratoriyasi, Xitoy FA Kondensirlangan holat fizikasi institutining Pekin milliy laboratoriyasi (Pekin sh., XXR), Merilend universiteti (Merilend shtati, AQSh), Moskva davlat universiteti

---

<sup>1</sup> Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha halqaro ilmiy tadqiqotlar obzori quyidagilar asosida o‘tkazildi: <https://journal.aps.org>, <https://ufn.ru>, [lettersonmaterials.com](http://lettersonmaterials.com), [phys.org](http://phys.org), [iopscience.iop.org](http://iopscience.iop.org), [journal.ioffe.ru](http://journal.ioffe.ru), Web of Science, Scopus, Springer, Research Gate va boshqa adabiy manbalar.

(Moskva sh., RF), N.I. Lobachevskiy nomidagi Nijegorod universiteti (Nijniy Novgorod sh., RF), I.P. Bardin nomidagi qora metallurgiya Markaziy ilmiy-tadqiqot instituti, Moskva sh., RF). Monokristalli kremniy hajmida temir o'tish guruhi elementlari diffuziyasi asosida kvant o'lchamli obyektlar yaratish bo'yicha va ularning material fizik xossalariga ta'sirini o'rganish bo'yicha katta hajmdagi ishlar olib borildi (O'zMU, TDTU, O'zbekiston). Ion implantatsiyasi qilinganda kremniyda xona temperaturasida kuzatilgan ferromagnetizmni o'rganish sohasidagi tadqiqotlarni intensivlashtirish qilish yarimo'tkazgich sanoati ehtiyoji uchun yangi materiallarni sintez qilishga olib keldi.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Shu vaqtga qadar kremniy taqiqlangan zonasida chuqur sathlar (ChS) hosil qiluvchi Mendeleyev jadvalidagi 30 dan ortiq kirishma atomlar tabiati tadqiq qilingan. Shunday kirishmalar bilan legirlangan kristallarning xossalarini tadqiq etish natijalari xususan Baxodirxonov M.K. va boshqalar ishlarida umumlashtirilgan. O'zgarmas manbadan kremniyga diffuzion usulda kiritilgan qorishmalarga xos bo'lgan xarakterli xossaga ularning kremniy hajmidan farq qiluvchi xususiyatga ega bo'lgan sirt oldi sohaning hosil bo'lishini keltirish mumkin. Bunda bu qatlamdagi kirishma konsentratsiyasi ularning eruvchanlik chegarasidan 2-4 tartibga ortiq bo'lishi mumkin. Bu kirishma konsentratsion taqsimotida ikki sohaning: keskin sirt oldi va qiya hajmiy sohalarning hosil bo'lishiga olib keladi. Bunda faqat hajmiy qism o'rganilgan.

O'ta o'tkazuvchanlik bo'yicha Pekin milliy laboratoriyasi, Xitoy fanlar akademiyasi Fizika instituti va kondensirlangan holat fizikasi bo'yicha Pekin milliy laboratoriyasi (Pekin, XXR) tadqiqotchilari (L.J. Gao va b.) kollaboratsiya qilib, energiyasi 200 keV va dozasi  $1,0 \times 10^{15} \text{ sm}^{-2}$  bo'lgan Cr ionlari bilan implantatsiya qilingan p – Si (100) mikrostrukturasi va magnit xossalarini SQUID magnitometri va skanerlovchi (SEM), hamda transmission elektron mikroskop (TEM) yordamida o'rganishdi.

Merilend (AQSh) universiteti eksperimentator- olimlari B.Kane boshchiligida yaqin maydonli skanerlovchi optik mikroskop yordamida elektronlarni detektorlashdi, xuddi shu universitet tadqiqotchilari guruhi D. Dreyua boshchiligida elektronlarning spinini qayd qilishdi. Professor R. Vebb guruhi Si dagi fosfor donori yadro spinini kvant hisoblashlarda foydalanish imkoniyatlarini o'rganishdi.

Ion dastalari fizikasi va Materialshunoslik instituti (Drezden, Germaniya)dan Yu. Fessbender M. Bolduk, Nyu-York Albani davlat universiteti nanoo'lchamlar ilmi va muxandisligi kollejidan, Moskva davlat universitetidan A.B. Granovskiy, L. Orlova, I.V. Kulemanov olimlar guruhi, Mn ionlari bilan implantatsiya qilingan kremniyning magnit va mikrostrukturali xossalarini tadqiq etishdi, hamda marganets ionlari bilan bog'liq xona haroratidagi ferromagnetizmni aniqlashdi.

AQShdagi IBM firmasi xodimlarining turli universitetlar, ilg'or texnologiyalarni tadqiq qilish va ishlab chiqish bilan keng qamrovli o'zaro hamkorligi mavjud. Jumladan, AQSh Kaliforniya shtatida joylashgan markaz (IBM – Stanford Spintronic Science and Applications Center (Spin Aps) 2004-yildan boshlab spintronika asoslarini nazariy va amaliy tadqiqotlar va ular asosida ilg'or texnologiyalarni rivojlantirish bilan shug'ullanishadi.

O‘zbekiston Respublikasida ionlar implantatsiyasi va yuqori temperaturali diffuziya orqali monokristallik kremniy va boshqa yarimo‘tkazgich materiallarga, hamda dielektriklarga kirishmalar kiritilganda hosil bo‘ladigan kvant o‘chlamli strukturalar (KO‘S) olish texnologiyalari va ularning fizik-kimyoviy, optik, elektrofizik va magnit xossalariga ta’siri bilan katta olimlar guruhi shug‘ullanayapti.

Ularga O‘zFA akademiklari M.K. Baxadirxanov, R.A. Muminov, A.T. Mamadalimov, S.Z. Zaynabidinov, professorlar X.S. Daliyev, Sh.B. Utamurodova, K.P. Abduraxmanov, X.K. Aripov, R. Aliyev, T.S. Kamilov, B.E. Umirzakov, B. Egamberdiyev va boshqalar kiradi. Ular ishtirokida katta o‘lchamli ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda va ahamiyati katta bo‘lgan ilmiy natijalar olinayapti.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya ishi bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan aloqadorligi.** Dissertatsiya tadqiqotlari O‘zbekiston Milliy universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining F2.1.6. “Chuqur sathli kirishmalar bilan legirlangan kremniyli strukturalarning fizik xossalariga tashqi ta’sirlarning va zaryad tashuvchilar injeksiyalarining ta’sirini tadqiq etish” (2003-2007 yy.) va A-4-7 “Mikro - va optoelektronika, shuningdek Quyosh energetikasi asboblari uchun kremniy va arsenid galliy monokristallik pardasi sirt oldi sohasida geteroepitaksial nanoo‘lchamli strukturalar sintezi texnologiyasini ishlab chiqish” (2015-2017-yy.) ilmiy loyihalari doirasida bajarilgan.

**Tadqiqot maqsadi** Marganets, xrom, kobalt silitsidlari va ular asosida yaratilgan strukturalarning elektrofizik xossalarini tadqiq etishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

marganets, xrom va kobalt bilan diffuziya natijasida legirlangan kremniy sirt oldi sohasi galvanomagnit xossalarini tadqiq etish;

xrom, marganets va kobalt bilan diffuzion legirlangan kremniy sirt oldi sohasi nojinsligini tadqiq etish;

diffuzion legirlangan kremniy sirt oldi sohasi strukturasi va tarkibini tadqiq etish;

metall silitsidlari va ular asosida yaratilgan strukturalar orqali tok o‘tish mexanizmini tadqiq etish;

xrom, kobalt va marganets silitsidlari termoelektrik xossalarini tadqiq etish;

silitsidlar va ular asosida yaratilgan strukturalar fotoelektrik xossalarini tadqiq etish;

metall silitsidlari va ular asosida yaratilgan strukturalar asosida yangi sezgir asboblarni maketini ishlab chiqish va yaratishdan iborat.

**Tadqiqotning obyektlari** bo‘lib monokristall kremniy, marganets, kobalt, xrom silitsidlari va ular asosidagi  $p^+-i-p^+$ ,  $p^+-i-m$  strukturalar hisoblanadi.

**Tadqiqot predmeti** bo‘lib marganets, kobalt va xrom atomlari bilan monokristallik kremniyni diffuzion legirlaganda sirt oldi sohasida silitsid pardalarning, bir jinsli bo‘lmagan sohalarning hosil bo‘lish jarayonlari, shuningdek silitsidlar asosida hosil bo‘ladigan strukturalarning o‘ziga xos xususiyatlari hisoblanadi.

**Tadqiqot usullari.** Qo'yilgan masalalarni yechish uchun quyidagi usullar qo'llanilgan: qarshilikni o'lchashning to'rt zondli usuli, Xoll koeffitsientini o'lchash usuli, lazer nurlanishini modulyatsiyalash usuli, foto o'tkazuvchanlikni o'lchash usuli, muvozanatda bo'lmagan zaryad tashuvchilar yashash vaqtini o'lchash usuli.

**Tadqiqotlarning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:**

marganets, xrom va kobalt bilan diffuzion legirlangan kremniy sirt oldi qatlami hosil bo'lish tabiati tadqiq qilingan. Metall atomlari bilan legirlangan kremniy sirt oldi sohasi  $Mn_xSi_y$ ,  $Cr_xSi_y$ ,  $Co_xSi_y$  tipidagi murakkab birikmadan tashkil topishi, bu qatlam qalinligining metall atomlari miqdoriga, temperaturaga, toblash vaqtiga va vakuumning darajasiga bog'liqligi aniqlangan;

diffuzion to'yinish temperaturasidagi metall atomlarining eruvchanlik miqdori bilan eruvchanlikdan  $2 \div 4$  tartibga ko'p bo'lgan sirt oldi sohasidagi metall konsentratsiyasi o'rtasida mavjud bo'lgan qarama-qarshilik tushuntirilgan. Metall atomlarining kremniy sirt oldi sohasidagi bunday eruvchanligi metallning kremniy bilan kimyoviy birikishi tufayli hosil bo'ladigan metall silitsidlari bilan bog'liq ekanligi aniqlangan;

metall atomlari bilan legirlangan kremniy kristall chuqurligi bo'yicha fotozond tadqiqotlari asosida bir jinsli bo'lmagan sohalari topografiyasi aniqlangan va ichki elektr maydon o'lchangan. Legirlangan kristall bir jinsli bo'lmagan sohalari metall atomlarining silitsid to'plamlari tufayli hosil bo'lishi aniqlangan;

Mn, Cr, Co bilan legirlangan Si sirt oldi sohasining p – tip o'tkazuvchanlikka ega bo'lishi, tok tashuvchilar konsentratsiyasi  $10^{20} \div 10^{21} \text{ sm}^{-3}$  va Xoll siljuvchanligi  $1 \div 17 \text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ga teng bo'lishi aniqlangan.

silitsid – yarimo'tkazgich – silitsid tipidagi modellashtirilgan struktura asosida tok o'tish mexanizmi nazariy va eksperimental tadqiq etilgan va infraqizil, temperatura so'nishi kabi fotoelektrik effektlar tushuntirilgan;

xrom, kobalt, marganets silitsidlarining termoelektrik xossalari tadqiq etilgan va optimal termoelektrik xossali yarimo'tkazgichli material sintezi texnologiyasini aytib berish tavsiya etilgan;

Mn, Cr, Co bilan legirlangan Si kristallarida fotoo'tkazuvchanlik va fotoEYuK kristallning  $30 \mu\text{m}$  chuqurligida eng katta qiymatga ega bo'lishi aniqlangan;

yoritilganlikning VAX ga ta'sirini o'rganilib,  $p^+ \text{-} i \text{-} p^+$  strukturaning fotosezgirliги eng katta qiymatga ixtiyoriy yoritilganlik intensivliklarida o'tish  $0,8 \pm 0,1 \text{ V}$  ga siljiganida erishishi aniqlangan;

$p^+ \text{-} i \text{-} p^+$  va  $p \text{-} i \text{-} n$  strukturalar asosida yuqori fotosezgirlikka ega fotoelektrik qurilma va infraqizil nurlarni sezuvchi datchiklar yaratilgan.

**Tadqiqotlarning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:**

Berilgan elektrofizik parametrlari, ehtiyoji sezilgan strukturalari, arzonligi va sodda texnologik jarayonda tayyorlanishi bilan ajralib turadigan xrom, marganets va kobalt silitsidlari pardalarini olish usuli taklif etilgan. Metall silitsidlari asosida  $0,63 \div 2 \mu\text{m}$  to'lqin uzunliklari sohasida yuqori fotosezgirlikka ega bo'lgan dielektrik bazali diodlarni yaratish imkoniyati ko'rsatilgan. Silitsidlar asosida sendvich-fotorezistorlar yaratish imkoniyati ko'rsatilgan. Bizning yangi uslubiy ishlanmalarimiz: yarimo'tkazgich nojinsliligini tadqiq etuvchi qurilma,

yarimo'tkazgich parametrlarining vaqtga bog'liqlik xarakteristikalarini o'lchash uchun qurilma, marganets silitsidi asosidagi fotosezgirliги yuqori bo'lgan yarimo'tkazgichli fotoelektrik qurilma, silitsidlar va kremniy asosida yaratilgan infraqizil nurlar detektori, infraqizil vlagomer, ko'tarib yurishga mo'ljallangan keng diapazonli portativ termometr dan iborat.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** tadqiqotning zamonaviy ilmiy usullarining, standart texnologik qurilmalarning va yuqori aniqlikdagi qurilmalarning, namuna elektrofizik parametrlarini o'lchash uchun ishlatilgan standart qurilmalarning qo'llanilishi bilan, shuningdek eksperimentlarning zaruriy statistikasining qo'llanilishi bilan, olingan natijalarni boshqa mualliflar natijalari bilan qiyosiy tahlil qilinishi bilan, olingan natijalarni mavjud bo'lgan aprobat siya qilingan fizik modellar doirasida talqin qilinishi bilan asoslanadi.

#### **Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati**

Olingan natijalarning ilmiy ahamiyati shundan iboratki, ular chuqur sathlar hosil qiluvchi kirishmalarning matritsa (kremniy) atomlari bilan o'zaro ta'siri haqidagi, kremniy sirtida silitsid pardalarni o'stirish haqidagi fizik tasavvurlarni rivojlantiradi, shuningdek metall silitsidlari pardalarini mikroelektronikada qo'llash, xususan, ular asosida termo-, vlagomer - va fotosezgir strukturalar yaratish imkoniyatini aniqlash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, ular metall silitsidlari asosida  $0,63 \div 2 \mu\text{m}$  to'liq uzunligi sohasida yuqori fotosezgirlikka ega bo'lgan diodni yaratishga imkon beradi.

#### **Tadqiqot ishlarining joriy qilinishi.**

Kremniyni marganets, xrom va kobalt atomlari bilan diffuzion usulda legirlaganda uning sirt oldi sohasida silitsidlarning shakllanishi hamda ularning elektrofizik, fotoelektrik, termoelektrik xossalari ni tadqiq etish natijalari asosida:

marganets, xrom va kobalt atomlari bilan legirlangan kremniy asosidagi  $p^+-i-p^+$ ,  $p^+-i-m$  strukturalar yordamida yaratilgan yuqori sezgirlikdagi elektron termometrlar va nam o'lchagichlardan va ularni yasash texnologiyalaridan "FOTON" AJ da foydalanilgan ("Uzeltexsanoat" AK tomonidan 2021-yil 22-dekabrda berilgan №04-3/2716 raqamli ma'lumotnoma). Ilmiy natijalardan foydalanish tayyor mahsulotlar omborida harorat va namlikni ushlab turish va "Foton" AJ da ishlab chiqarilgan mahsulotlarni nazorat qilish imkoniyatini bergan.

Kremniyni metall atomlari bilan legirlaganda hosil bo'ladigan silitsidlarni hosil qilish texnologiyasidan, silitsid – yarimo'tkazgich – silitsid orqali tok o'tish fizik mexanizmidan, optimal termoelektrik va fotoelektrik xossali yarimo'tkazgichli silitsidlarni sintez qilish usullaridan FA-F3-004 "Yuqori samaradorlikka ega bo'lgan arzon fotoalmashtirgichlar va ular asosida yaratiladigan uzoq xizmat qiladigan fotoenergetik qurilmalar uchun fundamental yangi fizik modellar, mexanizmlar, usullarni o'rganish" mavzusidagi fundamental loyahasida foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi tomonidan 2022-yilning 18-aprelida berilgan №2/1255-895-raqamli ma'lumotnoma). Olingan

natijalar yuqori samaradorli, arzon fotoalmashtirgichlar yaratish imkoniyatini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Ushbu tadqiqot natijalari 11 ta xalqaro va 13 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya materiallari bo'yicha 57 ta ilmiy ishlar nashr qilingan. Shu jumladan, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 15 ta maqola nashr etilgan. Bitta patent olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, oltita bob, xulosa va 156 ta foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat bo'lib, 194 betda bayon qilingan, 73 ta rasm hamda 7 ta jadval mavjud.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida mavzuning dolzarbligi va zarurligi har tomonlama asoslangan, tadqiqotning respublikamizdagi fan va texnologiyalar rivojining asosiy ustuvor yo'nalishlari bilan aloqasi ko'rsatib berilgan, dissertatsiya mavzusi bo'yicha xalqaro ilmiy-tadqiqotlarning mufassal sharhi va dissertatsiya doirasida qaralayotgan muammolarning o'rganilganlik darajasi, ularning zamonaviy holatining tahlili, tadqiqot mavzusining dolzarbligi, yo'nalishning ilmiy yangiligi asoslangan, ishning maqsadi va bu maqsadni amalga oshirish uchun yechilishi zarur bo'lgan masalalar tavsifi, o'tkazilgan tadqiqotlarning ilmiy va amaliy ahamiyati keltirilgan.

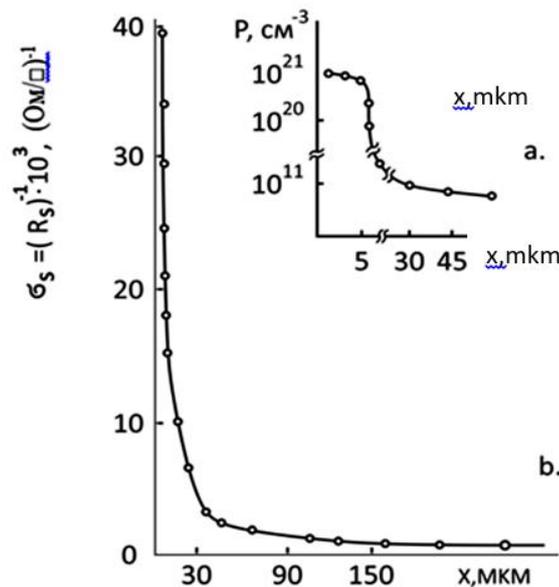
**Dissertatsiyaning "Kremniyda chuqur sathlar hosil qiluvchi kirishmalarning konsentratsion taqsimoti"** deb nomlangan birinchi bobida asosan keyingi yillarda kremniyda chuqur sathlar hosil qiluvchi kirishmalar sohasida mavjud ilmiy tadqiqotlar bo'yicha adabiyotlar sharhi va tahlili keltirilgan. Bunda kremniyni metall atomlari bilan surtilgan qatlamdan ham, gazli fazadan ham diffuzion legirlash jarayonida hosil bo'ladigan sirt oldi sohasining tabiati muhokama qilingan. Metall silitsidlari bo'yicha adabiyot ma'lumotlari tahlil qilingan va ularning elektrofizik va kinetik parametrlari muhokama qilingan. Bobning oxirida ushbu dissertatsiya ishi doirasida amalga oshiriladigan tadqiqot maqsadi keltirilgan.

**"Legirlangan kremniyni va uning asosida yaratilgan strukturalarni hosil qilish va tadqiq etish metodlari"** deb nomlangan ikkinchi bobda chuqur sathlar hosil qiluvchi elementlar bilan legirlash metodikasi, legirlangan namunalar o'tkazuvchanlik taqsimotini aniqlash metodikasi, elektrofizik parametrlarni o'lchashdagi xatoliklar, bir jinsli bo'lmagan holda legirlangan yarimo'tkazgichlar uchun Xoll koeffitsiyentini o'lchash metodikasi, kremniydagi fotoo'tkazuvchanlikning pasayishi orqali asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar yashash vaqtini o'lchash va fotoo'tkazuvchanlik kinetikasini tadqiq etish metodikasi, metall atomlari bilan legirlangan kremniy nojinsliligini yorug'lik zondi yordamida aniqlash metodikasi keltirilgan.

**“Diffuzion legirlangan kremniy sirt oldi qatlamining elektrik va galvanomagnet xossalarini tadqiq etish”** nomli uchinchi bobda marganets, xrom va kobalt bilan diffuzion legirlangan kremniy galvanomagnet xossalarini tadqiq etish bo‘yicha o‘lchash natijalari keltirilgan. Dastlabki kremniyni diffuzion legirlash jarayonida uning o‘tkazuvchanlik tipiga, sayoz sathlar konsentratsiyasiga va sovutish tezligiga bog‘liq bo‘lmagan holda p–tip o‘tkazuvchanlikli, tok tashuvchilar konsentratsiyasi  $10^{20} \div 10^{21} \text{ sm}^{-3}$  va Xoll harakatchanligi  $1 \div 17 \text{ sm}^2/V \cdot \text{s}$  bo‘lgan kichik omli sirt oldi qatlami hosil bo‘lishi ko‘rsatilgan.

Eksperiment natijalari sirt oldi sohasida sirt o‘tkazuvchanligi miqdorining qalinlik bo‘yicha taqsimot xarakteri marganets, xrom va kobaltlarning shu sohada radioaktiv o‘lchash natijalaridagi konsentratsion taqsimot profili xarakterini takrorlashi ko‘rsatilgan.

Kompleks (Xoll, fotosig‘im, fotoelektrik) tadqiqotlarning ko‘rsatishicha marganets, xrom va kobaltlar kremniyda 1-jadvalda keltirilgan sathlarni hosil qiladi.



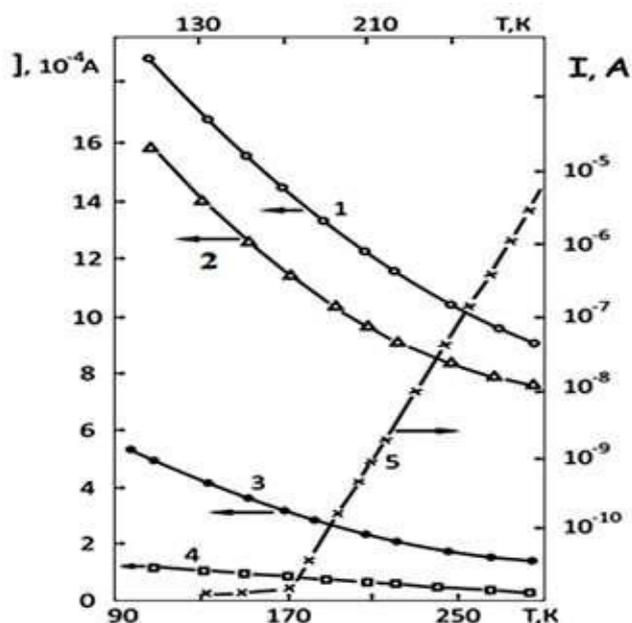
**1-rasm. p-Si<Mn> uchun tok tashuvchilar konsentratsiyasi taqsimoti (a) va sirt o‘tkazuvchanligi taqsimoti (b). T=300 K.**

1-jadval

Elementlar	Legirlangan kremniy ta'qiqlangan zonasidagi energetik sathlar (hajmiy qismda)
Mn	$E_c - (0,3 \pm 0,02) \text{ eV}; E_c - (0,41 \pm 0,02) \text{ eV};$ $E_c - (0,53 \pm 0,03) \text{ eV}$
Cr	$E_c - (0,22 \pm 0,02) \text{ eV}; E_c - (0,55 \pm 0,03) \text{ eV};$ $E_v + (0,31 \pm 0,02) \text{ eV}; E_v + (0,39 \pm 0,02) \text{ eV}$

Co	$E_c - (0,22 \pm 0,02) eV; E_c - (0,37 \pm 0,02) eV$
	$E_c - (0,53 \pm 0,03) eV; E_v + (0,1 \pm 0,02) eV$
	$E_v + (0,3 \pm 0,02) eV$

n-Si<Mn> da o'tkazilgan tadqiqotlar marganets elektr aktiv atomlari



2-rasm. Si<Mn> orqali o'tayotgan tokning yedirib tashlangan qatlam qalinligiga qarab temperatura bo'yicha o'zgarishi:

1 – 0 mkm (dastlabki); 2 – 0 mkm (HCl da yedirilgandan so'ng); 3 – 10 mkm, 4 – 20 mkm; 5 – 50 mkm, qo'yilgan maydon: 1 ÷ 4 – 2 V/sm; 5 – 18 V/sm.

bunda bor konsentratsiyasi ortib borishi bilan elektr jihatdan faol bo'lgan Mn atomlari konsentratsiyasi ortadi va maksimal konsentratsiya  $10^{16} \text{ sm}^{-3}$  ga yetadi.

Diffuzion parametr miqdorlari, kristall panjara tuguni va tugunlar orasidagi eruvchanlik, shuningdek kirishma atomlari energetik sathlari va ularning davriy sistemadagi holatlari o'rtasida ma'lum munosiblik mavjudligi ko'rsatilgan. Bunday qoidaning bajarilishini kremniydagi 3d – elementlarining kirishma atomlari tabiatida kuzatish mumkin : Sc – Ti – V – Cr – Mn – Fe – Co – Ni – Cu – Zn. Bunday elementlar diffuziya koeffitsiyentlari D bo'lishi mumkin bo'lgan maksimal yumshatish temperaturalarida  $10^{-7} \text{ sm}^2 / \text{s}$  dan kam bo'lmaydi. D ning T ga bog'liqligi barcha kirishmalar uchun  $D = D_0 \exp (-\Delta E / kT)$  ifoda orqali tavsiflab beriladi. Bu kirishmalarning kremniydagi eruvchanligi  $10^{18} \text{ sm}^{-3}$  dan ortmaydi. Qaralayotgan kirishmalar uchun diffuziya koeffitsienti sayoz sathli kirishmalarnikidan ancha katta. Mn, Cr, Co donor xossalari va dastlabki kremniy o'ktazuvchanligining kovakli

konsentratsiyasi sayoz sathdagi donolar konsentratsiyasiga bog'liq emasligini va uning maksimal qiymati  $\sim 4 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$  bo'lishligini ko'rsatdi. Bunday namunalar uchun solishtirma o'tkazuvchanlikning va Xoll koeffitsiyentining temperaturaga bog'liqligi barcha hollarda  $E_c - 0,24 \text{ eV}$  energiyali donorli sath hosil bo'lishini ko'rsatdi, bu natija M.K.Bahodirxonov va boshqalar ma'lumotlari bilan o'z tasdig'ini topgan.

p-Si dagi marganets tabiatini o'rganish maqsadida turli tarkibdagi bor ( $10^{14} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ) mavjud bo'lgan p – Si ga Mn bir xil legirlash rejimi ( $T=1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 40 min vaqt davomiyligi, chiniqtirish tezligi  $\sim 100 \text{ grad/s}$ )da diffuziya qilindi. Elektrik va galvanomagnetli o'lchamlar shuni ko'rsatdiki,

xarakteri o'rtasidagi, shuningdek Mn, Cr, Co larning kremniydagi diffuzion to'yinish temperaturasiidagi eruvchanligi va shu elementlarning sirt yaqinidagi konsentratsiyasining eruvchanlikdan 2-4 tartibga yuqori bo'lishidagi qarama-qarshilik mavjudligi ko'rsatilgan.

Bu qarama-qarshilik sababini aniqlash uchun Si<Mn> namunasidan o'tayotgan tokning temperaturaga bog'liqligi sirt oldi sohadan qatlam-qatlam olingandan so'ng o'rganilgan (2-rasm).

Kristall sirti metallik o'tkazuvchanlikka ega bo'lishi, sirtdan qatlamlar olinishi borasida yarim o'tkazuvchanlikka asta-sekin o'tishi ko'rsatilgan. Elektr o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi o'rganilganda temperatura pasayishi bilan elektr o'tkazuvchanlikning ortishi ko'rsatilgan. O'tkazuvchanlikning temperatura bo'yicha o'zgarishi tok tashuvchilarning fononlarda va kirishma ionlarida sochilishi bilan tushuntirilgan.

Elektrofizik xossalarning kompensatsiya darajasiga bog'liqligini aniqlash uchun ortiqcha kompensatsiya qilingan n-Si<Mn> va kompensatsiya darajasi turlicha ( $k=0,3\div 0,99$ ) bo'lgan p-Si<Mn> tayyorlangan. Tadqiqot natijalari kompensatsiya darajasi kuchsiz bo'lgan n-Si<Mn> da  $E_c - 0,24$  eV sath kuzatilishini "k" ortishi bilan sath ionizatsiya energiyasi ortib  $E_c - 0,33$  eV ga etishini ko'rsatdi. Kuchli kompensatsiya qilingan n-Si<Mn> namunalariida yana bitta donor sath kuzatiladi, uning ionizatsiya energiyasi ham "k" ga bog'liq bo'lib,  $E_c - (0,42 \div 0,53)$  eV intervalda yotadi.

Eksperiment natijalarini tushuntirish uchun Si<Mn> da musbat zaryadlangan Mn ionlarining klaster to'plamlari hosil bo'ladi deb taxmin qilinadi, u holda Si<Mn> nisbatan bir jinsli massaga joylashtirilgan yirik izolyatsiya qilingan to'plamlardan iborat bir jinsli bo'lmagan material sifatida qarash mumkin. Si<Mn> elektrofizik xossalarning farqlovchi xususiyatlari (Mn ionizatsiya energiyasi spektrining hosil bo'lishi, bor konsentratsiyasi ortishi bilan  $Mn^+$  konsentratsiyasining ortishi va boshqalar) shunday xulosa qilishga asos bo'ladi, bunda bunday klasterlarning yadrolari bo'lib borning manfiy zaryadlangan atomlari yoki vakansiyalar xizmat qiladi, ular o'z atrofida 2 tadan 4 tagacha ionlashgan tugunlararo marganets atomlarini bog'lab turadi.  $k \geq 0,9$  (klasterlar konsentratsiyasi  $\geq 10^{12} \text{sm}^{-3}$ ) bo'lganda klaster hajmiy zaryadlar sohalarning yopilib ketishi sodir bo'ladi va klasterlar sochilish markazlari sifatida emas, balki aralashma toklarining kam qarshilik bilan o'tadigan makroskopik markaz sifatida ishlab turadi.

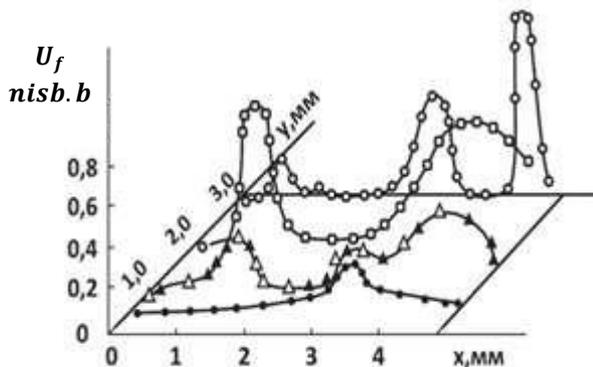
Bir jinsli emaslikni aniqlash uchun lokal fotozond usuli va lazer nurlanishining kichik burchakda sochilish usuli ishlatildi. Bu usullar bir jinsli bo'lmagan sohalarni, ayniqsa o'tkazuvchanlik gradiyenti katta bo'lgan sohalarni yuqori aniqlikda aniqlash imkoniyatini beradi.

Lokal fotoEYuK usuli bilan turli o'lchamlardagi  $(0,3\div 0,5) \cdot (0,3\div 1,6) \cdot (0,5\div 1,6) \text{sm}^{-3}$  to'g'ri burchakli parallelepiped shaklidagi legirlangan Si<Mn>, Si<Cr>, Si<Co> kristallardagi, dastlabki, termo ishlov berilgan va nazorat kristallardagi bir jinslimaslik tadqiq qilindi.

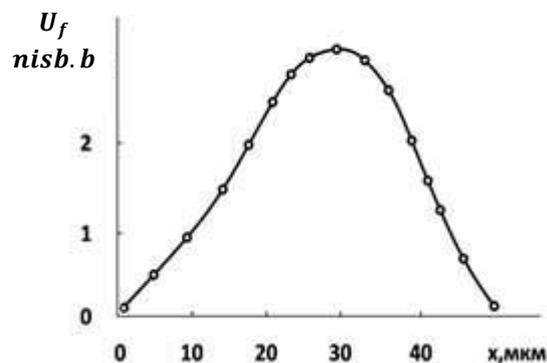
3-rasmda tipik n-Si<Mn> kristalli uchun sirtdan  $3\div 5 \mu\text{m}$  qalinlikdagi qatlam olib tashlangandan keyin, to'lqin uzunligi  $0,63 \mu\text{m}$  bo'lgan yorug'lik bilan

nurlantirgandagi yorug'lik skanerlar natijalari keltirilgan. Rasmdan fotosignalning nuqtadan nuqtaga nomonoton o'zgarishi ko'rinib turibdi.

O'lchashlarning ko'rsatishicha barcha Si<Mn> kristallarda olib tashlanadigan qatlam qalinligi ortishi bilan fotoEYuK spektr zichligi kamayadi. Tadqiqot natijalari sirtida yangi faza hosil bo'lishini ko'rsatadi. Bunday faza oriyentirlovchi taglikda uning atomlarini hisobga olib o'sadi va taglik kristallik panjarasini qonuniy davom ettiradi.



3-rasm. n-Si<Mn> namuna sirtidagi fotoEYuK spektri ( $T=300\text{K}$ ,  $\lambda = 0,63\ \mu\text{m}$ )



4- rasm. Fotoeyukning n-Si<Mn> uchun namuna qalinligiga bog'liqligi ( $T = 300\ \text{K}$ ,  $\lambda = 0,63\ \mu\text{m}$ )

FotoEYuK miqdorining sirtoldi qatlam qalinligiga bog'liqligi 4-rasmda keltirilgan. Rasmdan shu narsa ko'rinadiki, bunda fotoEYuK signali qatlam olinib borishi bilan  $\sim 25\ \mu\text{m}$  chuqurlikkacha ortib boradi, so'ngra tor sohada to'yinadi va  $\sim 30\ \mu\text{m}$  dan keyin ravon kamayadi va  $45\div 50\ \mu\text{m}$  dan so'ng to'laligicha yo'q bo'lib ketadi.

Legirlangan kristall bir jinsli bo'lmagan sohasidagi ichki elektr maydonni Tauts metodikasi asosida aniqlash imkoniyati ko'rsatilgan. n-Si<Mn> kristallida qo'yilgan tashqi elektr maydoni  $E_e = 0,9 \div 1,2\ \text{V/sm}$  bo'lganida ichki elektr maydon qiymati  $E_i = 1,8\ \text{V/sm}$  bo'lishi aniqlangan.

Xrom, marganets va kobaltlar bilan diffuzion legirlangan kremniy sirt oldi sohasining struktura modeli taklif qilingan. Unga ko'ra kompensatsiyalangan kremniy sirt oldi sohasi o'rtasida kompensatsiyalangan qatlami mavjud bo'lgan, ketma-ket - parallel ulangan ko'p sonli Shottki diodlari (juftlari) dan iborat. Bunday model sirtidan  $3\div 45\ \mu\text{m}$  chuqurlikda joylashgan ikkinchi fazaning orolchali xarakteri bilan aniqlanadi. Buni fotoEYuK miqdorining  $\sim 25\div 30\ \mu\text{m}$  chuqurlikda maksimumga ega bo'lishi ham tasdiqlaydi; bu chuqurlikda orolchalar (aralashmalar) va kremniy – ikkinchi faza aralashmalari chegarasi maksimal yig'indi sirti o'rtasida optimal munosabat bor.

**“Diffuzion legirlangan kremniy sirt oldi sohasining strukturasini va tarkibini tadqiq etish”** nomli to'rtinchi bobda xrom, marganets va kobalt atomlari bilan diffuzion legirlangan kremniy sirt oldi qatlamlari va metall-kremniy qism chegaralari fizikaviy-kimyoviy xarakteristikalari ko'rib chiqilgan.

Rastrli elektron mikroskop (REM-200) tadqiqotlari namuna sirtida blokli strukturalar va ular o'rtasida fazalararo chegaralar mavjudligini ko'rsatdi. REMning

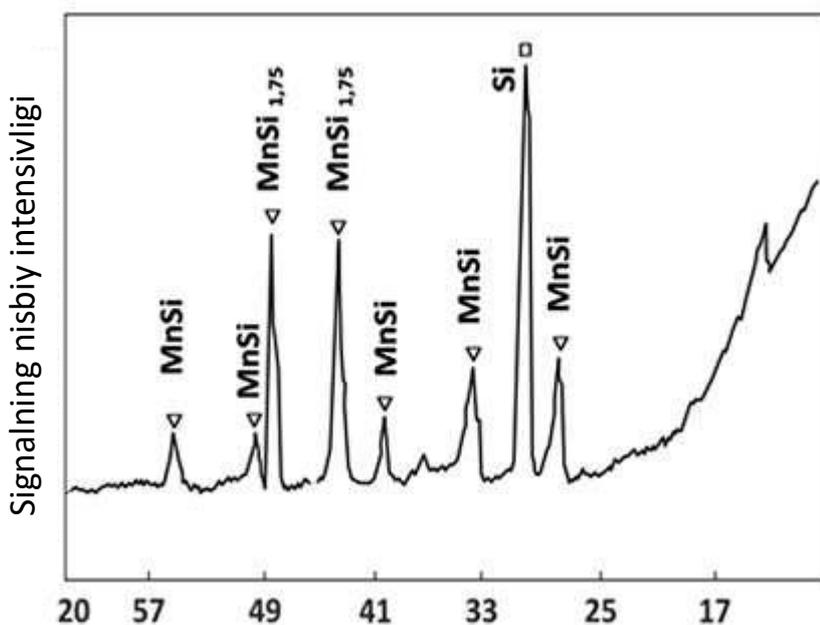
ajrata olish qobiliyati legirlanayotgan elementning atom nomeriga bog'liq va  $\sim 100 \text{ \AA}$  gacha yetadi. Bloklar o'rtasidagi ko'ndalang kesim baholanganda uning taxminan  $1000 \text{ \AA}$  ga teng ekanligi aniqlandi.

Bunday namunalar MIK-1 va MIK-4 turdagi infraqizil mikroskoplarda o'rganildi. Legirlangan namuna sirtida infraqizil nurlarga shaffof bo'lmagan yaxlit strukturalar hosil bo'lishi aniqlandi. Sirtidan  $3 \text{ \mu m}$  dan ortiqroq qatlam olib tashlanganda turli struktura, ya'ni infraqizil nurlar uchun navbatma-navbat keladigan shaffof va noshaffof sohalar kuzatilgan (5-rasm)



5- rasm. Kristall sirtidagi yarimo'tkazgichli silitsidlar mikrofotografiyasi (1400 marta kattalashtirish)

6-rasmda  $980 \text{ }^\circ\text{C}$  temperaturada 30 min davomida termodiffuziya qilingandan keyingi kobaltli kremniy difraktogrammasi keltirilgan. Rasmda kobalt disilitsidining o'tkir cho'qqilari ko'rinib turibdi, bu issiqlik bilan stimulyatsiya qilingan kimyoviy



6- rasm. Kobalt kremniy rentgen difraktogrammasi.  
 $T=980^\circ\text{C}$ ,  $t=30 \text{ min}$ .

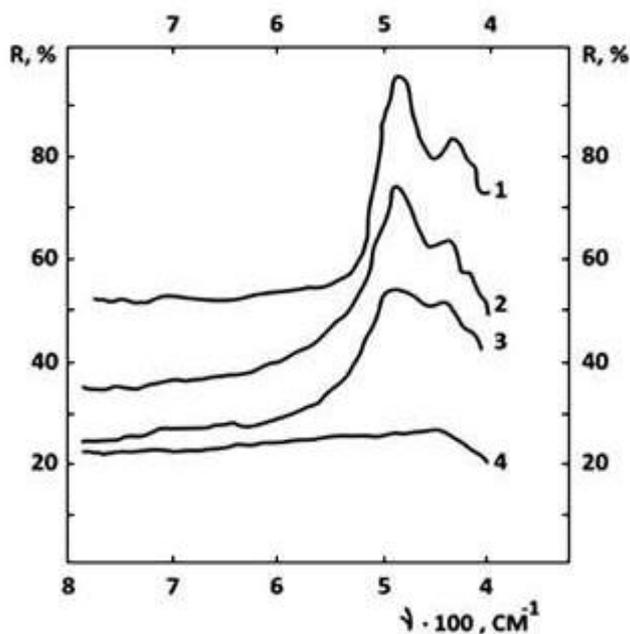
reaksiya jarayonida kremniy taglikda silitsidlar hosil bo'lishini ko'rsatadi. Shunga o'xshash difraktogrammalar xrom va marganets bilan diffuzion legirlangan kremniy uchun ham olingan.

Metall silitsidlarining strukturasi va ularning hosil bo'lish tabiati diffuziya temperaturasiga, diffuziyalanayotgan atomlar miqdoriga, sovutish tezligiga va vakuum chuqurlik darajasiga bog'liqligi aniqlangan.

Diffuzion legirlangan kremniy sirtining tekshirilayotgan faza strukturasi haqida axborot olish uchun o'lchangan qaytish spektrlari kremniyning mumkin bo'lgan ma'lum fazalari spektrlari orqali identifikatsiya qilinadi. Marganets, xrom va kobalt bilan legirlangan kremniydan qaytish spektrlari UR-20 qurilmasida  $2 \div 25 \mu\text{m}$  intervalda o'lchangan.

Optik usullar bilan o'lchashga mo'ljallangan namunalar  $2 \times 5 \times 10 \text{ mm}^3$  o'lchamli to'g'ri burchakli parallelepipeddan iborat bo'lgan.

7-rasmda marganets bilan legirlangan kremniy uchun V.K.Zaytsev metodi bo'yicha o'lchangan optik qaytish koeffitsiyentining chastotaga bog'lanishi keltirilgan. Undan kristall sirtida marganetsning oliy silitsidi fazalari hosil bo'lishi ko'rinib turibdi. Silitsid qatlamning qalinligini aniqlash uchun namuna sirtidan qatlam-qatlam olib tashlangandan keyingi sirtidan qaytish koeffitsiyenti o'lchandi (7-rasm, 2, 3, 4 – egri chiziqlar).



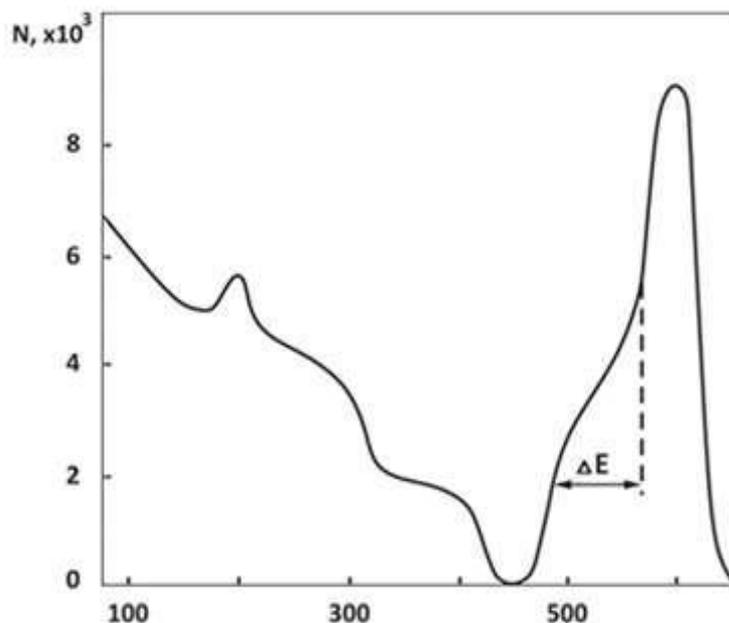
7- rasm. Namunadan qaytish koeffitsientining spektral bog'lanishi

1- oliy marganets silitsidi polikristallik namunasidan qaytish spektri; 2-dastlabki silliqdangan sirt uchun; 3-sirtidan qalinligi  $10 \mu\text{m}$  bo'lgan qatlam olingandan keyingi sirt uchun; 4- $50 \mu\text{m}$  olingandan so'ng; ordinata shkalasi pastga qarab 2 va 3 egri chiziqlar uchun 10% ga, 4-egri chiziq uchun 15% ga surilgan

O'lchashlarning ko'rsatishicha, namuna sirtidan  $\sim 50 \mu\text{m}$  qatlam olib tashlanganda qaytish koeffitsientidagi xarakterli cho'qqilar yo'q bo'lib ketadi. Tadqiqotlar silitsid qatlamining hosil bo'lish chuqurligi kristallga, diffuzant

miqdoriga, qizdirish temperaturasi, diffuziya vaqtiga, sovutish tezligiga va vakuumning chuqurlik darajasiga bog‘liqligini ko‘rsatdi.

8-rasmda 1050 °C temperaturada 60 minut davomida toblangan Si<Mn> namunasi uchun ionlarning teskari tomonga sochilish spektri keltirilgan. Spekrni tahlil qilinganida marganetsning oliy silitsidlari hosil bo‘lishi aniqlangan.



**8- rasm. 1050 °C temperaturada 60 minut davomida toblangan Si<Mn> namuna uchun ionlarning orqaga sochilish spektri**

Xrom silitsidli kristallarning yumshatish temperaturasi 450 °C dan ortganda silitsid o‘shishi yumshatish vaqtiga chiziqli bog‘langan (9-rasm). Silitsid qalinligi quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$W = [B \exp (-E_a/ kT)] t. (1)$$

bu yerda  $V$  – o‘zgarmas kattalik,  $E_a$  – o‘shish jarayoni o‘rtacha aktivatsiya energiyasi,  $k$  – Bolsman doimiysi,  $T$  – absolyut temperatura,  $t$  – toblash vaqti.

Arrenius grafigidan faza hosil bo‘lishi jarayonining aktivlashish energiyasi aniqlangan, u  $E_a = 1.5 \pm 0.1$  eV ga teng chiqqan.

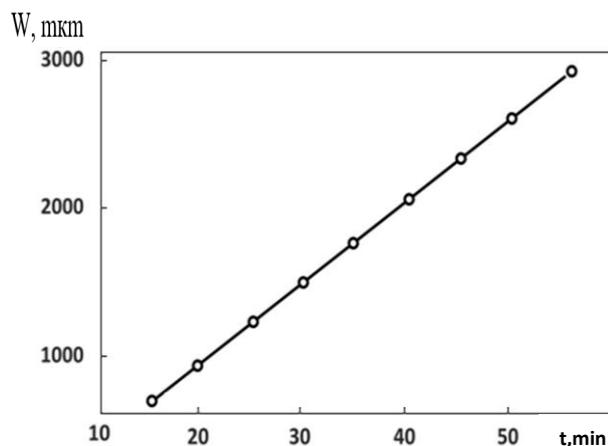
Silitsid aralashmalarining o‘lchamlarini aniqlash uchun sochilgan nurlarni modulyatsiya qilish metodi ishlatildi, bunda  $\rho = 10^4 \Omega \cdot sm$  ga teng bo‘lgan, Choxralskiy usulida o‘stirilgan, diametri 65 ÷ 110 mm bo‘lgan monokristall kremniy o‘rganildi. Bunday kristallar ushbu usul bilan ilk bora o‘rganildi.

Termik ishlov berilmagan, yuqori toza dislokatsiyasiz kremniy namunalarini elektron mikroskopiya, rentgen mikroanalizi va CO<sub>2</sub> nurlanishning kichik burchakli sochilishi usullari bilan tekshirilganda ularida defektlarning uch turi: svirl defektlar, kirishmali mikroaralashmalar va kirishmali bulutlar mavjudligi aniqlandi.

Svirl defektlar geterogen mexanizm tufayli paydo bo‘ladi va qatlam-qatlam bo‘lib joylashadi. Bunday defektlarning konsentratsiyasi  $10^6 \div 10^8 sm^{-3}$  ga teng.

Kremniyni o‘stirish jarayonida sovutish tezligini tanlash orqali bunday turdagi defektlardan ozod bo‘lish mumkin.

Ikkinchi tur defekti bo‘lib kirishmali mikroaralashma hisoblanadi, uni yangi



**9- rasm. CrSi<sub>2</sub> uchun yumshatish temperaturasi T=450 °C bo‘lganida silitsid qatlami qalinligining vaqtga bog‘lanishi**

singan joyda rentgen mikroanalizi usuli bilan qayd etildi. Mikroaralashma tarkibiga uglerod, kalsiy, fosfor, xlor, allyuminiy, natriy va boshqa ba‘zi kirishmalar kiradi. Mikroaralashma o‘lchamlari mikronning ulushlari va undan yuqoriroq kattalikka ega bo‘lib,  $\sim 10^7 \text{sm}^{-3}$  konsentratsiyaga ega. Bu kirishmalar monokristallni o‘stirayotganda eritmadan tortib olingan deb taxmin qilinadi.

Mikroaralashma tarkibiga kiruvchi kirishmalar bilan to‘yingan yuqori toza kristalda ularning qisman qorilib ketishi mumkin. Bunda sekin diffuziyalanuvchi kirishmalar

aralashma atrofida taxminan 10  $\mu\text{m}$  o‘lchamli g‘aramlar hosil qiladi. Katta konsentratsiyali qorilib ketgan kirishmalar mavjud bo‘lgan bunday lokal sohalar kirishmali bulutlar deyiladi. Bunday defektlar mavjudligi to‘lqin uzunligi 10,6  $\mu\text{m}$  bo‘lgan CO<sub>2</sub> lazer nurlanishining kichik burchakli sochilish usuli bilan aniqlangan.

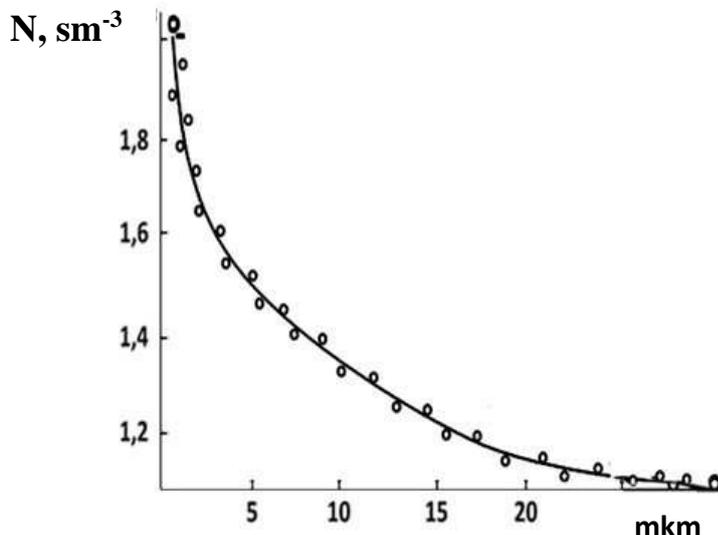
Shunday qilib, strukturasi mikronuqsonlar mavjud bo‘lgan kremniy bir jinslilik darajasini nazorat qiluvchi bu usulni o‘ta katta integral sxemalar va yarimo‘tkazgichli qurilmalar yaratishda ishlatiladigan katta diametrli dislokatsiyadan holi kremniyni ishlab chiqarishda qo‘llanilishi mumkin.

CO<sub>2</sub> nurlanishning kichik burchakli sochilish usuli marganets, xrom va kobalt bilan diffuzion legirlangan sirt oldi sohasidagi silitsidli orolchalarni aniqlashda qo‘llanildi. O‘lchash natijalari sirt oldi qatlamda o‘lchami  $8 \div 20 \mu\text{m}$  bo‘lgan silitsid kirishmalari hosil bo‘lishini ko‘rsatdi.

10-rasmda silitsid kirishmalari konsentratsiyasining chuqurlik (kristall ichi) bo‘yicha taqsimoti ko‘rsatilgan. Rasmdan ko‘rinib turibdiki, kristallning  $\sim 3 \mu\text{m}$  sirt qalinligida silitsid aralashmalar to‘yinishiga ega, ya‘ni yaxlit parda hosil bo‘lgan. Aralashma konsentratsiyasi 3  $\mu\text{m}$  dan 30  $\mu\text{m}$  gacha chuqurlikda ravon kamayadi.

Olingan eksperiment natijalari kremniydagi Cr, Co, Mn lar yuqori darajadagi reaksiya qobiliyatiga ega ekanligini ko‘rsatdi: legirlangan kristall sirtida xrom, marganets va kobaltlarning metallik fazalari kuzatilmadi. Kremniyni gazli fazadan diffuzion legirlaganda uning sirtida metallarning mono-, di-, oliy silitsidlari hosil bo‘ladi. Qalinligi  $3 \div 10 \mu\text{m}$  bo‘lgan sirt oldi qatlamda amorf faza kuzatilgan. Turli kristallarda 10-50  $\mu\text{m}$  chuqurlikda turlicha silitsidlar: Si<Mn> uchun asosan marganets oliy silitsidi, Si<Cr> uchun xromning mono va disilitsidlari, Si<Co> uchun asosan kobalt disilitsidi kuzatilgan. Namunaning sirtidan 50  $\mu\text{m}$  dan ortiq qalinlikdagi qatlam olib tashlanganda yuqorida zikr etilgan metallarning silitsidlari

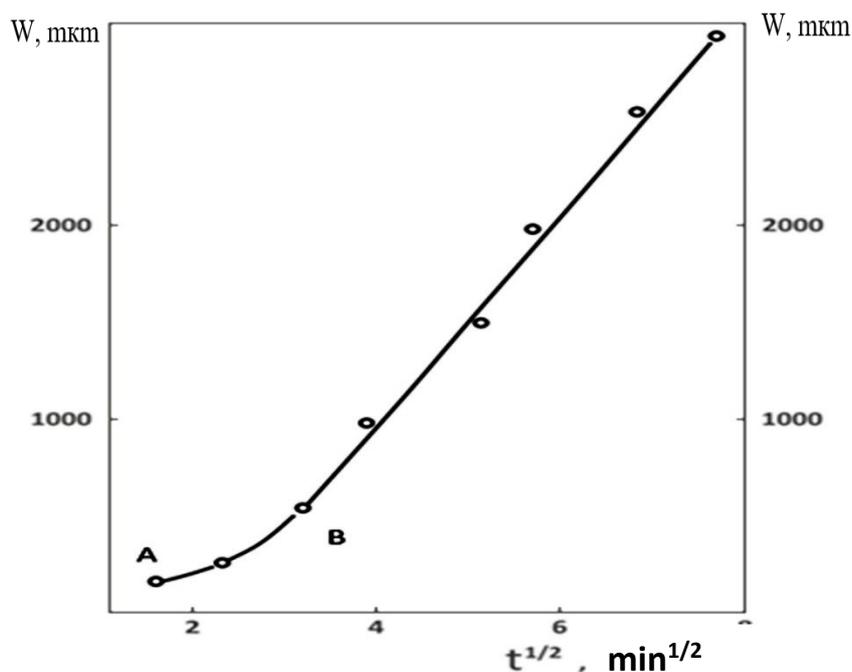
topilmagan. Marganets purkalgan kremniyni yumshatilganda namuna ko‘ndalang kesimi bo‘yicha silitsid fazalarining o‘shish kinetikasi o‘rganilganida shuni aniqlandiki, bunda silitsid qatlami qalinligi (W) ning yumshatish vaqti (t) ga bog‘liqligi parabolik bo‘lar ekan (11-rasm).



10- rasm. Silitsid aralashmalar sirt konsentratsiyasining kristall chuqurligiga bog‘lanishi

Vaqtning kichik qiymatlarida (11-rasm, AB qism) bu bog‘lanish buziladi, buning sababi silitsid hosil bo‘lish reaksiya tezligining cheklanganligi bo‘lishi kerak. Qatlamlar qalinlik bo‘yicha vaqtning kvadrat ildiziga proporsional holda shakllanadi (BC soha). t vaqt ichida shakllanadigan silitsid qatlami qalinligi (W):

$$W = \{ [ B \cdot \exp(-E_a/kT) ] \}^{1/2} \quad (2)$$



11- rasm. Marganets oliy silitsidi qalinligining yumshatish vaqtiga bogliqligi

CoSi va Co<sub>2</sub>Si qatlamlar hosil bo'lishida fazaviy o'sishning huddi shunday  $t^{1/2}$  ga bog'lanishi aniqlangan. CrSi<sub>2</sub> holida esa vaqtga chiziqli bog'lanish aniqlangan (9-rasm), uni bo'lim chegarasi holati bilan aniqlanadigan tezlikda o'zaro ta'sir yuz beradi deb tushuntiriladi.

Diffuziya koeffitsienti (D) miqdorini W ning vaqtga bog'liqlik chiziq qiyaligidan hisoblab topish mumkin.

Faza hosil bo'lish jarayonining aktivatsiya energiyasini diffuziya koeffitsiyentining teskari temperaturaga bog'liqligidan aniqlash mumkin. Aktivlanish energiyalarining miqdori CrSi<sub>2</sub> uchun 1,5 eV ga, Co<sub>2</sub>Si uchun 1,5 eV ga, CoSi uchun 1,9 eV ga va MnSi<sub>1,75</sub> uchun 1,4 eV ga teng.

Olingan natijalarning tahliliga ko'ra kremniyni gazlangan fazadan diffuzion legirlaganda silitsidlar hosil bo'lishida dastlab metall atomlariga boy silitsidlar, so'ngra metall monosilitsidlari hosil bo'ladi. Kremniyga metall atomlari purkalib issiqlik yordamida yumshatilganida esa kremniy va metall chegarasida metall atomlari bilan boy bo'lgan metall silitsidlari hosil bo'ladi.

Dissertatsiyaning **“Metall silitsidlari va ular asosida yaratilgan strukturalar orqali tok o'tish mexanizmini tadqiq etish”** deb nomlangan beshinchi bobda xrom, marganets, kobalt silitsidlari va ular asosida yaratilgan strukturalarning elektrofizik xossalarini eksperimental va nazariy tadqiq etish natijalari keltirilgan.

Metall silitsidlari quyidagicha tayyorlangan: metall atomlari yuqori ( $10^{-7}$  mm.sim.ust.dan kam bo'lmagan) vakuumda kremniy sirtiga 1200÷2000 Å qalinlikda purkalgan va kvarts ampulalarida T=900÷1100 °C temperaturalarda toblangan.

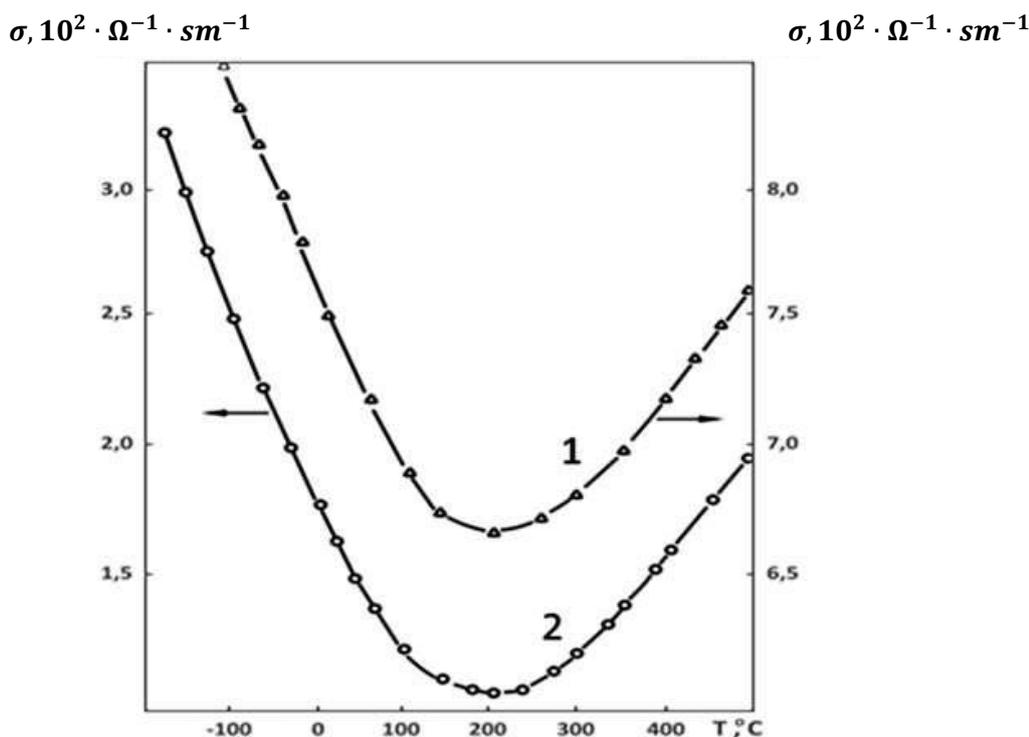
Elektr o'tkazuvchanlikning tipik temperatura bog'liqligi xrom silitsidi uchun 12-rasmda keltirilgan.

Rasmdan CrSi uchun ham CrSi<sub>2</sub> uchun ham uchta qism kuzatiladi. Birinchi qism – 200 °C ÷ +150 °C, bu sohada temperatura ortishi bilan elektr o'tkazuvchanlik chiziqli kamayadi. Ikkinchi qism – temperaturalar sohasi 150÷250 °C bo'lgan soha bo'lib, unda elektr o'tkazuvchanlik deyarli o'zgarmaydi. Uchinchi qism – temperaturalar sohasi 250 ÷ 500 °C bo'lib, unda temperatura ortishi bilan elektr o'tkazuvchanlik chiziqli ortadi. Birinchi qismda xrom silitsidi o'zini metallsimon qilib namoyon qiladi, bunda u manfiy temperatura koeffitsientiga ega bo'ladi.

Uchinchi qismda xrom silitsidining temperaturaga bog'liqligi yarimo'tkazgichniki kabi bo'ladi (musbat temperatura koeffitsiyenti).

Xrom monosilitsidi elektr o'tkazuvchanligi disilitsidnikadan 6-7 marta ko'p, buning sababi zaryad tashuvchilar miqdoridagi farqdadir. Birinchi qismda elektr o'tkazuvchanlikning pasayishi panjara fononlarida, kristallik zarralarda, kristall mukammal emasligi (defektlar)da, kirishma ionlarida va hokazolarda elektronlar sochilishining kuchayishi bilan tushuntirilgan. Shuni ham ta'kidlash lozimki, temperaturaning turli sohalarida turli turdagi to'qnashishlarning tutgan o'rni bir xil emas. Bizning kristallarda asosiy vazifani panjaradagi atom tebranishlarida va kristallik zarralar chegarasida yuz beradigan sochilishlar o'ynaydi.

Marganets va kobalt silitsidlari uchun elektr o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi elektr o'tkazuvchanlikning temperatura ortishi bilan monoton pasayishini ko'rsatadi. O'rganilgan temperatura intervalida elektr o'tkazuvchanlik 2-3,5 marta o'zgaradi. O'rganilgan silitsidlar temperaturaviy koeffitsientlari metallar uchun kuzatiladiganga yaqin. Turli silitsidlardagi elektr o'tkazuvchanlik qiymatlarining farqi ulardagi tok tashuvchilar miqdorlarining turlichaligi bilan tushuntiriladi. Temperatura ortishi bilan elektr o'tkazuvchanlikning pasayishi fononlar va kristallik zarralar chegarasidagi sochilishning ortishi va oqibatda tok tashuvchilar siljivchanligining pasayishi bilan tushuntiriladi.



12- rasm. Xrom silitsidlari elektr o'tkazuvchanligining temperaturaga bog'liqligi:  
1 – CrSi uchun; 2 – CrSi<sub>2</sub> – uchun.

Xrom silitsidi – kremniy asosida Shottki diodlari tayyorlangan, bunda ishlatilgan kremniy kirishmalar konsentratsiyasi  $(2\div 9) \cdot 10^{15} \text{sm}^{-3}$  bo'lgan, Choxralskiy usulida o'stirilgan, n – tipdagi monokristallik kremniy quymasidan kesib olingan.

Marganets, xrom va kobalt bilan kremniyni diffuzion legirlaganda hosil bo'ladigan silitsid va kremniy chegarasida Shottki diodi olish imkoniyati ko'rsatilgan. Shottki diodining asosiy parametrlari: baryer balandligi ( $\phi_{bn}$ ), ideallik koeffitsienti (n), qatlam qalinligi (d) va sirt holatlari zichligi ( $D_s$ ) aniqlangan.

Sistemadagi fizik hodisalarning mikroskopik analizi qilingan va zaryadlarning baryer orqali ko'p pog'onali o'tish modelining realligi asoslab berilgan.

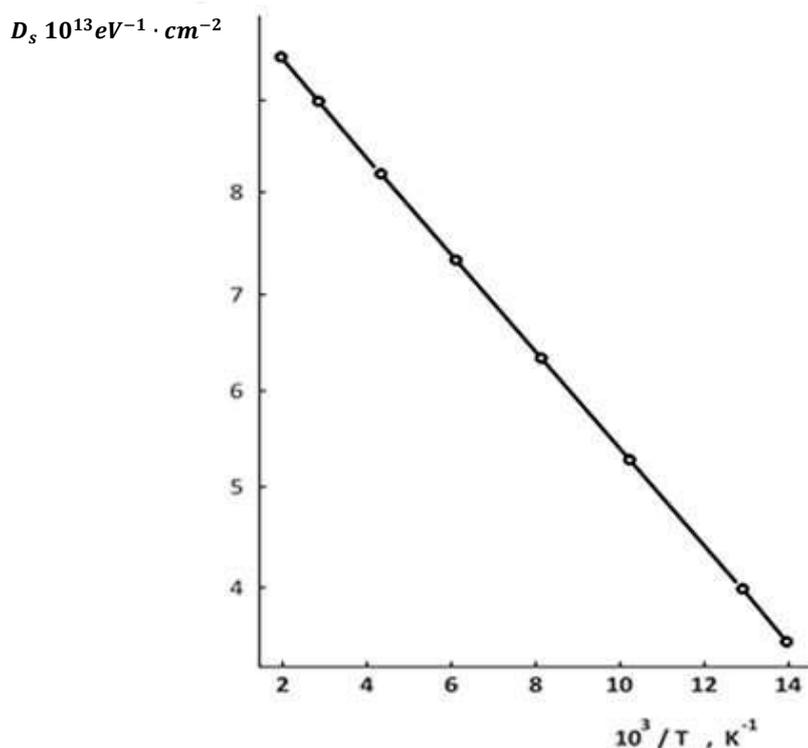
Ko'p pog'onali tunnel mexanizmidagi odimlar soni va odimlar o'rtasidagi energetik baryer aniqlangan.

Silitsid asosida yaratilgan Shottki baryeri parametrlariga yorug'lik va temperaturaning ta'sir etishi aniqlangan. Sirt elektron holatlarining Shottki diodi parametrlariga ta'siri aniqlangan.

Sirt holatlari zichligining temperaturaga bog'liqligi 13-rasmda keltirilgan.

Tok tashishning ustunlik qiluvchi mexanizmi tunnelovchi mexanizm ekanligi ko'rsatilgan. Kremniyni xrom, marganets va kobaltlar bilan diffuzion legirlash asosida  $p^+ - i - p^+$  strukturalar yaratish imkoniyatlari taklif etilgan. Quyidagi parametrlarni hisobga oluvchi strukturaning zonali diagrammasi yaratilgan: solishtirma qarshilik  $\rho(x)$ , Fermi sathi ( $E_F$ ), silitsid va yarimo'tkazgichning chiqish ishlari  $\Phi_c, \Phi_n$ , elektronlar va kovaklar konsentratsiyasi ( $p, n$ ). Silitsid – yarimo'tkazgich chegarasida  $\Phi_c > \Phi_n$  da kontakt potentsiallar farqi  $0,2 \div 0,25$  eV bo'lishi aniqlangan.

Baza uzunligi turlicha bo'lgan silitsid – yarimo'tkazgich – silitsid struktura VAXsi temperatura va yorug'likka bog'liq holda o'rganilgan. To'g'ri siljishda fotosignalning injeksion kuchayishi analiz qilingan va boshlang'ich fototokning silitsid – yarimo'tkazgich o'tish sohasi orqali injeksiyalanayotgan tok tashuvchilar hisobiga kuchayishini ta'minlash mumkinligi ko'rsatilgan.



13- rasm. Mn Si<sub>1.75</sub>/n-Si diodi sirt holatlari zichligi miqdorining temperaturaga bog'liqligi

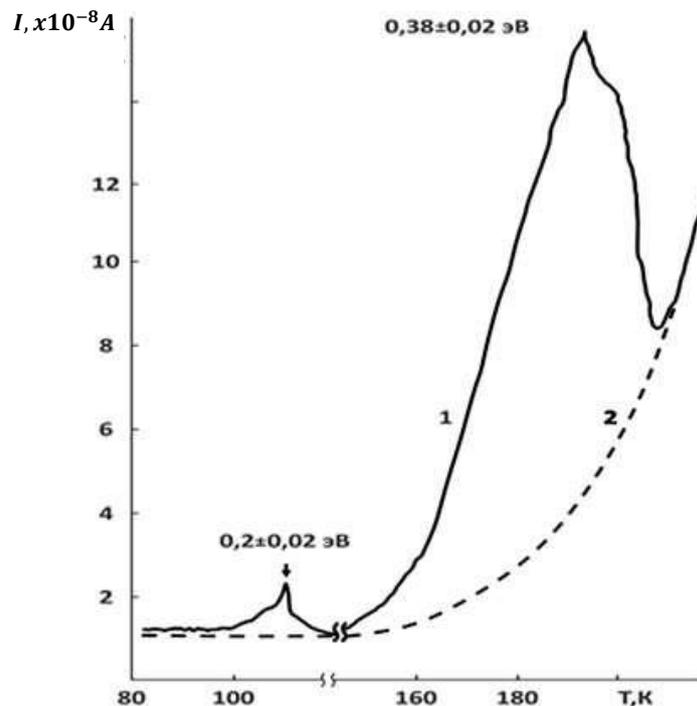
Dissertatsiyaning “**Silitsidlar va ular asosida yaratilgan strukturalar termo - va fotoelektrik xossalarini tadqiq etish**” oltinchi bobi xrom, kobalt va marganets silitsidlarining termo - va fotoelektrik xossalarini, shuningdek silitsid – kompensatsiyalangan kremniy – silitsid strukturalarning termostimulyatsiya o'tkazuvchanligini tadqiq etishga bag'ishlangan.

Termostimulyatsiya toki egri chiziqlari past temperaturada oldindan nurlantirib qo'yilgan kristallar qorong'ulik tokining temperaturaga bog'liqlik grafigidan iborat. Nurlanish sababli tuzoqqa tushgan tok tashuvchilar kristall qizdirilganda o'z joylaridan ajralib chiqadi va elektr toki hosil bo'lishida qatnashadi. Bu effekt qaytmas hisoblanadi: qayta sovutilganda elektr toki o'tmaydi.

Marganetsning oliy silitsidi (MOS)dan iborat past omli silitsid qatlami va yuqori omli kompensatsiyalangan Si<Mn> larni biriktirish orqali MOS - Si<Mn> - MOS va MOS - Si<Mn> - M strukturalarini yaratish imkoniyati paydo bo'ldi. Bloklovchi kontakt hosil qilish uchun struktura baza sohasining yon sirtiga NiGa yoki AlGa qotishmalari surkaldi yoki shu sirtga qisuvchi metall kontakt ishlatildi. Bunda bu kontaktlar yuzasi marganets oliy silitsidi yuzasidan katta bo'lmaydigan qilib hosil qilinadi. Tuzoqlarning joylashish chuqurligini aniqlash uchun mustaqil usul sifatida ishlatiladigan termostimulyatsiya o'tkazuvchanligi o'rganildi.

MOS- Si<Mn> - M struktura termostimulyatsiya o'tkazuvchanligi 14-rasmda keltirilgan.

Termostimulyatsiya o'tkazuvchanligi tadqiqotlari natijasida qo'yilgan katta kuchlanishlarda  $T = 109 \text{ K}$  sohasida  $E_{t1} = 0,2 \pm 0,02 \text{ eV}$  li kichik qiymatli tok cho'qqisi va  $T = 109 \text{ K}$  sohasida  $E_{t2} = 0,38 \pm 0,02 \text{ eV}$  katta qiymatli tok cho'qqisi mavjudligi aniqlandi.

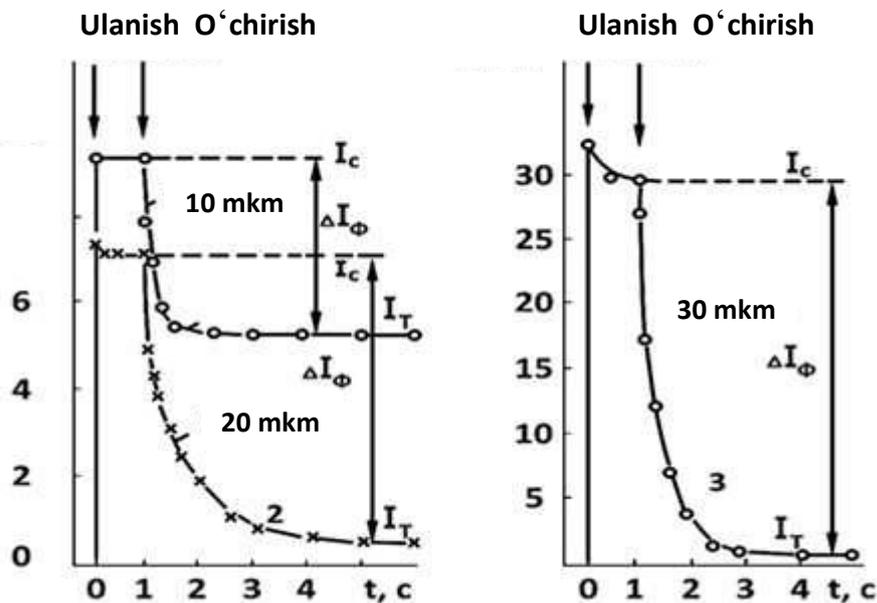


**14- rasm. MOS – Si<Mn> - M strukturaning siljish  $U=60 \text{ V}$  bo'lgandagi termostimulyatsiya qilingan o'tkazuvchanligi. 1 – TSO'; 2 – tokning qorong'ulikdagi temperatura bog'lanishi.**

Namunalar suyuq azot temperaturasigacha sovutilgan va elektr maydonida yoritilgan edi. Yoritish natijasida erkin zaryadlar hosil bo'lgan va ularning bir qismi

tuzoqlarda lokallashib qolgan. Agar tuzoq joylashgan chuqurlik yetarlicha katta bo'lsa, u holda past temperaturada zaryadlar termik ravishda tuzoqdan chiqib keta olmaydi. So'ngra kuchlanish ostida bo'lgan namuna qorong'ulikda qizdirilgan. Temperatura miqdori zaryad tashuvchilarni tuzoqdan termik uyg'otish uchun yetarli bo'lganda katta tok hosil bo'lgan. Tokning eng katta qiymati ma'lum kritik temperaturaga mos keladi. Maksimumdan so'ng tuzoqlardan zaryad tashuvchilarning chiqishiga qarab tok pasayadi. Oniy termostimulyatsiya toki tuzoqlardan zaryad tashuvchilarning chiqish tezligiga proporsional. Ushlab qoluvchi enregetik sathlar bir-biriga juda yaqin joylashganida TSO' piklari qo'shib ketishi mumkin. Tuzoq qancha chuqur bo'lsa TSO' cho'qqisining kritik temperaturasi shuncha yuqori bo'ladi.

TSO' natijalariga ko'ra Si<Cr> kristallari uchun yorug'likning intensivligi 10% bo'lganida tuzoqlar konsentratsiyasi  $7 \cdot 10^{15} \text{sm}^{-3}$  ga, rekombinatsion tutib qolish kesimi  $6 \cdot 10^{-20} \text{sm}^2$  ga teng, intensivlik 30% bo'lganida  $N_t = 2 \cdot 10^{16} \text{sm}^{-3}$ ,  $\sigma_n = 4.5 \cdot 10^{-20} \text{sm}^2$  ga teng, intensivlik 100% bo'lganida  $N_t = 2.5 \cdot 10^{16} \text{sm}^{-3}$ ,  $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-20} \text{sm}^2$  ga teng.



**15-rasm. Si<Mn> uchun 77K da  $h\nu \geq E_g$  yoritilgandan keyingi fotoo'tkazuvchanlik relaksatsiyasining olib tashlanadigan sirt oldi soha qalinligiga bog'liqligi.**

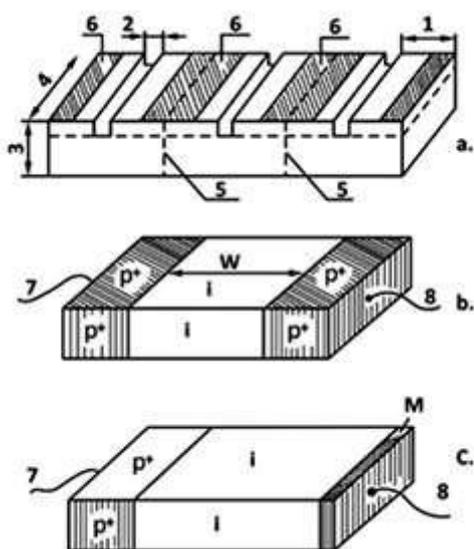
1.  $\Delta t = 10 \mu\text{m}$ ; 2.  $\Delta t = 20 \mu\text{m}$ ;
3.  $\Delta t = 30 \mu\text{m}$ .

15-rasmda Si<Mn> kristalli uchun nurlanuvchi diod AL107B orqali 10 mA tok o'tganda yorug'lik impulsi berilganidagi foto o'tkazuvchanlikning so'nish relaksatsiyasi ko'rsatilgan.

15-rasmdan shunday xulosa chiqadi: 77 K temperaturada namunaning sirt oldi sohasidan qatlamlar olib tashlanganida yorug'lik tokining qorong'ulik tokiga nisbati ( $I_c/I_t$ ) ortadi, olingan qatlam qalinligi  $\sim 20 \mu\text{m}$  gacha bo'lganida tokning qorong'ulik qiymatigacha pasayish vaqti ham ortadi, undan keyingi qatlamlar

olinganda uning kamayishi kuzatiladi, 30  $\mu\text{m}$  dan ortgandan so'ng yorug'lik sezgirlik 4 tartibdan ortiqqa o'sadi. Bundan olib tashlanadigan qatlam qalinligi ortganda yorug'lik sezgirlik karraliligi ortishi ko'rinadi.

Kichik omli  $p^+$  - qatlamni yuqori omli  $i$  – soha bilan birgalikda qo'shish orqali  $p^+ - i - p^+$  tipdagi strukturani yaratish imkoniyati hosil bo'ldi. Strukturani kichik omli qatlamni olib tashlash usuli bilan hosil qilindi: parallelepiped olti tomonining beshtasidan 50-80  $\mu\text{m}$  yedirib tashlandi. Ishlov berilmagan qirraga 16a-rasmda ko'rsatilganidek tor tirqish qoldirib metall kontaktlar surtilgan va bu tirqishlarda M-14 mikroporoshok suspenziyasi bilan 0,2 ÷ 0,3 mm diametrlı po'lat sim bilan  $p^+ - i - p^+$  struktura olish uchun ariqchalar ochilgan.



**16-rasm.  $p^+ - i - p^+$ ,  $p^+ - i - m$  strukturalar geometrik ko'rinishi. 1 -  $p^+$ - soha, 2-ariqcha, 3-struktura qalinligi, 4-struktura kengligi, 5-kesish chizig'i, 6-metallik kontakt, 7,8 – tok olib boruvchi elektrodlar (Al, Au yoki Cu simlari)  $p^+$ -MOS, m – metall, i-Si<Mn>**

kristallarning o'lchamlari 1•3•5  $\text{mm}^3$  va 2•2•10  $\text{mm}^3$  bo'lgan. Bunday strukturalar qalin bazali dielektrik hisoblanadi.

Simmetrik diod strukturalardan tashqari boshqa strukturalar tayyorlangan va tadqiq etilgan, bu  $p^+ - i - m$  (metall) turdagi strukturalarga ega bo'lib, bloklovchi metall kontaktlarga ega.

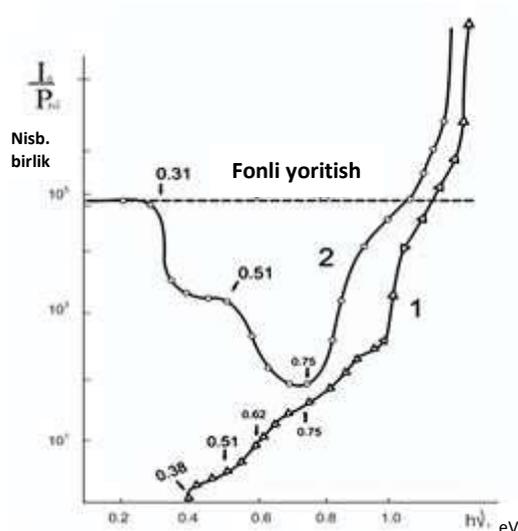
Bu strukturalar  $p^+ - i - p^+$  strukturalar asosida tayyorlangan; bloklovchi kontakt strukturaning baza sohasi yon sirtiga NiGa yoki AlGa qotishmalarini surtib hosil qilinadi yoki qisuvchi metall kontakt o'rnatiladi.

$p^+ - i - p^+$  va  $p^+ - i - m$  strukturalardagi infraqizil va temperatura so'nishlari o'rganilgan. Kombinatsiya qilingan lokal yoritishda va sirt oldi sohasini  $h\nu = 0,2 \div 1,3$  eV bilan skaner qilinganida fotoo'tkazuvchanlikning infraqizil so'nishi (IQS) kuzatilgan. Fotoo'tkazuvchanlikning uzun to'liqinli chegarasi 0,38 eV ga teng bo'lgan, fotojavob 0,51 eV, 0,62 eV, 0,75 eVlarda qayd etilgan (17-rasm).

Ariqchali brusni kesish o'lchamlari 16a-rasmda keltirilgan: 1 – brus qirrasidan ariqchagacha masofa 1,5 ÷ 1,7 mm; ariqcha kengligi 0,2 ÷ 0,3 mm; qalinligi 0,9 ÷ 1,4 mm; 4 – kengligi 1,7 ÷ 2,7 mm; 5 – kesish chizig'i; 6 – metall kontakt.

Taglik temperaturasi 100 °C dan yuqori bo'lmagan holda metallik kontaktlarni hosil qilishda alluminium yoki nikel purkaldi.

Katta uzun bazali shunday strukturani quyidagi usul bilan hosil qilindi: legirlangan namunaning ikki qarama-qarshi yon tomonlaridan tashqaridagi kichik omli qatlam olib tashlandi (16b–rasm). Bunday

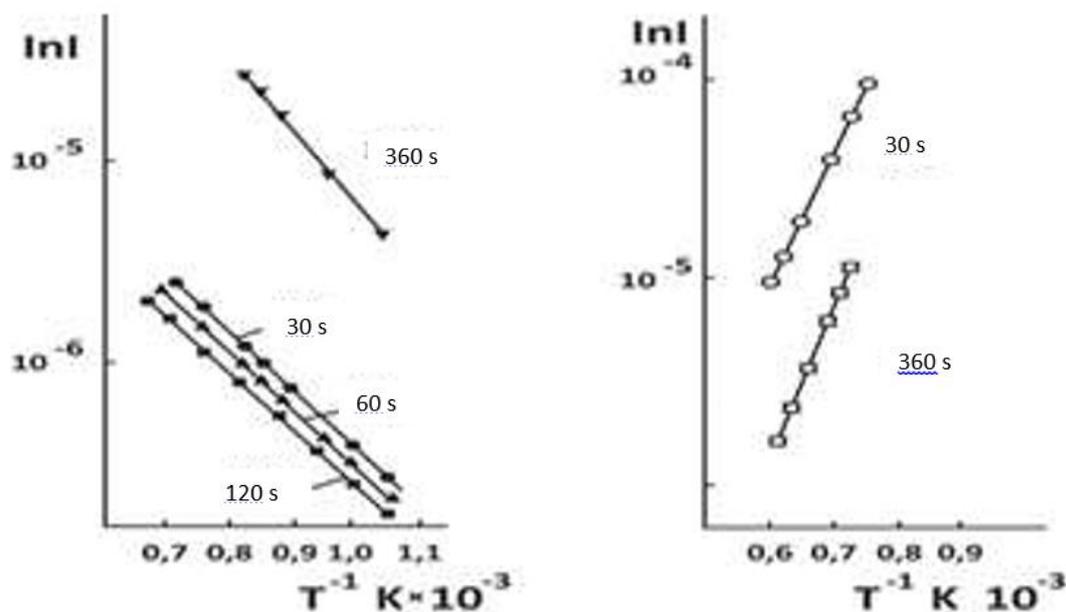


17- rasm. Mn silitsidi asosidagi  $p^+ - i - p^+$  strukturaning fotoo‘tkazuvchanlik (FO‘) spektral bog‘lanishi va 77 K dagi FO‘ infraqizil so‘nishi (IQS):  $1 - hv \geq E_g$  energiya bilan yoritilgandan so‘ng; 2-IQS.

Marganets silitsidi asosida yaratilgan  $p^+ - i - p^+$  strukturalar relaksatsion xarakteristikalari tadqiq etilgan.  $p^+ - i - p^+$  strukturadagi fotorelaksatsiyaning temperaturaga bog‘liqlik egri chizig‘ining ko‘rsatishicha fotoo‘tkazuvchanlik pasayishi miqdori 5 tartibgacha boradi, bunda temperatura bo‘yicha o‘ziga xos, nomonoton bog‘lanish kuzatiladi.

Relaksatsiya vaqtining o‘zgarish qiymatlarida: 30, 60, 90, 120, 220, 360 sek da  $I(T)$  bog‘lanish to‘plamida kuzatiladigan hodisalar analizi  $I(T)$  bog‘lanishning turli xarakterdagi ikki tarmog‘i:  $I(T)$  ga qarab o‘sadigan 80-132 K sohasi va keskin kamayadigan 132-165 K sohasi mavjudligini oshkor qildi.

Bu egri chiziqlarni  $\ln I$  ning  $T^{-1} K$  ga bog‘lanish koordinatalariga o‘tkazilganida (18-rasm) mos holda ikkita sohani – qarama-qarshi qiyalik burchagiga ega bo‘lgan to‘g‘ri chiziqni olish imkoniyati paydo bo‘ldi, ulardan pasayishning effektiv aktivatsiya energiyasi deb ataluvchi ikkita qiymat hisoblab topildi: birinchi soha (80-132K) da  $I(T)$   $E_1 = 1,2 \div 1,3$  eV energiya bilan o‘sadi, ikkinchi sohada  $E_2 = 3,2 \div 3,3$  eV energiya bilan pasayadi.

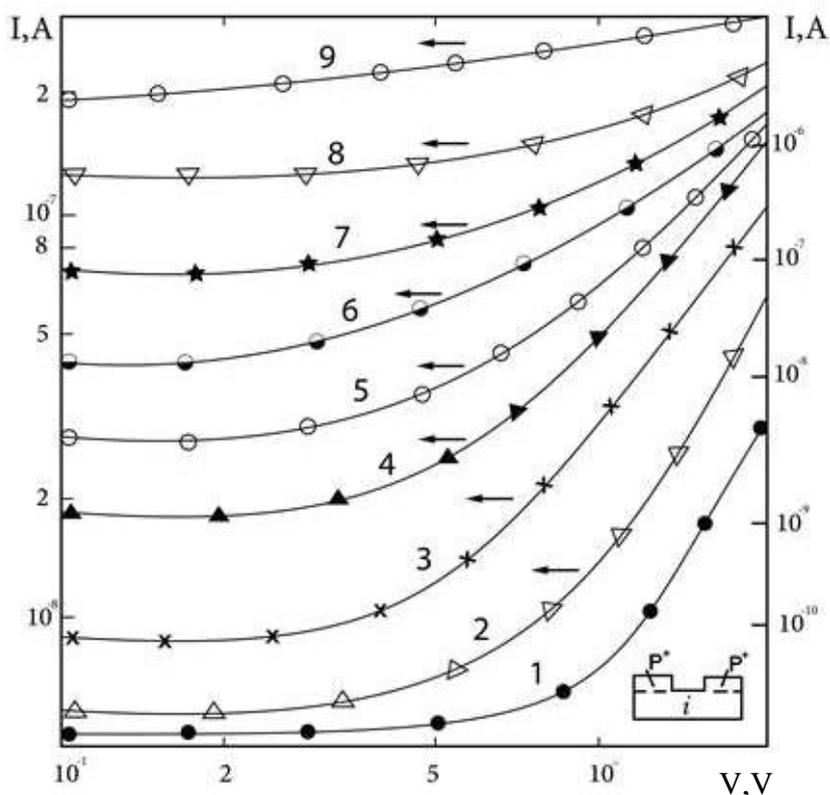


18- rasm. Marganets silitsidi asosida yaratilgan  $p^+ - i - p^+$  struktura uchun  $\ln I(T^{-1})$  bog‘lanishi.

Kristallarning yorug'lik ta'siridagi VAXlari 19-rasmda keltirilgan.

Kristall ariqchasining ochiq tomonidan  $10 \div 7000$  lk intensivlikda yoritilganda VAXning tok shkalasi bo'ylab yuqoriga siljishi aniqlangan. O'lchash natijalari yoritilganlik ortganida to'yinish tokining past voltli qiismining uzunligi fotoo'tkazuvchanlik tokining bir vaqtda o'sishi bilan ortishini ko'rsatadi. Katta kuchlanishlarda ( $>5$  V) yoritilganlik ancha kuchsiz ta'sir etadi va I ning V ga bog'liqligi deyarli to'g'ri chiziq ko'rinishida bo'ladi.

Ushbu dissertatsiyada olingan nazariy va eksperimental natijalar qattiq jismlilik elektronika uchun yangi qurilmalarni ishlab chiqish va yaratish imkoniyatini berdi. Metall silitsidlari asosida yasalgan sendvich-fotorezistorning tipik ko'rinishi 20-rasm



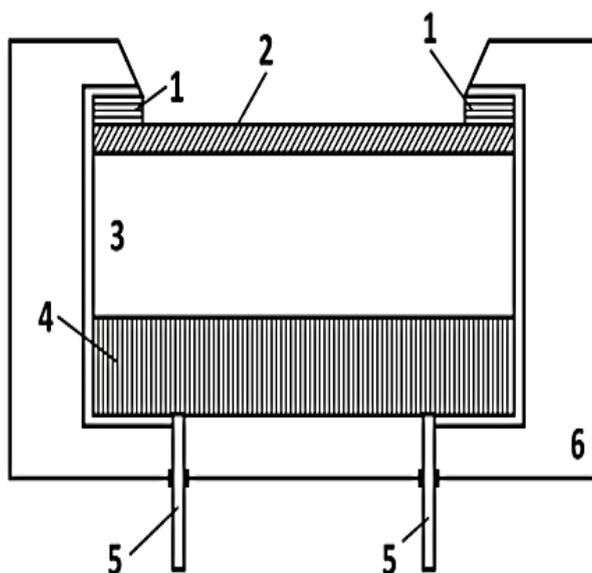
19-rasm.  $p^+ - i - o'$ tish VAXning yoritilganlikka bog'liqligi;  
 $V=5V$  1-0 Lk; 2-10 Lk; 3-100 Lk; 4-250 Lk; 5-500 Lk; 6-1000 Lk; 7-4000 Lk;  
 8-5000 Lk; 9-7000 Lk.

ko'rsatilgan.

$Si\langle Mn \rangle$ ,  $Si\langle Cr \rangle$ ,  $Si\langle Co \rangle$  asosida yaratilgan sendvich-fotorezistorlar sirt oldi soha qalinligi  $0,9 \mu m$  dan ortiq bo'lmaganda amalga oshiriladi.

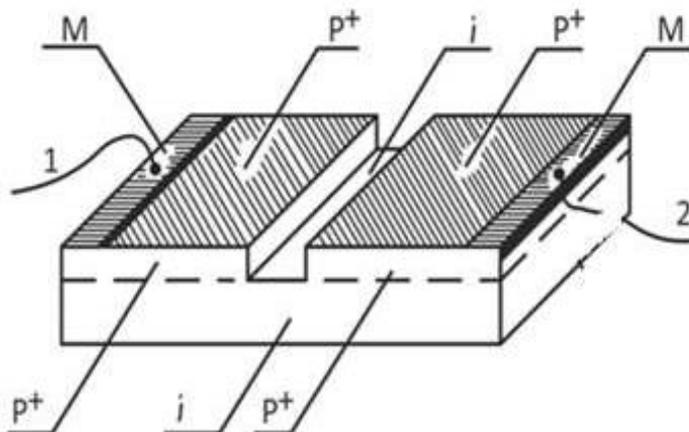
$p^+ - i - p^+$  struktura asosida yasalgan yuqori sezgirlikdagi fotoqurilma parametrlari 300 K da quyidagicha:  $p^+$  - soha solishtirma qarshiligi  $5 \div 10 \Omega \cdot sm$ ;  $i$  - soha (ariqcha qarshiligi yoki yedirilgan tomon) solishtirma qarshiligi  $10^5 \Omega \cdot sm$  (21-rasm).

Bu qurilmalar  $77 \div 160$  K temperatura diapazonida ko‘rinadigan va IQ – sohada  $0,5 \div 2,3$   $\mu\text{m}$  to‘lqin uzunligidagi nurlanishda sinalgan.



**20- rasm. Metall silitsidlari asosida yaratilgan sendvich-fotorezistor.**

1 –  $p^+$  - soha; 2 – p – soha; 3 – i – soha;  
4 – izolyator; 5 – elektrodlar; 6 - korpus



**21-rasm.  $p^+ - i - p^+$  strukturadagi fotoelektrik priborning ko‘rinishi: 1,2 – elektrodlar  
M –kontakt,  $p^+$  - MOS,  $i$  – yuqori omli soha ( $\text{Si} \langle \text{Mn} \rangle$ )**

Olingan eksperimental natijalar qurilmalarning spektrning ko‘rinadigan va yaqin infraqizil sohasida yuqori fotosezgirlikka ega ekanligini, katta chiqishga (90%) ega ekanligini ko‘rsatdi, bu esa uni fotoqabulqilgich sifatida qo‘llanilishi mumkinligiga amaliy qiziqish uyg‘otadi.

Kobalt disilitsidi asosida elektron termometr yaratilgan, uning ishlashi temperatura  $77-400$  K oralig‘ida o‘zgarganida elektr qarshilikning chiziqli o‘zgarishiga asoslangan.

## Xulosa

Kremniyda nuqson hosil bo'lishining muhim muammosi qo'yilgan va yechilgan. Ishning asosiy natijalari quyidagilardan iborat:

1. Ilk bora kremniyni marganets, xrom va kobalt kirishmalari bilan diffuzion legirlaganda past omli, tok tashuvchilar konsentratsiyasi  $\sim 10^{20} \div 10^{21} \text{sm}^{-3}$  bo'lgan va legirlangan hajmiy qismdagi strukturadan farq qiluvchi yangi struktura fazali  $\text{Si} < \text{Mn} >$ ,  $\text{Si} < \text{Cr} >$  va  $\text{Si} < \text{Co} >$  ning sirt oldi sohasi hosil bo'lishi aniqlangan.

2. Lokal fotoEYuK usuli yordamida infraqizil nurdan foydalanib, kristall hajmidagi nojinsliliklarni aniqlash imkoniyati taklif qilingan.

3. Legirlangan kristall bir jinsli bo'lmagan sohasidagi ichki elektr maydonini fotovoltaiik effekt metodikasi bo'yicha aniqlash imkoniyati ochilgan.  $n\text{-Si} > \text{Mn} >$  kristallida tashqaridan beriladigan elektr maydoni  $E_e \approx 2,0 \div 2,3 \text{ V/sm}$  bo'lganida ichki elektr maydonining qiymati  $E_i = 1,8 \text{ V/sm}$  bo'lishi aniqlangan.

4. Xrom, marganets va kobalt atomlari bilan diffuzion legirlangan kremniy sirtida ikkinchi fazadan iborat bo'lgan kirishma to'plamlari hosil bo'lishi aniqlangan. Sirtida  $20 \mu\text{m}$  o'lchamli to'plamlarning hosil bo'lishi va kristall ichiga kirgan sari kichiklashib borishi aniqlangan. Legirlangan kristall sirt oldi sohasining polikristall strukturaga, hajmiy soha esa monokristall strukturaga ega bo'lishi aniqlandi.

5. Silitsidlardagi kremniy atomi radiusini metall atomi radiusiga nisbatini baholash orqali optimal termoelektrik hossalari yarimo'tkazgich materialni sintez qilish texnologiyasini prognoz qilish imkoniyati aniqlangan.

6. Fotoo'tkazuvchanlik kinetikasini sirt oldi soha qalinligiga qarab o'rganish orqali fotosezgirlik karraliligining olib tashlanadigan qatlam qalinligi ortishi bilan  $10^3$  marta o'sishi, qoldiq o'tkazuvchanlik va uning relaksatsiya o'zgarish vaqtining 2 martaga kamayishi aniqlandi.

7. Silitsid-yarimo'tkazgich – silitsid strukturasi bilan tokning o'tishi eksperimental va nazariy tadqiq etildi; undan oqadigan tokning yoritilganlik va kuchlanish orqali boshqarish mavjudligi aniqlangan.

8.  $p^+ - i - p^+$  strukturalarda chuqur infraqizil va temperatura so'nishlari mexanizmi taklif etildi. Diffuziya usuli bilan legirlangan  $\text{Si} < \text{Mn} >$ ,  $\text{Si} < \text{Cr} >$  va  $\text{Si} < \text{Co} >$  namunalari asosida foto sezgir sendvich – fotorezistorlar yaratish imkoniyati aniqlangan.

9. Kobalt disilitsidi asosida keng diapazonli portativ termometr yaratilgan. Datchikning ishlash prinsipi elektr qarshilikning  $77 \div 400 \text{ K}$  temperatura diapazonida chiziqli o'zgarishiga asoslangan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ  
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
УЗБЕКИСТАНА**

---

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА  
ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА**

**ИСАЕВ МАХМУДХОДЖА ШАРИПОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СИЛИЦИДОВ МАРГАНЦА, ХРОМА, КОБАЛЬТА И СТРУКТУР НА  
ИХ ОСНОВЕ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ (DSC) ДИССЕРТАЦИИ  
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2023**

Тема диссертации доктора (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2022.3.DSc/FM184

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.ispm.uz](http://www.ispm.uz)) и Информационно-образовательном портале "ZiyoNet" ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Научный консультант:** Мамадалимов Абдугафур Тишабаевич  
доктор физико-математических наук, академик

**Официальные оппоненты:** Зайнабидинов Сирожиддин Зайнобидинович  
доктор физико-математических наук, академик

Аюпов Кутуп Саутович  
доктор физико-математических наук, профессор

Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:** Наманганский инженерно-технологический институт

Защита диссертации состоится «18» «10» 2023 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г.Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871)248-79-94, факс: (+99871) 248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе внедрения цифровых образовательных технологий института (зарегистрирована за № 55) по адресу: 100057, Узбекистан, г.Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871)248-79-59.

Автореферат диссертации разослан «03» 10 2023 г.  
(реестр протокола рассылки № 55 от 03.10 2023 г.)



**Ш.Б. Утамурадова,**  
председатель научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., профессор  
**Ж.Ж. Хамдамов,**  
ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
доктор философских наук (PhD), с.н.с.  
**Н.А. Тургунов**  
Председатель научного семинара  
при Научном совете по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., доцент

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Современный мировой научно-технический прогресс в значительной степени определяется развитием микроэлектроники и наноэлектроники, достижения которой напрямую зависят от успехов фундаментальных наук, в первую очередь физики твердого тела и физики полупроводников. Последние достижения в этих областях связаны с физикой легированных полупроводниковых и созданием технологий получения микро- и наноструктур с принципиально новыми функциональными возможностями для компьютерной и измерительной техники, средств связи и др. В связи с этим исследования физических процессов, происходящих как в объеме, так и на поверхности, и в приповерхностных слоях монокристаллического полупроводника, в частности, кремния в процессе диффузионного легирования примесями, создающие глубокие уровни и получения компенсированных материалов с заданными электрофизическими, тензоэлектрическими, фотоэлектрическими и оптическими свойствами являются актуальными задачами сегодняшнего дня.

В настоящее время использование диффузионно-легированного монокристаллического кремния для получения компенсированных материалов с заданными электрофизическими, фотоэлектрическими и оптическими свойствами в современной микроэлектронике является актуальной задачей. Хорошо разработанная технология выращивания монокристаллического кремния, планарная технология создания интегральных приборов на его основе, принципиально новая технология создания объектов пониженной размерности в кремнии, модификация свойств Si различными методами, а также обнаружение новых физических явлений в поверхности, кремния не характерных для его объема, привлекают пристальное внимание исследователей в качестве активного материала для нужд микро- и наноэлектроники.

В настоящее время силициды переходных металлов становятся базовым материалом для новых, перспективных интегральных будущего поколения в связи с их стойкостью к агрессивным средам и высокотемпературным обработкам. Поэтому комплексное исследование механизма введения примесей в объем кристалла и их взаимодействия как с матричными атомами кристалла, так и с технологическими примесями является актуальным. С этой точки зрения исследование процессов формирования силицидов в поверхностной области кремния при диффузионном легировании и разработка новых полупроводниковых приборов на их основе имеет особое научное значение в контексте создания новых материалов для микро- и наноэлектроники.

Данное диссертационное исследование соответствует задачам, обозначенным в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-60 «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022

года, в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-5011 «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности и повышению конкурентоспособности отечественной продукции» от 03 февраля 2021 года, № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: III. «Энергия, энергосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации<sup>1</sup>.** В настоящее время фундаментальными и прикладными исследованиями в области низкоразмерных структур занимаются ведущие научные центры и университеты, а именно: Центр спинтроники (г. Вашингтон, США); Пекинская национальная лаборатория сверхпроводимости (г. Пекин, КНР); Пекинская национальная лаборатория физики конденсированного состояния Китайской Академии Наук (г. Пекин, КНР); Мэрилендский университет (штат Мэриленд, США); Ближневосточный технический университет (г. Анкара, Турция); университет Осло (г. Осло, Норвегия); Институт физики ионных пучков и материаловедения (г. Дрезден, Германия); Научно-исследовательский институт по электрическим коммуникациям Токийского университета (г. Токио, Япония); Университет им. Жозефа Фурье (г. Гренобль, Франция); Департамент физики и астрономии Калифорнийского университета (г. Лос Анджелес, США); Университет штата Нью-Йорк в Олбани (г. Олбани, США); Центр нанотехнологии и наноматериалов института им. Вальтера Шоттки при Мюнхенском техническом университете (г. Мюнхен, Германия); лаборатория материалов спинтроники Корейского Университета (г. Пшонг, Южная Корея); Копенгагенский университет (г. Копенгаген, Дания); Принстонский университет (г. Принстон, США); Университет Айовы (г. Айова-Сити, США); Иллинойский университет (г. Чикаго, США); Институт химических проблем микроэлектроники (г. Москва, Российская Федерация); Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук (г. Черноголовка, Российская Федерация); Московский государственный университет (г. Москва, Российская Федерация); Томский государственный технический университет (г. Томск, Российская Федерация); Нижегородский университет имени Н.И.Лобачевского (г. Нижний Новгород, Российская Федерация);

---

<sup>1</sup> Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: <https://journals.aps.org>, <https://ufn.ru>, [lettersonmaterials.com](http://lettersonmaterials.com), [phys.org](http://phys.org), [iopscience.iop.org](http://iopscience.iop.org), [journals.ioffe.ru](http://journals.ioffe.ru), Web of Science, Scopus, Springer, ResearchGate и из других литературных источников.

Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии имени И.П.Бардина (г.Москва, Российская Федерация); и др.

В настоящее время в вышеуказанных исследовательских центрах уже решён целый ряд задач по технологии получения низко размерных полупроводниковых структур и изучения их физико-химических свойств (Принстонский университет, г. Принстон, Университет Айовы, г. Айова-Сити, Иллинойский университет, г. Чикаго, США). В ряде научных центров были выполнены исследования по изучению ферромагнетизма ИИ кремния при комнатной температуре, с элементами переходной группы железа (железо, хром, кобальт, никель, марганец) и на основе этих исследований была дана физическая интерпретация (Пекинская национальная лаборатория сверхпроводимости, Пекинская национальная лаборатория физики конденсированного состояния Китайской Академии Наук, г. Пекин, КНР, Мэрилендский университет, штат Мэриленд, США, Московский государственный университет г. Москва, Нижегородский университет имени Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии имени И.П. Бардина, г. Москва, РФ). Проведен большой объем работы по созданию монокристаллического кремния квантоворазмерных объектов на основе диффузии элементов переходной группы железа и исследование влияние их на физические свойства материала (в НУ РУз, ТашГТУ, Узбекистан). Интенсификация исследований в области изучения температурного ферромагнетизма ИИ кремния привела к синтезу новых материалов для нужд полупроводниковой промышленности.

**Степень изученности проблемы.** До настоящего времени исследовано поведение примесных атомов свыше 30 элементов таблицы Менделеева, создающих глубокие уровни (ГУ) в запрещенной зоне Si. Результаты, полученные при исследовании свойств кристаллов, легированных такими примесями, обобщены, в частности, в работах Бахадырханова М.К. и др. К характерным особенностям, свойственным примесям, введенным в Si диффузионным методом из постоянного источника, следует отнести создание ими приповерхностного слоя толщиной в десятки мкм со свойствами, отличающимся от свойств объема кремния. При этом концентрации примесей в таких слоях могут на 2-4 порядка превышать значение предела их растворимости. Это приводит к образованию двух участков концентрационного распределения примесей – крутого приповерхностного и пологого объемного. При этом изучена только объемная часть.

Коллаборацией исследователей из Пекинской национальной лаборатории по сверхпроводимости, института физики Китайской Академии Наук и Пекинской национальной лаборатории по физике конденсированного состояния (Пекин, КНР) исследованы магнитные свойства и микроструктура p-Si (100), имплантированного ионами Cr с энергией 200 кэВ и дозой  $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  с помощью SQUID магнитометра и сканирующими (SEM) и трансмиссионными электронными микроскопами (TEM). Учёные—

экспериментаторы из университета Мэриленд (США) во главе Б.Кане с помощью ближнепольного оптического сканирующего микроскопа детектировали электроны, а группа исследователей из того же университета во главе Д.Дреюа измеряли спин электронов. Группа профессора Р.Вебба изучала возможности использовать спин ядра донорного фосфора в Si для квантовых вычислений.

Группа учёных Ю.Фессбендер, М.Болдук из Института физики ионных пучков и материаловедения (Дрезден, Германия), из колледжа наноразмерных наук и инженерии университета Албани-Госуниверситет Нью-Йорка, А.Б.Грановский, Л.Орлова, И.В.Кулеманов из Московского Государственного университета исследовали магнитные и микроструктурные свойства кремния легированного марганцем и обнаружили в них ферромагнетизм при комнатной температуре связанный с ионами марганца.

Имеется большая коллаборация сотрудников фирмы IBM с различными университетами и организациями, занимающимися исследованиями и разработками различных продвинутых технологий. В частности, в Центре, находящемся в штате Калифорния США (IBM-Stanford Spintronic Science and Applications Center (SpinAps)), начиная с 2004 года занимаются теоретическими и экспериментальными исследованиями основ спинтроники и развитием продвинутых технологий.

В Республике Узбекистан, изучением различных дефектов, образованных введением примесей в монокристаллический кремний и другие полупроводниковые материалы путем ИИ и высокотемпературной диффузии, а также их влияния на физико-химические, оптические, электрофизические и магнитные свойства, занимается большая группа учёных. В их числе академики АН РУз М.К. Бахадырханов, Р.А.Муминов, А.Т.Мамадалимов, С.З.Зайнабидинов, профессора Х.С.Далиев, Ш.Б.Утамурадова, К.П.Абдурахманов, Х.К.Арипов, Р.Алиев, Т.С.Камилов, Б.Е.Умирзаков, Б.Эгамбердиев и др. С их участием выполняются широкомасштабные научно-исследовательские работы и получены значимые научные результаты.

**Связь темы диссертации с научными исследованиями высшего учебного заведения, в которой выполнена диссертационная работа.** Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов научных исследований Национального Университета Узбекистана по темами: Ф2.1.6. «Исследование влияния внешних воздействий и инжекции носителей заряда на физические свойства кремниевых структур, легированных примесями с глубокими уровнями (2003-2007 гг.) и А-4-7 «Разработка технологии синтеза гетероэпитаксиальных наноразмерных структур в приповерхностной области монокристаллических пленок кремния и арсенида галлия для приборов микро- и оптоэлектроники, в том числе солнечной энергетики» (2015-2017 гг.).

**Целью исследования** является исследование электрофизических свойств силицидов марганца, хрома, кобальта и структур на их основе.

### **Задачи исследования:**

- исследование гальваномагнитных свойств приповерхностной области кремния, диффузионно-легированного кремния марганцем, хромом и кобальтом;

- исследование неоднородности приповерхностного слоя кремния, диффузионного –легированного кремния хромом, марганцем и кобальтом;

исследование структуры и состав приповерхностного слоя диффузионно-легированного кремния;

-исследование механизма токопрохождения через силициды металлов и структур на их основе;

-исследование термоэлектрических свойств силицидов хрома, кобальта и марганца;

- исследование фотоэлектрических свойств силицидов;

- разработка и создание макета новых чувствительных приборов на основе силицидов металлов и кремния.

**Объектом исследования** являются монокристаллический кремний, силициды марганца, кобальта, хрома и  $p^+ - i - p^+$ ,  $p^+ - i - n$  структуры на их основе.

**Предметом исследования** являются процессы образования силицидных пленок, неоднородностей на приповерхностной области монокристаллического кремния в результате диффузионного легирования атомами марганца, кобальта и хрома, а также особенности структур, создаваемых на основе силицидов.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач были применены следующие методы: четырехзондовый метод измерения сопротивления, метод измерения коэффициента Холла, метод модуляции лазерного излучения, метод измерения фотопроводимости, метод измерения времени жизни неравновесных носителей.

### **Научная новизна исследований заключается в следующем:**

Исследована природа образования приповерхностного слоя диффузионно-легированного кремния, марганцем, хромом и кобальтом. Выявлено, что приповерхностная область кремния, легированного атомами металлов, представляет собой сложное соединение типа  $Mn_xSi_y$ ,  $Cr_xSi_y$ ,  $Co_xSi_y$ , толщина которого зависит от количества атомов металла, температуры, времени отжига и уровня вакуума;

объяснено существующее противоречие между величиной растворимости атомов металла в кремнии при температуре диффузионного насыщения и концентрацией металла вблизи приповерхностной области, превышающей растворимость на  $2 \div 4$  порядка. Выявлено, что такая растворимость атомов металла в приповерхностной области кремния связана с образованием химического соединения металла с кремнием, являющегося силицидом металлов;

на основе фотозондовых исследований кремния, легированного атомами металлов, по глубине кристалла определена топография неоднородных областей и измерены внутренние электрические поля. Установлено, что

неоднородностями в легированных кристаллах являются силицидные включения атомов металла;

установлено, что приповерхностная область Si, легированного Mn, Cr, Co имеет проводимость p-типа с концентрацией носителей тока  $10^{20} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$  и холловской подвижностью  $1 \div 17 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;

на основе моделированных структур типа силицид-полупроводник-силицид теоретически и экспериментально исследованы механизмы токопрохождения и объяснены такие фотоэлектрические эффекты, как инфракрасное и температурное гашение;

исследованы термоэлектрические свойства силицидов хрома, кобальта и марганца и предложена возможность прогнозирования технологии синтеза полупроводникового материала с оптимальными термоэлектрическими свойствами;

определена глубина кристалла Si, легированного Mn, Cr, Co, равная 30 мкм, где фотопроводимость и фотоЭДС имеет наибольшее значение;

исследованиями влияния освещенности на ВАХ выявлено, что наибольшее изменение fotocувствительности  $p^+ - i - p^+$  структуры при любых интенсивностях освещения наблюдается в случае, когда переход смещен на  $0,8 \pm 0,1 \text{ В}$ ;

созданы высокофоточувствительные фотоэлектрические приборы и датчики инфракрасных лучей на основе  $p^+ - i - p^+$  и  $p - i - n$  структур.

#### **Практические результаты исследований заключается в следующем:**

Предложен способ получения пленок силицидов хрома, марганца и кобальта с заданными электрофизическими параметрами с требуемой структурой, отличающийся дешевизной и простотой технологических процессов. Показана возможность создания на основе силицидов металлов диодов с диэлектрической базой с высокой fotocувствительностью в области длин волн  $0,63 \div 2 \text{ мкм}$ . Показана возможность создания сэндвич-фоторезисторов на основе силицидов. Наши новые методические разработки: установка для исследования неоднородностей полупроводника, установка для измерения временных характеристик параметров полупроводника, высокофоточувствительный полупроводниковый фотоэлектрический прибор на основе силицидов марганца, инфракрасный детектор на основе силицидов и кремния, инфракрасный влагомер, переносной широкодиапазонный портативный термометр.

**Достоверность результатов исследований** обосновывается применением современных научных методов исследования, стандартных технологических установок и высокоточного оборудования, стандартных приборов для измерения электрофизических параметров образцов, а также необходимой статистикой экспериментов, подтверждением полученных результатов при сравнительном анализе с результатами других авторов, интерпретацией полученных результатов в рамках существующих апробированных физических моделей.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научное значение работы заключается в развитии физических представлений о взаимодействии легирующих примесей, создающих глубокие уровни. С атомами матрицы (кремния) и росте силицидных пленок на кремнии, а также о возможности применения пленок силицидов металлов в микроэлектронике, в частности, для получения термо-, влаго-, и фоточувствительных структур на их основе.

Практическая значимость результатов работы определяется тем, что предлагаемый способ получения пленок силицидов хрома, кобальта и марганца с заданными электрофизическими параметрами с требуемой структур, отличается дешевизной и простотой технологических процессов.

Показана возможность создания диодов с высокой фоточувствительностью в области длин волн  $0,63 \div 2$  мкм на основе силицидов металлов. Показана возможность создания сэндвич – фоторезисторов на основе силицидов.

#### **Внедрение результатов исследований.**

На основании результатов исследования образования силицидов в приповерхностной области диффузионно-легированного кремния атомами марганца, хрома, кобальта, а также исследования их электрофизических, фотоэлектрических и термоэлектрических свойств:

использованы в АО «Фотон» в разработке высокочувствительных электронных термометров, влагомеров, изготовленных на основе структур  $p^+ - i - p^+$ ,  $p^+ - i - n$ , созданные на основе легированного кремния атомами марганца, хрома, кобальта и технология их изготовления (Справка ассоциации «Uzeltexsanoat» выданная 22 декабря 2021 г., №04-3/2716); Использование полученных результатов позволило измерять и поддерживать постоянную температуру и влажность на складе готовой продукции, что позволило контролировать условия обеспечения сохранности качества изделий, производимых АО «Фотон».

Полученные результаты использованы в фундаментальном проекте ФА – ФЗ – 004 «Изучение фундаментальных новых физических моделей, механизмов, способов для формирования высокоэффективных, дешевых фотопреобразователей, а также долговечных фотоэнергетических установок на их основе» технология получения силицидов на основе кремния, легированного атомами металлов, физический механизм прохождения тока в структурах силицид-полупроводник-силицид, синтез полупроводниковых силицидов с оптимальными термоэлектрическими и фотоэлектрическими свойствами. (Справка №2/1255-895 от 18 апреля 2022 г., выданная президиумом АН РУз). Использование полученных результатов позволило создать высокоэффективных, дешевых фотопреобразователей.

**Апробация работы.** Результаты данного исследования были доложены и апробированы на 11 международных и 13 республиканских научных конференциях.

**Опубликованность результатов.** По теме диссертации опубликовано 57 научных работ, из них 15 статьи в журналах, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, 156 списка используемой литературы, списка опубликованных работ. Работа содержит 194 страниц машинописного текста, включая 73 рисунков и 7 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

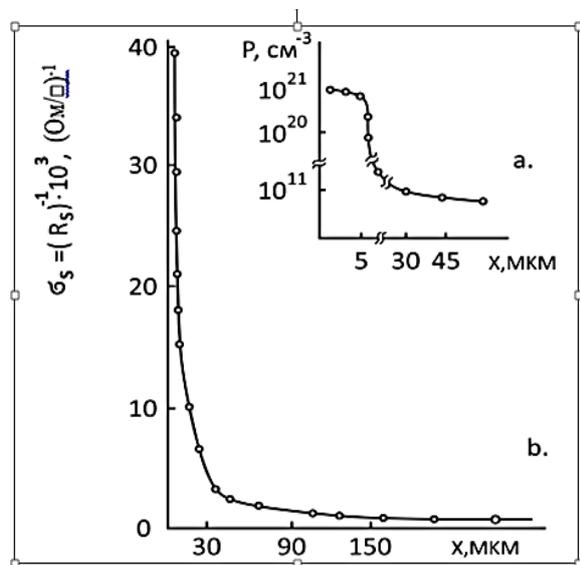
**Во введении** диссертации всесторонне обоснованы актуальность и востребованность её темы, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологии в республике, приведен обстоятельный обзор международных научных исследований по теме диссертации и степень изученности, рассматриваемые в диссертации проблемы. Проведен анализ современного состояния проблемы и обоснована актуальность темы исследования, научная новизна направления, изложены цель работы и основные задачи для решения данной проблемы, научная и практическая ценность проведённых исследований.

В первой главе **«Концентрационное распределение примесей, создающих глубокие уровни в кремнии»** посвящена анализу концентрационного распределения примесей, создающих глубокие уровни в кремнии. Рассмотрена природа образования приповерхностного участка в процессе диффузионного легирования кремния атомами металла как из нанесенного слоя, так и из газовой фазы. Проанализированы литературные данные по силицидам металлов и рассмотрены их электрофизические и кинетические параметры. В конце главы приведены задачи исследований данной диссертационной работы.

Во второй главе **«Методы получения и исследования легированного кремния и структуры на его основе»** приводится методика легирования кремния элементами, создающими глубокие уровни, методика определения распределения проводимости легированных образцов, погрешности в измерениях электрофизических параметров, методика измерения коэффициента Холла для неоднородно легированных полупроводников, методика для исследования кинетики фотопроводимости и измерения времени жизни неосновных носителей тока по спаду фотопроводимости в кремнии, методика определения неоднородностей в кремнии, легированном атомами металлов, световым зондом.

В третьей главе **«Исследование электрических и гальваномагнитных свойств приповерхностного слоя диффузионно-легированного кремния»** приведены экспериментальные результаты по исследованию гальваномагнитных свойств диффузионно-легированного кремния, марганцем, хромом и кобальтом. Показано, что в процессе диффузионного легирования исходного кремния, независимо от типа проводимости,

концентрации мелкой примеси и скорости охлаждения образуется низкоомный приповерхностный слой с проводимостью р-типа, с концентрацией носителей тока  $10^{20} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$  и холловской подвижностью  $1 \div 17 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  (рис.1).



**Рис.1. Распределение концентрации носителей тока (а) и распределение поверхностной проводимости (б) р – Si<Mn> (Т=300К)**

Приведенные экспериментальные результаты показывают, что характер распределения величины поверхностной проводимости по толщине приповерхностной области повторяет характер профиля концентрационного распределения марганца, хрома и кобальта, в этой области, полученного из радиоактивных измерений.

Комплексные исследования (холловские, фотоемкостные, фотоэлектрические) показали, что марганец, хром и кобальт в кремнии образуют уровни, приведенные в табл. 1.

Исследования в n-Si<Mn> показали, что концентрация

электроактивных атомов марганца не зависит от концентрации мелких доноров, и ее максимальное значение составляет  $\sim 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Зависимости удельной проводимости и коэффициента Холла от температуры для этих образцов показали, что во всех случаях наблюдается донорный уровень с энергией ионизации  $E_c - 0,24 \text{ эВ}$ , что подтверждает данные Бахадырханова М.К. и др.

Для определения поведения марганца в p-Si проводилась диффузия Mn в p-Si с различным содержанием бора ( $10^{14} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) при одинаковых режимах легирования ( $T=1100^\circ\text{C}$ , время 40 мин, скорость закалки  $\sim 100$  град/с). Как показали результаты электрических и гальваномагнитных измерений, концентрация электроактивных атомов Mn увеличивается с ростом концентрации бора, при этом максимальная концентрация достигает  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Показано, что между величинами диффузионных параметров, растворимости в узлах и междоузлиях кристаллической решетки, а также положением энергетических уровней примесных атомов и их положением в периодической системе имеется определенное соответствие. Соблюдение этих правил можно наблюдать в поведении примесных атомов 3d – элементов в кремнии: Sc-Ti-V-Cr-Mn-Fe-Co-Ni-Cu-Zn. Коэффициенты диффузии D этих элементов при максимально возможных температурах отжига не ниже  $10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ . Зависимость D от T для всех примесей описывается выражением:  $D=D_0 \exp(-\Delta E/kT)$ . Растворимость N этих примесей в кремнии не превышает  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Коэффициент диффузии для рассматриваемых примесей значительно больше, чем для примесей с мелкими уровнями. Показано противоречие между донорными свойствами Mn, Cr, Co и дырочным характером проводимости исходного кремния), а также между величиной растворимости Mn, Cr, Co в кремнии при температуре диффузионного насыщения и концентрацией этих элементов вблизи поверхности, превышающей растворимость на 2-4 порядка.

Для выяснения причины этого противоречия исследовались температурные зависимости тока через образцы Si<Mn>, после послойного удаления приповерхностной области (рис.2).

Таблица 1

Элементы	Энергетические уровни в запрещенной зоне (в объемной части) легированного кремния
Mn	$E_c - (0,3 \pm 0,02)$ эВ; $E_c - (0,41 \pm 0,02)$ эВ; $E_c - (0,53 \pm 0,03)$ эВ
Cr	$E_c - (0,22 \pm 0,02)$ эВ; $E_c - (0,55 \pm 0,03)$ эВ; $E_v + (0,31 \pm 0,02)$ эВ; $E_v + (0,39 \pm 0,02)$ эВ;
Co	$E_c - (0,22 \pm 0,02)$ эВ; $E_c - (0,37 \pm 0,02)$ эВ; $E_c - (0,53 \pm 0,03)$ эВ; $E_v + (0,1 \pm 0,02)$ эВ; $E_v + (0,3 \pm 0,02)$ эВ

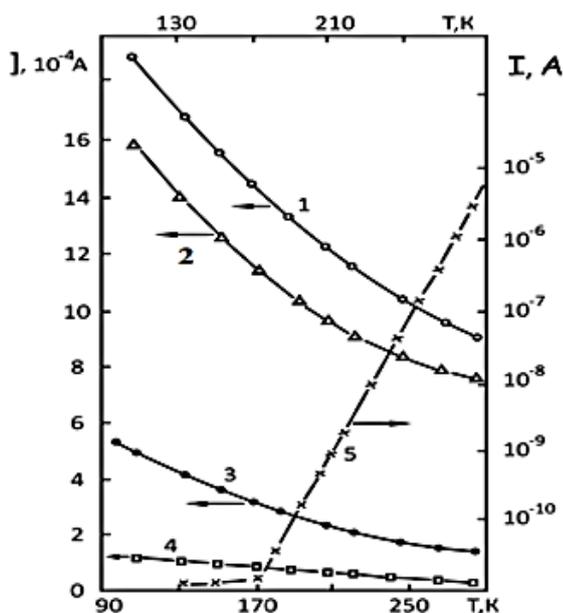


Рис.2. Температурная зависимость тока через Si<Mn> от толщины снятого слоя:

0 мкм (исходный) 2-0 мкм 1-(после травления в HCl); 2-3-10 мкм; 4-20 мкм; 1÷4 – 2 В/см.

Показано, что поверхность кристалла обладает металлической проводимостью, постепенно переходящее на полупроводниковую по мере удаления слоев. Исследованиями температурных зависимостей электропроводности установлено, что электропроводность возрастает с понижением температуры. Температурный ход проводимости объяснен рассеиванием носителей тока на фонах и на ионах примеси.

Для выявления зависимости электрофизических свойств от степени компенсации были изготовлены перекомпенсированные n-Si<Mn> и компенсированные p-Si<Mn> с различной степенью компенсации ( $k=0,3 \div 0,99$ ). Исследования показали, что в слабо компенсированном n-

Si<Mn> наблюдается уровень  $E_c-0,24\text{эВ}$ , а с ростом «к» энергия ионизации уровня увеличивается и достигает значения  $E_c-0,33\text{эВ}$ . В сильно компенсированных образцах n-Si<Mn> наблюдается еще один донорный уровень, энергия ионизации которого также зависит от «к» и лежит в интервале  $E_c-(0,42\div 0,53)\text{эВ}$ .

Для объяснения экспериментальных результатов предполагается, что в Si<Mn> образуются кластерные скопления положительно заряженных ионов Mn, тогда Si<Mn> можно рассматривать как неоднородный материал, содержащий крупные изолирующие включения, погруженные в сравнительно однородную массу. Особенности электрофизических свойств Si<Mn> (образование спектра энергии ионизации Mn, увеличение концентрации  $\text{Mn}^+$  с ростом концентрации бора и так далее) дают основание считать, что ядрами таких кластеров являются отрицательно заряженные атомы бора или вакансии, связывающие вокруг себя от 2 до 4 ионизованных междоузельных атомов марганца. При  $k \geq 0,9$  происходит перекрытие области объемных зарядов кластеров (концентрация кластеров  $\geq 10^{12}\text{см}^{-3}$ ) и кластеры будут действовать не как центры рассеяния, а как макроскопические, обтекаемые током включения.

Для определения неоднородности использовали локальный фотозондовый метод и метод малоуглового рассеяния лазерного излучения. Эти методы позволяют с высокой точностью определить неоднородные участки, особенно области с большими градиентами проводимости.

Методом локальной фотоэдс исследовались неоднородности в исходных, термообработанных и контрольных кристаллах кремния и легированных кристаллах Si<Mn>, Si<Cr>, Si<Co> имеющие форму прямоугольного параллелепипеда различных размеров:  $(0,3 \div 0,5) \times (0,3 \div 1,6) \times (0,5 \div 1,6)\text{см}^3$ .

На рис.3. представлены результаты светового сканирования для типичных образцов n-Si<Mn> при облучении светом с длиной волны  $0,63\text{мкм}$ , после снятия слоя толщиной  $3-5\text{мкм}$  с поверхности. Из рисунков видно, что фотосигнал изменяется от точки к точке не монотонно.

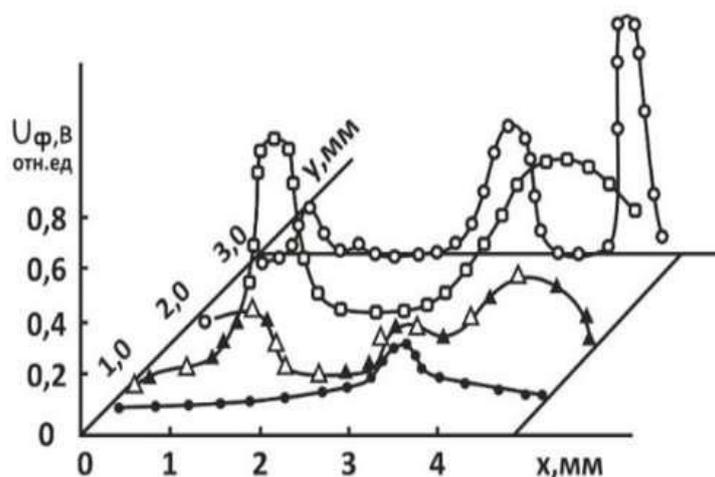


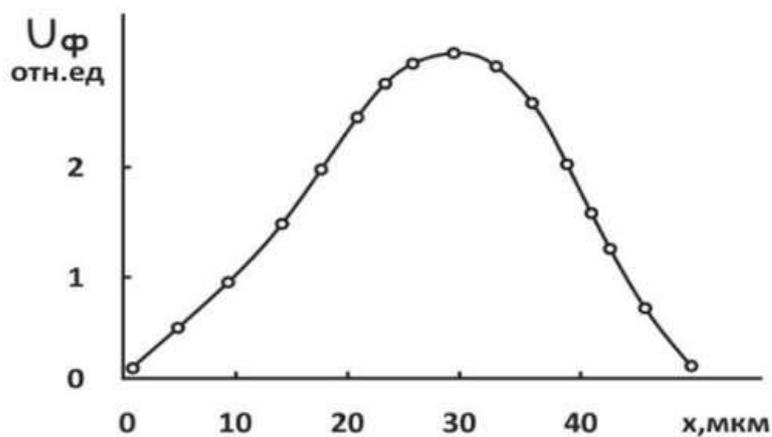
Рис. 3. Спектр фотоЭДС от поверхности образца n-Si<Mn>  $T=300\text{К}$ ,  $\lambda=0,63\text{мкм}$ .

Измерения показали, что плотность спектра фотоэдс уменьшается с увеличением толщины снимаемого слоя во всех кристаллах Si<M>. Результаты исследования показывают, что на поверхности происходит образование новой фазы. Такая фаза растет на ориентирующей подложке с учетом ее атомов и закономерно продолжает кристаллическую решетку подложки.

Зависимость величины фотоэдс от толщины приповерхностного слоя приведена на рис.4. Из рисунка видно, что сигнал фотоэдс по мере удаления слоя до глубины ~25 мкм увеличивается, а далее в узкой области имеет насыщение и с ~30 мкм плавно уменьшается и полностью исчезает после удаления свыше 45÷50 мкм.

Показана возможность определения внутреннего электрического поля в неоднородной области легированного кристалла по методике Тауца. Установлен, что в кристалле n-Si<Mn> при подаче внешнего электрического поля  $E_e=0.9\div 1.2$  В/см внутреннее электрическое поле имело значение  $E_i=1.8$  В/см.

Предложена модель структуры приповерхностной области диффузионно-легированного кремния хромом, марганцем и кобальтом. Приповерхностная область компенсированного кремния представляет собой большое число диодов Шоттки (пар), включенных параллельно-последовательно, со слоем компенсированного кремния между ними.



**Рис. 4. Зависимость величины фотоэдс от толщины приповерхностного слоя n-Si<Mn>.  $T = 300$  К,  $\lambda = 0,63$  мкм.**

Такая модель определяется островковым характером второй фазы, расположенных на глубине ~3÷45 мкм от поверхности. Это подтверждается и максимумом величины фотоэдс на глубине ~25÷30 мкм, где по-видимому, существует оптимальное соотношение между числом островков (включений) и их поверхностью, дающее максимальную суммарную поверхность границы кремний – включения второй фазы.

В четвертой главе «Исследование структуры и состава приповерхностного слоя диффузионно-легированного кремния» рассмотрены физико-химические характеристики приповерхностных слоев и

границы раздела металл – кремний диффузионно-легированного кремния атомами хрома, марганца и кобальта.

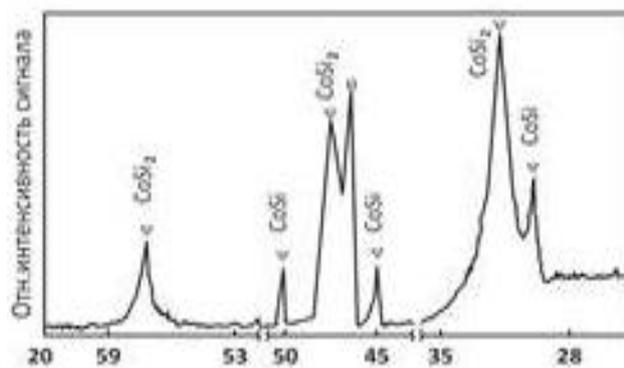
Исследования растровым электронным микроскопом (РЭМ-200) показали, что на поверхности образца существуют блочные структуры и между ними имеются межфазные границы. Разрешение в РЭМ зависело от атомного номера легируемого элемента и достигало  $\sim 100$  Å. Оценка поперечного размера между блоками показали, что он имеет порядка 1000 Å.

Изучались такие образцы на инфракрасных микроскопах типа МИК-1 и МИК-4. Установлено, что на поверхности легированного образца образуются сплошные структуры непрозрачные для инфракрасных лучей. При снятии с поверхности слоя толщиной более 3 мкм наблюдается сеточная структура (рис.5) т.е. чередующиеся прозрачные и непрозрачные области для ИК-лучей.

На рис.6. представлена дифрактограмма кремния с кобальтом после термодиффузии при температуре  $980^{\circ}\text{C}$  в течении 30 мин. Из рисунка видно, что наблюдаются острые пики дисилицида кобальта, что показывает образование силицида на кремниевой подложке в процессе химической реакции стимулированным теплом. Аналогичная дифрактограмма была получена и для кремния диффузионно-легированного хромом и марганцем.



**Рис.5. Микрофотография полупроводниковых силицидов на поверхности кристалла (увеличение 1400 х).**



**Рис.6. Рентгеновская дифрактограмма кремния с кобальтом.  $T = 980^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 30$  мин.**

Установлено, что структура силицидов металлов и природа их образования зависят от температуры диффузии, количества диффундирующих атомов, скорости охлаждения и глубины вакуума.

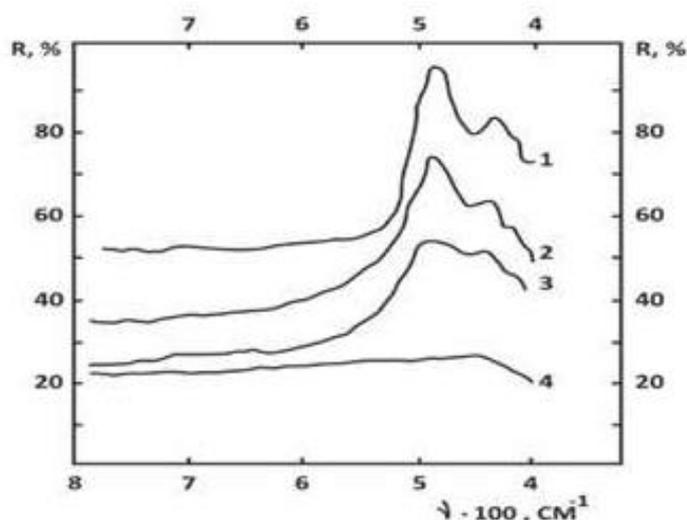
Для получения информации о структуре исследуемой фазы, поверхности диффузно-легированного кремния, измеренные спектры отражения идентифицируются через спектры возможных известных фаз для кремния. Спектры отражения от образцов кремния, легированных марганцем, хромом и кобальтом измерены в интервале  $2\div 25$  мкм на приборе UR-20.

Образцы для измерения оптическим методом представляли собой прямоугольный параллелепипед с размером  $2\times 5\times 10$  мм<sup>3</sup>.

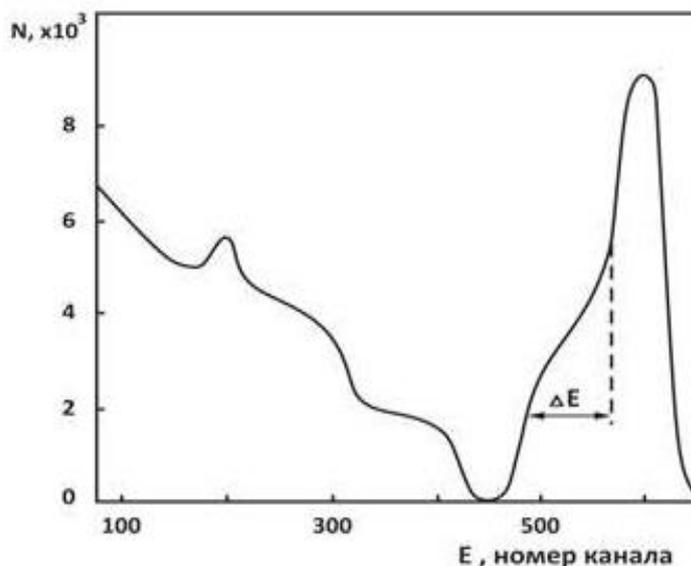
На рис.7. приведена спектральная зависимость коэффициента оптического отражения, измеренная по методике Зайцева В.К. для кремния, легированного марганцем.

Отсюда видно, что на поверхности кристалла образуются фазы высшего силицида марганца. Для выяснения толщины силицидного слоя измерялся коэффициент отражения при послойном снятии слоев с поверхности образцов (рис.7, кривые 2,3,4 )

Измерения показали, что характерные пики спектров коэффициента отражения исчезают при снятии слоя  $\sim 50$  мкм. Исследования показали, что глубина образуемых силицидных слоев зависит от кристалла, количества диффузанта, температуры отжига, времени диффузии, скорости охлаждения и глубины вакуума.



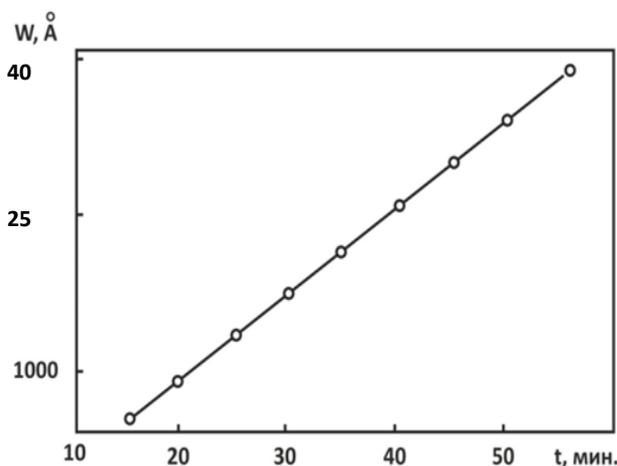
**Рис.7.** Спектральная зависимость коэффициента отражения образца 1-спектр отражения поликристаллического образца ВСМ; 2-для полированной исходной поверхности; 3-после снятия с поверхности слоя толщиной 10 мкм; 4-после снятия 50 мкм; Шкала оси ординат сдвинута вниз на 10% для кривых 2 и 3, на 15% для кривой 4.



**Рис.8.** Энергетический спектр обратного рассеяния ионов для образца Si<Mn> отожженного при температуре 1050 °С в течение 60 мин.

На рис.8 приведен спектр обратного рассеяния ионов для образца Si<Mn> отожженного при температуре 1050 °С в течении 60 минут. Расшифровка спектра показывает образование высшего силицида марганца.

При температуре отжига кристалла с силицидом хрома выше 450°С рост силицида имеет линейную зависимость от времени отжига (рис.9.). Толщина силицида определяется по следующей формуле:



**Рис.9. Зависимость толщины силицидного слоя от времени отжига при T=450 °С для CrSi<sub>2</sub>**

$$W = [V \exp(-E_a/kT)] t \quad (1)$$

где V — постоянная, E<sub>a</sub> — средняя энергия активации процесса роста, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, t - время отжига. По графикам Аррениуса определена энергия активации процесса образования фаз, которая равнялась E<sub>a</sub> = 1.5±0.1 эВ.

Для измерения размеров силицидных включений методом модуляции рассеянного излучения использовались бездислокационные слитки монокристаллического кремния диаметром — 65 ÷ 110 мм, выращенные методом Чохральского, с ρ = 10<sup>4</sup> Ом · см, т.к. этим методом впервые изучались такие кристаллы.

Исследования высокочистых нетермообработанных бездислокационных образцов кремния методами электронной микроскопии, рентгеновского микроанализа и малоуглового рассеяния излучения CO<sub>2</sub> — лазера выявлено, что в них обнаружено три вида дефектов: свирловые дефекты, примесные микровключения и примесные облака.

Свирловые дефекты зарождаются гетерогенным механизмом и расположены слоисто. Концентрация таких дефектов составляет 10<sup>6</sup>÷10<sup>8</sup> см<sup>-3</sup>. Подбирая скорость охлаждения при выращивании кремния можно избавиться от такого типа дефектов.

Вторым типом дефектов является примесное микровключение, наблюдаемое методом рентгеновского микроанализа на свежих сколах. В состав микровключений входят примеси углерода, кальция, фосфора, хлора, алюминия, натрия и некоторые другие. Микровключения имеют размеры от долей микрона и выше и концентрацию ~ 10<sup>7</sup> см<sup>-3</sup>. Предполагается, что эти примеси захватываются растущим монокристаллом из расплава. В высокочистом кристалле, недосыщенном по примесям, входящим в состав микровключения, может идти их частичное растворение. При этом медленно диффундирующие примеси будут образовывать вокруг включений скопления, размером порядка 10 мкм. Такие локальные области с повышенной

концентрацией растворенной примеси называются примесными облаками. Такие дефекты обнаружены методом малоуглового рассеяния излучения  $\text{CO}_2$  лазера с  $\lambda = 10.6$  мкм.

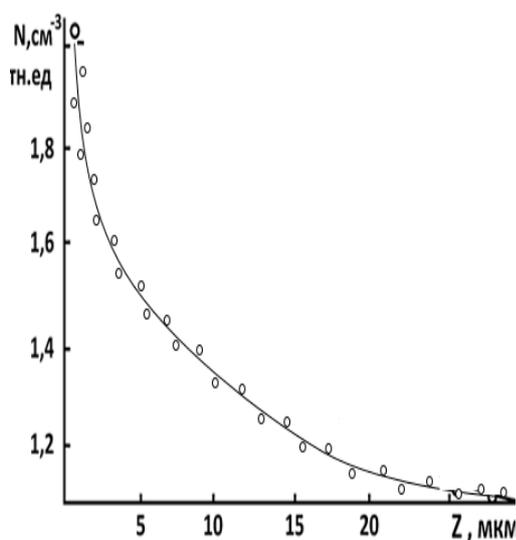
Таким образом, предлагаемые методы контроля уровня однородности кремния при наличии микродефектов структуры могут применяться в производстве бездислокационного кремния большого диаметра, из которого создаются сверхбольшие схемы и полупроводниковые приборы.

Метод малоуглового рассеяния излучения  $\text{CO}_2$  - лазера был применен для определения силицидных островков в приповерхностном слое кремния, диффузионно - легированного марганцем, хромом и кобальтом. Измерения показали, что в приповерхностном слое образуются силицидные включения размерами  $8 \div 20$  мкм.

На рис.10. показана зависимость концентрации силицидных включений от расстояния (вглубь кристалла). Из рисунка видно, что в приповерхностном слое кремния толщиной  $\sim 3$  мкм силицидные включения имеют насыщение, т.е. образуется сплошная пленка. На глубинах от 3 до 30 мкм концентрация включений уменьшается плавно.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что атомы Cr, Mn, Co в кремнии обладают повышенной реакционной способностью: на поверхности легированных кристаллов не обнаруживаются металлические фазы хрома, марганца и кобальта.

На поверхности образуются моно -, ди - высшие силициды металлов в случае диффузионного легирования кремния из газовой фазы. Аморфная фаза наблюдалась в приповерхностном слое толщиной  $3 \div 10$  мкм. На глубине  $10 \div 50$



**Рис.10. Зависимость поверхностной концентрации силицидных включений от глубины кристалла.**

мкм наблюдались различные силициды в разных образцах: для  $\text{Si}<\text{Mn}>$  наблюдалась преимущественно высший силицид марганца, для  $\text{Si}<\text{Cr}>$  — моно и дисилициды хрома, а для  $\text{Si}<\text{Co}>$  - преимущественно дисилицид кобальта. При снятии с поверхности образцов слоя толщиной более 50 мкм не были обнаружены силициды вышеуказанных металлов.

Изучение кинетики роста фазы силицидов по поперечному разрезу образцов в случае отжига напыленного марганца на кремнии показало, что зависимость толщины силицидного слоя ( $W$ ) от времени отжига ( $t$ ) является параболической (рис.11.). При меньших значениях  $t$  эта зависимость нарушается (рис.11. участок АВ), что, по-видимому,

связанно с лимитированием скорости реакции образования силицидов. Слои

формируются по толщине пропорционально квадратному корню от времени (участок BC). Толщина слоя силицида  $W$ , формирующегося за время  $t$ , определяется выражением

$$W = \{ [ B \cdot \exp(-E_a/kT) ] \}^{1/2} \quad (2)$$

В образовании слоя  $CoSi$  и  $Co_2Si$  тоже установлена такая же  $t^{1/2}$  - зависимость фазового роста. А в случае  $CrSi_2$  обнаружена линейная зависимость от времени (рис.9.), предполагающая взаимодействие со скоростью, определяемой состоянием границы раздела. Величину коэффициента диффузии  $D$  можно рассчитать из наклона линий временных зависимостей  $W$ .

Энергию активации процесса образования фаз можно определить из зависимости коэффициента диффузии от обратной температуры. Величины энергии активации составляют для  $CrSi_2$  1,5 эВ, для  $Co_2Si$  1,5 эВ, для  $CoSi$  1,9 эВ, для  $MnSi_{1,75}$  1.4 эВ. Анализ полученных результатов показывает, что при образовании силицидов вначале образуются силициды, богатые атомами металлов. а далее моносилициды металлов в случае диффузионного легирования кремния из газовой фазы. А в случае напыление слоя металлов на поверхность кремния, на границе кремния и металла после термоотжига образуется силицид металла.

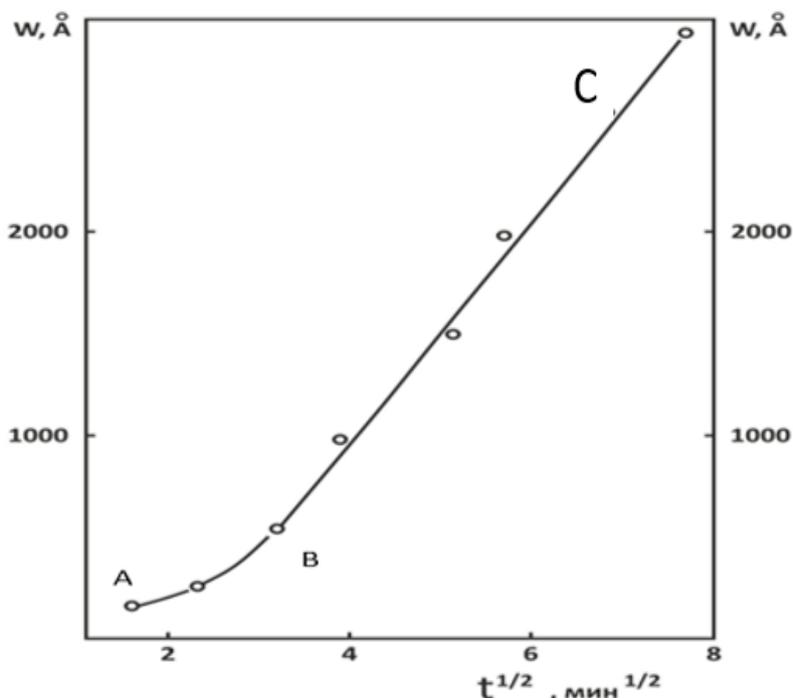


Рис.11. Зависимость толщины слоя ВСМ от времени отжига.

В пятой главе диссертации «Исследование механизма токопрохождения через силициды металлов и структур на их основе» приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования

электрофизических свойств силицидов хрома, марганца и кобальта и структур на их основе.

Силициды металлов изготовлены так: при высоком вакууме (не ниже  $10^{-7}$  мм. рт. ст.) металл напыляется на поверхность кремния толщиной  $1200 \div 2000$  Å и отжигается в кварцевых ампулах при  $T = 900 \div 1100^\circ\text{C}$ .

Типичные температурные зависимости электропроводности для силицидов хрома приведены на рис.12.

Из рисунка видно, что как для  $\text{CrSi}$ , так и для  $\text{CrSi}_2$  наблюдается три участка. Первый участок-область температур  $-200^\circ\text{C} \div +150^\circ\text{C}$ , где электропроводность линейно уменьшается с ростом температуры. Второй участок - область температур  $150 \div 250^\circ\text{C}$ , где электропроводность почти не меняется. Третий участок-область температур  $250 \div 500^\circ\text{C}$ , где электропроводность линейно растет с ростом температуры. На первом участке силицид хрома ведет себя подобно металлу, обладая отрицательным температурным коэффициентом.

На третьем участке температурная зависимость силицида хрома подобна полупроводнику (положительный температурный коэффициент). Электропроводность моносилицида хрома примерно в 6 - 7 раз больше, чем у дисилицида, что объясняется различием количества носителей заряда.

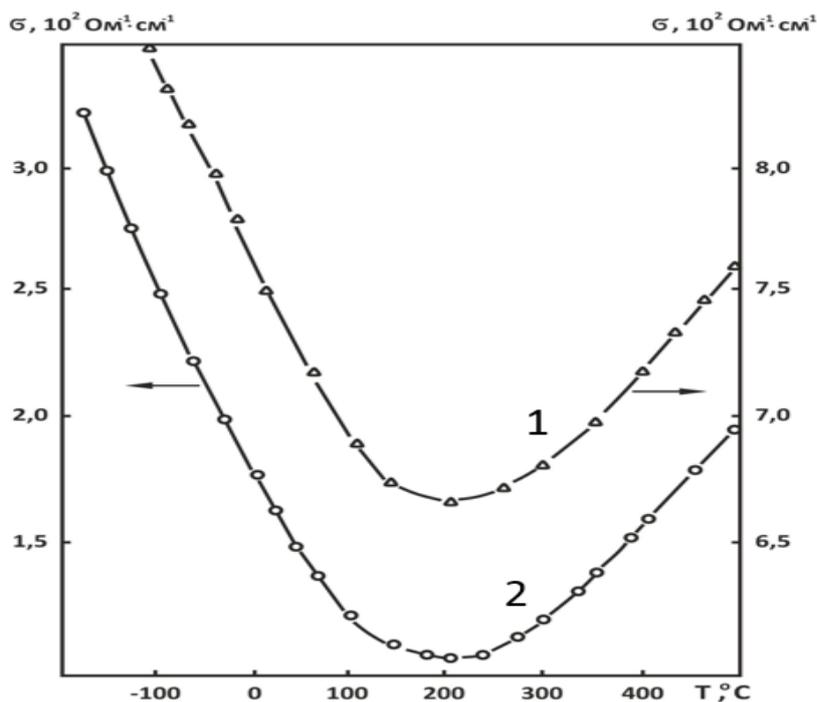


Рис.12. Температурная зависимость электропроводности силицидов хрома: 1-для  $\text{CrSi}$ ; 2 – для  $\text{CrSi}_2$

Спад электропроводности на первом участке обусловлен усилением рассеяния электронов на фононах решетки, на границах кристаллических зерен, на несовершенствах кристалла, на ионах примеси и так далее. Надо отметить, что в различных температурных областях роль столкновений различного рода неодинакова. В наших кристаллах основную роль играет

рассеяние на колебаниях атомов решетки и на границах кристаллических зерен.

Температурные зависимости электропроводности для силицидов марганца и кобальта показывают монотонное уменьшение электропроводности с повышением температуры. В исследованном интервале температур значения электропроводности изменяются в 2 – 3,5 раза. Температурные коэффициенты изученных силицидов близки к наблюдаемому для металлов. Различие в значениях электропроводности различных силицидов объясняется различным содержанием в них носителей тока. Уменьшение электропроводности с ростом температуры объясняется увеличением рассеяния на фононах и на границах кристаллических зерен, что приводит к уменьшению подвижности носителей тока.

Изготовлены Шоттки диоды на основе контакта силицид хрома — кремний с использованием монокристаллического кремния n -типа, выращенного методом Чохральского с концентрацией мелкой примеси  $(2 \div 9) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Показана возможность получения диода Шоттки при диффузионном легировании кремния марганцем, хромом и кобальтом на границе силицида и кремния. Установлены основные параметры диода Шоттки: высота барьера ( $\phi_{bn}$ ), коэффициент идеальности ( $n$ ), толщина слоя ( $d$ ) и плотности поверхностных состояний ( $D_s$ ).

Проведен микроскопический анализ физических явлений в системе и обоснована реальность модели многоступенчатого переноса зарядов в барьере.

Было определено количество шагов и энергетический барьер между шагами в многоступенчатом туннелирующем механизме.

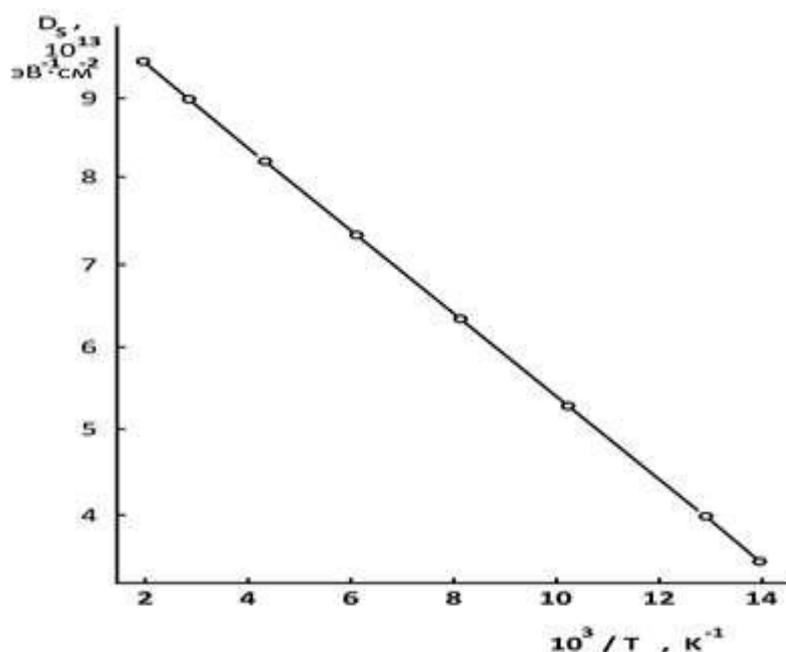


Рис.13. Температурная зависимость величины плотности поверхности состояний диода Mn Si<sub>1.75</sub>/n-Si

Выявлено влияние освещения и температуры на параметры барьера Шоттки на основе силицида. Определено влияние поверхностных электронных состояний на параметры диода Шоттки.

Полученная температурная зависимость плотности поверхностных состояний представлена на рисунке 13.

Показано, что преобладающим механизмом переноса тока является туннелирующий механизм. Предложена возможность создания  $p^+ - i - p^+$  структуры на основе диффузионного легирования кремния хромом, марганцем и кобальтом. Создана зонная диаграмма структуры с учетом параметров: удельного сопротивления  $\rho(x)$ , уровня Ферми ( $E_F$ ), работы выходов силицида и полупроводника  $\Phi_c, \Phi_p$ , концентрации электронов и дырок ( $n, p$ ). Определено, что контактная разность потенциалов на границе силицид-полупроводник составляет  $0,2 \div 0,25$  эВ при  $\Phi_c > \Phi_p$ .

Исследована ВАХ структур силицид-полупроводник-силицид с различными длинами баз в зависимости от температуры и освещенности. Проведен анализ инжекционного усиления фотосигнала при прямом смещении и показано обеспечение усиления первоначального фототока за счет инжектированных носителей через переход силицид—полупроводник.

Шестая глава диссертации «**Исследование термо и фотоэлектрических свойств силицидов и структур на их основе**» посвящена исследованию термо- и фотоэлектрических свойств силицидов хрома, кобальта и марганца, а также термостимулированных проводимостей структур силицид-компенсированный кремний-силицид.

Кривые термостимулированного тока представляют собой график зависимости темнового тока от температуры образцов, предварительно облученных при низкой температуре. Захваченные ловушками носители тока, которые образуются за счет излучения, освобождаются при нагревании и участвуют в электрическом токе. Этот эффект необратим: электрический ток не течет при повторном охлаждении.

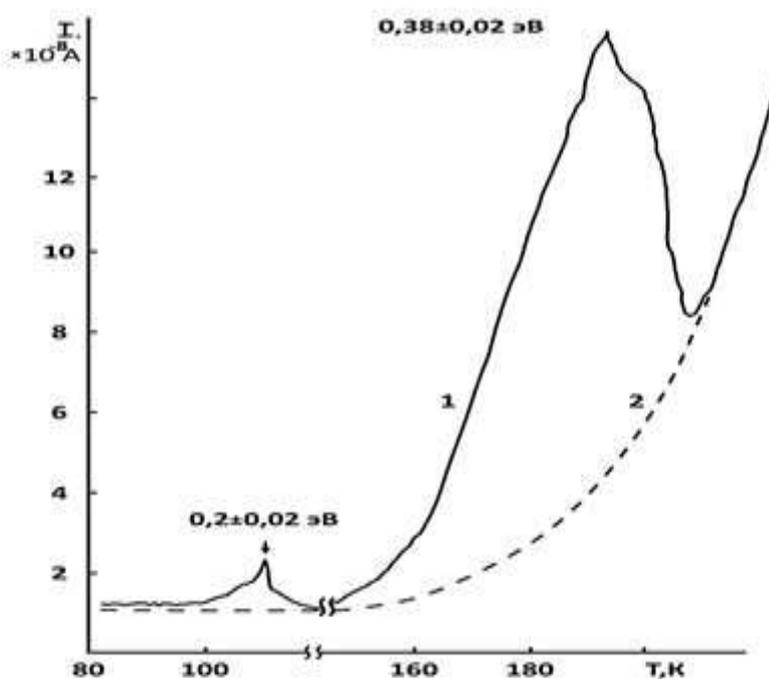
Сочетание низкоомного силицида слоя высший силицид марганца с высокоомной компенсированной областью Si<Mn> дало возможность создать структуры высший силицид марганца - Si<Mn> - высший силицид марганца и высший силицид марганца - Si<Mn> - М. Блокирующий контакт создавался путем нанесения сплавов NiGa или AlGa на боковую поверхность базовой области структур, или прижимным металлическим контактом на эту же поверхность. Таким образом, чтобы площадь этих контактов не превышала площадь высший силицид марганца. Для определения глубины залегания ловушек исследована термостимулированная проводимость, используемая в качестве независимой методики. Термостимулированная проводимость высший силицид марганца - Si<Mn> - М структуры приведены на рис.14.

При исследовании термостимулированной проводимости при больших приложенных напряжениях были обнаружены пики с малым значением тока в области  $T = 109$  К с  $E_{t1} = 0,2 \pm 0,02$  эВ и с большим значением тока в области

$T=190$  К с  $E_{12} = 0,38 \pm 0,02$  эВ. Образцы были охлаждены до температуры жидкого азота и освещены в электрическом поле. В результате освещения образовались свободные заряды, значительная часть которых локализовались в ловушках.

Если глубина последних достаточно велика, то заряды при низкой температуре не могут термически выйти из ловушек. Затем образец, находящийся под напряжением нагревался в темноте. Когда температура достигала значения, достаточного для термического возбуждения носителей из ловушек, возникал большой ток. Максимум тока соответствует некоторой критической температуре. После максимума ток спадает по мере выхода носителей из ловушек.

Мгновенный термостимулированный ток пропорционален скорости выхода носителей из ловушек. При слишком близком расположении энергетических уровней захвата пики термостимулированной проводимости могут сливаться. Чем глубже ловушка, тем выше критическая температура пика термостимулированной проводимости.



**Рис.14.** Зависимость термостимулированной проводимости от температуры для структуры высший силицид марганца –Si<Mn> - М при смещении  $U=60$ В.

**1-** термостимулированная проводимость; **2-**темновая температурная зависимость тока

Из графика термостимулированной проводимости для кристаллов Si<Cr> получено, что при интенсивности освещения в 10% концентрация ловушек равна  $7 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$ , сечение рекомбинационного захвата равна  $6 \cdot 10^{-20} \text{см}^2$ , при интенсивности 30%,  $N_t=2 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$ ,  $\sigma_n = 4.5 \cdot 10^{-20} \text{см}^2$ , при интенсивности 100%,  $N_t=2,5 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$ ,  $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-20} \text{см}^2$ .

На рис.15. приведены кривые релаксация затухания фотопроводимости для кристалла Si<Mn> после подачи импульса света через излучающий диод АЛ107Б при токе 10 мА. Как видно из рис.15. при температуре 77 К по мере

удаления слоев с приповерхностной области образцов, отношение светового тока к темновому ( $I_c/I_T$ ) увеличивается, а время спада до темнового значения тока также увеличивается до толщины снятого слоя  $\sim 20$  мкм, а дальнейшее послойное снятие приводило к его уменьшению, а при более 30 мкм кратность светочувствительности растет более чем на четыре порядка. Отсюда видно, что с увеличением толщины снятого слоя кратность светочувствительности увеличивается.

Сочетание низкоомного  $p^+$ -слоя с высокоомной  $i$ -области дало возможность создать структуру типа  $p^+ - i - p^+$

Структуру создавались методом удаления низкоомных слоев: отшлифовывали пять из шести сторон по 50-80 мкм. На эту не обработанную грань наносили металлические контакты с зазором как показано на рис.16 а, и в этих зазорах выполняли канавки стальной проволокой диаметром  $0,2 \div 0,3$  мм с суспензией микропорошка М-14 с целью получения  $p^+ - i - p^+$  структуры.

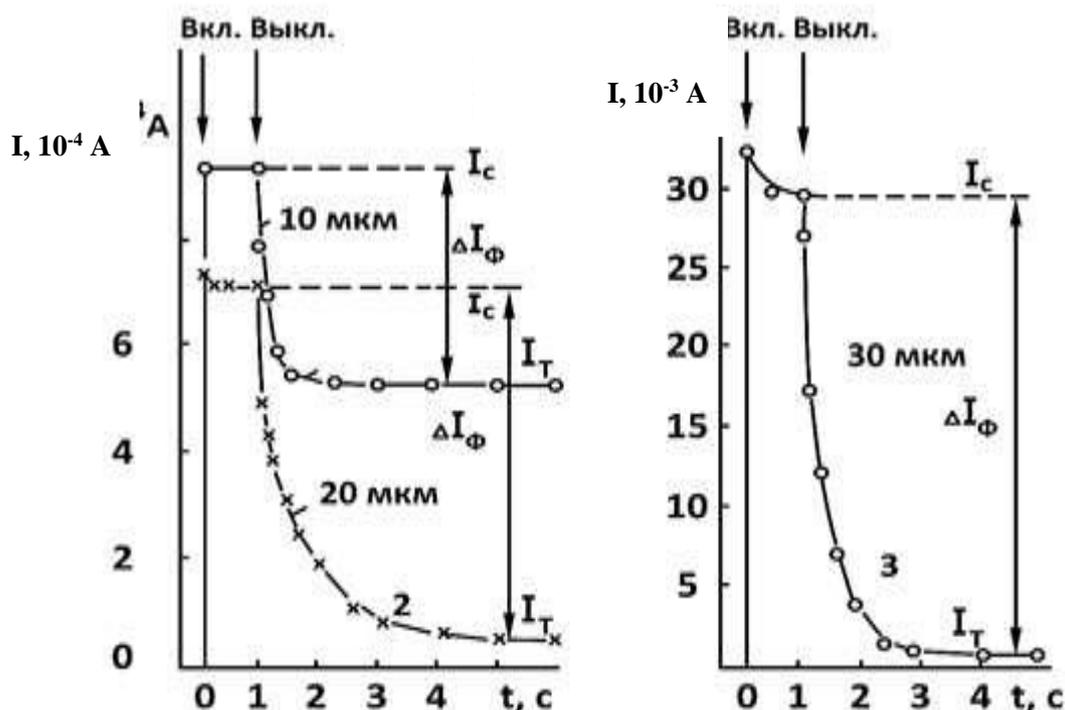


Рис.15. Релаксация затухания ФП в зависимости от толщины ( $\Delta t$ ) удаленного приповерхностного слоя  $Si<Mn>$  после освещения  $h\nu \geq E_g$ , при 77К. 1. $\Delta t=10$  мкм; 2. $\Delta t=20$  мкм; 3. $\Delta t=30$  мкм.

Размеры разрезания бруска канавкой приведены на рис.16 а, где: 1 – расстояние от края бруска до канавки  $1,5 \div 1,7$  мм, 2 – ширина канавки  $0,2 \div 0,3$  мм; 3 – толщина  $0,9 \div 1,9$  мм; 4 – ширина  $1,7 \div 2,7$  мм; 5 – линия среза; 6 – металлический контакт.

Металлические контакты создавались напылением алюминия или никеля при температуре подложки, не превышающей  $100$  °С.

Аналогичные структуры с большой длиной базы создавались следующим способом: удалением низкоомных слоев, кроме двух противоположных

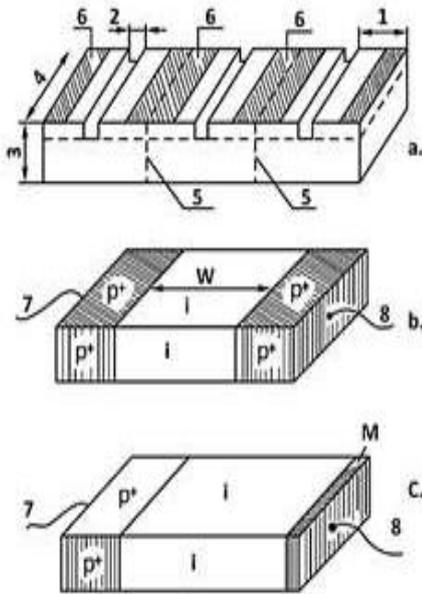


Рис.16. Геометрический вид  $p^+ - i - p^+$ ,  $p^+ - i - m$  структур. 1 -  $p^+$  - область, 2-канавка, 3-толщина структуры, 4- ширина структуры, 5-линия среза, 6-металлический контакт, 7,8 – токоотводящие электроды (проволоки из Al или Au или Cu)  $p^+ - VSM$ ,  $i - Si \langle Mn \rangle$ ,  $m - металл$ .

торцов легированного образца (рис.16 б). Размеры таких кристаллов были  $1 \times 3 \times 5 \text{ мм}^3$  и  $2 \times 2 \times 10 \text{ мм}^3$ . Такие структуры представляли из себя диэлектрический диод с толстой базой.

Кроме симметричных диодных структур были изготовлены и исследованы структуры с металлическим блокирующим контактом типа  $p^+ - i - m$  (металл). Эти структуры изготовлены на основе  $p^+ - i - p^+$  структур; блокирующий контакт создавался путем нанесения сплавов NiGa или AlGa на боковую поверхность базовой области структур (см.рис.16 в), или прижимным металлическим контактом.

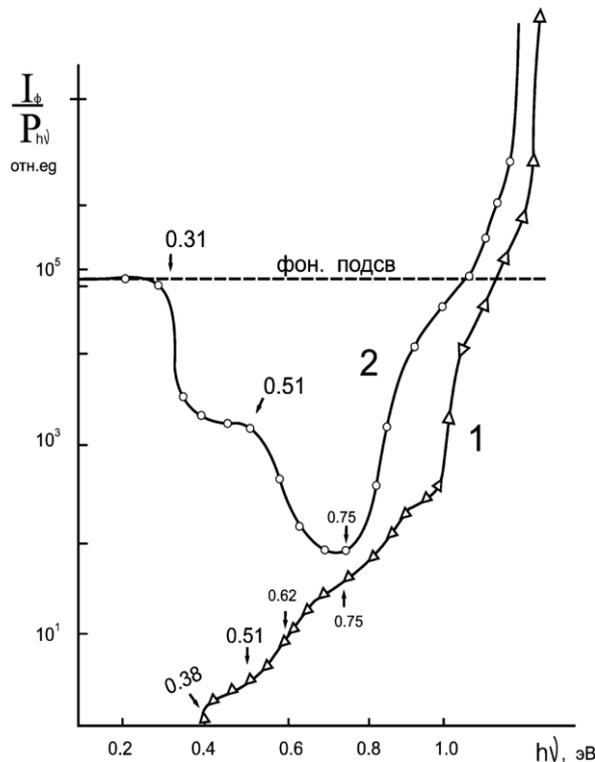


Рис. 17. Спектральная зависимость ФП  $p^+ - i - p^+$  структуры MnSi и ИКГ ФП 77 К: 1 – после засветки с  $h\nu \geq E_g$ ; 2 – ИКГ.

Для изучения анамального явление фотопроводимости исследованы инфракрасные гашения в  $p^+ - i - p^+$  и  $p^+ - i - m$  структурах. При комбинированном локальном освещении базовой области светом с энергией квантов  $h\nu \geq E_g$  светодиодом и при сканировании приконтактной области с  $h\nu = 0,2 \div 1,3$  эВ наблюдалось инфракрасное гашение фотопроводимости (ИКГ). Было обнаружено, что длинноволновая граница ФП равна 0,38 эВ и при энергиях 0,51; 0,62; 0,75 эВ обнаружен фотоответ (рис.17).

Исследованы релаксационные характеристики  $p^+ - i - p^+$  структур на основе силицида марганца. Кривые фоторелаксации от температуры  $p^+ - i - p^+$  структуры показывают, что величина спада фотопроводимости может уменьшаться на 5 порядков, при этом наблюдается своеобразная, немонотонная зависимость от температуры.

Анализ полученных зависимостей  $I(T)$  при постоянных значениях времени релаксации: 30, 60, 90, 120, 220, 360 сек. позволил выявить две ветви кривых с разным характером зависимости  $I(T)$  в области 80÷132 К рост  $I$  от  $T$ , а в области 132-165 – резкий спад. Построение этих кривых в координатах  $\ln I$  от  $T^{-1}$  К (рис.18) позволило получить соответственно два участка: прямых естественно с противоположными углами наклона, из которых были вычислены два значения так называемой эффективной энергии активации спада: на первом участке (80-132 К) возрастание  $I(T)$  с энергией  $E_1 = 1,2 \div 1,3$  эВ, а на участке спада  $E_2 = 3,2 \div 3,3$  эВ.

Нами исследовались также фотоэлектрические свойства поверхности

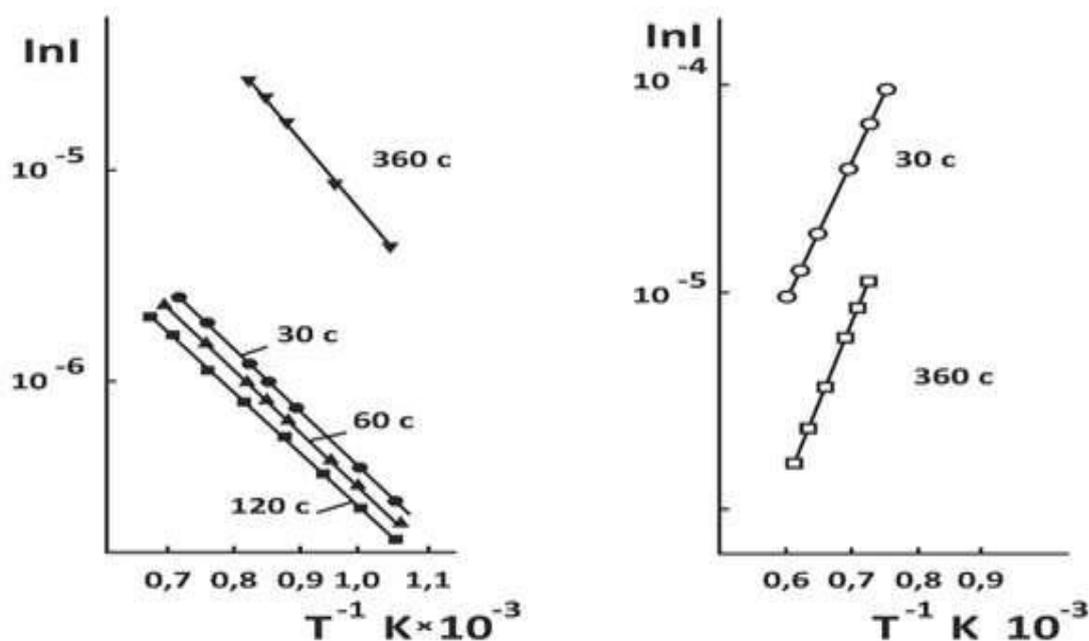
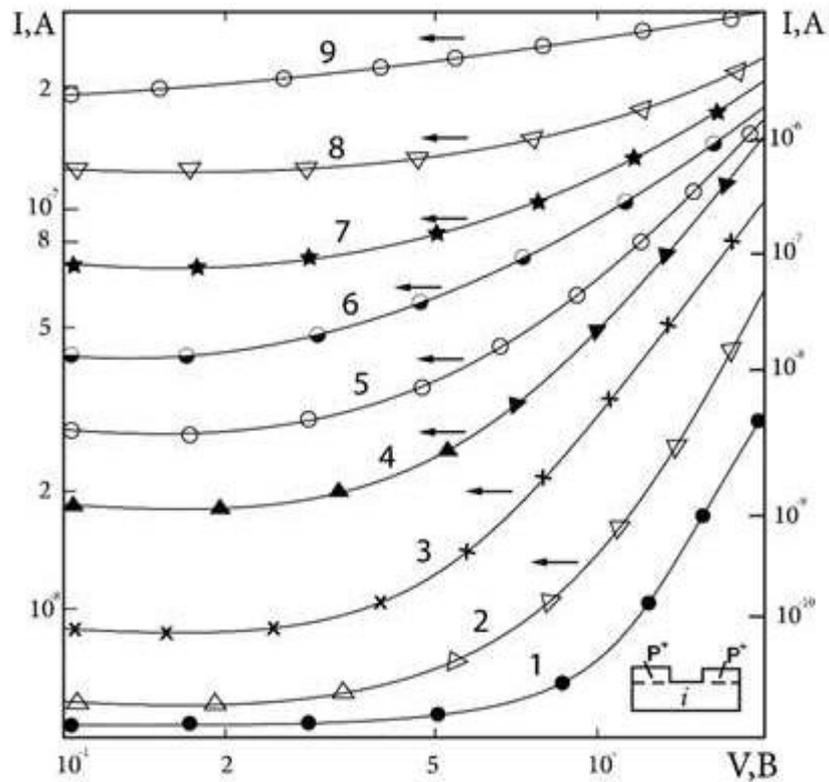


Рис. 18. Зависимость  $\ln I(T^{-1})$  для структур  $p^+ - i - p^+$  на основе силицида

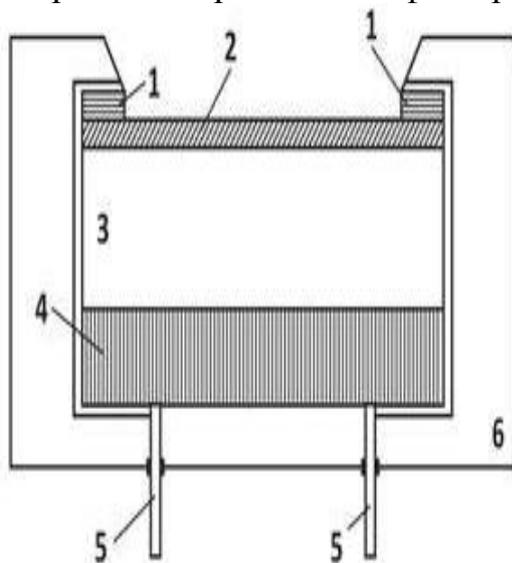
раздела силицид марганца-кремний. В образцах кремния, диффузионно-легированного марганцем механическим способом открывали канавку такого размера, чтобы была выявлена граница  $p^+ - i$  (вставка на рис. 19) затем наносили

контакты из AlGa на  $p^+$ - области. Далее образцы помещали в криостат с окном из  $\text{CaF}_2$  и облучали светом лампы накаливания. Типичные ВАХ образцов под действием освещения имели вид, приведенной на рис. 19.



**Рис. 19. Зависимость ВАХ от освещенности  $p^+ - i$  - переходов,  $V=5B$  1 – 0 Лк; 2-10 Лк; 3-100 Лк; 4-250 Лк; 5-500 Лк; 6-1000 Лк; 7-4000 Лк; 8-5000 Лк; 9-7000 Лк.**

Анализ результатов показал, что освещение образцов с интенсивностью  $10 \div 7000$  Лк с открытой стороны канавки приводит к смещению ВАХ вверх по шкале токов. Как показали результаты измерений, при увеличении освещенности протяженность низковольтного участка тока насыщения увеличивается с одновременным ростом тока фотопроводимости.



**Рис.20. Сэндвич – фоторезистор на основе силицидов металлов  
1 –  $p^+$  - область; 2 –  $p$  - область;  
3 –  $i$  - область; 4 – изолятор;  
5 – электроды; 6 – корпус.**

При больших напряжениях ( $>5V$ ) отмечается более слабое влияние освещенности и почти линейная зависимость  $I$  от  $V$ .

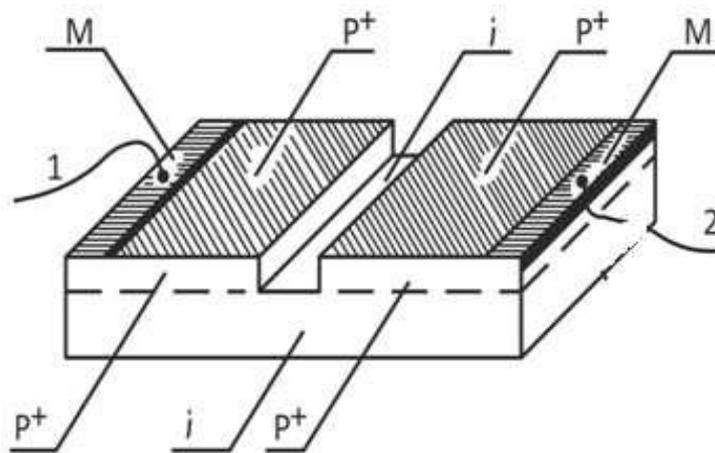
Полученные в настоящей диссертации теоретические и экспериментальные результаты позволили разработать и создать новые приборы для твердотельной электроники.

Типичный вид изготовленного сэндвич-фоторезистора на основе силицидов металлов показан на рис.20. Показано, что сэндвич-фоторезистор на основе  $Si\langle Mn \rangle$ ,  $Si\langle Cr \rangle$ ,  $Si\langle Co \rangle$  реализуется при толщине приповерхностного слоя не более  $0,9 \text{ мкм}$ .

Электрические параметры изготовленного высокочувствительного фотоприбора на основе  $p^+ - i - p^+$  структуры при  $300 \text{ К}$  следующие:  $p^+$ - область имеет удельное сопротивление  $5 \div 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ;  $i$  - область (сопротивление канавки или шлифованной стороны) имеет удельное сопротивление  $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (рис.21.).

Эти приборы были подвергнуты облучению в видимой и в ИК-области длин волн  $0,5 \div 2,3 \text{ мкм}$ , в диапазоне температур  $77 \div 160 \text{ К}$ .

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что данный прибор имеет высокую фоточувствительность в области видимого света и ближней ИК - области спектра, а также большой (90%) выход, представляющий практический интерес для применения в качестве фотоприемников.



**Рис.21. Вид фотоэлектрического прибора на основе  $p^+ - i - p^+$  структур: 1,2 – токоотводящие электроды  $M$  – металлический контакт,  $p^+$  - силициды марганца ( $BCM$ ),  $i$  – высокоомная область  $Si \langle Mn \rangle$ .**

Создан электронный термометр на основе дисилицида кобальта, принцип работы которого основан на линейном изменении электрического сопротивления с изменением температуры в диапазоне  $77-400 \text{ К}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставлена и решена важная проблема дефектообразования в кремнии. Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Впервые установлено образование низкоомного приповерхностного слоя  $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ ,  $\text{Si}\langle\text{Cr}\rangle$  и  $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$  с проводимостью р-типа, с концентрацией носителей тока  $\sim 10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$  и образование новой структурной фазы при диффузионном легировании кремния примесями марганца, хрома и кобальта, отличной от структуры легированной объемной части.

2. Предложена возможность определения неоднородности в объеме кристалла методом локальной фотоЭДС использованием ИК изучения.

3. Выявлена возможность определения внутреннего электрического поля в неоднородной области легированного кристалла по методике фотовольтаического эффекта. Установлено, что в кристалле  $n\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle$  при подаче внешнего электрического поля  $E_e \approx 2,0 - 2,3 \text{ В/см}$  внутреннее электрическое поле имело значение  $E_i = 1,8 \text{ В/см}$ .

4. Установлено, что на поверхности образцов кремния диффузионно-легированного атомами хрома, марганца и кобальта образуются примесные скопления, представляющие собой вторую фазу. Определены размеры скоплений, достигающие 20 мкм на поверхности и уменьшающиеся вглубь кристалла до глубины 40 мкм. Обнаружено, что приповерхностная область имеет поликристаллическую структуру, а объемная часть – монокристаллическую.

5. Выявлена возможность прогнозирования технологии синтеза полупроводникового материала с оптимальными термоэлектрическими свойствами в силицидах путем оценки отношения радиусов атома кремния к атому металла в соединении.

6. Исследованиями кинетики фотопроводимости в зависимости от толщины приповерхностного слоя установлено, что кратность фоточувствительности в  $10^3$  раз растет с увеличением толщины удаляемого слоя, а величина остаточной проводимости и ее постоянная времени релаксации уменьшаются в 2 раза.

7. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование прохождения тока в структурах силицид-полупроводник-силицид, а также определена возможность управления тока с помощью освещения и напряжения.

8. Предложен механизм глубокого инфракрасного и температурного гашения в  $p^+ - i - p^+$  структурах. На основе диффузионно-легированных образцов  $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ ,  $\text{Si}\langle\text{Cr}\rangle$  и  $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$  выявлена возможность создания фоточувствительного сэндвич-фоторезистора.

9. Создан электронный широкодиапазонный портативный термометр на основе дисилицида кобальта. Принцип работы датчика основан на линейном изменении электрического сопротивления с изменением температуры в диапазоне  $77 \div 400 \text{ К}$ .



**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 FOR THE AWARD  
OF ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH  
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND  
MICROELECTRONICS AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF  
UZBEKISTAN**

---

**NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN  
NAMED AFTER MIRZO ULUGBEK**

**ISAEV MAKHMUDKHODJA SHARIPOVICH**

**RESEARCH ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF  
MANGANESE, CHROMIUM, COBALT SILICIDES AND STRUCTURES  
CREATED ON THEIR BASIS**

**01.04.10- Semiconductor Physics**

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF DOCTOR OF SCIENCE (DSc) ON THE  
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2023**

The subject of doctor (DSc) dissertation is registered at Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan with number B2022.3.DSc/FM184.

The dissertation has been prepared at the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.ispm.uz](http://www.ispm.uz) and on the website of "ZiyoNet" information and Educational Portal at [www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

**Scientific consultant:**

**Mamadlimov Abdugafur Tishabaevich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician

**Official opponents:**

**Zaynabidinov Sirojiddin Zaynobidinovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician

**Ayupov Kutup Sautovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Onarkulov Karimberdi Egamberdievich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Leading organization:**

**Namangan Engineering Technology Institute**

The dissertation will be defended on 18 10 2023 at 10<sup>00</sup> hours at the meeting of the Scientific Council DSc.03/12.30.2019.FM/T.01.12 at the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics of the National University of Uzbekistan at the address: 100057, Tashkent, st. Yangi Almazar, house 20. Tel./Fax: (+99871) 248-79-91 / (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.

The dissertation can be found in the Department of Implementation of Digital Educational Technologies of the Institute (registered under No. 55) at the address: 100057, Uzbekistan, Tashkent, st. Yangi Almazar, house 20. Tel: (+99871) 248-79-59.

The abstract of the dissertation was sent out " 03 " 70 2023  
(distribution protocol No. 55 dated " 03 " 10 2023)



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

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

**N.A. Turgunov**  
Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific Council for Award of Academic Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

## INTRODUCTION (abstract of DS thesis)

**The aim of the research** is a comprehensive study of the electrical, thermoelectrical and photoelectrical properties of Si<Mn>, Si<Cr>, Si<Co> depending on the conductivity (concentration) distribution profile, as well as the study of the structure and composition of thin silicide films and the near-surface region of silicon using electronic microscopy, fast ion scattering spectroscopy and the possibility of obtaining various sensitive semiconductor devices based on them.

**The object of research** are single-crystal silicon, manganese, cobalt, chromium silicides and  $p^+ - i - p^+$ ,  $p^+ - i - m$  structures based on them.

**The scientific novelty of the research work** is as follows:

electric, X-ray phase, photoprobe methods, as well as methods of electron microscopy, fast ion scattering spectroscopy, the nature of the formation of a surface layer of diffusion-doped silicon, manganese, chromium and cobalt has been studied. It was found that the near-surface region of silicon doped with metal atoms is a complex compound of the  $Mn_xSi_y$ ,  $Cr_xSi_y$ ,  $Co_xSi_y$  types, the thickness of which depends on the number of metal atoms, temperature, annealing time, and vacuum level;

the existing contradiction between the solubility of metal atoms in silicon at the temperature of diffusion saturation and the metal concentration near the surface region, which exceeds the solubility by 2–4 orders, is explained. It was found that such a solubility of metal atoms in the near-surface region of silicon is associated with the formation of a chemical compound of metal with silicon, which is metal silicide;

On the basis of photoprobe studies of silicon doped with metal atoms, the topography of inhomogeneous regions was determined along the depth of the crystal and the internal electric fields were measured. It has been established that inhomogeneities in doped crystals are silicide inclusions of metal atoms;

it was found that the near-surface region of Si doped with Mn, Cr, Co has p-type conductivity with a current carrier concentration of  $10^{20} \div 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  and a Hall mobility of  $1 \div 17 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ;

on the basis of simulated structures of the silicide-semiconductor-silicide type, the mechanisms of current passage are theoretically and experimentally investigated and such photoelectric effects as infrared and thermal quenching are explained;

the thermoelectric properties of chromium, cobalt and manganese silicides have been studied and the possibility of predicting the technology of synthesis of a semiconductor material with optimal thermoelectric properties has been proposed;

the depth of the Si crystal doped with Mn, Cr, Co was determined to be  $30 \mu\text{m}$ , where the photoconductivity and photoEMF are the highest;

studies of the effect of illumination on BAX revealed that the greatest change in the photosensitivity of the  $p^+-i-p^+$  structure at any illumination intensity is observed in the case when the transition is shifted by  $0.8 \pm 0.1 \text{ V}$ ;

highly photosensitive photoelectric devices and sensors of infrared rays based on p+-i-p+ and p-i-n structures have been created.

**Implementation of research results.**

Based on the results of a study of the formation of silicides in the near-surface region of diffusion-doped silicon with manganese, chromium, cobalt atoms, as well as a study of their electrical, photoelectric and thermoelectric properties:

used in JSC "Foton" in the development of highly sensitive electronic thermometers, moisture meters, made on the basis of structures p + -i-p +, p + -i-m, created on the basis of doped silicon with manganese, chromium, cobalt atoms and their manufacturing technology (Certificate of the association "Uzeltexsanoat" issued December 22, 2021, No. 04-3/2716). The use of the obtained results made it possible to measure and maintain a constant temperature and humidity in the warehouse of finished products, which made it possible to control the conditions for ensuring the safety of the quality of products manufactured by Foton JSC;

Used in the fundamental project FA - FZ - 004 "Study of fundamental new physical models, mechanisms, methods for the formation of high-performance, cheap photoconverters, as well as durable photovoltaic installations based on them" technology for obtaining silicides based on silicon doped with metal atoms, the physical mechanism of current passage in silicide-semiconductor-silicide structures, synthesis of semiconductor silicides with optimal thermoelectric and photoelectric properties. (Reference No. 2/1255-895 dated April 18, 2022, issued by the Presidium of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan). The use of the results obtained made it possible to create highly efficient, cheap photoconverters;

**Approbation of research work.** The results of this study were reported and tested at 11 international and 13 national scientific conferences.

**Publication of research results.** 57 scientific papers were published on the topic of the dissertation, including 15 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertations.

**Structure and scope of the dissertation work.** The dissertation consists of an introduction, six chapters, a conclusion, a list of references, 156 a list of published works. The work contains 194 pages of typewritten text, including 73 figures and 7 tables.

## ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

#### LIST OF PUBLISHED WORKS

##### I бўлим (I часть, part I)

1. Исаев М. Ш. (патентообладатель), Касымов А. Х., Мухитдинов Д. З., Способ изготовления полупроводникового фотоэлектрического прибора// Патент № 2014672. – Москва. 1994. – с.1-10.
2. Касымов А.Х., Исаев М.Ш. Некоторые свойства силицида марганца // Узбекский физический журнал. –Ташкент. 1995. № 5. с. 73-77. (01.00.00; №5)
3. Исаев М. Ш. Фотоэлектрические свойства поверхности раздела силицид марганца – кремний// Узбекский физический журнал. – Ташкент. 1995. № 4. с. 47-51. (01.00.00; №5)
4. Касымов А.Х., Исаев М.Ш. Термоэлектрические свойства силицида марганца для термоэлектрических преобразователей солнечной энергии// Гелиотехника.- Ташкент. 1997-№1. с.64-68. (01.00.00; №1)
5. Исаев М.Ш., Норов Ш.Г., Мажидов А.Д. Исследование гальваномагнитных свойств приповерхностного слоя диффузионно-легированного кремния// Журнал Электронная обработка материалов. – Кишинев. 2006. с. 80-83. (№2 Journal Impact Factor:0.871)
6. Isaev M.Sh., Gaibov A.G., Eshkulov A.A. Investigation of Parameters of Schottky Diodes Based on Chromium Silicides// Journal of Physics. 2020. vol. 1679 022029 (№3 Scopus Cite Score:0.8)
7. Isaxanov Z.A., Yarkulov P.M., Umirzakov B.E., Isaev M.Sh., Abduvaitov A.A. Electronic Structure and Properties of Nanoscale Structures Created on the Surface of a Free Si/Cu Film System// Journal of Surface Investigation. 2021. Vol.15. Iss.2. p. 401-403. (№3 Scopus Cite Score:0.9)
8. Isaev M.Sh., Gaibov A.G., Eshkulov A.A., Saidachmetov P. Formation on Nanosized Films of Chromium silicides on silicon surface// Journal of Lecture Notes in Networks and Systems. 2021 vol.247, pp.1031-1041. (№3 Scopus Cite Score:0.7)
9. А.Т.Мамадалимов, М.Ш.Исаев, А.Акбаров. Структура и фоточувствительность р+-i-p+ и р+-i-m структур на основе Si<Co>// Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research. 2022. Vol.4. Iss.2, p.40-44. (01.00.00; №13)
10. Isaev M.Sh., Gaibov A., Eshkulov A., Mirkamilova M., Shukurova D. Research of Surface and Near – Surface Region Diffusion Doped Silicon by Manganese// Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. 509, pp. 681–690. (№3 Scopus Cite Score:0.7)
11. М.Ш.Исаев. Исследование термостимулированной проводимости силицида хрома// International Journal: Science and world. 2023. 1(113), с.15-19. (№5 GIF:0.325)

12. М.Ш.Исаев. Исследование температурной зависимости подвижности в силицидах хрома, кобальта и марганца// International Journal: Science and world. 2023. 1(113), с.20-23. (№5 GIF:0.325)
13. М.Ш.Исаев. Исследование электрических и термических свойств силицидов хрома// International Journal: Science and world. 2023. 1(113), с.24-27. (№5 GIF:0.325)
14. М.Ш.Исаев. Моделирование структуры силицидной области диффузионно-легированного кремния различными атомами металлов// International Journal: The Way of Science. 2023. N1 (107), с.10-16. (№5 GIF:0.543)
15. М.Ш.Исаев. Структура приповерхностного слоя диффузионно-легированного кремния атомами хрома и кобальта// International Journal: The Way of Science. 2023. 1(107), с.17-21. (№5 GIF:0.543)

### II бўлим (II часть, part II)

16. Исаев М.Ш. Экспериментальное и теоретическое исследование механизма токопрохождения структур силицид-полупроводник-силицид. –Препринт ТГТУ. Ташкент. 2005. с.20.
17. Исаев М.Ш. Исследование температурной зависимости проводимости приповерхностной области легированного кремния. Вестник Таш ГТУ.-2002.-т.1.-с.10-14.
18. Исаев М. Ш. Фотоэлектрические исследования приповерхностной области диффузионно-легированного Si<Cr>. Journal: Вестник ТашГТУ.-Т.2002.-№3.-с.15-20.
19. Исаев Ф.М., Миркамилова М.С., Исаев М.Ш., Хусанова Р. Исследование образования силицидов марганца методом модуляции рассеянного излучения. Журнал: Вестник ТашГТУ.-Т.2007.-№3.с.44-46
20. Исаев М.Ш., Миркамилова М.С., Химматкулов О., Жалалова Н.И. Результаты теоретического и экспериментального исследований электрических характеристик диодов Шоттки на основе силицида хрома. Вестник Таш ГТУ- №3-4,-2011.-с.54-57.
21. Исаев М.Ш., Мамадаминов У.М. Исследование профиля распределения проводимости диффузионно-легированного кремния атомами марганца, кобальта и хрома. Журнал: Вестник ТашГТУ.-Т.2001.-№4. с.17-20.
22. Исаев М.Ш., Умартаев А.М. Определение параметров монокристаллического кремния. Журнал Техника юлдузлари.-2002.-№3-с.16-20.
23. Isaev M.Sh., Isaev F.M. Formation of Silicide Film on Silicon Doped by Metal. Журнал Техника юлдузлари.-Т.2005.-№1.- 28-31 бетлар.
24. Мамадалимов А.Т., Исаев Ф.М., Исаев М.Ш. Рост силицидов никеля на поверхности кремния. IV Республиканская научная конференция «Рост, свойства и применение кристаллов» Андижан, 2008. – с.20-21.

25. Исаев М.Ш. Инфракрасный влагомер на основе силицида марганца. Межвузовский сборник научных трудов "Актуальные вопросы в области технических и фундаментальных наук".-Ташкент. -1997.-вып.3-с.49-53.
26. Исаев М.Ш., Камолходжаев Ш.М., Талипова Ш.А. Исследование приповерхностной области диффузионно-легированного кремния различными атомами методом оптического отражения. Межвузовский сборник научных трудов "Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук.- Т.2012-с.310-311.
27. Исаев М.Ш. Исследование релаксационных характеристик р-р структур на основе кремния, легированного кобальтом. Межвузовский сборник научных трудов «Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук».- Т.2015, ч.2.- с. 34-35.
28. Исаев М.Ш. Портативный электронный термометр. Межвузовский сборник научных трудов «Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук».- Т. 2016, ч.2.-с. 81-85.
29. Исаев М.Ш. Портативный влагомер. Межвузовский сборник научных трудов "Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук".- Т. 2016, ч.2.- с. 85-88.
30. Мамадалимов А.Т., Исаев Ф.М., Исаев М.Ш. Фотоэлектрические измерения внутреннего электрического поля на пленке силицида титана. Тез.конф. «Оптические методы в современной физике» Т.2008, с.172-174.
31. Isaev M.Sh., Yoon H.J. Photo-electronic properties of an interface silicide of manganese – silicon Korean International T. Research Journal 2003. Vol.24 pp.307-312.
32. Мамадалимов А.Т., Исаев М.Ш., Исаев Ф.М., Хусанова Р. Фотоэлектрические измерения внутреннего электрического поля на пленке силицида палладия. Материалы четвертой международной конференции посвященной 80-летию академика М.С. Саидова «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Т., 2010, с.215-216.
33. Исаев М.Ш. Исследование фотоэлектрических свойств силицидов содержащего кремния. Международная научная конференция "Актуальные научные исследования в современном мире".- с. 63-65.Сертификат № 42. 2016.-ДК 2122 143.
34. Исаев М.Ш., Миркамилова М.С., Гаиров А.Г., Химматкулов О., Вакобов К.И. Релаксационные характеристики р-і-р структур на основе кремния, легированного хромом. Тез. конф: "Zamonaviy fizikaning dolzarb muammolari"-Вухоро.2012-b.53-54.
35. Исаев М.Ш., Камолходжаев Ш.М., Толипова Ш.А. Исследование электрических характеристик диодов Шоттки на основе силицидов хрома. Тез.IV МН конф.:" Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред".-Самарканд.2013-с.82.
36. Исаев М.Ш. Исследование размеров силицидов никеля методом модуляции излучения. Межвузовский сборник научных трудов

- «Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук» 2014, ч. II. с. 265-266.
37. Исаев М.Ш. Исследование релаксационных характеристик  $p-i-p$  структур на основе кремния, легированного кобальтом. Республиканский межвузовский сборник «Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук» 2015, ч. II. с. 34-35.
  38. Исаев М.Ш., Миркомилова М.С., Исаев Ф.М., Хусанова Р. Фотоэлектрические измерения внутреннего электрического поля на пленке силицида никеля. Вестник ТашГТУ 2007, №4 с. 12-15.
  39. Мамадалимов А.Т., Исаев Ф.М., Исаев М.Ш., Абдуназарова Р.Б. Исследование размеров силицидов платины методом модуляции излучения. Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» Т. 2010, с. 216-217.
  40. Исаев М.Ш., Исаев Ф.М. Исследование зависимости электропроводности и подвижности от удаляемого слоя в диффузионно-легированном кремнии атомами металла. Международная научная конференция Физика полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов.- Владивосток. 2005.-с. 181-185.
  41. Мамадалимов А.Т., Исаев Ф.М., Исаев М.Ш., Султонов О.З., Хамдамов Ж.Ж., Шосаитов Ш.Ш. Исследование фотоэлектрических свойств  $p-i$  датчиков. «Қаттиқ жисмлар физикасининг долзарб муаммолари» Республика илмий конференцияси. Андижон, 2009, с. 8-9.
  42. Усманов М., Умирзаков Б.Е., Исаев М.Ш. Электрофизические и оптические свойства структуры  $CoSi-Si$ . Республиканская научная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред» Самарканд, 2013, с. 99.
  43. Мамадалимов А.Т., Исаев М.Ш., Исаев Ф.М. Исследование релаксационных характеристик  $p-i-p$  структур на основе  $Si<Mn>$ . Международная научная конференция “Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах”.-Т. 2007.-с. 155-156.
  44. Мамадалимов А.Т., Исаев М.Ш., Исаев Ф.М. Фотоэлектрические измерения внутреннего электрического поля на пленке силицида титана. Республиканская научная конференция “Оптические методы в современной физике”.-Т. 2008.-с. 172-174.
  45. Исаев М.Ш., Камолходжаев Ш.М., Талипова Ш.А. Исследование температурной зависимости электропроводности силицидов хрома, марганца и кобальта. IV Международная научная конференция “Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред”.-Самарканд. 2013-с. 83.
  46. Мамадалимов А.Т., Исаев М.Ш., Исаев Ф.М., Абдуназарова Р.Б. Исследование размеров силицидов платины методом модуляции излучения. Международная научная конференция “Фундаментальные и прикладные вопросы физики”-Т. 2010- с. 216-217.

47. Мамадалимов А.Т., Исаев М. Ш., Плоцина Е.С., Исаев Ф.М. Research of an Opportunity of Creation Sandwich-Photoresistor on the Basis of the Silicon Alloyed by Nickel. “Yarim o'tkazgichlar fizikasining fundamental va amaliy muammolari” Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi.-Andijon, 2005.-b.14-15.
48. Мамадалимов А.Т., Исаев М. Ш., Исаев Ф.М., Султонов О.З., Хамдамов Ж.Ж., Шосаитов Ш.Ш. Исследование фотоэлектрических свойств р-и-н датчиков. “Qattiq jismlar fizikasining dolzarb muammolari” Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi -Andijon-2009.-b.8-9.
49. Исаев М.Ш. Optical properties of  $\text{CoSi}_2/\text{Si} \langle 100 \rangle$  structure. XXI Международная научная конференция “Актуальные исследования в современном мире” (Украина).- с.88-89- 2017.- Сертификат № КЯ 1701044.
50. Исаев М.Ш., Усманов М., Умирзаков Б.Е., Эшкулов А.А. Исследование образования пленок дисилицидов кобальта на поверхности кремния методом эпитаксиального выращивания. Республиканская научная конференция “Актуальные проблемы современной физики и астрофизики”. - Карши 2015.- с. 101-102.
51. Исаев М.Ш., Мамадалимов А.Т., Усманов М., Эшкулов А.А., Жураев У.Е.. Рост силицидных пленок на поверхности кремния.”Mikroelektronika, nanozarlar fizikasi va texnologiyalari” Respublika ilmiy konferensiyasi.- Андижон 2015. - 6-7 б.
52. Исаев М.Ш., Усманов М. Исследование температурной зависимости удельного сопротивления структуры силицид кобальта-кремний. ”Mikroelektronika, nanozarlar fizikasi va texnologiyalari” Respublika ilmiy konferensiyasi.- Андижон 2015. - 70-71 б.
53. Исаев М.Ш. Образование силицидных пленок на поверхности кремния. XX Международная научная конференция “Актуальные научные исследования в современном мире”.- с. 66-68.Сертификат № 12. 2016. - ДК 2122 144.
54. Исаев М.Ш., Джураев У., Усманов М. Temperature dependence of specific resistance of  $\text{CoSi}_2\text{-Si}$  structure. Международная научная конференция “Актуальные исследования в современном мире” (Украина).- с. 90-92.- 2017.- Серт. № КЯ 1701045.
55. Исаев М.Ш. Исследование фотоэлектрических свойств силицида кобальта. II Международная научная конференция «Современные тенденции развития физики полупроводников» 2022. С.49-50.
56. Мамадалимов А.Т., Исаев М.Ш., Хакимова Н.К., Карабаева М.А. Термоэлектрические свойства силицида кобальта. «Яримўтказгичлар ва полимерлар физикасининг долзарб муаммолари» Республика илмий конференцияси. Тошкент. 2022. – с.19-21.
57. Мамадалимов А.Т., Isaev M.Sh. Optical properties of  $\text{CrSi}_2/\text{Si} \langle 100 \rangle$  structure. Республиканская научная конференция «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике». Т. 2022.-с. 297-299.



Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” jurnali taxririya-tadqiqotida taxrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi (03.10.2023).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturasida.

Shartli bosma tabog‘i: 4,5. Adadi 60. Buyurtma № 51.

Guvohnoma reestr № 10-4434

Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti  
bosmaxonasida chop etilgan.

Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy.

