

**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**

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

TURSINBAEV SABIRBAY AWESBAY ULÍ

**MARGANES KIRISHMALARIGA EGA KREMNIYNING
ELEKTROFIZIK XUSUSIYATLARIGA BIR O‘QLI BOSIM TA’SIRI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Toshkent - 2024

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

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

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

Tursinbaev Sabirbay Awesbay uli

Marganes kirishmalariga ega kremniyning elektrofizik xususiyatlariga bir
o'qli bosim ta'siri..... 3

Турсынбаев Сабырбай Ауесбай улы

Влияние одноосного давления на электрофизические свойства кремния
с примесью марганца 21

Tursinbaev Sabirbay Awesbay uli

Influence of Uniaxial Pressure on the Electrophysical Properties of Silicon
with an Impurity of Manganese 41

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 45

**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**

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

TURSINBAEV SABIRBAY AWESBAY ULÍ

**MARGANES KIRISHMALARIGA EGA KREMNIYNING
ELEKTROFIZIK XUSUSIYATLARIGA BIR O‘QLI BOSIM TA’SIRI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Toshkent - 2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.2.PhD/FM287 raqam bilan ro'yxatga olingan.

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

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.ispm.uz) va «ZiyoNet» axborot-ta'lim portalida (www.ziyo.net.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	Kamalov Amangeldi Bazarbaevich fizika-matematika fanlari doktori, professor
Rasmiy opponentlar:	Dadamirzayev Muxammadjon Gulomqodirovich fizika-matematika fanlari doktori, professor Pulatova Dilaram Sobitovna fizika-matematika fanlari nomzodi
Yetakchi tashkilot:	Farg'ona davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2024 yil «13» 06 soat 16⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100057, O'zbekiston, Tashkent sh., Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy, Tel.: (+99871)248-79-94, faks: (+99871)248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.)

Dissertatsiya bilan institut Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (60 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil «28» 05 kuni tarqatildi.

(2024 yil «28» 05 dagi 60 raqamli reestr bayonnomasi).



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

J.J. Hamdamov
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash Ilmiy kotibi, (PhD) k.i.x.

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda yarimo‘tkazgichlar fizikasi sohasida dolzarb yo‘nalishlardan biri sifatida kremniyni chuqur energetik sathlarni hosil qiluvchi kirishma atomlari bilan legirlab, uning asosiy parametrlarini o‘zgartirish orqali yangi turdagi materiallar olish va olingan yangi materiallar asosida turli fizik kattaliklarni o‘lchaydigan datchiklar yaratish masalalariga alohida ahamiyat berilmoqda. Hozirgi kunda rivojlangan mamlakatlarda o‘tuvchi metallar bilan legirlangan kremniyning tenzoelektrik xususiyatlarini har tomonlama tadqiq qilish katta ilmiy va amaliy ahamiyatga ega bo‘lib, tubdan yangi, o‘ta sezgir, o‘ta kichik o‘lchamli datchiklar va mexanik deformatsiyalarni o‘lchovchi qurilmalarni ishlab chiqishga alohida e‘tibor qaratilmoqda.

Jahonda kremniy kristallining tenzoelektrik, elektrofizik, fotoelektrik, optik va boshqa xususiyatlarini o‘rganish hamda datchiklarning konstruksiyasini takomillashtirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Jumladan yarimo‘tkazgichli bosim datchiklari yuqori sezgirlikga ega bo‘lishi va fizik parametrlarining kichikroq qiymatini aniqlay olishi muhim ahamiyat kasb etadi. Biroq yarimo‘tkazgichli datchiklarning ko‘pchiligi bunday xossalarga ega emas. Shuningdek, o‘lchov qurilmalari uchun to‘g‘ri bosim datchigini tanlashda uning narxi, o‘lchash aniqligi va uzoq muddatli barqaror ishlashi muhim rol o‘ynaydi. Bu borada marganes kirishmalariga ega kremniyning tenzoxususiyatlarini o‘rganish dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda kremniyning kristall panjarasi xossalarini tubdan o‘zgarishiga olib keluvchi, marganes kirishma atomlari bilan legirlash asosida sezgirliги yuqori bo‘lgan datchiklarni yaratish uchun yangi materiallarni olish texnologiyasini ishlab chiqish borasida muayyan natijalarga erishilmoqda. Bu borada fizik parametrlari bir vaqtning o‘zida bir necha turdagi tashqi ta’sirlarga nisbatan yuqori sezgir materiallarni olishga bo‘lgan ehtiyoj ortib bormoqda. Shu sababli marganes kirishmalari bilan legirlangan kremniyning elektrofizik xususiyatlariga bir o‘qli bosim ta’sirini o‘rganish dolzarb hisoblanadi. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021 yil 19 martdagi “Fizika sohasidagi ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ–5032-son qarorida «... fizika sohasidagi ilmiy tadqiqotlarning ishlab chiqarish bilan uzviy bog‘liqligini ta’minlash, iqtisodiyot tarmoqlaridagi muammolar yechimiga qaratilgan ilmiy ishlar ko‘lamini kengaytirish; ilmiy tadqiqotlarning va innovatsiya ishlarining natijadorligi va amaliy ahamiyatini oshirish...»¹ kabi vazifalar belgilangan. Mazkur yo‘nalishda mikro- va nanoelektronika qurilmalarini ishlab chiqarish uchun zarur elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlarga ega bo‘lgan yangi yarimo‘tkazgichli materiallar va datchiklarni yaratish muhim ilmiy ahamiyat kasb etadi.

¹ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021 yil 19 martdagi “Fizika sohasidagi ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ–5032-son qarori.

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, 2019 yil 22 avgustdagi PQ-4422-son «Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishning tezkor chora-tadbirlari to‘g‘risida», 2020 yil 10 iyuldagi PQ-4779-son «Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg‘i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida»gi Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyani rivojlanishning ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot Respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III. «Energia, energiya resurslarini tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik; zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish» ustuvor yo‘nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Hozirgi kunga qadar kirishmaviy elementlar bilan legirlangan kremniy monokristalli hamda uning tenzoxususiyatlarini tadqiq qilish muammolari quyidagi ilmiy markazlarda o‘rganilgan: Milliy fanlar va texnologiyalar universiteti (Pokiston), Funktsional bio-integratsiyalangan elektronika va energiyani boshqarish laboratoriyasi (Koreya), Qattiq jismlar, tuzilmalar va materiallar mexanikasi markazi, Aerokosmik muhandislik kafedrasini (AQSh), Ostindagi Texas universiteti, Elektrotexnika va kompyuter injiniringi kafedrasini, Urbana-Champaigndagi Illinoys universiteti (AQSh).

Rossiya olimlari G.A. Malign, V.I. Nikolaev, V.M. Krimov, A.V. Soldatov va ularning ilmiy maktablari tomonidan $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ qotishma kristallarining $\langle 011 \rangle$ o‘qi bo‘ylab bosim ta’sir ko‘rsatilganda ularning deformatsiya xususiyatlariga issiqlik bilan ishlov berishning ta’siri o‘rganilgan. K.Y. Kraynova (Rossiya) tomonidan polikristall olmos materiali asosida bosimga sezgir tenzodatchikni ishlab chiqarish texnologiyasi haqida ilmiy tadqiqodlar olib borilgan. I.G. Protsenko, Yu.A. Brusensovlarning (Rossiya) ilmiy ishlarida mexanik deformatsiya va kuchlanishlarning ta’siri yarimo‘tkazgich tenzosezgir elementlar yordamida o‘rganilgan, V.V. Kaminskiy, A.A. Molodix, N.N. Stepanov, S.M. Solovev, N.M. Volodin, V.A. Ivanovni (Rossiya) ilmiy maktablari tomonidan samariy sulfid birikmasi asosida yarimo‘tkazgich tenzo va barorezistorlarni tashqi bosimni o‘lchashdagi xususiyatlari o‘rganilgan.

Hozirgi vaqtda akademiklar R.A. Muminov, A.T. Mamadalimov, M.K. Baxadirxanov, S. Zaynobidinov, professorlar Sh.B. Utamuradova, X.S. Daliev, N.F. Zikrillaev, X.M. Iliev va boshqalar kremniy namunalarini kirishma atomlari bilan legirlash va olingan material asosida yaratilgan tenzodatchiklar imkoniyatlarini kengaytirishni ilmiy asoslab berishgan. O.O. Mamatkarimov,

O. Ximmatkulov, I.G. Tursunovlar tomonidan bir o'qli elastik deformatsiyani $Sb-p-Si<Mn>-Au$ strukturali diodning sirtiy-barer qismi Volt-Amper xarakteristikasiga ta'siri o'rganilgan. G. Gulyamov, A.G. Gulyamov tomonidan yorug'lik ta'sirida $p-n$ o'tishning tenzosezuvchanligi o'rganilgan. S.M. Otajonov, A.M. Xudoyberdiev tomonidan suyuq geliy haroratida chuqur sath xosil qiluvchi kirishmalarga ega yarimo'tkazgich yupqa qatlamlarining deformatsiyaga sezgirligi o'rganilgan. Yarimo'tkazgich yupqa qatlamlarning turli haroratlarda deformatsiyasi paytidagi qarshiligining nisbiy o'zgarishi aniqlangan va 4.2 K suyuq geliy haroratida deformatsiya sezgirligini aniqlash mexanizmini tushuntiruvchi strukturaviy model taklif qilingan. 4.2 K haroratda yarimo'tkazgichli yupqa qatlamlarning deformatsiya sezgirligini aniqlash uchun qurilma ishlab chiqilgan.

Shu bilan birga, yarimo'tkazgichli tenzosezgir materiallar asosida yaratilgan datchik va qurilmalarga bag'ishlangan amaliy va nazariy tadqiqotlar tahlili bu sohaning imkoniyatlari yanada keng ekanligini ko'rsatadi. Lekin, shu kunga qadar marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning juda kichik bir o'qli nuqtaviy radial bosim ta'sirida tenzoxususiyati va uning parametrlarini boshqarish o'rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi Qoraqalpoq davlat universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq OT-F-2-77 «Modellashtirish asosida ichki nuqsonlarni hisobga olgan holda yarim o'tkazgichli asboblarning ishonchligini bashorat qilishning takomillashtirish usuli» (2016-2020 yy.) mavzusidagi loyiha doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi marganes kirishmasi kiritilgan kremniyning elektrofizik xususiyatlarini bir o'qli nuqtaviy radial bosim ta'sirida o'rganish va $p-Si<B,Mn>$ asosida sezgir tenzodatchiklar yaratishning texnologik jarayonini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

tenzosezgir $p-Si<B,Mn>$ namunalarni olishning texnologik rejimini yaratish;
turli solishtirma qarshiliklarga ega bo'lgan $p-Si<B,Mn>$ namunalarning tenzoxossalarini o'rganish;

bir vaqtning o'zida bir o'qli nuqtaviy radial bosim va harorat ta'sirida bo'lgan $p-Si<B,Mn>$ namunalarning elektrofizik parametrlarini o'rganish;

bir vaqtning o'zida bir o'qli nuqtaviy radial bosim va yorug'lik ta'sirida o'ta kompensatsiyalangan $p-Si<B,Mn>$ namunalarning elektrofizik parametrlarini o'rganish;

turli qiymatlarga ega bo'lgan elektr maydonidagi $p-Si<B,Mn>$ namunalarning elektrofizik parametrlariga bir o'qli nuqtaviy radial bosimning ta'sirini o'rganish;

kompensatsiyalangan kremniyning fizik parametrlariga bir o'qli nuqtaviy radial bosim, yorug'lik, harorat, elektr maydonining ta'sirida tenzoxossalarini o'zgarishini o'rganish uchun qurilma yaratish.

Tadqiqot ob'ekti sifatida turli solishtirma qarshiliklarga ega bo'lgan $p-Si<B,Mn>$ namunalari olingan.

Tadqiqot predmeti marganes kirishmalariga ega kremniy namunalarning tenzoxossalarini tadqiq qilish hisoblanadi.

Tadqiqot usullari. Qo'yilgan vazifalarni amalga oshirish uchun quyidagi usullar qo'llanilgan: marganes kirishmasi bilan legirlangan kremniy namunalarning elektrofizik kattaliklarini o'lchashga asoslangan zamonaviy Ecopia HMS-7000 Xoll effektini o'lchash qurilmasidan, kremniyning fotoelektrik xossalarini o'rganish uchun IKS-21 spektrometrdan, $p-Si<B,Mn>$ namunalarning tenzoxossalarini o'rganish uchun dissertatsiya ishini amalga oshirish jarayonida yaratilgan bir o'qli nuqtaviy radial bosim beruvchi qurilmadan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

tok tashuvchilarining konsentratsiyasi $n=1.14 \cdot 10^{11} \div 2.39 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ va solishtirma qarshiligi $\rho=7.92 \cdot 10^2 \div 1.53 \cdot 10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo'lgan tenzosezgir $p-Si<B,Mn>$ namunalarni yaratishning texnologik rejimi ishlab chiqilgan;

ilk bor $T=1060 \text{ }^\circ\text{C}$ haroratda legirlangan $p-Si<B,Mn>$ namunalarning solishtirma qarshiligi, $5 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ oraliqdagi bosim (P) ta'sirida 3 barobar ortishi va dastlabki kremniy namunalarda esa sezilarli o'zgarishlari aniqlangan;

doimiy bir o'qli nuqtali radial bosim $P=5.16 \cdot 10^5 \div 7.74 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ va $T=30 \div 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ta'sirida $p-Si<B,Mn>$ namunalarda deformatsiya sezuvchanligi (α) dastlabki namunalarga nisbatan 15 marta ortishi aniqlangan;

ilk bor bir o'qli nuqtali radial bosim $P=4,14 \cdot 10^6 \div 2,76 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ va $I=1800 \div 4600 \text{ luks}$ yorug'lik ta'sirida bo'lgan $p-Si<B,Mn>$ namunalarning tenzosezgirlik qiymati 2-3 barobar ortishi aniqlangan;

$p-Si<B,Mn>$ namunalarga 1-15 V/sm diapazondagi tashqi elektr maydoni (E) ta'sir qilganda ularning tenzosezuvchanligi dastlabki namunalarga nisbatan taxminan 3 marta oshishi aniqlangan;

bir o'qli nuqtaviy radial bosim ($10^6 \div 10^9 \text{ Pa}$), yorug'lik ($1 \div 50000 \text{ luks}$), harorat ($1 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$) va elektr maydoni ($1 \div 15 \text{ V}/\text{sm}$) ta'sirida bo'lgan o'ta kompensatsiyalangan kremniyning tenzosezuvchanligini o'rganish uchun qurilma yaratilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagidan iborat:

kremniyda marganes kirishma atomlarining konsentratsiyasini o'zgartirish orqali kremniyning bir o'qli nuqtaviy radial bosim ta'siriga sezgirlikni oshirish imkoniyati ko'rsatilgan, uning asosida tenzosezgirlik yuqori bo'lgan yangi sinf datchiklarini yaratish imkoniyatlari ochib berilgan;

deformatsiyaga sezgir, marganes atomlari bilan legirlangan ($p-Si<B,Mn>$) yangi turdagi namunalarni olish texnologik jarayonining bosqichlari ishlab chiqilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchligi marganes atomlari bilan legirlangan kremniyning elektrofizik xususiyatlari, diffuziya vaqtida va diffuziyadan keyingi har xil tashqi omillar ta'sirida yuz beruvchi fizik jarayonlarni tadqiq qilishda keng qo'llaniladigan tadqiqot usullaridan shuningdek, tayyorlangan namunalarning elektrofizik kattaliklarini o'lchashda zamonaviy Xoll effektiga asoslangan o'lchash qurilmasidan, kremniyning fotoelektrik xossalarini o'rganish uchun IKS-21 spektrometrdan, namunalarning tenzo xossalarini o'rganish uchun dissertatsiya ishini

amalga oshirish jarayonida bir o'qli nuqtaviy radial bosim beruvchi qurilmadan foydalanilganligi bilan asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Olingan tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati $p-Si<B,Mn>$ namunalari asosida tayyorlangan namunalarning tabiatiga bog'liq ravishda uning tenzoelektrik parametrlarining o'ziga xos jihatlari aniqlanganligi bilan izohlandi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati kremniyni kirishma marganes atomlari bilan legirlashda diffuziya kattaliklarining kirishma to'plamlari strukturaviy tuzilishiga ta'sirini aniqlash va kichik qiymatlardagi bosimlarni qayd etuvchi qurilmalar va datchiklar yaratishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.

$p-Si<B,Mn>$ ning elektrofizik xususiyatlariga bir o'qli nuqtaviy radial bosim ta'sirini tadqiq qilish asosida quyidagi ilmiy natijalarga erishildi:

tenzosezgir, yangi turdagi $p-Si<B,Mn>$ namunalarni olishning texnologik jarayonining asosiy bosqichlarini aniqlanganligi; dastlabki namunalarda tenzosezgirlik $10\div 12\%$ ni tashkil qilishi, $p-Si<B,Mn>$ namunalarda esa tenzo sezgirlik qiymati 3 martaga ortishi; $p-Si<B,Mn>$ namunalarining $5.16\cdot 10^5\div 7.74\cdot 10^7 Pa$ oraliqdagi doimiy bosim (P) ta'sirida va $30\div 75^\circ C$ oraliqdagi harorat (T) oraliq'ida deformatsiya sezuvchanligi (α) ning qiymati 15 martaga ortishidan «FOTON» aksiyadorlik jamiyatida tenzosezgir kremniy strukturalar olishda qo'llanilgan («O'zeltexsanoat» aksiyadorlik kompaniyasining 2023 yil 19 apreldagi 04-3/484-son ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish jahon analoglari darajasiga mos keladigan elektrofizik parametrlarga ega namunalarni ishlab chiqarish imkonini bergan;

bir vaqtning o'zida bir o'qli nuqtaviy radial bosim va yorug'lik ta'sirida $p-Si<B,Mn>$ yuqori kompensatsiyalangan kremniyning elektrofizik parametrlarini o'rganilishi natijasida, ya'ni $1800\div 4600 luks$ yorug'lik (I) diapazonida va bir o'qli nuqtaviy radial bosim (P) $4.14\cdot 10^6\div 2.76\cdot 10^8 Pa$ hamda elektr maydoni qiymati (E) $5\div 15 V/sm$ oraliqda oshirilganda $p-Si<B,Mn>$ namunalarining tenzosezgirlik deyarli 3 barobarga ortgan. Ushbu natijalardan Qoraqalpoq davlat universitetida 2016–2020 yillarda bajarilgan OT-F-2-77 raqamli «Modellashtirish asosida ichki nuqsonlarni hisobga olgan holda yarim o'tkazgichli asboblarning ishonchligini bashorat qilishning takomillashtirish usuli» mavzusidagi fundamental tadqiqod loyihasida foydalanilgan (O'zbekiston respublikasi oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2023 yil 1 maydagi 2/14-17/04-829-son ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish $p-Si<B,Mn>$ namunalarining tenzoelektrik xususiyatlarini batafsil tavsiflash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalari aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 9 ta xalqaro va 3 ta respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy konferensiyalarda ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi doirasida bajarilgan ishlarning asosiy natijalari bo'yicha jami 28 ta ilmiy ish chop etilgan bo'lib, ular, 7 tasi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar

Vazirligi xuzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rt bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovadan iborat. Dissertatsiya ishi hajmi 42 ta rasm va 10 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda 115 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mos kelishi ko'rsatilgan, muammoning o'rganilganlik darajasi ochib berilgan, dissertatsiya mavzusining bajarilgan oliy ta'lim muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, tadqiqotning ob'ekti va predmeti, tadqiqotning usullari tavsiflangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi, tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy qilinishi va aprobatsiyasi, hamda dissertatsiya hajmi va tuzilishi bo'yicha ma'lumot berilgan.

«**Yarimo'tkazgich materiallar asosida ishlaydigan zamonaviy tenzodatchiklarning holati**» deb nomlangan birinchi bobda tenzosezgir materiallar, tenzodatchiklar konstruksiyalari, yarimo'tkazgich tenzodatchiklarni turlari va ularni yasashidagi muammolar bo'yicha adabiyotlardagi ma'lumotlar tahlili keltirilgan. Nazariy va eksperimental ma'lumotlar tahlilidan kelib chiqib dissertatsiya ishining maqsadi va vazifalari belgilangan.

Dissertatsiyaning «**Kremniy asosida yangi turdagi tenzodatchik ishlab chiqish texnologiyasi**» deb nomlangan ikkinchi bobda marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarini olish texnologiyasi, kremniy yuzasiga nikelni kimyoviy usul bilan cho'ktirish texnologiyasi, tenzodatchiklarning elektr parametrlarini o'rganishda Xoll usulidan foydalanishni tadqiq qilish usullari, Si<Mn> namunalarining tenzoxossalari tadqiq qilish uchun qurilmaning yaratilishi yoritib berilgan.

Kompensatsiyalangan kremniy namunasini olish uchun Choxralskiy usuli bilan o'stirilgan KDB-1, KDB-2, KDB-3, KDB-4 va KDB-5 markali monokristall kremniylardan foydalanildi. Dastlabki quyidagi xususiyatlarga ega: qoldiq kislorod konsentratsiyasi $\sim 10^{17} \div 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ oralig'ida, bor atomlarini konsentratsiyasi $N_B \approx 7 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$, solishtirma qarshiligi $\rho \sim 1 \div 5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$, dislokatsiya zichligi $S \sim 10^3 \cdot \text{sm}^{-2}$ va *p*-tipi o'tkazuvchanlik. Kirishma sifatida tozaligi 99.999% va elektro-aktiv konsentratsiyasi $N_{Mn} \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan marganesdan foydalanildi.

Namunalar $8 \times 4 \times 1 \text{ mm}^3$ o'lchamlarda kesib olindi. Namunalarni kesish jarayoni, belgilangan aniq burchak ostida ushlab turuvchi moslamalar bilan ta'minlangan, o'lchamlar aniqligi $\pm 10 \text{ }\mu\text{m}$ bo'lgan yuqori effektivlikka ega va sifatli kesishga mo'ljallangan laboratoriya va ishlab chiqarishda qo'llanadigan, olmos ipli keskich STX-402 (Diamond wire saw) qurilmasi bilan amalga oshirildi.

Namuna mexanik kesilish jarayonida yuzaga kelgan shikastlanishlarni mexanik va kimyoviy usullar bilan yo'qotish maqsatida $1\text{HF}:3\text{HNO}_3$ tarkibdagi eritmada sekin yemirilish asosida amalga oshirildi. So'ngra qarama-qarshi yuzlarning

parallelligini $\sim 2\div 3 \mu m$ aniqlikda ta'minlaydigan *M1* dan *M14* gacha markali karbid kremniy mikro kukunlari yordamida kremniy sirtiga mexanik ishlov berildi.

Diffuziyadan oldin, sayqallash jarayonida namunalarning yuza qismida hosil bo'lgan mexanik shikastlangan sohalarni va yog'larni yo'qotish uchun namunalar yana bir bor bidistillirlangan suvda va $1HNO_3:3HCl$ kimyoviy aralashmalar yordamida tozalandi. So'ngra namunalar bidistillirlangan suv va spirtida yuvilgan va quritilgan kvarts ampulalariga joylashtirilib, kirishma marganes elementlari solingandan so'ng havosi $P\sim 10^{-4}\div 10^{-6} mm.sim.ust.$ bosimgacha so'rib olindi.

Marganes kirishma atomlarining kremniyga diffuziyasi belgilangan haroratni $\pm 1^\circ C$ aniqlikda ushlab turuvchi vakuum quvurli pechda amalga oshirildi.

Diffuziya harorati kvarts ampulasi yoniga joylashtirilgan platina-platinorodiy termoparasi yordamida aniqlandi.

Marganesning kremniyga diffuziyasi gaz fazasida amalga oshirildi. Kvarts ampulaga solingan marganes elementi miqdori, diffuziya haroratida hosil qilgan bug'ning bosimi namuna sirtida kerakli konsentratsiyani ta'minlaydigan qilib tanlab olindi.

So'ngra diffuziya jarayonida namunaning butun hajmi kirishma marganes atomlari bilan bir xil to'yinishi uchun $t=5\div 20$ minut davomida yopiq vakuum olingan ampulalarda olib borildi;

Kremniy namunalarning boshlang'ich namunadagi texnik kirishma atomlarining konsentratsiyasiga qarab, turli darajada marganes kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan namunalarni olish maqsadida ($\rho = 10^2\div 10^5 Om\cdot sm$) marganes diffuziyasining harorati va vaqti matematik hisoblanib $T=1050\div 1150^\circ C$ harorat oralig'ida diffuziya jarayoni amalga oshirildi.

Diffuziyadan keyin namunalar joylashgan kvarts ampula maxsus yog'ga tushirilib $200\div 300^\circ C/s$ tezlikda sovutildi. Bundan so'ng namunalar kvarts ampuladan olinib, mexanik va kimyoviy ishlov berish yo'li bilan tozalandi.

Termik ishlov berish va boshqa diffuziya sharoitlarini ta'sirini hisobga olish uchun xuddi shu sharoitda nazorat kremniy namunalari tayyorlandi. Diffuziyadan keyin oksid qatlam bilan qoplangan sirt qatlamini olib tashlash uchun namunalarning barcha tomoni 100 mikrondan qarama-qarshi yuzlarning tekis parallelligini saqlangan holda, karbid kremniy mikro kukunlari bilan mexanik ishlov berildi.

Adabiyot tahlilidan bizga ma'lumki, marganes atomlari kremniyda ikkita donor energetik sathlar hosil qiladi. Marganes atomlarining bir va ikki karra ionlashgan energiyali sathlarni hosil qilib, ular quyidagilarga teng:

$$E_{Mn1} = E_c - 0.3 eV \text{ va } E_{Mn2} = E_c - 0.55 eV. \quad (1)$$

Elektroaktiv marganes atomlarining konsentratsiyalari $N_{Mn} \approx 2 \cdot 10^{15} sm^{-3}$ ga teng bo'ladi.

Marganes kirishma atomlarini kremniydagi eruvchanligi va diffuziya koeffitsiyenti $T=1150^\circ C$, $N_{Mn}=8 \cdot 10^{15} sm^{-3}$ da elektroaktiv marganes atomlarining maksimal konsentratsiyasida retrograd xarakteriga ega bo'lib, diffuziya koeffitsiyenti quyidagi ifoda bilan ta'riflanadi:

$$D_{Mn} = 0.26 \exp(-1.3/kT). \quad (2)$$

Bu ifodadan marganes kirishma atomlarining aktivlanish energiyasi boshqa kirishma atomlariga (masalan: oltingugurt va selenga) nisbatan kichik.

Kremniy namunalarga omik kontaktlar kremniy yuzasiga nikelni kimyoviy usul bilan cho'ktirish yoki "VUP-4" vakuum qurilmasida kremniy sirtiga nikel kirishma atomlarini purkash yo'li bilan olindi. Har qanday turdagi kontaktlarni olishdan oldin namunalarda ma'lum kimyoviy eritmalar asosida tozalangan ($1H_2O_2:1NH_4OH:5H_2O$ peroksid-ammiak eritmasi), olingan kontaktlarning sifati namunalarning Volt-Amper tavsifini o'lchash orqali tekshirilgan.

Namunalarning elektr parametrlari (elektr o'tkazuvchanligi, harakatchanligi va konsentratsiyasi) Xoll effekti usuli yordamida aniqlandi. Sinov namunasi magnit maydoni $H=3000$ ersted bo'lgan doimiy magnitning qutblari orasida maxsus tutgich bilan joylashtirilgan.

Magnit maydonning yo'nalishi magnitni 180° ga aylantirish orqali o'zgartirildi; qarshilik quyidagi formula bo'yicha hisoblanildi:

$$\rho = \frac{V_0 \cdot l}{I \cdot W \cdot t} \quad [Om \cdot sm]. \quad (3)$$

Bu yerda I –namunadan o'tadigan tok, V_0 –kontaktlar orasidagi kuchlanish, l –potensial kontaktlar orasidagi masofa, W –namuna eni, t –namuna qalinligi. Xoll doimiysi quyidagi formula bo'yicha hisoblandi:

$$R_H = \frac{V_H \cdot t \cdot 10^8}{IB} \quad [sm^3/KI]. \quad (4)$$

Bu yerda Xollning V_H – E.Yu.K., B –magnit maydon induksiyasi. Xoll harakatchanligi quyidagi formula yordamida hisoblandi:

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad [sm^2/V \cdot s]. \quad (5)$$

Asosiy tok tashuvchilarning konsentratsiyasi quyidagi formula bo'yicha hisoblandi:

$$n, p = \frac{l}{eR_H} \quad [sm^{-3}]. \quad (6)$$

Natijalar 1–jadvalda keltirilgan.

1–jadval

№	Namuna	Tipi	$R_x (Om)$	$\rho, (Om \cdot sm)$	μ	$n, p (sm^{-3})$
1	KDB-1	p	$2.796 \cdot 10^3$	0.875	320	$22.3 \cdot 10^{15}$
2	KDB-3	p	$1.416 \cdot 10^3$	3.1	426.7	$4.4 \cdot 10^{15}$
3	KEF-50	n	$62 \cdot 10^3$	46.75	1450	$1 \cdot 10^{14}$
4	KEF-100	n	$134.3 \cdot 10^3$	112	1125	$4.677 \cdot 10^{13}$

Tashqi nuqtaviy radial bir o'qli mexanik bosim ta'sirida marganes kirishma atomlarining strukturalariga ega kremniyning elektrofizik parametrlarini o'lchashda ishonchli natijalarini olish uchun qorong'ulikda hamda yoritilmaganda ham sinxron (silliq) o'zgarishiga imkon beradigan maxsus qurilma ishlab chiqildi.

1–rasmda ko'rsatilgan qurilmaning avvalgi versiyalaridan avzalligi va farqi shundan iboratki, yarimo'tkazgichlarga nuqtaviy radial bosimni ta'sirini o'rganish bilan bir vaqtning o'zida qo'shimcha quyidagi tashqi ta'sirlarni: yorug'lik, harorat va elektr maydonining qiymatlarini o'zgartirish mutlaqo avtomatik tarzda boshqarishga imkon beradi.

Yaratilgan qurilma yordamida bir o'qli nuqtaviy radial bosim qiymatini

$P=10^5 Pa$ dan $P=10^8 Pa$ gacha o'zgartirgan holda ta'sir qilib, kremniy namunalarning tenzo-parametrlarini o'lshash imkoniga ega bo'lindi. Bundan tashqari yorug'lik intensivligi 1 luksdan 15000 luks gacha, $T=30\text{ }^\circ C$ xona haroratidan $T=150\text{ }^\circ C$ gacha bo'lgan oralig'ida yorug'lik va harorat bilan ta'sir qilish imkoni yaratildi.



1–rasm. Nuqtaviy radial bosim ta'siri ostida yarimo'tkazgich namunalarning elektrofizik parametrlarini o'lchashdagi qurilmaning uchinchi versiyasining tashqi ko'rinishi

“Dissertatsiyaning $Si<Mn>$ namunalarning tenzoxususiyatlarini tadqiq qilish” deb nomlangan uchinchi bobida turli haroratlarda, yoritilganliklarda va turli xil konsentratsiyali $Si<Mn>$ namunalarning tenzoelektrik xususiyatlari tadqiq qilingan.

2–jadvalda keltirilgan kirishma marganes atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarning tenzoxususiyatlari materialning solishtirma qarshiligiga qarab, nuqtaviy radial bosimni $P=5\cdot 10^5 Pa$ dan $P=3\cdot 10^7 Pa$ gacha oralig'ida o'zgartirilgandagi holati o'rganildi (2–rasm).

2–jadval

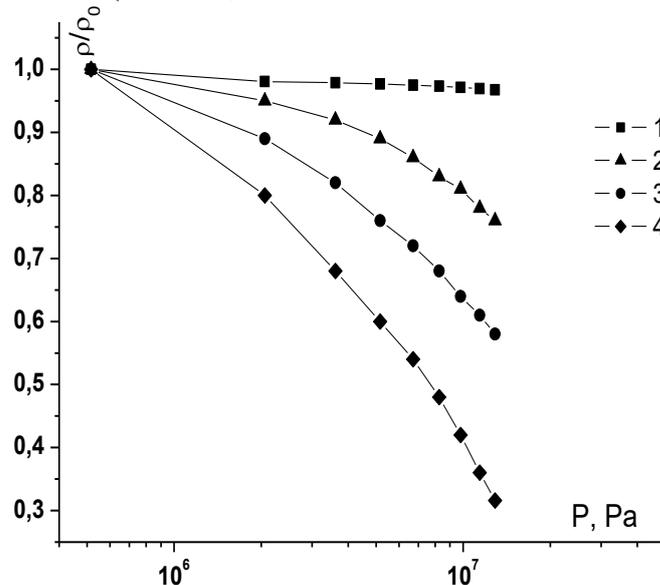
Namunalarning Xoll effekti usulida aniqlangan elektrofizik parametrlari

No	Boshlang'ich material	Tipi	ρ , ($Om\cdot sm$)	μ , ($V\cdot s/sm^2$)	n, p (sm^{-3})
1	KDB-3	P	$7.92\cdot 10^2$	120.7	$2.39\cdot 10^{13}$
2	KDB-3	P	$5.5\cdot 10^3$	224.9	$2.49\cdot 10^{12}$
3	KDB-3	P	$5.64\cdot 10^4$	274.8	$2.03\cdot 10^{11}$
4	KDB-3	P	$1.53\cdot 10^5$	330.2	$1.14\cdot 10^{11}$

2–rasmdan ko'rinib turibdiki, solishtirma qarshiligining maksimal o'zgarishi $\rho\sim(5\div 7)\cdot 10^3 Om\cdot sm$ bo'lgan namunalarga to'g'ri keladi. Solishtirma qarshiligi $\rho\geq 7.9\cdot 10^2 Om\cdot sm$ dan kam bo'lgan va $\rho\leq 5\cdot 10^4 Om\cdot sm$ dan katta bo'lgan namunalarda esa, ρ ning o'zgarishi, $\rho\sim 5\cdot 10^3 Om\cdot sm$ namunalarga nisbatan ancha kichik bo'lishi aniqlandi.

Solishtirma qarshiligi $\rho\sim(5\div 7)\cdot 10^3 Om\cdot sm$ bo'lgan barcha namunalarda bosim ostida ρ ning sezilarli o'zgarishi tajriba natijalari asosida aniqlandi.

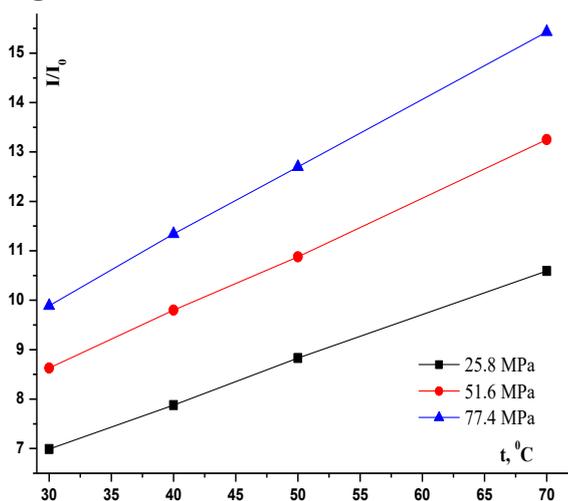
Nazorat kremniy namunasining solishtirma qarshiligining o'zgarishi 2–rasm 1 egri chiziqda ko'rsatilgan. Nazorat namunalarida ρ ning maksimal o'zgarishi 10 % dan 12% gacha oraliqda bo'ladi (2–rasm).



2 – rasm. Sinov namunalarining bosim ta'sirida solishtirma qarshiligining nisbiy o'zgarishi

1–dastlabki namuna, 2–marganes atomlari bilan legirlangan kremniy $\rho=1.53 \cdot 10^5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, 3–marganes atomlari bilan legirlangan kremniy $\rho=5.64 \cdot 10^4 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, 4–marganes atomlari bilan legirlangan kremniy $\rho=5.5 \cdot 10^3 \text{ Om}\cdot\text{sm}$.

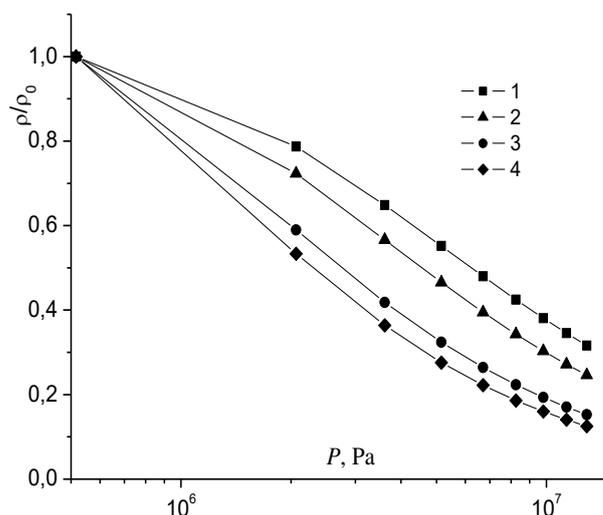
Shu bilan birga, tekshirilgan bosim oralig'ida, kirishma marganes atomlari bilan legirlangan namunalarning solishtirma qarshiligi (ρ) deyarli uch barobar o'zgardi, ya'ni, solishtirma qarshilikning 3 martagacha anomal darajada katta o'zgarishi kuzatildi.



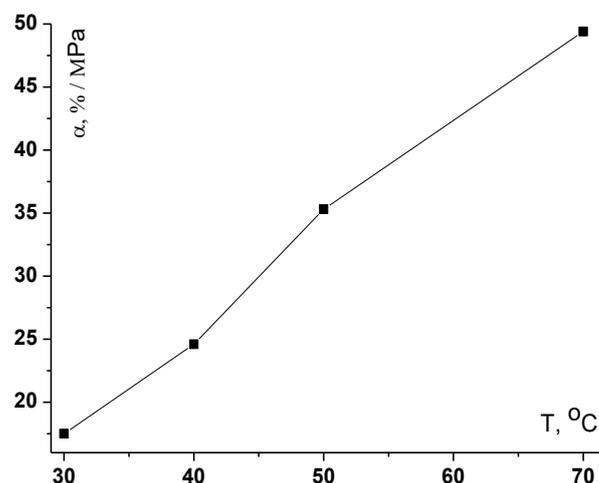
3–rasm. Turli qiymatlardagi radial nuqtaviy bosimlarda marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy tenzosezgirlicini haroratga bog'liqligi

Bu tajribada $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$, $T=50 \text{ }^\circ\text{C}$, $T=70 \text{ }^\circ\text{C}$ haroratlarda $P=10^6 \text{ Pa}$ dan $P=7.74 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ gacha bo'lgan nuqtaviy radial bosimning marganes atomlari bilan legirlangan kremniyning elektrofizik xususiyatlariga ta'siri o'rganildi (3–rasm). Marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning tenzosezgirlicini haroratga bog'liqligi turli bosim qiymatlarida o'rganildi. 3–rasmda ko'rsatilganidek, nuqtaviy radial bosim ta'sirida, marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalaridan o'tadigan tokning qiymati chiziqli ortib borishi aniqlandi.

Kirishma marganes atomlari bilan legirlangan, solishtirma qarshiligi $\rho=5.5 \cdot 10^3 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ bo'lgan kremniy namunasiga turli haroratlarda radial nuqtaviy bosimga bog'liqligi o'rganildi. Bu tajribalarda kremniy namunasining solishtirma qarshiligini (ρ) o'zgarishi 4–rasmda ko'rsatildi. Harorat oshishi bilan kremniy namunalarining tenzosezuvchanligi ortishi aniqlandi. Bu jarayon haroratni $T=70\div 75 \text{ }^\circ\text{C}$ qiymatigacha davom etadi, lekin haroratning yanada oshishi kremniy namunalarining tenzosezgirlikni yomonlashishiga olib keldi.



4–rasm. Turli haroratlarda bosim ostida marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarining solishtirma qarshiligining ($\rho=5.5 \cdot 10^3 \text{ Om}\cdot\text{sm}$) nisbiy o'zgarishi: 1– $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$, 2– $T=40 \text{ }^\circ\text{C}$, 3– $T=50 \text{ }^\circ\text{C}$, 4– $T=70 \text{ }^\circ\text{C}$

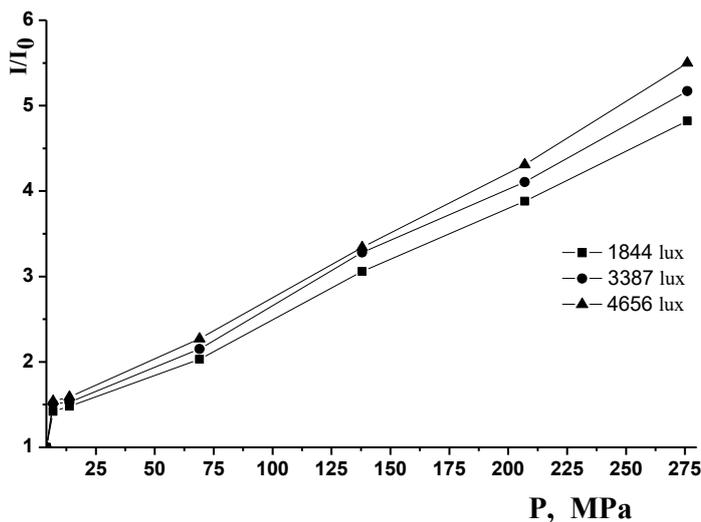


5–rasm. Marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarining tenzosezuvchanligini haroratga bog'liqligi

Marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarining haroratga nisbatan α –tenzosezgirlikning o'zgarishi 5–rasmda ko'rsatildi.

Olingan tajriba natijalari nafaqat tenzodatchiklarni keng harorat oralig'ida qo'llash imkoniyatini, balki harorat va bosim ortishi natijasida yuqori harorat sezgirlik ham mavjudligini ko'rish mumkin. Tajriba ma'lumotlariga asoslanib aytishimiz mumkinki, kirishma marganes atomlari bilan legirlangan kremniy noyob fizik imkoniyatlarga ega bo'lgan, yuqori samarali tenzodatchiklarni yaratish uchun eng qulay (optimal) material ekan. Odatdagi yarimo'tkazgich materiallardan farqli, marganes atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarini xona haroratida ancha yuqori tenzosezuvchanlik mavjud ekanligi aniqlandi.

Olingan tajriba natijalarini mavjud nazariyalar yordamida tushuntirib bo'lmaydi. Olingan materialdagi bunday yuqori tenzosezgirlik kremniy kristall panjarasida joylashgan marganes kirishma atomlarining holatini bosim ta'sirida o'zgarishi bilan bog'liq ekan.



6–rasm. Solishtirma qarshiligi $\rho=2.4 \cdot 10^3 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo‘lgan marganes atomlari bilan legirlangan kremniyning yoritilganlikni turli intensivligi ta’sirida tenzosezuvchanlikning nisbiy o‘zgarishi

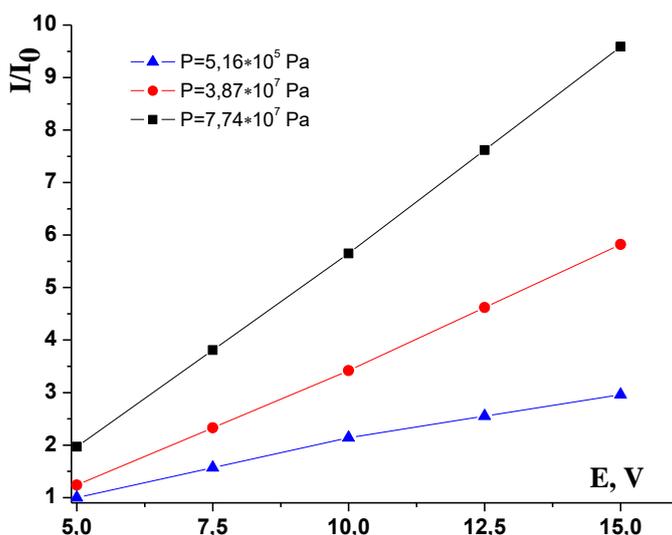
6–rasmdan ko‘rinib turibdiki, nuqtaviy radial bosimning qiymatini oshishi bilan fototokni nisbiy o‘zgarishi chiziqli ravishda ortdi, bu tajriba natijalari bir vaqtning o‘zida yoritilganlik va bosim ta’sirini tadqiq qiluvchi datchiklarni ishlab chiqishda muhim ahamiyatga ega.

Shuni ta’kidlash kerakki, yorug‘lik intensivligining ortishi bilan fototokning nisbiy o‘zgarishi kuchayadi, bu natijalarni tenzodatchikning sezgirlikini oshirishda foydalanish mumkin.

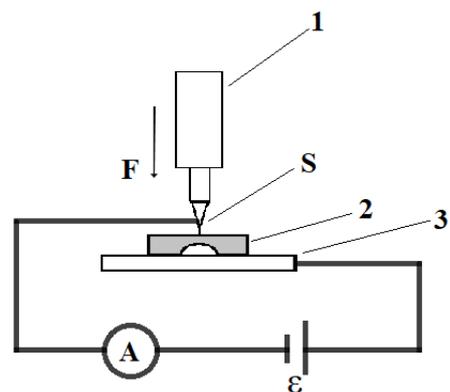
Tadqiqot natijalarining tahlili shuni ko‘rsatadiki, marganes kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy namunalarini integral yorug‘lik bilan yoritilganda tenzosezuvchanligi oshar ekan.

Dissertatsiyaning **“Marganes kirishmalariga ega kremniy asosida tenzodatchik yaratish imkoniyati”** deb nomlangan to‘rtinchi bobida marganes kirishmalariga ega kremniyning tenzoelektrik xususiyatlarini elektr maydoniga bog‘liqligi, marganes kirishmalariga ega bo‘lgan kremniy asosidagi tenzodatchikning optimal konstruksiyasini yaratilishi, marganes kirishmalariga ega kremniyga bir vaqtning o‘zida yoritilganlik va temperatura ta’siri o‘rganilgan va eksperimental natijalar muhokama qilingan.

Tajriba natijalari asosida, marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy harorat ta’sirida ham yuqori sezgir tenzodatchiklarni yaratish uchun noyob material ekanligi aniqlandi. Shuni ta’kidlash kerakki, tenzodatchiklarni yaratish uchun ishlatiladigan mavjud materiallardan farqli, marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning tenzosezgirlikni harorat $T=70 \text{ }^\circ\text{C}$ gacha ko‘tarilganda yaxshilanishi aniqlandi.



7–rasm. Turli elektr kuchlanishlarda va radial nuqtaviy bosim ta’sirida tokning nisbiy o’zgarishi



8–rasm. Tashqi mexanik bir o’qli radial nuqtaviy bosimning ta’siri ostida kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy parametrlarini o’lchash uchun ishlab chiqarilgan qurilmaning konstruksiyasi va sxemasi

Marganes bilan legirlash uchun boshlang’ich material sifatida solishtirma qarshiligi $\rho=5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ bo’lgan p-tipli monokristall kremniy tanlandi. Marganes kirishma atomlari bilan legirlash jarayoni diffuziya texnologiyasi bilan yopiq ampulalarda $T=1050\div 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ harorat oralig’ida $t=5\div 20$ daqiqa davomida amalga oshirildi. Marganes atomlari bilan legirlangan kremniyning tenzoelektrik xususiyatlarini elektr maydoniga bog’liqligini o’rganish uchun $\rho\sim 5\cdot 10^3 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ namuna tayyorlangan.

7–rasmda $P=5.16\cdot 10^5 \text{ Pa}$ dan $P=7.74\cdot 10^7 \text{ Pa}$ gacha bo’lgan turli bosimlarda bir o’qli nuqtaviy radial bosimning ta’sir qilish sohasidagi tokning o’zgarish qonuniyatlari zondga qo’llaniladigan elektr kuchlanishning turli qiymatlarida keltirilgan. Rasmdan ko’rinib turibdiki, zondga tushiriladigan elektr kuchlanish ortishi bilan tenzosezuvchanligi chiziqli ortgan.

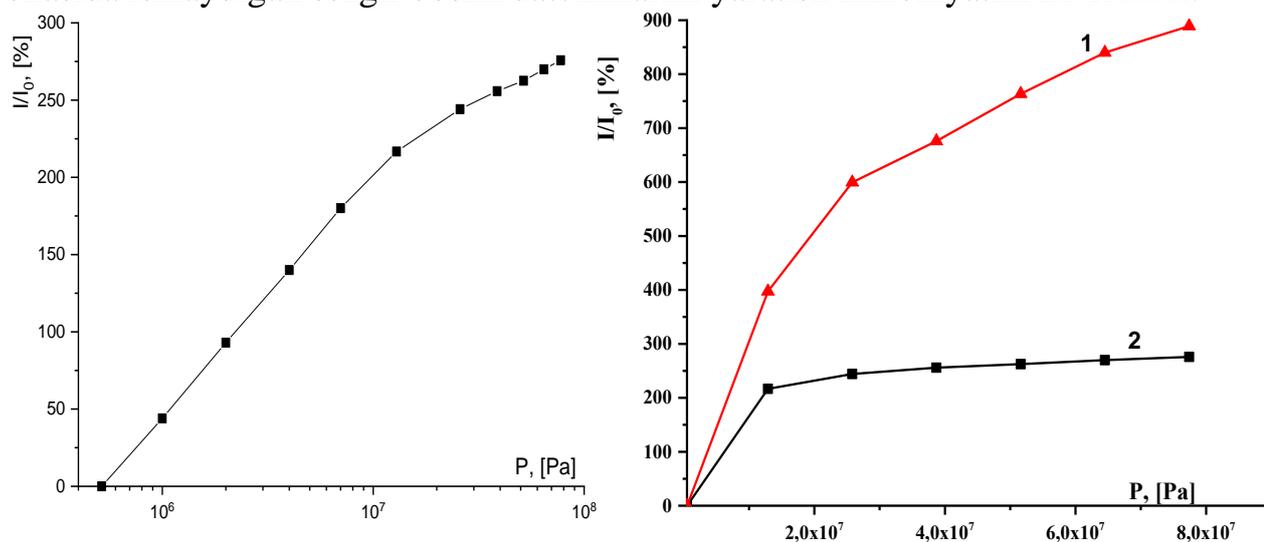
Namunalarning tenzoxususiyatlarini o’rganish jarayonida bir o’qli radial bosimning ta’sirini 8–rasmda ko’rsatilgandek elektr sxemasi yordamida amalga oshirildi. Bu yerda: 1–yupqa uchli zond, 2–sinov namunasi, 3–elektr o’tkazuvchan materialdan yasalgan tekis taglik. (S–yupqa uchli zond uchining maydoni, F–kuch).

Harorat va yoritilganlikning ortishi material tenzosezgirlikining sezilarli darajada ortishiga olib kelishi aniqlangan. Olingan natijalar kvant nuqtalarda hamda materialda tashkil topgan minizonalarda energetik spektrlar kengayishi bilan tushuntiriladi.

Olingan namunaning elektrofizik parametrlariga turli haroratlarda bosim ta’sirini o’rganish maxsus yaratilgan qurilma yordamida amalga oshirilgan. Qurilma xona haroratidan $T=150 \text{ }^\circ\text{C}$ gacha bo’lgan harorat oralig’ida tadqiqot qilish imkonini

berdi. Bosim mexanik usulda uchli zond yordamida amalga oshirilgan. Tajribalar $P=5.16 \cdot 10^5 Pa$ dan $P=7.74 \cdot 10^7 Pa$ gacha bosim ta'siri va $T=30 \text{ }^\circ C$, $T=40 \text{ }^\circ C$, $T=50 \text{ }^\circ C$, $T=70 \text{ }^\circ C$ haroratlarda o'rganilgan. O'lchash vaqtida namunalardagi kuchlanish tushishi $E = 10 V$ ni tashkil etadi.

9-rasmda I/I_0 ning bosimga nisbatan nisbiy o'zgarishi ko'rsatilgan. Tokning (I/I_0) nisbiy o'zgarishining bosimga bog'likligini, tenzosezgirlik koeffitsiyentining α_1 ($P=5 \cdot 10^5 \div 7 \cdot 10^7 Pa$) va α_2 ($P=10^7 \div 10^8 Pa$) bo'lganda monoton o'zgarishiga qarab ikkita sohaga ajratish mumkin. Bu juda muhim natija bo'lib, kichik bosimlar sohasida ishlaydigan sezgir bosim datchiklarini yaratish imkoniyatini ko'rsatadi.



9-rasm. Xona haroratida tokning nisbiy o'zgarishini bosimga bog'liqligi (1–100 Vt/sm^2 yoritilganlik bilan, bog'liqligi (yoritilmagan holda, 2–yoritilmagan holda, $E=10 V$, $T=300 K$ da) $E=10 V$ da, $T=300 K$ da)

Xuddi shunday qonuniyat yuqori haroratlarda kuzatiladi, shuning uchun namunalar yoritilganda juda qiziqarli natijalar olingan.

Shunday qilib, yoritilganda tenzosezgirlik (10-rasm) sezilarli darajada ortishi aniqlangan. Ma'lumki, oddiy yarimo'tkazgich materiallarda teskari ta'sir kuzatiladi, ya'ni yoritilganlik tenzosezuvchanligining pasayishiga olib kelishi.

Bu o'rganilgan namunalarning asosiy xususiyatlaridan biri bo'lib, yuqori sezuvchan foto-tenzo-datchiklarning yangi sinfi yaratilganligini ko'rsatadi. Qorong'ulikda va yoritilganlikda har xil haroratlarda tenzodatchiklarning α_1 va α_2 koeffitsiyentlari 3-jadval va 11-rasmda keltirilgan. α_1 va α_2 koeffitsiyentlar quyidagi tenglama orqali hisoblanadi:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{I}{I_0}\right)_1 - \left(\frac{I}{I_0}\right)_2}{P_2 - P_1} \quad (7)$$

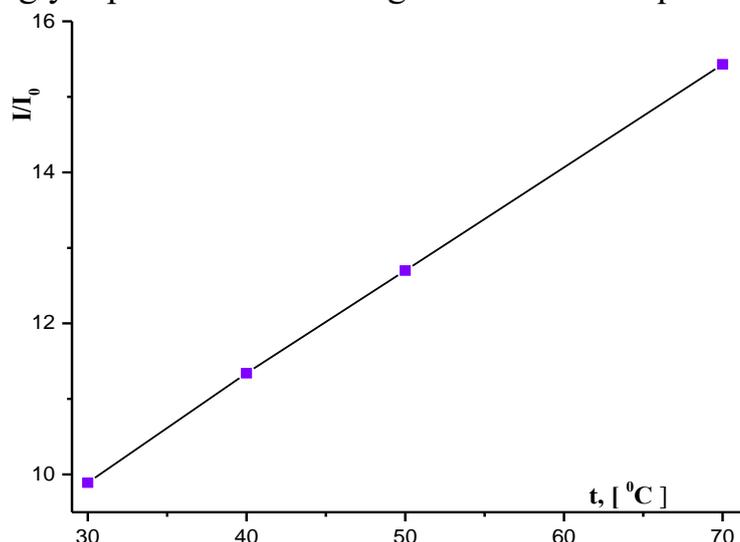
Olingan natijalar marganes atomlari bilan legirlangan kremniy haqiqatdan ham juda sezgir tenzodatchiklarni yaratish uchun mutlaqo yangi material ekanligini ko'rsatadi.

3-jadval

Harorat	30 °C	40 °C	50 °C	70 °C
Yoritmasdan				
$\alpha_1, [\%/MPa]$	2.02	3.36	6.97	10.8
$\alpha_2, [\%/MPa]$	0.11	0.36	1.14	2.46
Yoritilganda				
$\alpha_1', [\%/MPa]$	5.6	6.72	9	11.79
$\alpha_2', [\%/MPa]$	1.39	1.86	1.99	2.8

Namunalarning tenzoxossalarning yana bitta xususiyati haroratning tenzosezgirlikka sezilarli ta'sir etishidir. Harorat oshganda tenzo sezuvchanligi pasaymaydi, aksincha sezilarli darajada ortgan.

Legirlashdan so'ng paydo bo'lgan marganes atomlarining holati ko'p zaryadli kvant nuqtalari vazifasini bajarishi bilan izohlanadi, ular o'z atrofida nafaqat yetarlicha kuchli elektr maydonini hosil qiladi, balki bularning o'zaro ta'siri tufayli elektronlarning energiya spektrini kvantlashiga sezilarli ta'sir qiladi.



11–rasm. Doimiy nuqtaviy bosim ta'sirida tok kuchi o'zgarishining haroratga bog'liqligi. ($I=5000$ luks yoritilganda, $E=10$ V/sm)

Legirlangan kremniydagi marganes atomlari esa bunday kristallardagi energiya holatlarining spektral diapazoni sezilarli darajada kengayishiga sabab bo'ladigan kichik energiya sathi paydo bo'lishiga olib keladi.

Tenzosezgirlik taqiqlangan zona kengligiga bevosita bog'liq va shunga mos past tenzokoeffitsiyentga ega bo'lgan odatiy yarimo'tkazgich materiallardan farqli ravishda bizning materiallarda, bosim ostida E_g qiymati o'zgarishidan tashqari, kvant nuqtalari ichida va mini zonalaridagi energetik sathlar butun spektri sezilarli darajada o'zgaradi.

Bunda kvant nuqtalaridagi kirishma energetik sathlar va mini zonalardagi energetik sathlar ionlanish energiyasi o'zgarishining qo'shgan hissasi E_g ning o'zgarishiga qaraganda sezilarli darajada katta. Kremniydagi marganes atomlari konsentratsiyasini va zaryadlanganlik darajasini o'zgartirish orqali tenzo sezgirlikni keng ko'lamda o'zgartirish mumkin. Bu esa nafaqat yangi sinf tenzodatchiklari

yaratishnigina emas, balki hajmiy nanostrukturali materiallar tenzo effektini tadqiq qilish va amaliyotda qo'llash bilan bog'liq bo'lgan yangi ilmiy yo'nalishga asos solish demakdir.

XULOSA

1. Keng diapazonda tok tashuvchilar konsentrasiyalari (n) va solishtirma qarshiligi (ρ) bo'lgan marganes bilan legirlangan tenzosezgir o'ta kompensatsiyalangan kremniy namunalari yaratishning texnologik rejimi ishlab chiqildi.

2. Ilk bor $T=1060$ °C haroratda legirlangan $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ namunalarning solishtirma qarshiligi $5 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^6$ Pa oraliqdagi bosim (P) ta'sirida 3 barobar ortishi va dastlabki kremniy namunalarida esa sezilarli o'zgarmasligi aniqlandi.

3. Doimiy bir o'qli nuqtaviy radial bosim $5.16 \cdot 10^5 \div 7.74 \cdot 10^7$ Pa va $30 \div 75$ °C harorat (T) ta'sirida $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ namunalarida tenzosezuvchanligi (α) 15 marta ortishi aniqlandi.

4. Ilk bor bir o'qli nuqtaviy radial bosim $P=4.14 \cdot 10^6 \div 2.76 \cdot 10^8$ Pa va $I=1800 \div 4600$ luks yorug'lik ta'sirida bo'lgan marganes kirishma atomlari bilan o'ta kompensatsiyalangan kremniy namunalarning tenzosezgirlik qiymati 2÷3 barobar ortishi aniqlandi.

5. $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ namunalariga $1 \div 15$ V/sm diapazondagi tashqi elektr maydoni (E) ta'sir qilganda ularning tenzosezuvchanligi deyarli 3 marta oshishi aniqlandi.

6. Bir o'qli nuqtaviy radial bosim ($10^6 \div 10^9$ Pa), yorug'lik ($1 \div 50000$ luks), harorat ($1 \div 150$ °C) va elektr maydoni ($1 \div 15$ V/sm) ta'sirida bo'lgan o'ta kompensatsiyalangan kremniyning tenzo sezuvchanligini va boshqa xossalarini o'rganish uchun qurilma yaratildi.

**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**

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

ТУРСЫНБАЕВ САБЫРБАЙ АУЕСБАЙ УЛЫ

**ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА КРЕМНИЯ С ПРИМЕСЬЮ МАРГАНЦА**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2023.2.PhD/FM287

Диссертация выполнена в Нукусском государственном педагогическом институте и Научно-исследовательском институте Физика полупроводников и микроэлектроники при НУУз имени Мирзо Улугбека.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу ispm.uz и на Информационно-образовательном портале "ZiyoNet".

Научный руководитель: Камалов Амангелди Базарбаевич
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Дадамрзаев Мухаммаджон Гуломқодирович
доктор физико-математических наук, профессор
Пулатова Диларам Собитовна
кандидат физико-математических наук

Ведущая организация: Ферганский государственный университет

Защита диссертации состоится « 13 » « 06 » 2024 г. в 10 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

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсный центр института (зарегистрирована за № 60) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871)248-79-59.

Автореферат диссертации разослан « 28 » « 05 » 2024 г.
(реестер протокола рассылки № 66 от 28.05 2024 г.).



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

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

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время во всем мире особое внимание, как одному из актуальных направлений в области физики полупроводников, уделяется разработке методов получения новых типов материалов путем изменения основных параметров кремния с помощью легирования примесными атомами, создающими глубокие энергетические уровни, а также созданию на основе полученных новых материалов датчиков для измерения различных физических величин. На сегодняшний день в развитых странах комплексное исследование тензоэлектрических свойств кремния, легированного переходными металлами, имеет большое научное и практическое значение, при этом особое внимание уделяется разработке совершенно новых, сверхчувствительных, предельно малогабаритных датчиков и устройств измерения механических деформаций.

Во всем мире проводятся научные исследования, направленные на изучение тензоэлектрических, электрофизических, фотоэлектрических, оптических и других свойств кристаллического кремния, а также на усовершенствование конструкции датчиков. В частности, особо важное внимание отводится тому, чтобы полупроводниковые датчики давления обладали высокой чувствительностью и могли обнаруживать малые значения физических параметров. Однако большинство полупроводниковых датчиков не обладают такими свойствами. Также при выборе правильного датчика давления для измерительных устройств важную роль играют его стоимость, точность измерения и долговременная стабильная работа. В этой связи, одной из актуальных задач является изучение тензометрических свойств кремния с примесью марганца.

В нашей республике достигаются определенные успехи в области разработки технологий получения новых материалов на основе легирования кремния атомами марганца для создания высокочувствительных датчиков, приводящего к радикальному изменению свойств кристаллической решетки кремния. Поэтому возрастает потребность в создании датчиков, физические параметры которых обладают одновременно высокой чувствительностью к нескольким видам внешних воздействий. В связи с этим, изучение влияния одноосного давления на электрофизические свойства кремния, легированного примесями марганца является весьма актуальным. В постановлении Президента Республики Узбекистан ПП–5032 «О мерах по повышению качества образования в области физики и развитию научных исследований» от 19 марта 2021 года указано: «определены функции обеспечения неразрывной связи научных исследований в области физики с производством, расширения сферы научной работы, направленной на решение проблем в отраслях экономики; повышения производительности и практической значимости

научно-исследовательской и инновационной работы...»². В этом направлении большое научное значение имеет создание новых полупроводниковых материалов с необходимыми электрофизическими, фотоэлектрическими и оптическими свойствами для производства на их основе устройств микро- и наноэлектроники, датчиков.

Представленное диссертационное исследование, в определенной мере, способствует выполнению задач, изложенных в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», а также постановлениями Президента Республики Узбекистан № ПП-4779 «О дополнительных мерах по сокращению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетической продукции, путем повышения энергоэффективности экономики и задействования имеющихся ресурсов» от 10 июля 2020 года и № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» от 22 августа 2019 года, в котором утверждены долгосрочные целевые параметры развития ВИЭ и план организационно-практических мер дальнейшего развития ВИЭ.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Настоящая работа выполнена в соответствии с Приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан III: «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машина- и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. До настоящего времени исследование монокристаллов кремния, легированного примесными элементами, и его тензочувствительные свойства изучались в следующих научных центрах: Национальный университет науки и технологий (Пакистан), Лаборатория функциональной биоинтегральной электроники и управления энергопотреблением (Корея), Центр механики твердых тел и конструкций материалов (Корея), кафедры аэрокосмической инженерии (США), Техасский Университет в Остине, Факультет электротехники и вычислительной техники, Университет Иллинойса в Урбана-Шампейн (США).

Российскими учеными А.Г. Малыгиным, В.И. Николаевым, В.М. Крымовым, А.В. Солдатовым (Россия) и их научными школами было изучено влияние термической обработки на деформационные свойства при воздействии давления вдоль оси $\langle 011 \rangle$ кристаллов сплава $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$. Научные исследования по технологии изготовления чувствительных к давлению тензодатчиков на основе поликристаллического алмазного материала проводились К.Й. Крайновой (Россия). В научных работах И.Г. Проценко, Ю.А. Брусенсовых (Россия) изучались эффекты механической деформации и напряжений с использованием полупроводниковых

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

тензочувствительных элементов. В научных школах В.В. Каминского, А.А. Молодиха, Н.Н. Степанова, С.М. Соловьева, Н.М. Володина, В.А. Иванова (Россия) свойства полупроводниковых тензо- и барорезисторов на основе соединения сульфида самария изучались при измерении внешнего давления.

В настоящее время академики Р.А. Муминов, А.Т. Мамадалимов, М.К. Бахадирханов, С. Зайнобидинов, профессора Ш.Б. Утамурадова, Х.С. Далиев, Н.Ф. Зикриллаев, Х.М. Илиев и другие дали научное обоснование легирования образцов кремния примесными атомами и расширения возможностей тензорезисторов, созданных на основе полученного материалов. О.О. Маматкаримов, О. Химматкулов, И.Г. Турсунов исследовали влияние одноосной упругой деформации на вольт-амперные характеристики поверхностно-барьерной части структурированного диода $Sb-p-Si\langle Mn \rangle-Au$. Г. Гулямов, А.Г. Гулямов исследовали тензочувствительность $p-n$ -перехода при освещении. С.М. Отажонов, А.М. Худойбердиев исследовали деформационную чувствительность тонких полупроводниковых пленок с примесями, создающими глубокие уровни при температуре жидкого гелия. Определено относительное изменение сопротивления тонких полупроводниковых пленок при деформации соответствующей различным температурам и предложена структурная модель, объясняющая механизм чувствительности к деформации при температуре жидкого гелия 4.2 К. Разработано устройство для определения деформационной чувствительности тонких полупроводниковых пленок при температуре 4.2 К.

Эспериментальные и теоретические исследования, посвященные анализу датчиков и устройств на основе полупроводниковых тензочувствительных материалов, показывают, что возможности этой области гораздо шире. Однако до настоящего времени не изучались тензосвойства кремния, легированного атомами марганца, находящегося под действием малых одноосного точечного радиального давления и методы управления его параметрами.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проекта научных исследований Каракалпакского государственного университета по теме: ОТ-Ф-2-77 «Усовершенствованный метод прогнозирования надежности полупроводниковых приборов с учетом внутренних дефектов на основе моделирования» в 2016-2020 гг.

Целью исследования является изучение электрофизических свойств кремния, легированного марганцем, под воздействием одноосного давления, и разработка технологического режима создания чувствительных тензодатчиков на основе $p-Si\langle B, Mn \rangle$.

Задачи исследования:

разработать технологический режим создания тензочувствительных образцов $p-Si\langle B, Mn \rangle$;

исследовать тензосвойства образцов $p-Si\langle B, Mn \rangle$, имеющих разные удельные сопротивления;

изучить о влияние одновременного воздействия давления и температуры на электрофизические параметры образцов $p-Si\langle B, Mn \rangle$;

исследовать электрофизические параметры перекомпенсированных образцов $p-Si\langle B, Mn \rangle$ при одновременном воздействии одноосного точечного радиального давления и света;

исследовать влияние одноосного точечного радиального давления на электрофизические параметры образцов $p-Si\langle B, Mn \rangle$ при различных значениях электрического поля;

создать устройство для исследования изменений тензосвойств под влиянием одноосного точечного радиального давления, света, температуры, электрического поля на физические параметры компенсированного кремния.

Объектом исследования выбраны образцы $p-Si\langle B, Mn \rangle$ с различным удельным сопротивлением.

Предметом исследования является исследование тензосвойств образцов $p-Si\langle B, Mn \rangle$.

Методы исследований. Для выполнения поставленных задач использовались следующие устройства и методы: современный измерительный прибор, основанный на эффекте Холла Escoria HMS-7000 для измерения электрофизических параметров образцов $p-Si\langle B, Mn \rangle$, спектрометр ИКС-21 для исследования фотоэлектрических свойств кремния, устройство для исследования тензосвойств образцов $p-Si\langle B, Mn \rangle$, создающее одноосное точечное радиальное давление, разработанное в процессе выполнения диссертационной работе.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан технологический режим создания тензочувствительных образцов $p-Si\langle B, Mn \rangle$ с концентрацией носителей тока $n=1.14 \cdot 10^{11} \div 2.39 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и удельным сопротивлением $\rho=7.92 \cdot 10^2 \div 1.53 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$;

впервые установлено, что значение удельного сопротивления образцов $p-Si\langle B, Mn \rangle$, легированных при температуре $T=1060 \text{ }^\circ\text{C}$ увеличивается в 3 раза под воздействием давления (P) в диапазоне $5 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^6 \text{ Па}$, а в исходных образцах изменение незначительно;

установлено, что в образцах $p-Si\langle B, Mn \rangle$ при воздействии постоянного одноосного точечного радиального давления $P=5.16 \cdot 10^5 \div 7.74 \cdot 10^7 \text{ Па}$ и температуре $T=30 \div 75 \text{ }^\circ\text{C}$ деформационная чувствительность (α) увеличивается в 15 раз по сравнению с исходными образцами;

впервые установлено, что при одноосном точечном радиальном давлении $P=4.14 \cdot 10^6 \div 2.76 \cdot 10^8 \text{ Па}$, приложенном к образцам $p-Si\langle B, Mn \rangle$, находящимся под влиянием света освещенностью $I=1800 \div 4600 \text{ люкс}$, тензочувствительность образцов увеличивается в $2 \div 3$ раза;

обнаружено, что при воздействии внешнего электрического поля (E) в интервале $1 \div 15$ В/см на образцы $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ их тензочувствительность увеличивается примерно в 3 раза по сравнению с исходными образцами;

создано устройство для исследования тензочувствительности сильно компенсированного кремния, подвергнутого действию одноосного точечного радиального давления ($10^6 \div 10^9$ Па), света ($1 \div 50000$ люкс), температуры ($1 \div 150$ °С) и электрического поля ($1 \div 15$ В/см).

Практические результаты исследования:

путем изменения управления концентрации атомов марганца в кремнии показано повышение чувствительности кремния к одноосному точечному радиальному давлению, на основе которого выявлены возможности создания нового класса датчиков с высокой тензочувствительностью;

разработаны этапы технологического режима создания образцов нового типа на основе кремния, легированного атомами марганца ($p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$), чувствительных к деформации.

Достоверность результатов исследований обоснована использованием метода исследования электрофизических свойств кремния, легированного атомами марганца и физических процессов, происходящих в них при диффузии и после нее под действием различных внешних факторов, а также современного измерительного прибора, основанного на эффекте Холла для измерения электрофизических параметров, спектрометра для исследования фотоэлектрических свойств кремния ИКС-21, использованием сконструированного в процессе выполнения диссертационной работы устройства создания одноосного точечного радиального давления для исследования тензосвойств образцов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость полученных результатов исследования заключается в особенностях тензоэлектрических параметров, которые определялись в зависимости от природы созданных образцов $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$.

Практическая значимость результатов исследований состоит в определении влияния параметров диффузии на структуру примесных скоплений при легировании кремния атомами марганца и изучении возможности создания устройств и датчиков, регистрирующих малые значения давления.

Внедрение результатов исследования.

В процессе изучения исследования влияния одноосного точечного радиального давления на электрофизические свойства $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ получены следующие научные результаты:

разработаны основные технологические режимы создания образцов нового типа $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ и тензочувствительности; в исходных образцах кремния, тензочувствительность составляет $10 \div 12\%$, а в образцах $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ тензочувствительность увеличивалась в 3 раза; под воздействием давления (P) в диапазоне $5.16 \cdot 10^5 \div 7.74 \cdot 10^7$ Па в интервале температур (T) $30 \div 75$ °С в образцах $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ значение тензочувствительности (α) увеличивается в

15 раз и эти результаты использованы в Акционерном обществе «ФОТОН» при получении тензочувствительных кремниевых структур (справка АО «Узэлтехсаноат» № 04-3/484 от 19.04.2023 г.). Использование научных результатов позволило изготовить образцы с электрофизическими параметрами, соответствующими уровню мировых аналогов;

в результате исследования электрофизических параметров сильно компенсированного $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$, при одновременном воздействии одноосного точечного радиального давления и света при освещенности (I) в диапазоне $1800 \div 4600$ люкс, а также при изменении точечного радиального давления (P) в диапазоне $4.14 \cdot 10^6 \div 2.76 \cdot 10^8$ Па, увеличивая напряженность электрического поля (E) в диапазоне $5 \div 15$ В/см тензочувствительность образцы $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$, увеличилась почти в 3 раза. Эти результаты были использованы в фундаментальном научно-исследовательском проекте № ОТ-Ф-2-77 «Совершенствование метода прогнозирования надежности полупроводниковых приборов на основе моделирования с учетом внутренних дефектов», выполненном в Каракалпакском государственном университете в 2016–2020 гг. (справка Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан №2/14-17/04-829 от 1 мая 2023 года). Использование научных результатов позволило подробно описать тензоэлектрические свойства образцы $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования были доложены и обсуждены на 9 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. Всего по основным результатам работ по теме диссертации было опубликовано 28 научных работ, из них 7 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан при Министерстве Высшего образования, науки и инновации Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Объём диссертационной работы, включая 42 рисунка и 10 таблиц, составляет 115 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследования с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан, приведен обзор научных работ по теме диссертации раскрыты сведения о степени изученности проблемы и методах исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе под названием **«Состояние современных**

тензорезисторов на основе полупроводниковых материалов» дан анализ имеющейся в литературе информации о тензорезистивных материалах, конструкциях тензорезисторов, типах полупроводниковых тензорезисторов и проблемах их изготовления. На основе анализа теоретических и экспериментальных данных определены цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием **“Технология разработки тензодатчика нового типа на основе кремния”**, описана технология получения образцов $Si\langle B, Mn \rangle$, а также технология химического осаждения никеля на поверхность кремния, освещены исследовательские методы использования метода Холла при исследовании электрических параметров тензодатчиков, по созданию устройства для исследования тензосвойств образцов $Si\langle Mn \rangle$.

Для получения компенсированного кремниевого образца были использованы монокристаллические кремниевые образцы марок КДБ–1, КДБ–2, КДБ–3, КДБ–4 и КДБ–5, выращенные методом Чохральского. Исходные образцы имеют следующие характеристики: концентрация остаточного кислорода в пределах $\sim 10^{17} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$ концентрация атомов бора $N_B \approx 7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ удельное сопротивление $\rho \sim 1 \div 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, плотность дислокаций $S \sim 10^3 \text{ см}^{-2}$ и проводимость p -типа. В качестве примеси был выбран марганец чистотой 99.999% и электроактивной концентрацией $N_{Mn} \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Образцы были нарезаны на части размером $8 \times 4 \times 1 \text{ мм}^3$. Процесс резки образцов осуществлялся с помощью устройства с алмазной резкой STX–402 (Diamond wire saw) с фиксированными точными угловыми держателями, которое обладает высокой эффективностью при точности размеров $\pm 10 \text{ мкм}$ и применяется в лабораторных условиях и на производстве для качественной резки.

Для устранения повреждений, вызванных в процессе резки образцов механическими и химическими методами, проводилось медленное травление в растворе с содержанием $1HF:3HNO_3$. Затем с помощью микропорошков карбида кремния с M1 до M14, обеспечивающих параллельность противоположных граней с точностью $\sim 2 \div 3 \text{ мкм}$.

Перед диффузией образцы были еще раз очищены в бидистиллированной воде и с использованием химических смесей $1HNO_3:3HCl$ для удаления механически поврежденных участков и жира, образовавшихся на поверхности образцов в процессе шлифования. Затем образцы помещали в ампулы из кварца, которые отправляли и сушили в бидистиллированной воде и спирте, а после введения примесных элементов марганца воздух всасывали до давления $P \sim 10^{-4} \div 10^{-6} \text{ мм.рт.ст.}$

Диффузию примесных атомов марганца в кремний осуществляли в вакуумной трубчатой печи, поддерживающей заданную температуру с точностью до $\pm 1^\circ\text{C}$.

Температура диффузий определена с помощью платина–платинородиевой термопары размещенной близи кварцевой ампулы.

Диффузию марганца в кремний осуществляли в газовой фазе. Количество элемента марганца, осажденного в кварцевой ампуле, было выбрано таким образом, чтобы давление образующегося пара при температуре диффузии обеспечивало необходимую концентрацию на поверхности образца.

Затем, в ходе процесса диффузии, весь объем образца был перенесен в ампулы, где был получен замкнутый вакуум в течение $t=5\div 20$ минут, чтобы входное отверстие было равномерно насыщено атомами марганца.

В зависимости от концентрации технических легированных атомов в исходном образце кремния проводили процесс диффузии в диапазоне температур $T=1050\div 1150^\circ\text{C}$, математически рассчитывая температуру и время диффузии марганца, с целью получения образцов, с различной степенью компенсированных примесными атомами марганца ($\rho=10^2\div 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

После диффузии кварцевую ампулу, в которой находились образцы, опускали в специальное масло и охлаждали со скоростью $200\div 300^\circ\text{C}/\text{с}$. После этого образцы были из взяты из кварцевой ампулы и очищены механической и химической обработкой.

Чтобы учесть влияние термической обработки и других условий диффузии, контрольные образцы кремния были приготовлены в тех же условиях. Чтобы удалить поверхностный оксидный слой, после диффузии, все стороны образцов были механически обработаны специальным микропорошком карбида кремния, сохранив плавную параллельность противоположных граней от 100 мкм.

Из анализа литературы известно, что атомы марганца образуют в кремнии две донорные энергетические уровни. Образую одно- и двукратно ионизированные энергетические уровни атомов марганца, они эквивалентны следующим:

$$E_{Mn1}=E_c-0.3 \text{ эВ} \text{ и } E_{Mn2} = E_c-0.55 \text{ эВ}. \quad (1)$$

Концентрация электроактивных атомов марганца составила $N_{Mn} \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Растворимость и коэффициент диффузии примесных атомов марганца в кремнии являются обратными по отношению к максимальной концентрации электроактивных атомов марганца при $T=1150^\circ\text{C}$, $N_{Mn}=8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а коэффициент диффузии определяется следующим выражением:

$$D_{Mn}=0.26 \exp(-1.3/kT). \quad (2)$$

Из выражения энергия активации легированного атомов марганца мала по сравнению с другими легированными атомами (например, серой и селеном).

Омические контакты на образцах кремния были получены из низкотемпературного сплава индий галлий путем химического осаждения никеля на поверхность кремния или путем распыления атомов никеля на поверхности кремния в вакуумном устройстве "ВУП-4". Перед получением любых контактов образцы очищали на основе определенных химических растворов ($1\text{H}_2\text{O}_2:1\text{NH}_4\text{OH}:5\text{H}_2\text{O}$ перекисно-аммиачный раствор), качество полученных контактов проверялись путем измерения вольт-амперных характеристик образцов.

Электрические параметры (электропроводность, подвижность и концентрация) образцов были определены с помощью метода основанного на эффекте Холла. Контрольный образец помещался со специальным держателем между полюсами постоянного магнита с магнитным полем $H=3000$ Эрстед.

Направление магнитного поля было изменено путем поворота магнита в 180° ; сопротивление было рассчитано по следующей формуле:

$$\rho = \frac{V_0 \cdot l}{I \cdot W \cdot t} \quad [\text{Ом} \cdot \text{см}]. \quad (3)$$

Здесь I –ток, проходящий через образец, V_0 –напряжение между контактами, l –расстояние между потенциальными контактами, W –ширина образца, t –толщина образца. Постоянная Холла была рассчитана по следующей формуле:

$$R_H = \frac{V_H \cdot t \cdot 10^8}{IB} \quad [\text{см}^3/\text{Кл}]. \quad (4)$$

Здесь V_H электродвижущая сила Холла, B - индукция магнитного поля. Подвижность Холла была рассчитана по следующей формуле:

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad [\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}]. \quad (5)$$

Концентрация основных носителей тока была рассчитана по следующей формуле:

$$n, p = \frac{l}{eR_H} \quad [\text{см}^{-3}]. \quad (6)$$

Результаты были представлены в таблице 1.

1–таблица

№	Образец	тип	R_x (Ом)	ρ , (Ом·см)	μ	n, p (см ⁻³)
1	КДБ–1	p	$2.796 \cdot 10^3$	0.875	320	$22.3 \cdot 10^{15}$
2	КДБ–3	p	$1.416 \cdot 10^3$	3.1	426.7	$4.4 \cdot 10^{15}$
3	КЭФ–50	n	$62 \cdot 10^3$	46.75	1450	$1 \cdot 10^{14}$
4	КЭФ–100	n	$134.3 \cdot 10^3$	112	1125	$4.677 \cdot 10^{13}$

Для получения достоверных результатов при измерении параметров кремния со структурами из атомов марганца под воздействием внешнего точечного радиального одноосного механического давления было разработано специальное устройство, позволяющее синхронно (плавно) изменять как при отсутствии, так и при наличии малой величины.

Преимущество и отличие устройства, показанного на рис. 1, от предыдущих вариантов заключается в том, что при изучении влияния точечного радиального давления на полупроводники одновременное изменение значений следующих дополнительных внешних воздействий: света, температуры и электрического поля, позволяет осуществлять управление абсолютно автоматически.

С помощью созданного устройства удалось измерить тензопараметры образцов кремния при изменении значения радиального давления одноосной точки от $P=10^5$ Па до $P=10^8$ Па. Кроме того, возможна освещенность от 1 люкс до 15000 люкс, от $T=30^\circ\text{C}$ комнатной температуры до $T=150^\circ\text{C}$, возможно воздействие светом и температурой.



Рис.1. Третья версия устройства для измерения электрофизических параметров полупроводниковых образцов под воздействием точечного радиального давления

В третьей главе диссертации «Исследование тензосвойств образцов $Si<Mn>$ » изучались тензоэлектрические свойства образцов $Si<Mn>$ с различной концентрацией, при различных значениях температуры и освещенности.

Изучены тензосвойства образцов кремния, легированного атомами марганца в зависимости от удельного сопротивления материала приведенные в табл. 2, при изменении точечного радиального давления от $P=5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до $P=3 \cdot 10^7 \text{ Па}$ (рис. 2).

2–таблица

Электрофизические параметры образцов, определенные методом эффекта Холла

№	Исходный материал	Тип	ρ , ($\text{Ом} \cdot \text{см}$)	μ , ($\text{В} \cdot \text{с} / \text{см}^2$)	n, p (см^{-3})
1	КДБ–3	p	$7.92 \cdot 10^2$	120.7	$2.39 \cdot 10^{13}$
2	КДБ–3	p	$5.5 \cdot 10^3$	224.9	$2.49 \cdot 10^{12}$
3	КДБ–3	p	$5.64 \cdot 10^4$	234.8	$2.03 \cdot 10^{11}$
4	КДБ–3	p	$1.53 \cdot 10^5$	330.2	$1.14 \cdot 10^{11}$

Из рис. 2 видно, что максимальное изменение ρ соответствует образцам с $\rho \sim (5 \div 7) \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. В образцах с удельным сопротивлением менее $\rho \geq 7.9 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и с разрешением больше $\rho \leq 5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ было обнаружено, что изменение ρ значительно меньше по сравнению с образцами с $\rho \sim 5 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Для всех образцов с $\rho \sim (5 \div 7) \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ экспериментально было определено значительное изменение ρ под давлением.

Изменение удельного сопротивления исходного образца кремния показано на рис. 2 кривая 1. В исходных образцах максимальное изменение ρ составляет примерно $10 \div 12\%$ (рис. 2).

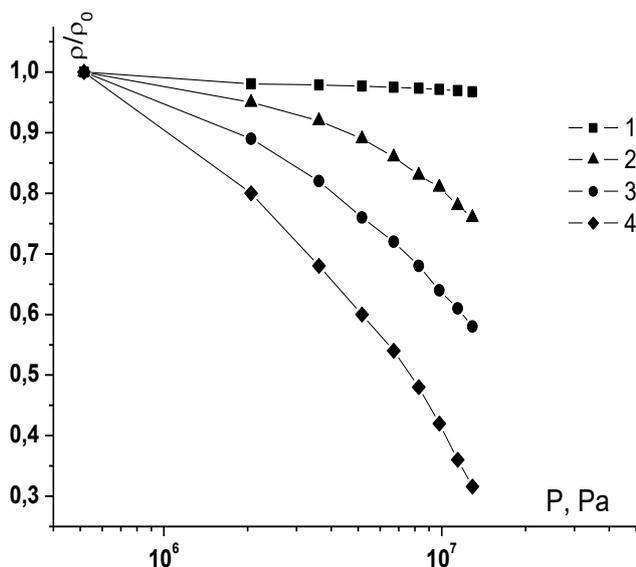


Рис.2. Относительное изменение удельных сопротивлений испытуемых образцов под воздействием давления

1– исходный образец, 2 – кремний легированный атомами марганца ($\rho=1.53 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), 3–кремний легированный атомами марганца ($\rho=5.64 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), 4–кремний легированный атомами марганца ($\rho=5.5 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

При этом в выбранном интервале давлений удельное сопротивление ρ образцов кремния изменяется почти в три раза, а именно наблюдается аномально большое увеличение удельного сопротивления в 3 раза.

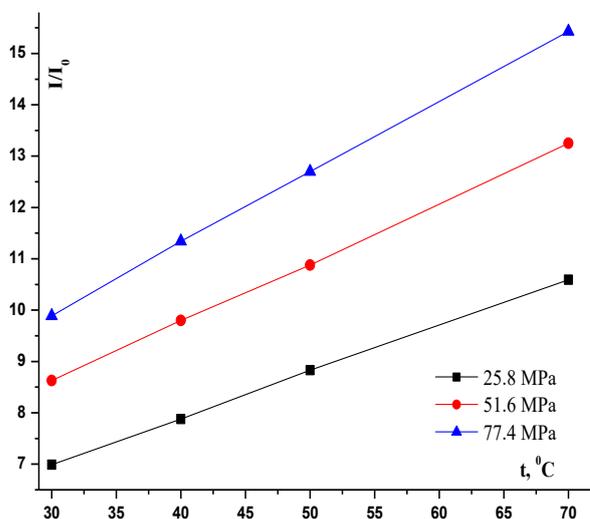


Рис.3. Температурная зависимость тензочувствительности кремния, легированного атомами марганца, при различных радиальных точечных давлениях.

В этом эксперименте изучалось влияние точечного радиального давления от $P=10^6 \text{ Па}$ до $P=7.74 \cdot 10^7 \text{ Па}$ при температурах $T=30^\circ\text{C}$, $T=50^\circ\text{C}$, $T=70^\circ\text{C}$ на электрофизические свойства кремния, легированного марганцем (рис. 3). Исследована температурная зависимость тензочувствительности кремния, легированного атомами марганца, при различных значениях давления. Как видно из рис. 3, под действием точечного радиального давления величина тока, проходящего через образцы $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ линейно возрастает.

Исследована зависимость одноосного точечного радиального давления при различных температурах образцов $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ с удельным сопротивлением $\rho=5.5 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Изменение (ρ) удельного сопротивления

образца показано на рис. 4. Было обнаружено, что с повышением температуры тензочувствительность образцов возрастает. Этот процесс длится при температуре $T=70\div 75^\circ\text{C}$, но дальнейшее повышение температуры приводит к ухудшению тензочувствительности образцов.

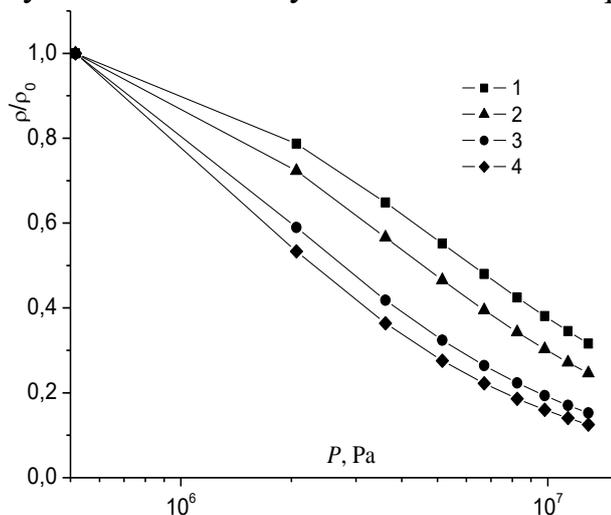


Рис.4. Относительное изменение удельного сопротивления ($\rho=5.5 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) образцов $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ под давлением при различных температурах: 1– $T=30^\circ\text{C}$, 2– $T=40^\circ\text{C}$, 3– $T=50^\circ\text{C}$, 4– $T=70^\circ\text{C}$

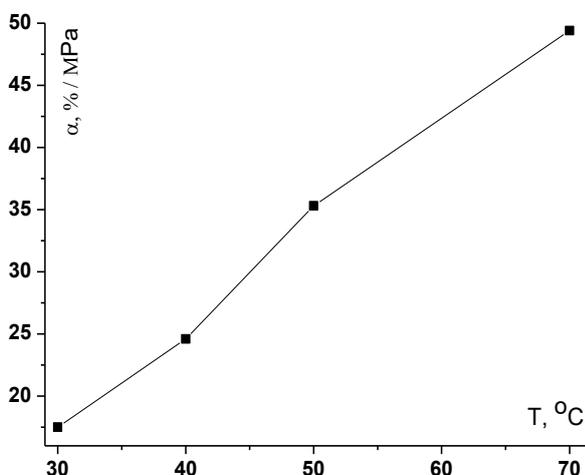


Рис.5. Температурная зависимость тензочувствительности образцов кремния, легированных атомами марганца

Изменение α -тензочувствительности образцов кремния, легированных атомами марганца, в зависимости от температуры, показано на рис. 5.

Полученные экспериментальные результаты показывают не только возможность использования тензодатчиков в широком диапазоне температур, но и наличие высокой температурной чувствительности за счет повышения температуры и давления. На основании экспериментальных данных можно сказать, что кремний, легированный атомами марганца, является наиболее удобным (оптимальным) материалом для создания высокоэффективных тензодатчиков с уникальными физическими возможностями. Было обнаружено, что в отличие от обычных полупроводниковых материалов образцы $p\text{-Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$ обладают гораздо более высокой тензочувствительностью при комнатной температуре.

Полученные экспериментальные результаты не могут быть объяснены с помощью существующих теорий. Столь высокая тензочувствительность полученного материала обусловлена изменением положения атомов марганца, находящихся в кристаллической решетке кремния, под действием давления.

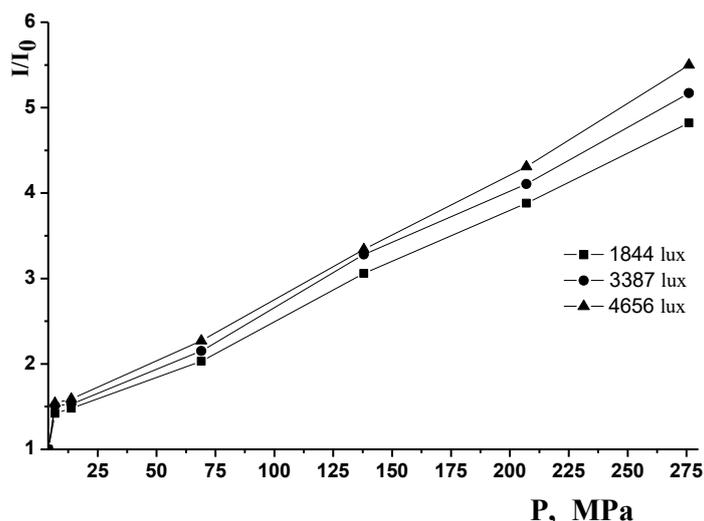


Рис. 6. Относительное изменение тензочувствительности черепа, легированного атомами марганца, с относительным сопротивлением $\rho=2.4 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ под действием различной интенсивности освещения

Как видно из рис. 6, относительное изменение фототока линейно увеличивается с увеличением значения давления, что важно при разработке датчиков, которые одновременно исследуют влияние освещения и давления.

Таким образом, в зависимости от интенсивности излучения, фототоки могут изменяться относительно друг друга, что может быть использовано для повышения чувствительности тензодатчика.

Анализ результатов исследований показывает, что тензочувствительность компенсированных образцов кремния с примесью марганца увеличивается при освещении интегральным светом.

В четвертой главе диссертации под названием «**Возможность создания тензодатчика из кремния с примесями марганца**» представлены тензоэлектрические свойства кремния с примесью марганца в зависимости от величины электрического поля, разработка оптимальной конструкции тензодатчика на основе кремния с примесями марганца, изучение эффектов одновременного освещения и отпуска на кремнии с примесями марганца, а также обсуждаются экспериментальные результаты.

Таким образом, было обнаружено, что кремний, содержащий атомы марганца, является уникальным материалом для создания высокочувствительных тензодатчиков даже под воздействием температуры. Следует отметить, что, в отличие от существующих материалов, используемых для создания тензодатчиков, было обнаружено, что тензочувствительность кремния с атомами марганца улучшается при повышении температуры до $T=70 \text{ }^\circ\text{C}$.

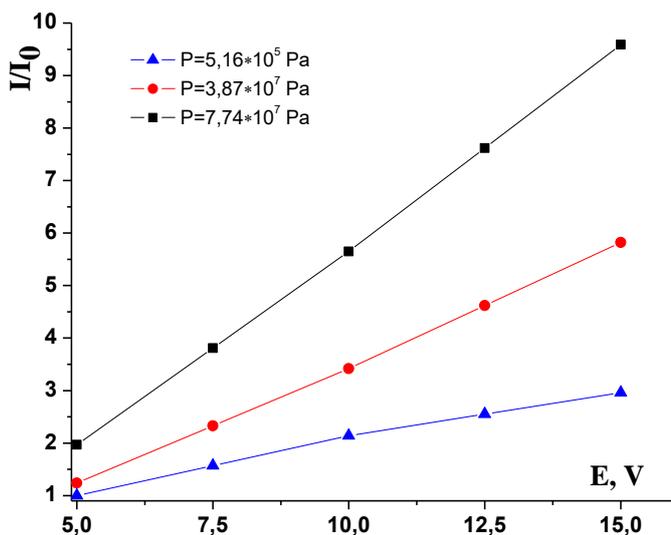


Рис.7. Относительное изменение тока при различных электрических напряжениях и под воздействием радиального точечного давления

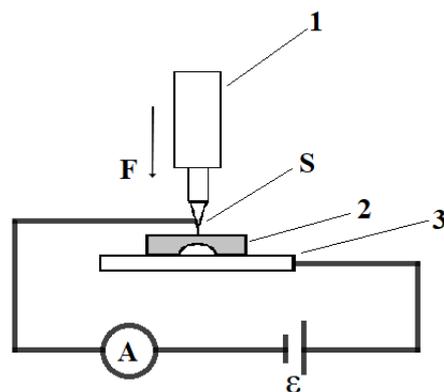


Рис.8. Конструкция и схема устройства для измерения параметров $p-Si\langle Mn \rangle$, под воздействием внешнего механического одноосного точечного радиального давления

В качестве исходного материала для легирования марганцем был выбран монокристаллический кремний p -типа с удельным сопротивлением $\rho = 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Легирование кремния марганцем осуществлялось по диффузионной технологии в закрытых ампулах в диапазоне температур $T = 1050 \div 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $t = 5 \div 20$ минут. Для изучения тензоэлектрических свойств кремния с атомами марганца в зависимости от электрического поля были подготовлены образцы с удельным сопротивлением $\rho \sim 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

На рис. 7 представлены закономерности изменения тока в зоне влияния одноосного точечного радиального давления при различных его значениях от $P = 5,16 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до $P = 7,74 \cdot 10^7 \text{ Па}$ при различных значениях электрического напряжения, подаваемого на зонд. Как видно из рисунка, тензочувствительность линейно увеличивается с ростом электрического напряжения, подаваемого на зонд.

В ходе исследования тензосвойств образцов эффект одноосного радиального давления был достигнут с помощью электрической схемы, приведенной на рис. 8. Здесь: 1—тонкий заостренный зонд, 2—исследуемый образец, 3—плоское основание из электропроводящего материала (S —площадь наконечника тонкого заостренного зонда, F —сила).

Было обнаружено, что повышение температуры и освещенности приводит к значительному увеличению тензочувствительности материала. Полученные результаты объясняются расширением энергетических спектров в квантовых точках, а также в минizonaх, образующихся в материале.

Изучение влияния давления на электрофизические параметры полученных образцов при различных температурах проводилось с помощью

специально разработанного устройства. Устройство позволял проводить исследования в диапазоне температур от комнатной до $T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Давление измерялось механически с помощью заостренного зонда. Эксперименты проводились при воздействии давления в диапазоне от $P=5.16\cdot 10^5\text{ Па}$ до $P=7.74\cdot 10^7\text{ Па}$ и при температурах $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$. На момент измерения падение напряжения в образцах составляло $E=10\text{ В/см}$.

На рис. 9 показано относительное изменение I/I_0 в зависимости от давления. Зависимость относительного изменения тока от давления (I/I_0) может быть разбита на две области в зависимости от монотонного изменения коэффициента тензочувствительности при α_1 ($P=5\cdot 10^5\div 7\cdot 10^7\text{ Па}$) и α_2 ($P=10^7\div 10^8\text{ Па}$). Это очень важный результат, который показывает возможность создания чувствительных датчиков давления, работающих в области малых его значений.

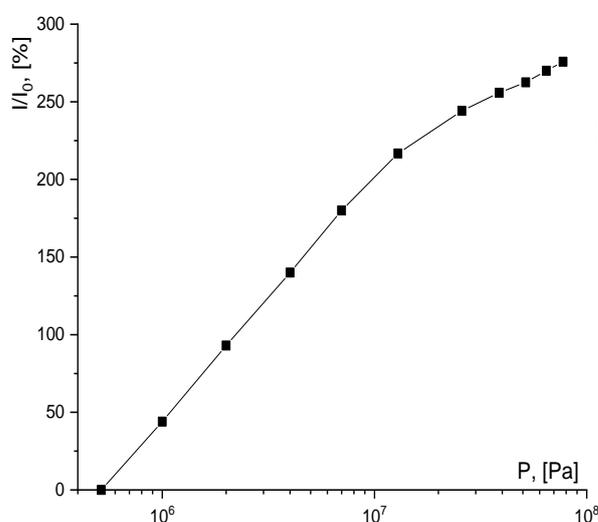


Рис.9. Зависимость относительного изменения тока при комнатной температуре от давления (без освещения, при $E=10\text{ В/см}$, при $T=300\text{ К}$)

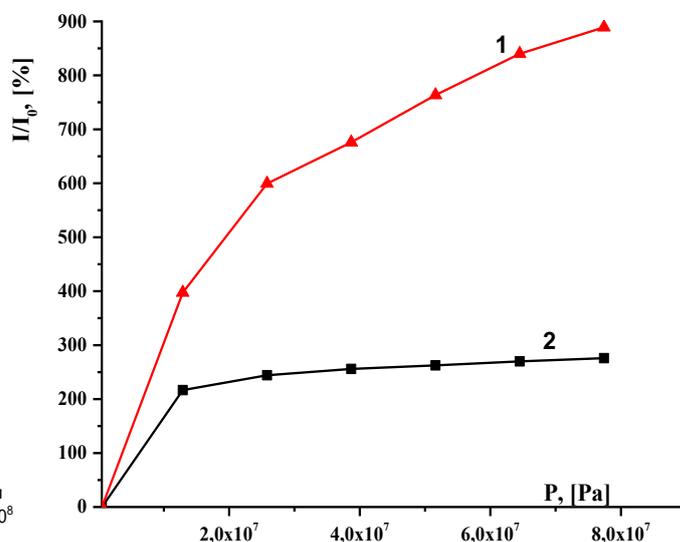


Рис.10. Зависимость давления по току (1–100 Вт/см^2 с подсветкой, 2–без подсветки, $E=10\text{ В/см}$, $T=300\text{ К}$)

Аналогичная закономерность наблюдается при высоких температурах, поэтому при освещении образцов были получены очень интересные результаты.

Таким образом, было обнаружено, что при освещении тензочувствительность (рис. 10) значительно возрастает. Известно, что в обычных полупроводниковых материалах наблюдается противоположный эффект, т.е. освещенности вызывает снижение тензочувствительности. Это одна из основных характеристик исследуемых образцов, свидетельствующая о создании нового класса сверхчувствительных фото-тензодатчиков. При различных температурах в темноте и при освещении коэффициенты α_1 и α_2 тензодатчиков представлены в таблице 3 и на рис. 11. Коэффициенты α_1 и α_2 рассчитываются по следующему уравнению:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{I}{I_0}\right)_1 - \left(\frac{I}{I_0}\right)_2}{P_2 - P_1}. \quad (7)$$

Полученные результаты показывают, что кремний, легированный атомами марганца является совершенно новым материалом для создания действительно очень чувствительных тензодатчиков.

3–Таблица

Температура	30 °C	40 °C	50 °C	70 °C
Без освещения				
$\alpha_1, [\%/МПа]$	2.02	3.36	6.97	10.8
$\alpha_2, [\%/МПа]$	0.11	0.36	1.14	2.46
Освещенный				
$\alpha'_1, [\%/МПа]$	5.6	6.72	9	11.79
$\alpha'_2, [\%/МПа]$	1.39	1.86	1.99	2.8

Еще одной особенностью тензосвойств образцов является значительное влияние температуры на тензочувствительность. При повышении температуры тензочувствительность не снижается, а, напротив, значительно возрастает.

Состояние атомов марганца образующихся после легирования объясняется тем, что они действуют как многозарядные квантовые точки, которые не только создают вокруг себя достаточно сильное электрическое поле, но и существенно влияют на квантование энергетического спектра электронов за счет их взаимодействия.

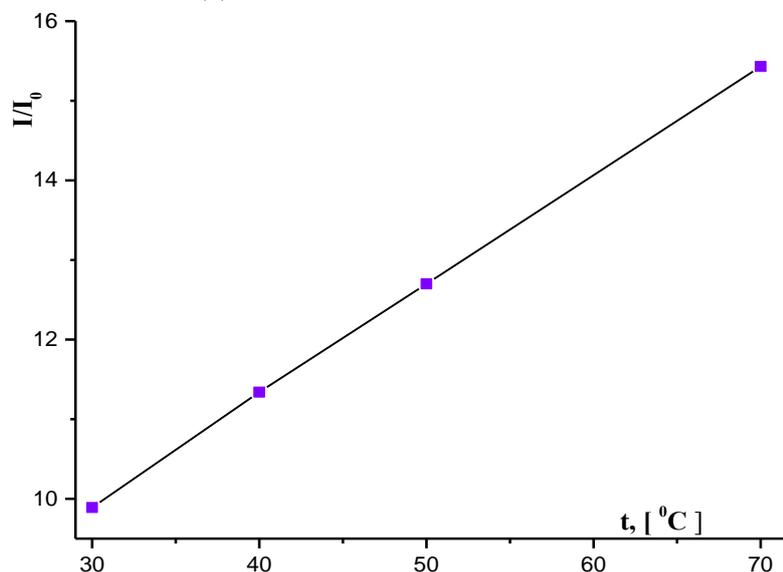


Рис.11. Температурная зависимость изменения силы тока под воздействием постоянного точечного давления. (При освещенности $I=5000$ люкс $E=10$ В/см)

Атомы марганца в кремнии приводят к появлению небольшого энергетического уровня, что приводит к значительному расширению спектрального диапазона энергетических состояний в таких кристаллах.

Тензочувствительность напрямую зависит от ширины запрещенной зоны и, в отличие от типичных полупроводниковых материалов соответственно с

низким тензосоэффициентом, в наших материалах, помимо изменения значения E_g под давлением, уровни энергии в кремнии, легированном марганцем, и в мини-зонах значительно изменяются во всем спектре.

При этом уровни входной энергии в кремний, легированный марганцем и уровни энергии в минизонах вносят значительно больший вклад в изменение энергии ионизации, чем изменение E_g . Тензочувствительность может быть значительно изменена путем варьирования концентрации и уровня заряда атомов марганца в кремнии. Это делается не только для создания тензодатчиков нового класса, но и для того, чтобы заложить основу для нового научного направления, в котором объемные наноструктурированные материалы задействованы в исследовании и применении тензоэффекта на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан технологический режим создания тензочувствительных перекомпенсированных образцов кремния, легированного марганцем в широком диапазоне концентраций носителей тока (n) и удельного сопротивления (ρ);

2. Впервые установлено, что значение удельного сопротивления образцов $p-Si<B,Mn>$, легированных при температуре $T=1060^\circ C$ увеличивается в 3 раза под воздействием давления (P) в диапазоне $5 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^6 Pa$, а в исходных образцах изменение незначительно;

3. Установлено, что в образцах $p-Si<B,Mn>$ при воздействии постоянного одноосного точечного радиального давления при $P = 5.16 \cdot 10^5 \div 7.74 \cdot 10^7 Pa$ и температуре $T=30 \div 75^\circ C$ тензочувствительность (α) увеличивается в 15 раз;

4. Впервые установлено, что при одноосном точечном радиальном давлении $P= 4.14 \cdot 10^6 \div 2.76 \cdot 10^8 Pa$, приложенном к образцам $p-Si<B,Mn>$, находящимся под влиянием света освещенностью $I=1800 \div 4600$ люкс, тензочувствительность образцов увеличивается в 2÷3 раза;

5. Обнаружено, что при воздействии внешнего электрического поля (E) напряженностью в интервале $1 \div 15 V/cm$ на образцы $p-Si<B,Mn>$ их тензочувствительность увеличивается примерно в 3 раза;

6. Создано устройство для исследования тензочувствительности и других свойств сильно компенсированного кремния, подвергнутого действию одноосного точечного радиального давления ($10^6 \div 10^9 Pa$), света ($1 \div 50000$ люкс), температуры ($1 \div 150^\circ C$) и электрического поля ($1 \div 15 V/cm$).

**SCIENTIFIC COUNCIL No. 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 OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

**NUKUS STATE PEDAGOGICAL INSTITUTE
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND
MICROELECTRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

TURSÍNBAEV SABÍRBAY AWESBAY ULÍ

**INFLUENCE OF UNIAXIAL PRESSURE ON THE ELECTROPHYSICAL
PROPERTIES OF SILICON WITH AN IMPURITY OF MANGANESE**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2024

INTRODUCTION (PhD dissertation abstract)

The aim of the research study is to study the electrophysical properties of silicon doped with manganese under the influence of uniaxial pressure, and to develop a technological regime for creating sensitive strain gauges based on $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$.

The object of study was $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples with different resistivities.

The scientific novelty of the research work:

a technological regime has been developed for creating strain-sensitive $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples with a current carrier concentration $n=1.14 \cdot 10^{11} \div 2.39 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and a resistivity $\rho=7.92 \cdot 10^2 \div 1.53 \cdot 10^5 \text{ Ohm cm}$;

for the first time it was established that the value of the resistivity of $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples alloyed at temperature $T=1060 \text{ }^\circ\text{C}$ increases 3 times under the influence of pressure (P) in the range of $5 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, and in the original samples the change is insignificant;

it has been established that in $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples under the influence of constant uniaxial point radial pressure $P=5.16 \cdot 10^5 \div 7.74 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ and temperature $T=30 \div 75 \text{ }^\circ\text{C}$, the deformation sensitivity (α) increases 15 times compared with original samples;

it was established for the first time that at a uniaxial point radial pressure $P=4.14 \cdot 10^6 \div 2.76 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ applied to $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples under the influence of light with illumination $I=1800 \div 4600 \text{ lux}$, the strain sensitivity of the samples increases by 2 \div 3 times;

it was found that when $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples are exposed to an external electric field (E) in the range of $1 \div 15 \text{ V/cm}$, their strain sensitivity increases approximately 3 times compared to the original samples;

a device has been created to study the strain sensitivity of highly compensated silicon exposed to uniaxial point radial pressure ($10^6 \div 10^9 \text{ Pa}$), light ($1 \div 50000 \text{ lux}$), temperature ($1 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$) and electric field ($1 \div 15 \text{ V/cm}$).

Implementation of research results. In the process of studying the influence of uniaxial point radial pressure on the electrical properties of $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$, the following scientific results were obtained:

the main technological modes for creating samples of a new type $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ and strain sensitivity have been developed; in the original silicon samples, the strain sensitivity is 10 \div 12%, and in the $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples the strain sensitivity increased 3 times; under the influence of pressure (P) in the range of $5.16 \cdot 10^5 \div 7.74 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ in the temperature range (T) $30 \div 75 \text{ }^\circ\text{C}$ in $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples, the strain sensitivity value (α) increases 15 times and these results are used in the Joint Stock Company "FOTON" upon receipt of strain-sensitive silicon structures (certificate of JSC "Uzeltshanoat" No. 04-3/484 dated 04/19/2023). The use of scientific results made it possible to produce samples with electrophysical parameters corresponding to the level of world analogues;

as a result of studying the electrophysical parameters of strongly compensated $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$, with simultaneous exposure to uniaxial point radial pressure and light at illumination (I) in the range of $1800 \div 4600 \text{ lux}$, as well as when changing point

radial pressure (P) in the range $4.14 \cdot 10^6 \div 2.76 \cdot 10^8 \text{ Pa}$, increasing the electric field strength (E) in the range of $5 \div 15 \text{ V/cm}$, the strain sensitivity of $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples increased almost 3 times. These results were used in the fundamental research project No. OT-F-2-77 “Improving the method for predicting the reliability of semiconductor devices based on modeling taking into account internal defects”, carried out at Karakalpak State University in 2016–2020. (certificate of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan No. 2/14-17/04-829 dated May 1, 2023). The use of scientific results made it possible to describe in detail the piezoelectric properties of $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples.

Approbation of results of a research. The results of the study were reported and discussed at 9 international and 3 national scientific and practical conferences.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. The volume of the dissertation work, including 42 figures and 10 tables, is 115 pages.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. А.Б. Камалов, С.А. Турсынбаев, С.Т. Артыкова. Влияние освещения на тензочувствительность кремния, легированного марганцем. // Science and world, 2023, 3 (115), С.12–14, (№5 GIF: 0,325).
2. А.Б. Камалов, М.А. Жалелов, С.А.Турсынбаев. Тензоэлектрические свойства кремния с нанокластерами атомов марганца. // Fan va jamiyat, 2023, том 1, вып. 1, С.18–20, (01.00.00; №15).
3. S.A. Tursinbaev. Influence of Illumination and Temperature on Tensoproperties of Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms // Semiconductors, 2022, Vol. 56, No. 6. pp. 407–410, (№41 SCImago).
4. A.B. Kamalov, J.J. Khamdamov, F.A. Saparov, S.A. Tursinbaev. Influence of pressure on the electrical characteristics of silicon and dielectric coating. // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2022, том 4, вып. 1, С. 30–36, (01.00.00; №16).
5. A.S. Muratov, A.B. Kamalov, S.A. Tursinbaev. Installations for studying the strain properties of silicon with nanoclusters of impurity atoms. // Science and Education in Karakalpakstan, 2021, 2 (17). С. 4–7, (01.00.00; №11).
6. Х.М. Илиев, А.Б. Камалов, С.А. Турсынбаев. Кремний с нанокластерами атомов марганца – новый материал для тензодатчиков. // Fan va jamiyat, 2020, 4 С.7–9, (01.00.00; №15).
7. С.А. Турсынбаев, А.Б. Камалов, Х.М. Илиев, С.А. Тачилин, Г.А. Кушиев. Тензосвойства кремния с нанокластерами. // Физика полупроводников и микроэлектроника, 2019, том 1, вып. 4, С.62–67, (01.00.00; №16).

II bo'lim (II часть; part II)

8. С.А. Турсынбаев, А.Б. Камалов, С.Б. Исамов, С.А. Тачилин. Разработка установки для изучения влияния электрического поля, температуры и освещения на параметры полупроводникового материала в условиях локального давления. // Приборы, 2022, 1 (259), С. 19–22, (05.00.00; №63).
9. S.A. Tursinbayev. Yarimo'tkazgichli materiallarga bir o'qli radial bosim beruvchi qurilmani boshqaruvchi mikrokontroller dasturi. // Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risida "Guvohnoma". O'zbekiston Respublikasi adliya vazirligi. 2022. № DGU17792.
10. A.B. Kamalov, S.A. Tursinbaev, Kh.M. Iliyev, M.M. Shoabdurakhimova. Influence of lighting on tenso-sensitivity of silicon doped with manganese. // V-Международной конференции по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах», Фергана, 2020, 13–14 ноябрь, С. 361–362.

11. A.V. Kamalov, S.A. Tursinbaev, A.D. Paluanova, D.T. Tolibaeva. Yarimo‘tkazgichlarning tenzosezgirlik xossalarini o‘rganish. Poluprovodnikovaya opto- i nanoelektronika, альтернативные источники энергии и их перспективы. Международная научно-практическая конференция посвященная 80 – летию Академии наук Узбекистана. 12-13 октябр. Андижан–2023. 44 – 45 b.
12. С.А. Турсынбаев, Х.М. Илиев, Х.Ф. Зикриллаев, С.А. Тачилин. Новые материалы для тензодатчиков. // Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники, “Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике” сборник докладов международной научной конференции, 2020, 9–10-октябрь, С.174–176.
13. С.А. Турсынбаев. Тензочувствительность кремния с нанокластерами атомов марганца. // Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники, “Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике” сборник докладов международной научной конференции, 2020, 9–10-октябрь, С.176–179.
14. Х.М. Илиев, С.Б. Исамов, С.А. Турсынбаев, Б.О. Исаков, Х.Ф. Зикриллаев, З.М. Сапарниязова. Исследование влияния многозарядных квантовых точек на тензосвойств кремния. // Материалы международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах». Фергана, 2020, С. 55–57.
15. С.А. Турсынбаев. Тензотермические свойства кремния с нанокластерами атомов марганца. // Материалы международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах». Фергана, 2020, С. 204–206.
16. Х.М. Илиев, С.А. Турсынбаев, С.А. Тачилин. Разработка универсальной установки для изучения тензосвойств кремния с нанокластерами примесных атомов. // Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова. Международная научно-техническая конференция: «Тенденции развития альтернативной и возобновляемой энергетики: проблемы и решения», 2021, 17–18 Май С. 79–84.
17. S.B. Isamov, S.A. Tursinbaev, B.O. Isakov, N.T. Movlonov, F.R. Bozorov. Nanoklasterli yarim o‘tkazgichlarga bosimning ta’sirini o‘rganuvchi qurilma yaratish. // Ферганский государственный университет. Международной научной конференции. “Тенденции развития физики конденсированных сред”. Фергана, 2021, 25 май, С.32–35.

- 18.С.А. Турсынбаев, С.Б. Исамов. Новый подход к изучению тензoeлектрических свойств кремния с нанокластерами примесных атомов. // “Яримўтказгичлар физикаси, микро- ва нанoeлектрониканинг фундаментал ва амалий муаммолари” I-Халхаро анжуман. Ташкент 2021, 28–29-октябрь, С. 107–108.
- 19.С.А. Турсынбаев. Нанокластерли кремнийнинг доимий босим ва ўзгарувчан электр майдони таъсирида тензoeлектрик хусусиятлари. // “Яримўтказгичлар физикаси, микро- ва нанoeлектрониканинг фундаментал ва амалий муаммолари” I-Халхаро анжуман. Ташкент 2021, 28–29-октябрь, С. 150.
- 20.С.А. Турсынбаев. Влияние температуры на тензoeлектрические свойства кремния с нанокластерами атомов марганца. // Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике. II Международная научная конференция. 2021, 19–20 ноября, С. 195–198.
- 21.С.А. Турсынбаев, А.Б. Камалов, Х.М. Илиев, Б.О.Исаков, С.Й. Махмудов. Марганец атомлари нанокластерларига эга кремний тензосезгирлигини босим ва ҳарорат таъсирида ўрганиш. // Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике. II Международная научная конференция. 2021, 19–20 ноября. С. 216–222.
- 22.Ф. Isayev, S. Tursinbaev, F.R. Vozorov, A. Abdurazzaqov, O. Maulenbergenov. Tenzodatchiklar konstruksiyalari va o'lchash usullari. // Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике. II Международная научная конференция. 2021, 19–20 ноября, С. 368–371.
- 23.А.В. Kamalov, S.A. Tursinbaev, S.T. Artikova. Features of the tensor properties of silicon with nanoclusters of impurity atoms. // Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo'tkazgich materiallar. III xalqaro ilmiy anjumani. 2022, 24–25 noyabr, С. 313–316.
- 24.Sh.V. Utamuradova, A.V. Kamalov, S.A. Tursinbaev. Effects of radial pressure on the parameters of semiconductor materials. // “Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы”. Сборник материалов II международной научной конференции Ташкент-2022, 27–28 декабрь, С.31–33.
- 25.Ш.Б. Утамурадова, А.Б. Камалов, С.А. Турсынбаев, С. Артыкова. Яримўтказгич материалларнинг тензохусусиятлари ва улар асосида тайёрланган тензодатчиклар ёрдамида механик деформацияларни аниқлаш // “Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы”. Сборник материалов II международной научной конференции Ташкент–2022, 27–28 декабрь, С.36–37.
- 26.Х.М. Илиев, С.А. Турсынбаев. Тензoeлектрические свойства кремния с нанокластерами примесных атомов. // Республиканская конференция по физической электронике и фотонике, Конференция посвящается 80 летнему юбилею академика Академии наук Республики Узбекистан У.Х. Расулева. Ташкент–2019, 23 октября, С.168–169.

- 27.С.А. Турсынбаев, Х.М. Илиев, Н.Ф. Зикриллаев. Кремний с наноструктурами (квантовыми ямами) новый материал для создания высокочувствительных тензодатчиков. // Каракалпакский государственный университет имени Бердаха. Материалы Республиканской конференции (с участием ученых стран СНГ). «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП–2019, С.161–162.
- 28.S.A. Tursinbaev, M.A. Abdimuratova, D.B. Tursunboeva. Modern load cells their usage // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг II республика илмий анжуман (ЁОФТРИА-II) материаллари, 2022, 20–21 май. С. 63–65.

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarining mosligi tekshirildi (28.05.2024).

Bichimi: 84x60 ¹/₁₆. «Times New Roman» garniturasida.

Raqamli bosma usulda bosildi.

Shartli bosma tabog‘i: 3,25. Adadi 70 dona. Buyurtma №56.

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.

