

**FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI HUZURIDAGI FIZIKA-
MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI ILMIY
DARAJASINI BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

ANDIJON MASHINASOZLIK INSTITUTI

SOXIBOVA ZARNIGORXON MUTALIBJON QIZI

**Na VA Cs ATOMLARI BILAN LEGIRLANGAN GRANULALANGAN
KREMNIYNING TERMOELEKTRIK XOSSALARI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona – 2023

**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 and mathematical sciences**

Soxibova Zarnigorxon Mutalibjon qizi

Na va Cs atomlari bilan legirlangan granulalangan kremniyning
termoelektrik xossalari..... 3

Сохибова Зарнигорхон Муталибжон кизи

Термоэлектрические свойства гранулированного кремния,
легированного атомами Na и Cs..... 25

Sokhibova Zarnigorkhon Mutalibjon kizi

Thermoelectric properties of granular silicon doped with Na and Cs atoms..... 48

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works 52

**FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI HUZURIDAGI FIZIKA-
MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI ILMIY
DARAJASINI BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

ANDIJON MASHINASOZLIK INSTITUTI

SOXIBOVA ZARNIGORXON MUTALIBJON QIZI

**Na VA Cs ATOMLARI BILAN LEGIRLANGAN GRANULALANGAN
KREMNIYNING TERMOELEKTRIK XOSSALARI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona - 2023

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati. Jahonda mavjud an'anaviy energiya manbalarini takomillashtirishning yangi usullarini ishlab chiqish, xususan termoelektrik materiallardan foydalangan holda issiqlik energiyasidan elektr energiyasi olish texnologiyalarini qo'llash yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida termoelektrik materiallarni keng ishlab chiqarish va ular asosida o'zgartirgichlar tayyorlash, yer qobig'ida an'anaviy termoelektrik materiallarning nisbatan kamligi va ularning yuqori narxi bilan cheklanganligi ushbu sohada yangi material va texnikalarni amaliyotga joriy etishni taqazo qiladi. Shu jihatdan yarimo'tkazgich asosli termoelektrik materiallarning, xususan granulalangan kremniyning elektrofizik, termoelektrik xususiyatlarini o'rganish, ular asosida issiqlik elektr qurilmalari yaratish va ularni ishlab chiqarish xarajatlarini sezilarli darajada qisqartirish muhim ahamiyat kasb etadi.

Jahonda yetakchi ilmiy-tekshirish institutlarining olimlari tomonidan g'ovak kremniy, mikrodonador polikristall, turli ko'rinishdagi multikremniy, mikro va granulalangan kremniyning xususiyatlarini o'rganishga yo'naltirilgan ko'plab ilmiy - tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, kremniyning turli modifikatsiyalarining o'ziga xosligi va fizik xususiyatlari tadqiq qilinib, ular asosida quyosh elementlari va termoelektrik yarimo'tkazgichlarning yangi turlari, shuningdek turli ko'rinishdagi datchiklarni yaratish imkoniyatlarini asoslashga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda ham yarimo'tkazgichli metariallarning elektrofizik xossalari o'rganish, shu jumladan yarimo'tkazgichlardagi issiqlik energiyasidan oraliq bosqichsiz elektr energiyasi olishning istiqbolli usullarini yaratishga yo'naltirilgan keng qamrovli chora – tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. 2022-2026-yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasida "... iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash, hayotning barcha sohalariga "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini faol tatbiq etish, energiya samaradorligini oshirish..."¹ bo'yicha aniq vazifalar belgilab qo'yilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, mavjud an'anaviy energiya manbalarini takomillashtirishning yangi usullarini ishlab chiqish, arzon, yuqori darajada ishonchli, ekologik toza va xavfsiz bo'lgan muqobillarini yaratish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2018 yil 6 avgustdagi PQ-3899-son "Ilmiy va innovatsion faoliyatni integratsiyalash tizimining samaradorligini oshirish bo'yicha chora-tadbirlar to'g'risida"gi, 2021 yil 19 martdagi PQ-5032-son "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi qarorlari, 2017 yil 26 maydagi PQ-3012 sonli «2017-2021 yillarda qayta tiklanuvchi energetikani yanada rivojlantirish, iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohada energiya samaradorligini oshirish chora –

¹O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "2022-2026-yillarda yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son Farmoni ».

tadbirlari dasturi to'g'risida»gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning Respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga mos kelishi. Ushbu dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarni rivojlanishining III. «Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligi rivojlanishi» va II. «Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik» ustuvor yo'nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Mavjud an'anaviy energiya manbalarini takomillashtirish, arzon hamda ekologik jixatdan toza bo'lgan muqobillarini yaratish, xususan, kremniy asosli termoelektrik materiallardan foydalangan holda issiqlik energiyasidan elektr energiyasi olishga yo'naltirilgan ilmiy tadqiqotlar dunyoning yetakchi ilmiy markazlari hamda oliy ta'lim muassasalari tomonidan katta qiziqish bilan o'rganilmoqda. Sohada ilmiy izlanishlar olib borayotgan yetakchi ilmiy tadqiqotchilar sifatida quyidagilarni misol keltirishimiz mumkin: Rossiyada – V.V.Kaminskiy, A.A.Snarskiy, L.P.Bulat, A.K.Sarichev, I.P.Zvyagin, N.N.Stepanov, I.V.Bezsudnov, G.A.Libenson, L.S.Smirnov, V.L.Girshov, A.V.Dmitriyev, S.A.Kotov, V.N.Syemenko, A.N.Lagarkov, AQSHda - A Donald, R.F.Uollis, Y.Peter, Germaniyada - Manuel Cardona, Ye. Muller va boshqalar, respublikamizda T.S.Kamilov, A.S.Saidov, G.Abduraxmanov, S.Z.Zaynabidinov, R.Ya.Rasulov, B.M.Abduraxmanov, X.B.Ashurov.

A.A.Snarskiy, A.K.Sarichev, I.V.Bezsudnov, A.N.Lagarkovlar termoEYUK, issiqlik o'tkazuvchanlik, elektr o'tkazuvchanlik va termoelektrik asillik (Z) kabi asosiy termoelektrik kattaliklar qiymatlarini hisoblash va xossalarini taxlil qilish mumkin bo'lgan nanotuzilmali kompozitlar modelini yaratdilar va ushbu yangi materiallarning muayyan turlaridan foydalanish istiqbollari ishlab chiqdilar.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqotlari Andijon mashinasozlik institutining BF3-003. «Kirishmali voltaik effektga asoslangan yarimo'tkazgich negizli mikro va nanoo'lchamli noan'anaviy va muqobil energiya manbalarini yaratish» (Создание нетрадиционные и альтернативные источники энергии на основе примесные волтаические эффектах в микро и нанорезмерных полупроводниках) fundamental (2017-2020) loyixasi doirasida hamda Andijon davlat universitetining OTM-2-68 «Kristallarda kirishma-nuqsonli mikro va nanobirikmalarni hosil bo'lish mexanizmlari va ularning keng qamrovli funksional imkoniyatlarga ega bo'lgan ko'pqatlamli tuzilmalar olishdagi roli» (2017-2020) mavzusidagi loyihalar doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi $T \approx 300-700$ K temperatura oraliqlarida granulalangan kremniyning termoelektrik hamda elektrofizik xossalariga Na va Cs kirishmalarining ta'sirini kompleks o'rganish va zaryad ko'chirilish jarayonlarini granular o'lchami va tuzilishiga bog'liqlik qonuniyatlarini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

Na va Cs atomlarini granulalangan kremniyning sirt sohalarida kirishmali holatlar hosil qilish mexanizmlarini o'rganish;

300-700 K temperatura oralig'ida, zarralarining o'lchamlari 400 nm - 60 mkm bo'lgan, Na va Cs kirishmalari bilan legirlangan granulalangan kremniyning elektrofizik xususiyatlarini o'rganish;

Na va Cs kirishmalari bilan legirlangan kremniy plastinkasini ma'lum bir dispersiya darajasiga qadar mexanik maydalash usulida tayyorlangan granulalangan kremniyning asosiy termoelektrik parametrlari elektr o'tkazuvchanligi, issiqlik o'tkazuvchanligi va Zeebek koeffitsiyentini o'rganish;

Na va Cs kirishmalari bilan legirlangan kremniy plastinkasidan tayyorlangan, granulalangan kremniydan termoelektrik materiallar olish usulini ishlab chiqish.

Tadqiqotning ob'yekti sifatida yuqori tozalikdagi kremniy namunalari va tarkibida Na va Cs ishqoriy metall atomlarini o'z ichiga olgan kremniy namunalari, shuningdek, kukun texnologiyasi metodidan foydalanib tayyorlangan ma'lum o'lchamdagi kremniy granulalaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning predmeti tarkibiga Na va Cs atomlari kiritilgan granulalangan kremniy zarrachalarining mikrotuzilmasini o'rganish, zaryad ko'chirilish jarayonlari, namunalarning termoelektrik hamda elektrofizik tavsiflarini tahlil qilish hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Qo'yilgan vazifalardan kelib chiqqan holda dastlabki materiallarning elektrofizik tavsiflarini baholash uchun o'tkazuvchanlik turini aniqlashda termozond usulidan, solishtirma qarshilikni o'lchashda to'rt zondli usuldan, kremniy granulalari olishda kukun texnologiyasi metodidan, granulalangan kremniy zarrachalari mikrotuzilmasi va o'lchamini aniqlash uchun EMPYREAN XDR rentgen difraktometri hamda SEM EVO MA 10 (CARL ZEISS) skanerlovchi elektron mikroskopidan, issiqlik o'tkazuvchanlikni aniqlashda solishtirish usulidan, solishtirma termoEYUK ni aniqlashda differensial usuldan foydalanildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

temperaturalar farqiga mos holda kristallografik buzilishlar granula hajmidan sirtga tomon ortib borib, ikki tutashgan chegara sohada reaksiyalanish qobiliyati yuqori bo'lgan SiO₂ dan iborat atomar sirt hosil qilishi, temperatura ortishi bilan ishqoriy metall atomlarining desorblanishi va buning hisobiga sirtida kirishmali holatlar hosil bo'lishi asoslangan;

o'lchamlari 400 nm - 60 mkm bo'lgan, Na va Cs atomlari bilan legirlangan kremniy granulalarini ikkita bir jinsli kontaktlar bilan mexanik siqib qizdirilganda, namunadagi qizdirish temperaturasi va uning gradiyentiga bog'liq holda elektr yurituvchi kuch va tok oqimi hosil bo'lishi aniqlangan;

tarkibiga ishqoriy metall atomlari kiritilgan namunalarda issiqlik o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi o'rganilib, 300 – 350 K harorat oralig'ida issiqlik o'tkazuvchanlik Na kiritilgan namuna uchun 11,81 Vt/m·K, Cs kiritilgan namuna uchun 10,69 Vt/m·K qiymatga ega bo'lib, bu monokristall kremniy issiqlik o'tkazuvchanligidan 12-14 marta kichik bo'lishligi asoslangan;

granulalangan kremniyning Zeebek kattaligi 300-500 K temperatura oralig'ida Cs kiritilgan namunalarda 470-510 mkV/K, Na kiritilgan namunalarda esa 370-430 mkV/K ekanligi, bu esa monokristall kremniyning Zeebek koeffitsientidan 8-10 marta kattaligi, shuningdek boshqa termoelektrik materiallardan farqli ravishda Zeebek koeffitsientini haroratga deyarli bog'liq emasligi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

mexanik usulda kremniy kukunlari olish va ularning parametrlarini o'lchash texnikasini takomillashtirish usuli ishlab chiqilgan;

ishlab chiqilgan usullar boshqa termoelektrik materiallarni o'rganishda foydali bo'lib, kirishmali issiqlik voltaik effekt asosida ishlaydigan issiqlik energiyasi o'zgartirgichlarining o'ziga xos yangi turlarini yaratish uchun kremniy granulalarini ishlab chiqarishda qo'llanilishi mumkinligi aniqlangan;

zarrachalarining o'lchami 400 nm dan 60 mkm gacha bo'lgan ishqoriy metall atomlari kiritilgan granulalangan kremniyning issiqlik o'tkazuvchanligini aniqlashga mo'ljallangan "Visual Basic"ga tayangan yangi EHM uchun dasturiy mahsulot ishlab chiqilgan, bu termoelektrik kattalikni o'lchash aniqligini oshirish bilan o'lchash tartibini soddalashtirish va optimallashtirish imkonini beradi. Shuningdek granulalangan kremniy tayyorlovchi uskunani boshqarish imkonini beruvchi "Python" dasturi asosida yangi EHM mahsuloti ishlab chiqilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi tadqiqot uchun yuqori aniqlikka ega bo'lgan jahon amaliyotida keng qo'llanilishi bilan tadqiqotchilar ishonchiga sazovor bo'lgan zamonaviy standart va metrologik sertifikatlangan o'lchov asboblari va jihozlaridan foydalanish bilan hamda ishning bir qismi "Ilg'or texnologiyalar Markazi" ilmiy laboratoriyalarida olib borilganligi bilan, shuningdek bajarilgan tadqiqot ishining amaliyotga joriy etilganligi bilan asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundaki, sirt tuzilishi, granulalangan kremniy zarralari va ishqoriy metall atomlari kiritilishining ahamiyati to'g'risida yangi ma'lumotlar olindi, ular harorat o'zgarishiga bog'liq holda desorblanishi va qayta adsorblanishi, elektron-kovak juftliklarining hosil bo'lish jarayonlari hamda materialning rekombinatsiyalanish xususiyatlarini aniqlaydi, bu esa granulalangan kremniyning mikro tuzilishi va maxsus fizik xossalari to'g'risidagi nazariy bilimlarni takomillashtirishda qo'llanilishi mumkinligi bilan belgilanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, ilmiy va muhandislik ishlanmalarida termoelektrik energiya o'zgartirgich qurilmalarini ishlab chiqarishda qimmatbaho va kam uchraydigan an'anaviy materiallarni, shuningdek, nanokompozit termoelektrik materiallarni granulalangan kremniy bilan almashtirish imkoniyatiga e'tibor berish taklif etiladi, mavjud homashyodan, jumladan, kremniy ishlab chiqarish chiqindilaridan-homashyo, texnik kremniy, Si monokristali va epitaksial kremniy strukturalarini ishlab chiqarish chiqindilaridan tayyorlangan energiya o'zgartirgichlarning o'zini ham, ishlab chiqarilgan energiya tannarxini ham kamaytiradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Granulalangan kremniyning elektrofizik va termoelektrik xossalariga ishqoriy metall atomlarining ta'sirini o'rganish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

kukun texnologiyasi asosida granulalangan kremniy namunalari olish, tozalash, ularni o'lchami va mikrostrukturasini aniqlash, Cs va Na ishqoriy metall atomlari kiritilgan granulalangan kremniyning elektrofizik va termoelektrik xususiyatlarini kompleks baholash hamda termoelektrik material sifatida qo'llash bo'yicha ilmiy-amaliy natijalardan «FOTON» AJda ishlab chiqariladigan yarimo'tkazgichli elektron qurilmalar tayyorlashda foydalanilgan. ("Uzeltexsanoat" aksiyadorlik kompaniyasining 2022-yil 18-martdagi №04-3/455 raqamli ma'lumotnomasi). Ushbu ilmiy yangilikni qo'llash, Na va Cs atomlari kiritilgan granulalangan kremniydan turli temperaturalarda ishlashga mo'ljallangan issiqlik energiyasi o'zgartirgichlari tayyorlashda asos sifatida foydalanish imkoniyatlarini oshirgan. Namunalarning elektrofizik parametrlari respublikamizda va butun jahonda ishlab chiqarilayotgan elektrotexnik asboblarning parametrlari darajasida ekanligi ko'rsatilgan;

ishqoriy metall atomlarini granulalangan kremniyning elektrofizik hamda termoelektrik xususiyatlariga ta'sirini temperatura o'zgarishi jarayoniga tadqiq etish uslubidan Andijon davlat universitetida 2017-2018 yillarda bajarilgan "I 2017-7-7 - "Mahalliy homashyodan abraziv karbid kremniy olish texnologiyasini o'zlashtirish va joriy etish" mavzusidagi loyiha doirasida foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligining 2020-yil 31-dekabr №89-03-5632 ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalarni qo'llash temperatura ortishi jarayonida ishqoriy metall atomlarining kremniy granulari ikki tutashgan chegara sohasi tomon desorblanishi va temperatura kamayishi bilan qayta adsorblanishi natijasida solishtirma qarshilikni 5-8 martagacha kamayishiga hamda ishqoriy metall atomlari kiritilgan namunalarda qisqa tutashuv tokini 30 martagacha oshirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 8 ta xalqaro va 4 ta respublika miqyosidagi ilmiy amaliy anjumanlarda muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Natijalar asosida jami 23 ta ilmiy ish chop etilgan, jumladan O'zR OAK sining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 9 ta maqola, shulardan 5 tasi xalqaro jurnallarda e'lon qilingan, 2 ta EHM uchun dasturiy mahsulotlarga O'zR IMAning mualliflik guvohnomalari olingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, 133 ta foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 133 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish qismida** o‘tkazilgan tadqiqot ishining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqot maqsadi va vazifalari, tadqiqot ob’ekti va predmeti tavsiflangan, tadqiqotning Respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining asosiy ustuvor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, shuningdek ularning ishonchliligi asoslangan, uning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarning amaliyotga joriy qilish, dissertatsiya ishining aprobatsiyasi hamda hajmi va tuzilishi haqidagi ma’lumotlar keltirilgan.

“Mikro va nanoo‘lchamli kremniy asosli termoelektrik materiallar fizikasining hozirgi holati” nomli birinchi bobida mikro va nanoo‘lchamli yarimo‘tkazgichlar asosida termoelektrik materiallar hamda termoelementlar olish imkoniyatlari, usullari, fan – texnika taraqqiyotidagi ahamiyati yuzasidan respublikamiz hamda jahon miqyosida olib borilgan ilmiy - amaliy tadqiqotlar, shuningdek sohaga oid adabiyotlar tahlil qilingan, tadqiqotning dolzarbligi, maqsadi va yechilishi zarur bo‘lgan vazifalari belgilangan.

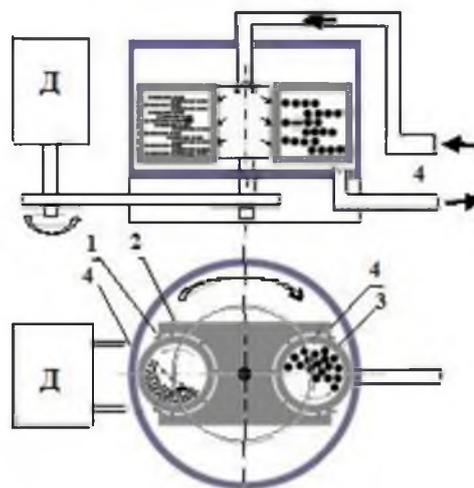
1.1-paragrafda yarimo‘tkazgichlar hamda ularning birikmalaridan hosil qilingan mikro- va nano- o‘lchamdagi zarralarning elektrofizik hamda termoelektrik xossalarini tadqiq etish, shuningdek ushbu yo‘nalishlar oldida turgan ustuvor vazifalarning nazariy tahlili o‘tkazilgan. 1.2-paragrafda mikro va nanoo‘lchamli yarimo‘tkazgichli kukunlarning mikrotuzilmasi va zaryad holatlari, 1.3-paragrafda granulalangan kremniy yarimo‘tkazgichlarining elektrofizik va termoelektrik xossalarini o‘rganish yuzasidan tegishli mexanizmlar bayon etilgan. 1.4-paragrafda granulalangan kremniyning elektrofizik va termoelektrik xossalariga kirishmalarning ta’siri bo‘yicha nazariy tahlillar bajarilgan.

“Mikro va nanoo‘lchamli, granulalangan kremniyning elektrofizik hamda termoelektrik xususiyatlarini tadqiq etishni amaliy va nazariy metodlari” nomli ikkinchi bobida dastlabki maxsulotlarning umumiy tavsiflari, granulalangan kremniy kukunlari olish texnologiyasi, granulalangan kremniyning elektr o‘tkazuvchanligi, Zeebek koeffitsienti va issiqlik o‘tkazuvchanligini o‘rganish usullari, shuningdek, yangi ishlab chiqilgan “Visual Basic” dasturiy tizimiga asoslangan “Granulalangan kremniyning issiqlik o‘tkazuvchanligini aniqlash” nomli EHM uchun dasturiy mahsulot va undan ilmiy maqsadlarda foydalanish metodikasi bayon qilingan.

Mikro- va nanoo‘lchamli granulalangan yarimo‘tkazgichlar olishda kukunli texnologiyadan foydalanildi. Kukun texnologiyasi boshqalaridan, masalan, zol-gel, molekulyar nur yoki boshqa texnologiyalarga nisbatan soddaligi, murakkab texnologik jarayonlarni talab qilmasligi bilan ajralib turadi. Kukun texnologiyasi yordamida istalgan turdagi kristallar va ular asosida yaratilgan, ishlash muddatini o‘tagan quyosh elementlari hamda boshqa turdagi yarimo‘tkazgichlarni kukunsimon holatga keltirish imkoniyatiga ega bo‘lamiz.

Dastlabki xomashyo, yani Na va Cs ishqoriy metall atomlari kiritilgan p - tipli polikristall kremniy plastinalari planetar tegirmon yordamida maydalangan bo'lib, uning mexanoaktivator sxemasi 1 – rasmda tasvirlangan.

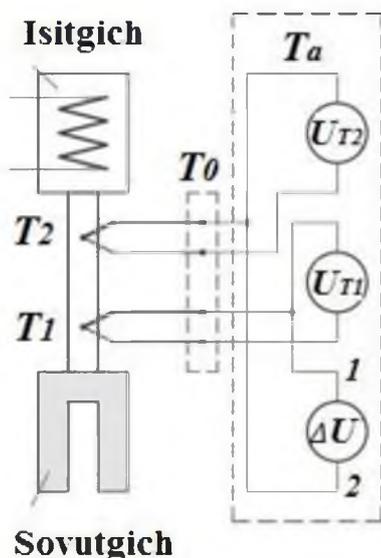
Granulalangan kremniyning mikrotuzilmasini o'rganish va o'lchamlarini aniqlash uchun EMPYREAN XDR rentgen difraktometri hamda SEM EVO MA 10 (CARL ZEISS) skanerlovchi elektron mikroskopdan foydalanilgan bo'lib, ularning asosiy texnik xarakteristikalari keltirilgan. EMPYREAN XDR rentgen difraktometri ham ilmiy tadqiqotlar, ham sanoatda taxliliy nazorat uchun mo'ljallangan. Shuningdek, an'anaviy kukunli va tadqiqot difraktometrning imkoniyatlarini o'zida mujassamlashtirgan bo'lib, nanostrukturalarda fazalar tarkibini aniqlash, hamda ularning rentgen spektral xarakteristikasini o'rganishga asoslangan.



1 – rasm. Planetar shar tegirmonining mexanoaktivator sxemasi. 1 – reaktor; 2 – tashuvchi; 3 – maydalovchi qism (sharlar); 4 – suvli sovutish tizimi; D – aylanishlar sonini boshqaruvchi elektrodvigatel

Skanerlovchi elektron mikroskop SEM EVO MA10 (CARL ZEISS) elektron mikroskop yoki maxsus elektron zond mikroanalizatoridan foydalanib, mikroskopik o'lchamdagi namunaning mikrofotografiyasini olish, shuningdek ixtiyoriy tanlangan qismining kimyoviy tarkibi to'g'risida ma'lumot olish imkonini beradi. Uskuna maxsus kompyuter bilan jihozlangan bo'lib, Windows XP uchun SmartSEM dasturi asosida ishlaydi.

Kremniy kukunlarining elektr o'tkazuvchanligini doimiy tok ta'sirida o'lchash uchun ikki kontaktli usuldan, Zeebek koeffitsiyentini aniqlashda esa 2 – rasmda tasvirlangan differensial usuldan foydalanildi. Bu usulda namunaning turli joylariga o'rnatilgan ikkita termoparalar mos ravishda isitgich va sovutgich haroratini ko'rsatadi va ular orasidagi potentsiallar farqi namuna orqali tok o'tmayotgan vaqtda o'lchanadi. Bu holatda namunadagi elektr maydon $E = \alpha \Delta T$



2-rasm. Namunalarning tarmoEYUK ni o'lchashning differensial usulini prinsipial sxemasi

ga teng bo'ladi.

Bu usulning eng muhim sharti namunaning o'zi xam, termoparali o'tkazgichlar xam bir jinsli bo'lishi kerak. Xulosa qilib aytganda termoEYUK harorat funksiyasi bo'lib, u namuna va o'tkazgichlar uzunligiga bog'liq emas. Agar ushbu shartlar bajarilsa, biz ΔU uchun quyidagini yozishimiz mumkin

$$\Delta U = - \left(\int_{T_a}^{T_0} \alpha_{Cu} dT + \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{ref}^1 dT + \int_{T_1}^{T_2} \alpha_X dT + \int_{T_2}^{T_0} \alpha_{ref}^2 dT + \int_{T_0}^{T_a} \alpha_{Cu} dT \right) \quad (1)$$

Bir jinsli bo'lgan elektrodlar uchun $\alpha_{ref}^1 = \alpha_{ref}^2 = \alpha_{ref}$, u holda (1) ifodani quyidagicha yozish mumkin

$$\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_X - \alpha_{ref}) dT. \quad (2)$$

Bundan kelib chiqadiki

$$\alpha_X(T_{av}) = -\frac{\Delta U}{\Delta T} + \alpha_{ref}(T_{av}) \quad (3)$$

bu yerda $\Delta T = T_2 - T_1$, $T_{av} = (T_2 + T_1)/2$, $\Delta U = -(\alpha_X - \alpha_{ref})\Delta T$ (4) ifoda termoEYUK ning ΔT harorat oralig'ida keskin o'zgarishlar bo'lmagan hollardagini amal qiladi. TermoEYUK ni aniqlashdagi xatoliklarning asosiy sababi ko'pincha termoparali o'tkazgichlarning bir jinsli emasligidir, ular harorat farqi ΔT ni o'lchashda xatolikka olib keladi. Bir jinsli bo'lmagan o'tkazgichlar uchun $\alpha_{ref}^1 \neq \alpha_{ref}^2$, shu sababli $\alpha_X(T_{av})$ uchun ifoda quyidagicha o'zgaradi

$$\alpha_X(T_{av}) = -\frac{\Delta U}{\Delta T} + \alpha_{ref}(T_{av}) + \frac{V_0}{\Delta T} \quad (5)$$

bu yerda,

$$U = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{ref}^1 dT - \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{ref}^2 dT \approx (\alpha_{ref}^1 - \alpha_{ref}^2)(T_1 - T_0). \quad (6)$$

TermoEYUK $\Delta\alpha = U_0/\Delta T$ ni o'lchashdagi noaniqlik $1/\Delta T$ ga proporsional bo'lib, yuqori haroratlarda ΔT ni oshirish orqali kamaytirish mumkin. Biroq, past haroratlarda bu xar doim ham mumkin emas, ushbu holda ΔT uchun ikkita cheklov mavjud. 1) $\Delta T \ll T$; 2) namuna orqali o'tadigan issiqlik oqimi sovutish tizimining issiqlik sig'imi bilan chegaralanadi, bu odatda past temperaturalarda kichik qiymatlarga ega bo'ladi. Bu metod $\Delta U \propto \frac{1}{\Delta T}$ hamda ΔT kichikligiga asoslangan, u holda $\Delta U_0 \propto (T_{av} - T_0)$ ekanligidan birinchi ifoda ΔT ga bog'liq bo'lmaydi. Shuning uchun ΔU ni $T_{av} = const$ bo'lgan holat uchun ΔT ni funksiyasi sifatida o'lchash, $\Delta U = -(\alpha_X - \alpha_{ref})\Delta T + U_0$ ko'rinishdagi chiziqli funktsiyani beradi.

Kukunning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientini aniqlash uchun solishtirish metodidan foydalanildi. Ushbu metodga ko'ra ikki turdagi material namunalaridan bir xil issiqlik oqimi o'tkaziladi va xar bir issiqlik o'tkazuvchi qatlamlar orasidagi temperatura alohida o'lchanadi. Birinchi va uchinchi qatlamlar issiqlik

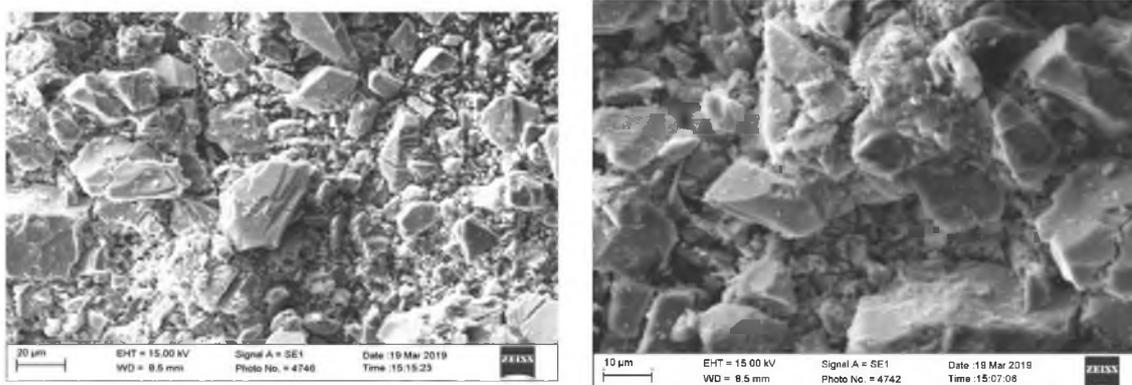
o'tkazuvchanlik koeffitsientini bilgan xolda o'rtadagi qatlamnikini aniqlash mumkin bo'ladi:

$$\chi_1 = \chi_2 \frac{a_1 t_3 - t_2}{a_2 t_2 - t_1}, \quad \chi_3 = \chi_2 \frac{a_3 t_3 - t_2}{a_2 t_4 - t_3} \quad (7)$$

Granulalangan kremniyning solishtirish metodidan foydalanib, har bir qatlamlar orasidagi temperaturalar farqini bilgan holda namunalarning solishtirma issiqlik sig'imini hisoblashga mo'ljallangan hamda "VisualBasic"ga tayangan yangi EHM uchun dasturiy mahsulot ishlab chiqildi.

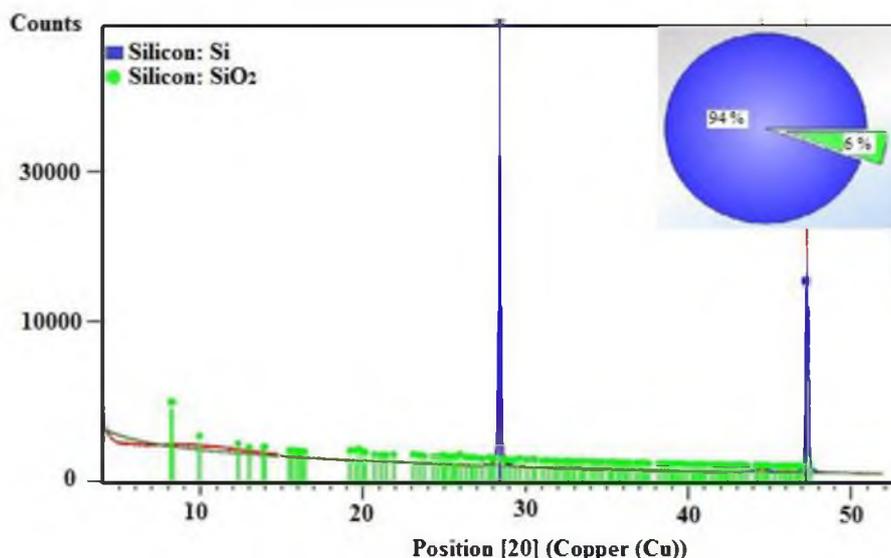
"Granulalangan kremniy namunalarning mikrotuzilmasi va asosiy elektrofizik xossalari" nomli uchinchi bobida zarrachalari o'lchami 400 nm÷60 mkm bo'lgan granulalangan kremniy namunalarning mikrotuzilmasi, morfologiyasi, kukunlar olish va tozalash texnologiyasi, shuningdek granulalangan yarimo'tkazgichlarning elektrofizik xossalari va zaryad ko'chish jarayonlari muhokama etilgan.

Ilmiy tadqiqot ishida tajribalar o'tkazishda p- tipli, diametri 3 sm, qalinligi 400 mkm, solishtirma qarshiligi $\rho \sim 3 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo'lgan kremniy namunalari sirtiga $E \approx 30 \text{ keV}$ energiya ta'sirida, $D \approx 10^{13} \text{ sm}^2$ miqdorda Na va Cs atomlari kiritilgan, so'ngra 300÷1000 K va 10^{-6} Torr vakuum sharoitida termik ishlov berilgan polikristall kremniy plastinkalarini o'lchamlari 400 nm ÷ 60 mkm bo'lguncha maydalangan granulalardan foydalanilgan. Shuningdek ishqoriy metall atomlarini kremniyning elektrofizik xossalariga ta'sirini solishtirish maqsadida xuddi shu o'lchamdagi KES 0,01 markali, qalinligi 340 mkm, solishtirma qarshiligi $\rho \sim 10 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo'lgan monokristall kremniy plastinkalaridan maydalab tayyorlangan kremniy granulalaridan foydalanildi (3-rasm).



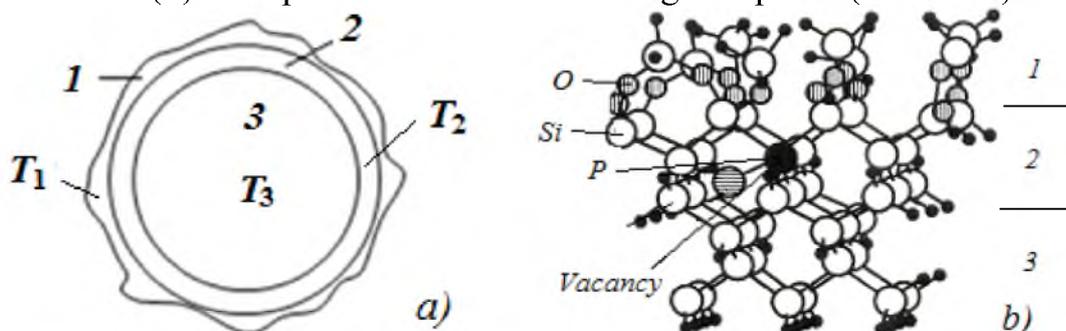
3 - rasm. Granulalangan kremniy kukunlarining mikrofotografiyasi

Tadqiqotlardan ko'rinadiki, barcha turdagi granulalar tarkibi 98,54-98,95 % sof kremniydan, qolgan qismi esa SiO₂ dan tashkil topgan. Kremniy miqdori sirtga yaqinlashgan sari 98,54 % dan 94,54 % gacha kamayib, aksincha, kislorod miqdori ortib borgan holda joylashganligi aniqlandi (4-rasm).



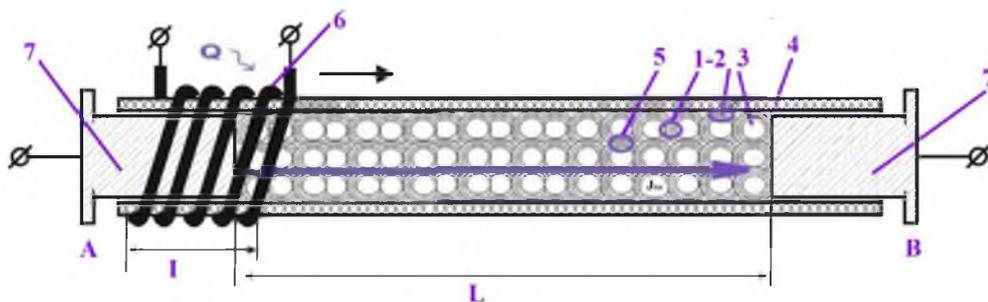
4 – rasm. Granulalangan kremniy kukunining rentgen spektral xarakteristikasi

Dastlab kremniy xom ashyolarining barchasi planetar shar tegirmoni yordamida maydalanib, kukun holatiga keltirildi. Kukunlash jarayonida ishqalanish, mexanik ishlov berish, qizish hamda kristalografik nuqsonlarning hosil bo‘lishi granula yadrosidan sirt sohasigacha fazalar o‘zgarishiga olib keladi. Shu sababli granula yadrosidan sirti tomon temperaturalar farqi vujudga keladi ($T_3 \leq T_2 \leq T_1$, 5a - rasm). Temperaturalar farqiga mos holda granula tuzilishi 3 qismdan, nisbatan temperaturasi yuqori bo‘lgan notekis sirt, ya’ni reaksiyalanish qobiliyati yuqori bo‘lgan (1) soha, kukun yadrosi (3) hamda (1) va (3) sohalarni ajratib turuvchi (2) oraliq sohalardan iborat ekanligi aniqlandi (5a - rasm).



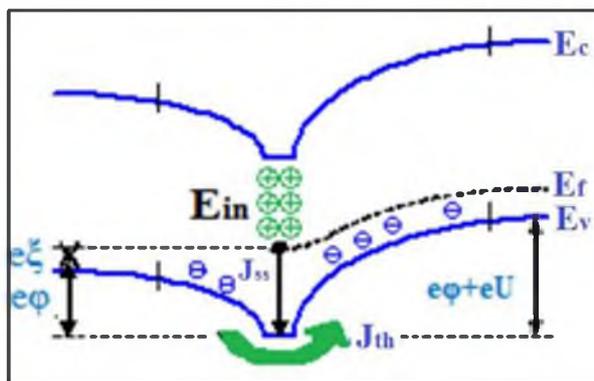
5 - rasm. a) Granulalarning soddalashtirilgan sxemasi, b) granulaning kristall tuzilishi. 1–notekis sirt soha, 2–oraliq soha 3–granula yadrosi, $T_3 \leq T_2 \leq T_1$ – mos holda qizdirilganda kontakt sohalardagi temperaturalar, O–kislrorod atomlari, Si–kremniy atomlari, P – kirishma atomlari, Vacancy – vakansiya.

Biz granulalangan kremniyning elektrofizik xususiyatlarini ichki diametri 2 mm bo‘lgan dielektrik korpus (keramik trubka)ga joylashtirilgan holatda o‘rgandik, 6 – rasmda tadqiqot metodi va unga mos holda granular joylashuvining soddalashtirilgan sxemasi) tasvirlangan.



6-rasm. Granular joylashuvining soddalashtirilgan sxemasi. 1- granularning o‘zaro ketma-ket tutashgan sohasi, 2 – granularning keramik trubka (4) bilan tutashgan sohasi, 3 – yarimo‘tkazgich kukunlari, 4 – keramik trubka, 5 – granularning o‘zaro parallel tutashgan sohasi, 6 – isitgich, 7 - omik kontaktlar, Q – berilayotgan issiqlik miqdori

Namunaga A sohadan Q issiqlik berilganda M_A va M_B kontaktlarda temperaturalar farqi paydo bo‘ladi (6 - rasm). Bunday holda, A sohaning qizishi hisobiga hosil bo‘lgan zaryad tashuvchilar nisbatan temperaturasi past bo‘lgan B soha tomonga ko‘chadi va temperatura ta‘sirida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ortadi. Natijada, temperaturasi yuqori bo‘lgan A sohadan B sohaga zaryad tashuvchilar ko‘chishi yuz beradi. Ko‘rib o‘tilgan holatlarda granular yadro (3) orqali emas, balki, granula sirtidagi igna tolali notekis soha (1) va uni granula yadrosidan ajratib turuvchi oraliq soha (2) lar (5a - rasm) orqali, ya‘ni, 6 – rasmda tasvirlangandek 1-2 hamda 5 sohalar orqali tutashadi, zaryad ko‘chish jarayonlari ham aynan shu tutashgan sohalar orqali amalga oshishi aniqlandi.



7-rasm. Zaryadlangan donadorliklararo chegara sohalarining zonalar diagrammasi.

7-rasmda zaryadlangan donadorliklararo chegara sohalarining zonalar diagrammasi tasvirlangan. Termoelektron emissiya modeliga ko‘ra, zaryadlar chapdan o‘ngga o‘tish jarayonida termoelektron emissiya (J_{th}) toki paydo bo‘ladi:

$$J_{th} = A^* \cdot T^2 \exp(-\beta(\zeta + \varphi))(1 - \exp(-\beta U)) \quad (8)$$

bu yerda, $\beta = e/kT$ - koeffitsient, A^* - Richardson effektivlik doimiysi, U - berilgan kuchlanish, $e\phi$ – chapdagi to‘siq balandligi, $e\zeta$ – donadorlikda kirishmalarning legirlanish konsentratsiyasiga bog‘liq bo‘lgan Fermi sathi.

Zonalar diagrammasidan ko‘rinadiki, J_{th} termoelektron emissiya tokidan tashqari ikkinchi J_{ss} tok ham keltirilgan. Bu tok, zaryad tashuvchilarning chapdan o‘ng tomonga o‘tayotganda E_f fermi sathidan yuqorida joylashgan donadorliklararo chegara sohasidagi lokallashgan tuzoqlar (E_{in})da ushlanishi va qayta ozod bo‘lishi jarayonida paydo bo‘ladi. Bu tok tuzoqlarning to‘liq o‘tkazuvchanligi (Y_{ss}) ga va potensial to‘siq balandligi ($\delta\phi$) ga quyidagicha bog‘langan

$$J_{ss} = Y_{ss} \delta\phi \quad (9)$$

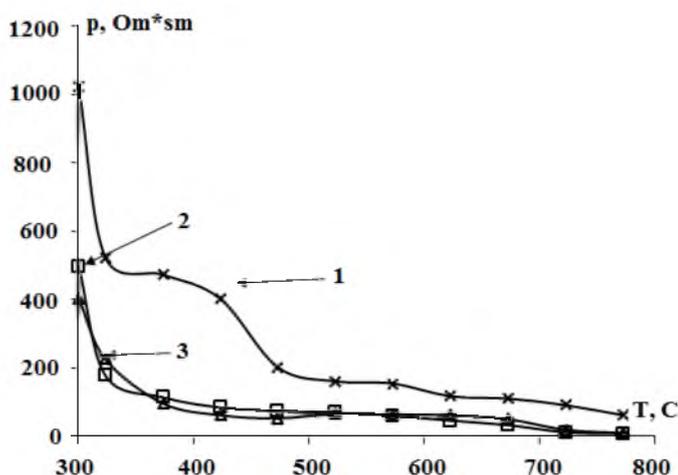
Bu holda umumiy tokni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$J_{tot} = J_{th} + J_{ss} \quad (10)$$

(10) ifodadan ko‘rinadiki, umumiy tok zaryad tashuvchilarning tuzoqlarda ushlanishi va qayta ozod bo‘lishiga bog‘liq. Temperatura ortishi jarayonida elektron-kovak juftliklari generatsiyasi kuchayishi hisobiga paydo bo‘luvchi umumiy tok ham ortib boradi. Demak, polikristall yarimo‘tkazgichlarda zaryad ko‘chish jarayoni asosan ikki tutashgan sohalarda namoyon bo‘luvchi J_{ss} tok va E_i sathli tuzoqlarning (Y_{ss}) to‘liq o‘tkazuvchanligiga bog‘liq.

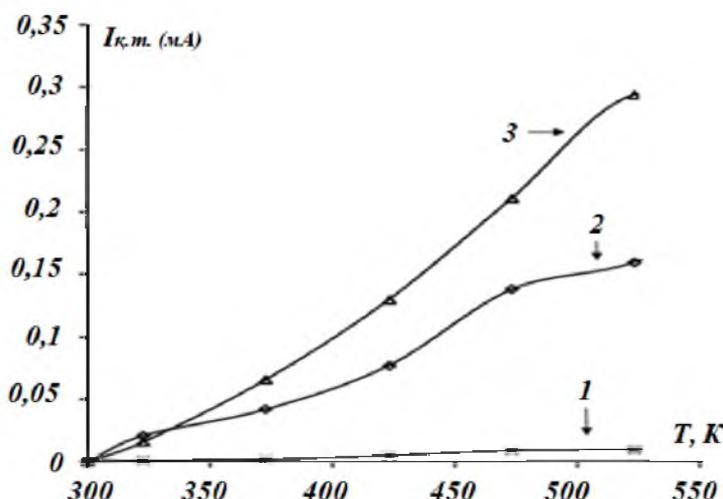
“Ishqoriy metall atomlari kiritilgan granulalangan kremniyning asosiy elektrofizik va termoelektrik xususiyatlari” nomli to‘rtinchi bobida granulalangan kremniyning fizik xususiyatlari to‘g‘risida ma’lumotlar keltirilgan. Xususan, birinchi marta granulalangan Si da temperatura ortishiga bog‘liq holda elektron-kovak juftliklarining hosil bo‘lishi va zaryad ko‘chish jarayonlariga ishqoriy metall atomlarining ta’sirini o‘rganishda olingan tadqiqot natijalari keltirilgan.

8-rasmda 25 MPa tashqi bosimda, zarrachalari o‘lchami 400 nm dan 60 mkm gacha bo‘lgan ishqoriy metall atomlari kiritilgan p tipli polikristall kremniy plastinasidan tayyorlangan granulalangan kremniy namunasini solishtirma qarshiligining temperaturaga bog‘liqligi keltirilgan. Rasmdan ko‘rinadiki, ~350 K temperaturada ishqoriy metall atomlari kiritilgan namunalarning solishtirma qarshiligining qiymati ishqoriy metall atomlari kiritilmagan namunalardagiga nisbatan 2 marta, 350÷450 K oraliq‘ida 6 marta, 700÷800 K oraliq‘ida 7 martagacha kam bo‘lishi kuzatildi. Bu borada olib borilgan tadqiqotlarda granulalangan kremniyning solishtirma qarshiligini tashqi bosimga ham kuchli bog‘liqligi aniqlangan bo‘lib, keltirilgan natijalarga asoslangan holda, agar bosim 50 MPa gacha oshirilsa 300 K temperaturada namunalardagi solishtirma qarshilikning qiymati 4 darajaga kamayishini, ya’ni Cs kiritilgan namunada $\rho \sim 1,78 \cdot 10^{-2}$ Om*sm/MPa, Na kiritilgan namunada $\rho \sim 2,25 \cdot 10^{-2}$ Om*sm/MPa koeffitsient bo‘yicha o‘zgarishini ko‘rishimiz mumkin. Shunday qilib tadqiqot natijalariga ko‘ra, ishqoriy metall atomlari granulalangan kremniyning solishtirma qarshiligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi aniqlandi.



8-rasm. Granulalangan Si namunalarda solishtirma qarshilikning temperaturaga bog‘liqligi. 1 – legirlanmagan Si (KES-0.01), 2 – Na bilan legirlangan granular, 3 – Cs bilan legirlangan granular.

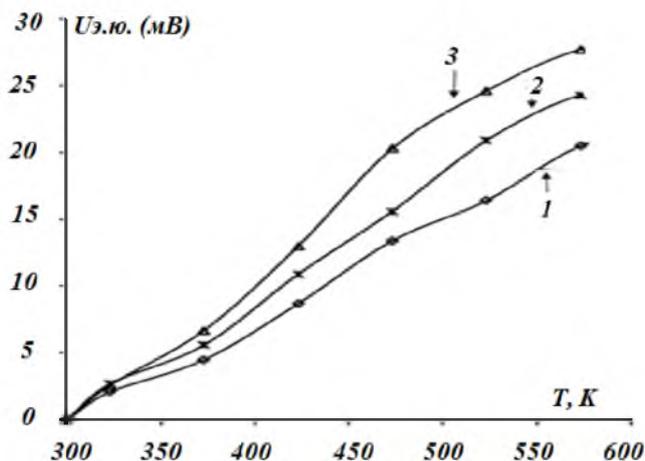
Bizga ma’lumki, termoelektrik material sifatida foydalanishning asosiy shartlaridan biri bu harorat 700 K dan yuqori bo‘lganda materialning o‘tkazuvchanligini ortishi va buning natijasida solishtirma termoelektrikni oshishi hisoblanadi. Ushbu shart granulalangan kremniydan yuqori samaradorlikga ega bo‘lgan issiqlik energiya o‘zgartirgichlarini tayyorlash uchun asos bo‘lib hisoblanadi. Tadqiqot natijalarimizdan ko‘rinadiki, ishqoriy metall atomlari kiritilgan granulalangan kremniy yuqori samaradorlikga ega bo‘lgan issiqlik energiya almashtirgichlarini tayyorlash uchun asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin.



9-rasm. Qorong‘ulik tokining temperaturaga bog‘liqligi. 1 – legirlanmagan Si (KES-0.01), 2 – Na atomlari kiritilgan granula, 3 – Cs atomlari kiritilgan granula

9-10 - rasmlarda 25 MPa tashqi bosim ta’sirida granulalangan kremniyda qorong‘ulik toki va kuchlanishining temperaturaga ($T \approx 300-650$ K) bog‘liqlik grafigi keltirilgan. Grafikdan ko‘rinadiki ishqoriy metall atomlari kiritilgan namunalarda olingan natijalar ishqoriy metall atomlari kiritilmagan namunalarnikidan tubdan farq qiladi. Tadqiqot natijalaridan ko‘rinadiki 375 K temperaturada Cs kiritilgan namunalardagi tok kuchining qiymati ishqoriy metall atomlari kiritilmagan namunalarga nisbatan 30 martagacha, Na kiritilgan namunalarda esa 20 martagacha ortiq bo‘lishi kuzatildi. Salt ishlash kuchlanishi ham tok kuchiga mos holda o‘zgaradi. Bundan ko‘rinadiki, ishqoriy metall atomlari temperatura ortib borishi bilan desorblanib granula sirtidagi SiO_2 dan iborat notekis sohada, $\text{Na}_x\text{-O}_y$ va $\text{Cs}_x\text{-O}_y$ yoki $\text{Na}_x\text{-V}_y$ va $\text{Cs}_x\text{-V}_y$ kompleks

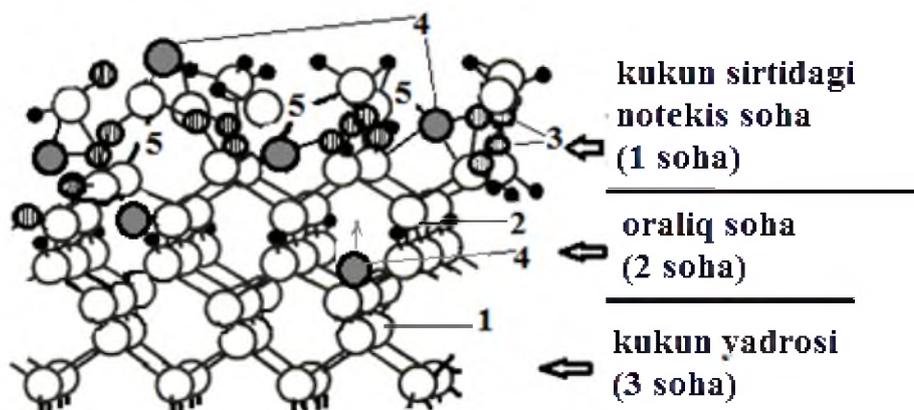
birikmalarni hosil qiladi. Bu holat, tarkibida ishqoriy metall atomlari bo'lmagan granularga nisbatan qorong'ulik toki va kuchlanishining ortishiga olib keladi.



10 – rasm. Granulalangan kremniy namunalarini qizdirish natijasida hosil bo'lgan salt yurish kuchlanishning temperaturaga bog'liqligi. 1 – legirlanmagan Si ($K_{ЭC} = 0.01$), 2 – Na atomlari kiritilgan granula, 3 – Cs atomlari kiritilgan granula

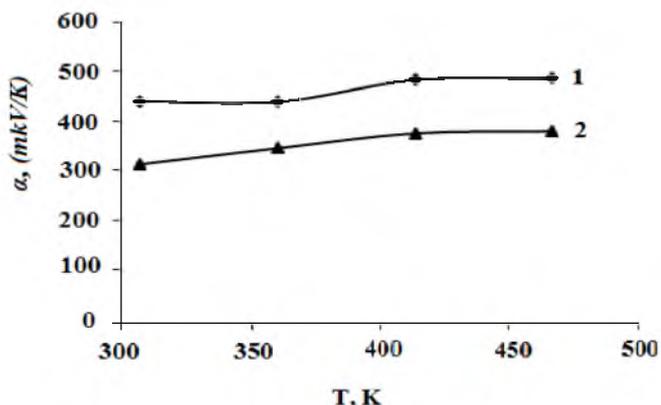
Ishqoriy metall atomlari 11 – rasmda tasvirlangandek, kukunning barcha sohalarida mavjud. Kimyoviy jihatdan faol bo'lgan, tez harakatchan ishqoriy metall atomlari kremniy granularida donor sathlarni hosil qilib, kislorod atomlari hamda vakansiyalar bilan oson ta'sirlashadi. Natijada, haroratning ortib borishi bilan desorblanib Na_x-O_y va Cs_x-O_y yoki Na_x-V_y , va Cs_x-V_y kompleks birikmalarni hosil qiladi. Bu jarayon kremniy granulari sirtida SiO_2 yoki Si_xO_y kabi oksid birikmalarni paydo bo'lishini oldini oladi, shuningdek, temperatura ta'sirida namoyon bo'luvchi yangi turdagi rekombinatsiya markazlarini bartaraf etish imkonini beradi.

Termoelektrik materiallarning asosiy xususiyatlaridan biri Zeebek koeffitsiyenti ya'ni solishtirma termoEYUK (α) xisoblanadi. Hozirda keng qo'llanilib kelayotgan termoelektrik materiallar uchun termoEYUK (α) ning qiymati 200-300 mkV/K hisoblanadi. Monokristall kremniy uchun esa bu qiymat 300 K temperaturada $\sim 44-50$ mkV/K bo'lganligi sababli ulardan termoelektrik material sifatida faqat maqsadli holatlardagina kamdan-kam foydalanilar edi.



11-rasm. Granulaning kristall panjara tuzilishi. 1 – kremniy, 2 – vodorod, 3 – kislorod, 4 – ishqoriy metall atomlari, 5 – kremniy yoki kirishma atomlarining uzilgan bog'i.

12-rasmda granulalangan kremniyning 300-500 K temperatura oralig'idagi Zeebek koeffitsienti (α)ning temperaturaga bog'liqligi keltirilgan. Tadqiqot natijalaridan ko'rinadiki 300 ÷ 500 K oralig'ida Zeebek koeffitsiyentining qiymati Cs kiritilgan namunalarda 470 ÷ 510 mkV/K, Na kiritilgan namunalarda esa 370 ÷ 430 mkV/K bo'lib bu monokristal kremniyga nisbatan 10÷8 barobar ko'p ekanligi, shuningdek boshqa termoelektrik materiallardan farqli ravishda Zeebek koeffitsientini haroratga deyarli bog'liq emasligi aniqlandi.

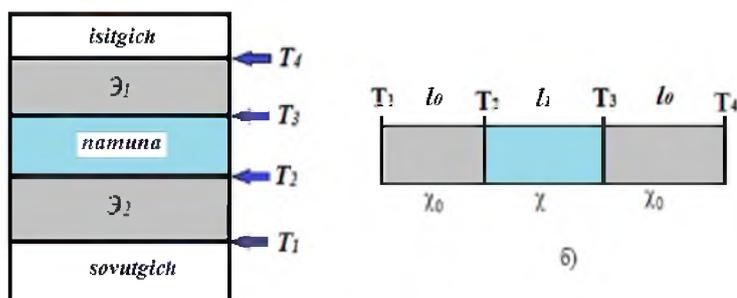


12 – rasm. Zeebek koeffitsienti (α) ni temperaturaga bog'liqligi. 1 – Cs atomlari kiritilgan granular, 2 – Na atomlari kiritilgan granular.

Termoelektrik materiallarning asosiy parametrlaridan yana biri ularning issiqlik o'tkazuvchanlik (χ) xisoblanib, termoelektrik materiallarning asilligi (Z) ni oshirish uchun materialning issiqlik o'tkazuvchanligini kamaytirish talab qilinadi:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi} \quad (11)$$

Z – materiallarning asilligi, σ - elektr o'tkazuvchanlik, α – solishtirma termoEYUK, χ - issiqlik o'tkazuvchanligi.



13-rasm. Solishtirish metodidan foydalangan holda granulalangan kremniyning issiqlik o'tkazuvchanligini o'lchash sxemasi.

Tadqiqot ishida ishqoriy metall atomlari kiritilgan granulalangan kremniyning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti χ ni aniqlashda solishtirish metodidan foydalanilgan bo'lib, 13-rasmda metodning umumiy (a) hamda soddalashtirilgan (b) ko'rinishlari tasvirlangan. Metodning mohiyati, dastlab issiqlik o'tkazuvchanligi o'rganilayotgan materialdan namuna tayyorlanadi hamda unga o'xshash shakl va o'lchamlarda issiqlik o'tkazuvchanlik qiymati ma'lum bo'lgan ikkita etalon (E_1 , E_2) namuna orasiga joylashtiriladi. Xar bir qatlamlar orasidagi issiqlik miqdori quyidagigacha ifodalanadi:

$$Q_1 = \chi_0 S \frac{\Delta T_{12}}{l_0} \quad Q_2 = \chi S \frac{\Delta T_{23}}{l}, \quad Q_3 = \chi_0 S \frac{\Delta T_{34}}{l_0} \quad (12)$$

bu yerda χ - tekshirilayotgan qatlamning issiqlik o'tkazuvchanligi, χ_0 Θ_1 va Θ_2 etalon qatlamlarning issiqlik o'tkazuvchanligi. Agar

$$Q_2 = \frac{1}{2} (Q_1 + Q_3) \quad (13)$$

deb hisoblansa, $l_0 = l_1$ ekanligidan kelib chiqib issiqlik o'tkazuvchanligi quyidagi ifoda orqali xisoblandi:

$$\chi = \frac{\chi_0 \frac{\Delta T_{12} + \Delta T_{34}}{2}}{\Delta T_{23}} \quad (14)$$

Hisoblash natijalariga ko'ra zarrachalarining o'lchamlari 400 nm - 60 mkm bo'lgan ishqoriy metall atomlari kiritilmagan granularlangan kremniyning 300 - 350 °C temperatura oralig'idagi issiqlik o'tkazuvchanligi $\chi \sim 15,34 \div 16,76$ Vt/m·K qiymatlarda bo'ladi. Xuddi shu o'lchamlarda natriy atomlari kiritilgan namuna uchun issiqlik o'tkazuvchanligi $\chi \sim 9,62 \div 1,81$ Vt/ m·K, seziiy atomlari kiritilgan namuna uchun $\chi \sim 9,14 \div 10,69$ Vt/m·K bo'lib bu monokristall kremniyga nisbatan 12 ÷ 14 marta kichik bo'lishi aniqlandi.

Aytish joizki, agar granula ($d_1, \sigma_1, \chi_1, \alpha_1$) va granulararo tutush sohalarning ($d_2, \sigma_2, \chi_2, \alpha_2$) termoelektrik parametrlari bir-biridan tubdan farq qilsa, bunday sistema adabiyotlarda keltirilgan «elektron kristal-fonon shisha» kabi ideal termoelektrik materialning bir ko'rinishi xisoblanadi. Bunday sistemaning termoelektrik xarakteristikalari quyidagicha bo'ladi:

Ushbu sistema uchun o'tkazuvchanlikning effektiv qiymati quyidagicha:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_2 \frac{d_1}{d_1 + d_2} + \sigma_1 \frac{d_2}{d_1 + d_2}} \quad (15)$$

Ushbu sistema uchun issiqlik o'tkazuvchanlikning effektiv qiymati quyidagicha:

$$\chi_{eff} = \frac{\frac{d_1 + d_2}{\frac{d_1}{\chi_1} + \frac{d_2}{\chi_2}}}{\chi_1 \chi_2} \quad (16)$$

Kremniy granulasi-SiO₂ qatlam sistemadagi Zeebek koeffitsientining effektiv qiymati:

$$\alpha_{eff} = \alpha_1 \frac{\chi_2 d_1}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} + \alpha_2 \frac{\chi_1 d_2}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} \quad (17)$$

$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi}$ ekanligini hisobga olib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$Z_{eff} = \left[\alpha_1 \frac{\chi_2 d_1}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} + \alpha_2 \frac{\chi_1 d_2}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} \right]^2 \left[\frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_2 \frac{d_1}{d_1 + d_2} + \sigma_1 \frac{d_2}{d_1 + d_2}} \right] \left[\frac{1}{d_1 + d_2} \left(\frac{d_1}{\chi_1} + \frac{d_2}{\chi_2} \right) \right] \quad (18)$$

Yuqorida aytib o'tilganidek, granula va granulararo chegara sohalari

xususiyatlari bir-biridan tubdan farq qilsa, ya'ni $\sigma_1 \gg \sigma_2$, $\chi_1 \gg \chi_2$, $\alpha_1 > \alpha_2$, $d_1 \gg d_2$, bo'lsa, u holda termoelektrik asillik Z_{eff} ning effektiv qiymati uchun quyidagiga ega bo'lamiz (mos holda granularlar va granularlararo chegaralar parametrlari: σ_1 va σ_2 , χ_1 va χ_2 , α_1 va α_2 , d_1 va d_2)

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\alpha_1^2 \sigma_2}{\chi_2} \quad (19)$$

Demak, termoelektrik asillik Z_{eff} ning effektiv qiymati zarrachalarining solishtirma termoEYUKsi va granularlararo chegara soha elektr o'tkazuvchanligiga to'g'ri proporsional, granularlararo chegara soha yoki SiO₂ qatlamning issiqlik o'tkazuvchanligiga teskari proporsional ravishda o'zgarar ekan. Z ning ortishi granularlangan yarimo'tkazgichlarda Zeebek koeffitsientining ortishiga bog'liq bo'lib, bu teplovoltaiik effektning vujudga kelishi tufayli sodir bo'ladi.

Demak, tadqiqot ishida asosiy vazifa granularlangan kremniyning termoelektrik asilligi Z ni ortishiga hamda granularlararo zaryad tashuvchilarning tunnellashuvi xisobiga yuzaga keluvchi SiO₂ qatlamning o'tkazuvchanligini ortishiga erishishdan iboratdir. Shunday qilib asosiy e'tibor tunnel sharoitlarini yaxshilashga qaratilgan bo'lishi zarur. Bizga ma'lumki, an'anaviy termoelektrik materiallarda zaryad tashuvchilar tunnellashuvini tushuntirishda «gamov» tunnellashuv modeli asosida quyidagi ehtimollikdan foydalaniladi:

$$D^{(1)}(E) = \exp\left[-\frac{2}{\hbar}\sqrt{2m(V-E)}x\right] \quad (20)$$

bu yerda $V-E$ – eng yuqori potensial to'siq balandligi va zarrachalarning energetik sathlari orasidagi farq, x – to'siq balandligi.

Granularlangan yarimo'tkazgichlar uchun «gamov» tunnellashuvi modeli tadqiqotlarda tunnel kontakti ichidagi oraliq nuqsonli holat orqali ikkita elektronning nokogorent sakrashini kiritish orqali o'zgartirilgan va bu quyidagicha ifodalanadi:

$$D^{(2)}(E) = \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{2}{\hbar}\sqrt{2m(V-E)}x/2\right] \quad (21)$$

Tadqiqotlarga ko'ra granularlangan yarimo'tkazgichlar uchun rezonansli tunnellashuv «gamov» tunnellashuviga nisbatan samaraliroq ekan. Unga ko'ra rezonansli tunnellashuv uchun quyidagi Ventsel-Kramers-Brillyuen ehtimolligidan foydalanish taklif etilgan:

$$D^{(3)}(E) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\tau_0 \Theta^2}{\hbar}\right)^2 (E - E_N)^2} \quad (22)$$

bu yerda τ_0 va E_N – potensial o'ra ichidagi elektronning tebranish davri va energiyasi, $\Theta = \exp\left(\int_b^a P_I \frac{dx}{\hbar}\right)$, P_I – elektron impulsi.

Ifodadan ko‘rinib turibdiki, $\Theta \gg 1$ bo‘lganda, rezonans kengligi $E - E_N = \frac{\hbar}{\tau_0} \Theta^2$ kichik bo‘ladi.

Yuqorida keltirilgan natijalarni xisobga olib, oldinga qo‘yilgan vazifa, ya’ni ko‘p komponentli geterogen muhitdan iborat termoelektrik materialni tayyorlash usuli quyidagi tartibda amalga oshirildi. Dastlab ishqoriy metall atomlari bilan legirlangan polikristall kremniy tarkibida kislorod bo‘lgan muhitda 400 nanometrdan 60 mikrometr o‘lchamgacha kukunsimon holatga yetguncha maydalandi. Granulalar sirtida ishqoriy metall atomlarining kislorod atomlari bilan ($\text{Na}_x\text{-O}_y$ va $\text{Cs}_x\text{-O}_y$) yoki vakansiyalar bilan ($\text{Na}_x\text{-V}_y$, va $\text{Cs}_x\text{-V}_y$) kompleks birikmalardan iborat nanoqatlamlar hosil qilindi. So‘ngra granulalarni bir-biriga tashqi bosim ostida siqish orqali esa to‘g‘ridan-to‘g‘ri nanoqatlamlar orqali tunnelli kontaktlar hosil qilindi va nanoqatlamda elektronlarning rezonansli tunnellashtirilishini ta’minlovchi $E_c^{Si} \leq E_N < [E_c^{Si(IM_x-O_y)} \text{ yoki } E_c^{Si(IM_x-V_y)}]$ munosabatlarni qanoatlantiruvchi lokal energetik sathlar hosil qilish bilan hal qilingan.

bu yerda E_c^{Si} – kremniy o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar energiyasi;

$E_N - Si(IM_x - O_y)$ yoki $Si(IM_x - V_y)$ nanoqatlam o‘tkazuvchanlik zonasi pastida joylashgan, tunnel kontaktlardagi lokal sathlar energiyasi;

$E_c^{Si(IM_x-O_y)}$ yoki $E_c^{Si(IM_x-V_y)}$ – o‘tkazuvchanlik zona pastida, $Si(IM_x - O_y)$ yoki $Si(IM_x - V_y)$ nanoqatlamda joylashgan elektronlar energiyasi.

XULOSA

Granulalangan kremniyning termoelektrik xossalari Na va Cs atomlarining ta'sirini o'rganish hamda ishqoriy metall atomlari kiritilgan granulalangan kremniydan termoelektrik materiallar olish texnologiyasini ishlab chiqish natijalariga ko'ra quyidagi asosiy xulosalarga kelindi:

1. Zarrachalarining o'lchami 400 nm - 60 mkm bo'lgan ishqoriy metall atomlari (Na va Cs) bilan legirlangan, granulalangan kremniy keramik korpus ichiga joylab, ikki tarafdin 25 MPa tashqi bosimda metall kontaktlar bilan siqilgan namunalarda qizdirilganda tok va elektr yurituvchi kuch hosil bo'lishi aniqlandi;

2. Temperaturalar farqiga mos holda granulalarning tuzilish modeli taklif qilindi. Modelga ko'ra, granular reaksiyalanish qobiliyati yuqori bo'lgan sirtidagi notekis (1) soha, uni granula yadrosi (3)dan ajratib turuvchi (2) oraliq sohalardan iborat bo'lib, xar bir sohalar bo'yicha temperaturalar farqi ($T_3 \leq T_2 \leq T_1$) mavjudligi aniqlandi;

3. Ilk marotaba granulalangan yarimo'tkazgichlardagi zaryad ko'chish mexanizmlari tushuntirib berilgan bo'lib, unga ko'ra granular o'zaro yadro (3) orqali emas, balki, granula sirtidagi notekis (1) soha va uni granula yadrosidan ajratib turuvchi oraliq (2) sohalar orqali tutashadi, zaryad ko'chish jarayonlari ham aynan shu tutashgan sohalar orqali amalga oshishi tushuntirildi;

4. Temperatura ortib borishi bilan tez harakatchan ishqoriy metall atomlari sirt tomon desorblanib Na_x-O_y va Cs_x-O_y yoki Na_x-V_y va Cs_x-V_y kompleks birikmalari kirishmali holatlarni hosil qiladi, shuningdek o'tkazuvchanlikning ortishi va tok generatsiyasiga sabab bo'ladi;

5. 500 K temperaturada kukunni siquvchi tashqi bosimning qiymati 25 MPa bo'lgan holatda tok zichligi Cs kiritilgan namunalarda 30 mA/sm², Na kiritilgan namunalarda 15 mA/sm² bo'lishi aniqlandi;

6. Birinchi marta, tarkibiga ishqoriy metall atomlari kiritilgan granulalangan kremniyda Zeebek koeffitsientining temperaturaga bog'liqligi aniqlandi. 300 ÷ 500 K temperatura oralig'ida Zeebek koeffitsientining qiymati Cs kiritilgan namunalarda 470 ÷ 510 mkV/K, Na kiritilgan namunalarda esa 370 ÷ 430 mkV/K bo'lib bu monokristall kremniyga nisbatan mos ravishda 10-8 barobar ko'p ekanligi aniqlandi;

7. Birinchi marta, tarkibiga ishqoriy metall atomlari kiritilgan namunalarda issiqlik o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi aniqlandi. Zarrachalarining o'lchamlari 400 nm - 60 mkm bo'lgan granulalangan kremniyning 300 - 350 °C temperatura oralig'idagi issiqlik o'tkazuvchanligi (χ) natriy atomlari kiritilgan namuna uchun 9,62 dan 11,81 Vt/m·K, seziiy atomlari kiritilgan namuna uchun 9,14 dan 10,69 Vt/m·K bo'lib bu monokristall kremniyga nisbatan 12-14 marta kichik ekanligi aniqlandi.

8. Tajribalarimizda granulalangan kremniyning issiqlik o'tkazuvchanligi nafaqat zarrachalar o'lchamiga balki namuna tarkibiga ham bog'liq bo'lishi tasdiqlandi. Ishqoriy metall atomlari granulalangan kremniyning ikki tutashgan sohasida Na_x-O_y , Cs_x-O_y yoki Na_x-V_y , Cs_x-V_y kabi kompleks birikmalarni hosil

qilishi hamda ushbu sohaning elektron holati va issiqlik o'tkazuvchanligini o'zgarishiga sabab bo'lishi aniqlandi.

9. Termoelektrik asillik Z_{eff} ning effektiv qiymati zarrachalarning solishtirma termoEYUKsi va granulalararo chegara soha elektr o'tkazuvchanligiga to'g'ri proporsional, granulalararo chegara soha yoki SiO_2 qatlamning issiqlik o'tkazuvchanligiga teskari proporsional ravishda o'zgarishi aniqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК ПРИ ФЕРГАНСКОМ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

АНДИЖАНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

СОХИБОВА ЗАРНИГОРХОН МУТАЛИБЖОН КИЗИ

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННОГО
КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ Na И Cs**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Фергана -2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2021.4.PhD/FM658.

Диссертация выполнена в Андижанском машиностроительном институте.
Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.ferpi.uz) и на Информационно образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: **Зайнабидинов Сирожидин**
доктор физико-математических наук, профессор,
академик АН РУз

Официальные оппоненты: **Имамов Эркин Зуннунович**
доктор физико-математических наук, профессор
Султанов Номонжон Акрамович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека**

Защита диссертации состоится «15» 09 2023 года в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 при Ферганском политехническом институте (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06, факс (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ферганского политехнического института. (зарегистрирована за № 191). (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06.)

Автореферат диссертации разослан «04» 09 2023 года. (реестр протокола рассылки 13 от «04» 09 2023 года).



Н.Х.Юлдашев
Заместитель председателя Научного совета по присуждению ученых степеней доктора философии, д.ф.-м.н., профессор

Б.Ж.Ахмадалиев
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степени доктора философии, доктор философии по физико-математическим наукам

С.Ф.Эргашев
Председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, доктора философии, т.ф.д., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Разработка новых методов совершенствования существующих традиционных источников энергии в мире, в частности, использование технологий получения электроэнергии из тепловой энергии с использованием термоэлектрических материалов, занимает одно из ведущих мест. Широкое производство термоэлектрических материалов в мировом масштабе и производство трансформаторов на их основе ограничено относительной редкостью и высокой стоимостью традиционных термоэлектрических материалов в земной коре, что требует внедрения новых материалов и технологий в этой области. В связи с этим актуально изучение электрофизических и термоэлектрических свойств термоэлектрических материалов на основе полупроводников, особенно гранулированного кремния, для создания на их основе термоэлектрических устройств и существенного снижения себестоимости их производства.

Учёные ведущих научно-исследовательских институтов мира проводят множество научно-исследовательских работ, направленных на изучение свойств пористого кремния, микрогранулированного поликристалла, мультискремния различных форм, микро- и гранулированного кремния. В связи с этим исследуются уникальность и физические свойства различных модификаций кремния, особое внимание уделяется обоснованию возможностей создания новых типов солнечных элементов и термоэлектрических полупроводников, а также датчиков различного типа.

В нашей республике реализуются комплексные мероприятия, направленные на изучение электрофизических свойств полупроводниковых материалов, включая создание перспективных способов получения электроэнергии из тепловой энергии в полупроводниках без промежуточных стадий и достигаются определенные результаты. В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы поставлены конкретные задачи по «... бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией, активное внедрение технологий «Зелёной экономики» во все сферы жизни, увеличение энергоэффективности...»² сломанный. В реализации этих задач важна разработка новых методов совершенствования существующих традиционных источников энергии, создание дешёвых, высоконадёжных, экологически чистых и безопасных альтернатив.

В Постановлении Президента Республики Узбекистан в 2017-2021 годах” от 7 февраля 2017 года², № УП-3899 “О мерах по повышению эффективности системы интеграции научной и инновационной деятельности” от 6 августа 2018 г., № ПП-5032 “О мерах по повышению качества образования и научных исследований в области физики” от 19 марта 2021 г., в Указе Президента ПК-3012 от 26 мая 2017 года «О дальнейшем

²Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 « О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 — 2026 годы».

развитии возобновляемой энергетики в 2017-2021 годах, повышении энергоэффективности в экономической и социальной сферах» поставлены задачи по развитию альтернативной энергетики в Узбекистане другим нормативно-правовым документам, связанным с этой деятельностью, в определенной степени служит данная диссертационная работа.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Данная диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетами развития науки и техники Республики Узбекистан III. «Развитие энергетики, энергосбережения, транспорта, машин и оборудования, современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронной техники» и II. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Степень изученности проблемы. Исследования, направленные на совершенствование существующих средств альтернативной энергетики и создание новых доступных материалов для этих целей, а также разработка новых экологически чистых технологий, в частности, производство электроэнергии прямым преобразованием тепловой энергии с использованием термоэлектрических материалов изучаются ведущими мировыми исследовательскими центрами и университетами. В числе ведущих исследователей в данной области можно отнести следующих ученых: в России - В.В.Каминский, А.А.Снарский, Л.П.Булат, А.К.Сарычев, И.П.Звягин, Н.Н.Степанов, И.В.Безсуднов, Г.А.Либенсон, Л.С.Смирнов, В.Л.Гиршов, А.В.Дмитриев, С.А.Котов, В.Н.Цеменко, А.Н.Лагарьков, в США- А.Дональд, Р.Ф.Уоллис, Ю.Питер, в Германии - Мануэль Кардона, Э.Мюллер, а в нашей республике Т.С.Камилов, Г.Абдурахманов, С.З.Зайнабидинов, Р.Я.Расулов, Б.М.Абдурахманов, А.М.Касимахунова, Х.Б.Ашуров,

А.А.Снарский, А.К.Сарычев, И.В.Безсуднов, А.Н.Лагарьков разработали модель наноструктурированных композитов, с помощью которой можно рассчитать значения основных термоэлектрических величин, таких как удельная термоЭДС, теплопроводность, электропроводность и термоэлектрическая добротность (Z) и прогнозировать свойства, а также оценить перспективу использования конкретных видов новых материалов.

Связь темы диссертации с тематическими планами научно-исследовательских работ. Диссертационное исследование выполнено в рамках фундаментального проекта Андижанского машиностроительного института БФЗ-003 (2017-2020) «Создание нетрадиционных и альтернативных источников энергии на основе примесных вольтаических эффектах в микро и наноразмерных полупроводниках» и в рамках проекта Андижанского государственного университета ОТМ-2-68 «Механизмы образования дефектных микро- и наночастиц в кристаллах и их роль в получении многослойных структур с широким спектром функциональных возможностей» (2017-2020 гг.).

Цель исследования. Комплексное изучение влияния примесей Cs и Na на термоэлектрические и электрофизические свойства гранулированного кремния в интервале температур $T \sim 300-700$ К и установление закономерностей процессов переноса заряда в зависимости от размеров и структуры гранул.

Задачи исследования:

изучение механизмов образования примесных состояний атомами Cs и Na в приповерхностных областях гранулированного кремния;

изучение электрофизических свойств гранулированного кремния, легированного примесью Na и Cs, с размерами частиц 400 нм - 60 мкм в диапазоне температур 300-700 К;;

исследование основных термоэлектрических параметров гранулированного кремния, электропроводности, теплопроводности и коэффициента Зеебека, изготовленного методом механическим измельчением до заданной степени дисперсности кремниевой пластины, легированной примесями Na и Cs;

разработка метода получения термоэлектрических материалов из гранулированного кремния, изготовленного из кремниевых пластин, легированных примесями Na и Cs.;

Объект исследования: в качестве объекта исследования использованы образцы кремния высокой чистоты и образцы кремния, содержащие атомы щелочных металлов Cs и Na, а также гранулы кремния, заданного размера приготовленные с использованием методов порошковой технологии.

Предметом исследования являются микроструктура частиц гранулированного кремния, содержащего атомы Cs и Na, процессы переноса заряда, термоэлектрические и электрофизические характеристики образцов.

Методы исследований. Исходя из поставленных задач, для оценки электрофизических свойств исходного сырья материалов, при определении типа проводимости был использован термозондовый метод; при измерении удельного сопротивления – четырёхзондовый метод; для получения гранул кремния использованы методы порошковой технологии; для изучения микроструктуры и определения размеров частиц кремниевых порошков использовались рентгеновая дифрактометр EMPYREAN XDR и сканирующий электронный микроскоп SEM EVO MA 10 (CARL ZEISS); для определения теплопроводности – метод сравнения, а для определения термоЭДС дифференциальный метод.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

в соответствии с разницей температур кристаллографические возмущения увеличиваются от размера гранулы к поверхности, образуя атомарную поверхность, состоящую из SiO_2 с высокой реакционной способностью в двух смежных граничных областях, десорбция атомов щелочных металлов с повышением температуры и, за счет этого, образование примесных состояний на поверхности;

при прессовании двумя однородными контактами и нагреве гранул кремния, легированных атомами Na и Cs с размером частиц от 400 нм до 60 мкм, обнаружено протекание тока и возникновение электродвижущей силы, зависящей от температуры нагрева и ее градиента по телу образца;

температурную зависимость теплопроводности изучали в образцах, содержащих атомы щелочных металлов, причем в интервале температур 300-350 К теплопроводность составила 11,81 Вт/м•К для образца, содержащего натрий, и 10,69 Вт/м•К для образца, содержащего цезий, основанное на том, что в 12-14 раз ниже теплопроводности монокристаллического кремния;

что в диапазоне температур 300 -500 К значение коэффициента Зеебека гранулированного кремния составляет 470-510 мкВ/К в образцах, включенных в Cs и 370-430 мкВ/К в образцах включенных в Na, что в 8-10 раз выше, чем у монокристаллического кремния, а также в отличие от других термоэлектрических материалов, было обнаружено что коэффициент Зеебека практически независимым от температуры.

Практические результаты исследования.

разработан метод совершенствования технологии механического получения порошков кремния и измерения их параметров;

разработанные методы полезны при исследовании других термоэлектрических материалов, а также установлено, что они могут быть использованы при производстве кремниевых гранул для создания уникальных новых видов преобразователей тепловой энергии на основе примесного тепловольтаического эффекта;

разработан новый компьютерный продукт на базе *Visual Basic* для определения теплопроводности гранулированного кремния в том числе, легированного атомами щелочных металлов с размером частиц от 400 нм до 60 мкм, позволяющий упростить и оптимизировать процедуру определения этой термоэлектрической величины с обеспечением повышения точности её определения. Также разработан новый компьютерный продукт на базе *Python*, позволяющий управлять оборудованием для приготовления гранулированного кремния.

Достоверность результатов исследований обеспечена применением современных эталонов, и метрологический аттестованных средств измерений и оборудования, которые используются в высокоточных исследованиях в мировой практике, а часть работ выполнена в научных лабораториях «Центра перспективных технологий» а также реализации выполненных научно-исследовательских работ.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что получены новые сведения о строении поверхности, частиц гранулированного кремния и показана роль добавки атомов щелочных металлов, которые в процессах десорбции и реадсорбции в ходе изменения температуры, определяют процессы образования электронно-дырочных пар и рекомбинационные характеристики материала, что может быть использовано

для углубления теоретических знаний о микроструктуре и специфических свойствах гранулированного кремния.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что при инженерных разработках и выпуске термоэлектрических преобразователей энергии предлагается обратить внимание на возможность замены дорогостоящих и дефицитных традиционных материалов, а также нанокompозитных термоэлектрических материалов гранулированным кремнием, изготавливаемым из доступного сырья, включая отходы производства кремния - сырца, технического кремния, монокристаллов Si и эпитаксиальных кремниевых структур, что позволит снизить стоимость, как самых термопреобразователей, так и вырабатываемого ими электричества.

Внедрение результатов исследования. На основе научных результатов исследования были разработаны:

методика изучения влияния атомов щелочных металлов на электрофизические и термоэлектрические свойства гранулированного кремния в процессе изменения температуры, которая применялась в Андижанском государственном университете в 2017-2018 гг. при выполнении работ по проекту «И - 2017-7-7 - «Разработка и внедрение технологии производства абразивного карбида кремния из местного сырья» (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 31 декабря 2020 г. № 89-03-5632). Научные результаты по снижению, удельного сопротивления в 5 - 8 раз в результате организации десорбции и реадсорбции атомов щелочного металла в кремниевых гранулах, приводящие к повышению температуры и увеличению тока короткого замыкания в образцах с атомами щелочных металлов до 30 раз в отчет по проекту;

методики изготовления образцов гранулированного кремния на основе порошковой технологии; очистки, определения их размеров и микроструктуры; комплексная оценка электрофизических и термоэлектрических свойств гранулированного кремния с добавками атомов щелочных металлов Cs и Na, в комплексе с научно-практическими рекомендациями по применению в производстве электронных приборов переданы в АО «ФОТОН». (Регистрационный номер письма Акционерного общества «Узэлтехсаноат» № 04-3/455 от 18 марта 2022 года). Применение этой научной инновации расширило возможности использования гранулированного кремния с атомами Na и Cs в качестве основы для изготовления преобразователей тепловой энергии, предназначенных для работы при различных температурах. Показано, что электрофизические параметры образцов находятся на одном уровне с параметрами электротехнических устройств, выпускаемых в нашей стране и мире.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 8 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов. По результатам опубликовано 23 научных работ, в том числе 9 статей в научных изданиях, рекомендованных к публикации основных научных результатов докторских диссертаций ВАК РУз. Получены авторские свидетельства на 2 программные продукты для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы из 133 наименований. Текст диссертации содержит 133 машинописных страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **вводной** части работы обосновывается актуальность и необходимость данной исследовательской работы, описываются цели и задачи, объект и предмет исследования, указывается соответствие исследования основным приоритетным направлениям развития науки и техники Республики Узбекистан, научная новизна и практические значимости результатов работы, также обосновывается их достоверность, раскрывается ее теоретическая и практическая значимость, приводятся данные о внедрении результатов в практику, апробации диссертационной работы, объеме и структуре.

Первая глава диссертации, "**Современное состояние физики микро- и наноразмерных термоэлектрических материалов на основе кремния**", содержит сведения о методах получения термоэлектрических материалов на основе микро- и наноразмерных гранулированных полупроводников, а также термоэлектрических элементов, о важности научных и практических исследований в этой области, проводимых в нашей республике и за рубежом. В ней также проанализирована литература, связанная с этой областью, науки и техники, определены актуальность исследования, цели и задачи, которые необходимо решить.

В §1.1 проведено исследование электрофизических и термоэлектрических свойств полупроводников и образующихся из их соединений микро- и наноразмерных частиц, а также теоретический анализ приоритетных задач, стоящих перед этими направлениями. В §1.2 описываются микроструктура и зарядовые состояния микро- и наноразмерных порошков полупроводников, а в §1.3 описываются соответствующие механизмы изучения электрофизических и термоэлектрических свойств гранулированных кремниевых полупроводников. В §1.4 - проведен теоретический анализ влияния введения примесей на электрофизические и термоэлектрические свойства гранулированного кремния.

Во второй главе диссертации, "**Практические и теоретические методы исследования электрофизических и термоэлектрических свойств микро- и наноразмерного гранулированного кремния**", приведено описание свойства исходного сырья, технология получения порошков гранулированного кремния, и описаны методики измерения электропроводности, коэффициент Зеебека, а также методы исследования теплопроводности. Описан также разработанный соискателем программный продукт для ЭВМ под названием «Определение теплопроводности гранулированного кремния» на основе программной системы "Visual Basic" и способ его использования в научных целях».

Порошковая технология была использована для получения микро- и наноразмерных гранулированных полупроводников. Порошковая технология отличается своей простотой по сравнению с другими технологиями и не требует сложных технологических процессов. С помощью порошковой

технологии есть возможность измельчать любые типы кристаллов и солнечные элементы на их основе, выработавшие свой ресурс, и другие виды полупроводников.

Исходное сырье – пластины поликристаллического кремния р-типа, содержащие атомы щелочных металлов Na и Cs, измельчали с помощью планетарной мельницы, схема механоактиватора которой представлена на рис. 1.

Показано что для изучения микростроения гранулированного кремния и определения его размеров использовались рентгеновская дифрактометрия EMPYREAN XDR и сканирующий электронный микроскоп SEM EVO MA 10 (CARL ZEISS), основные технические характеристики которых представлены. Рентгеновский дифрактометр EMPYREAN XDR предназначен как для научных исследований, так и для аналитического контроля в промышленности. Он также сочетает в себе возможности традиционного

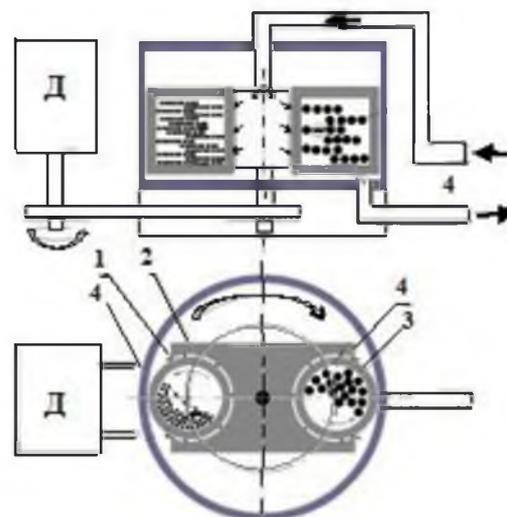


Рис.1. Схема механоактиватора планетарной шаровой мельницы. 1 – реактор; 2 – носитель; 3 – мелющая часть (шарики); 4 – система водяного охлаждения; Д — электродвигатель, который регулирует количество оборотов.

порошкового и исследовательского дифрактометра, основанного на определении состава фаз в наноструктурах, а также изучении их рентгеноспектральных характеристик.

Сканирующий электронный микроскоп SEM EVO MA10 (CARL ZEISS) позволяет сделать микрофотографию образца микроскопических размеров, а также получить информацию о химическом составе произвольно выбранной детали, используя электронный микроскоп или специальный электронно-зондовый микроанализатор. Оборудование

оснащено специальным компьютером и работает на базе программы SmartSEM для Windows XP.

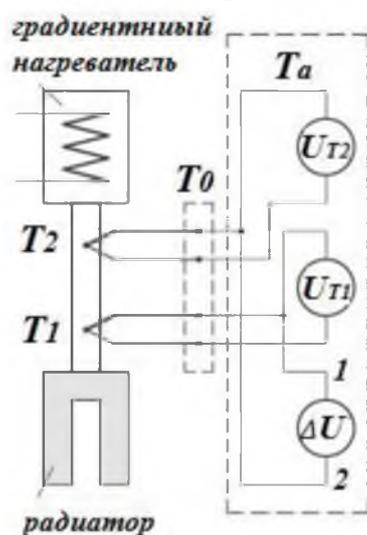


Рис.2. Принципиальная схема дифференциального метода измерения термоЭДС образцов

Для измерения электропроводности порошка кремния под действием постоянного тока использовался двухконтактный метод, а для определения коэффициента Зеебека - дифференциальный метод, описанный на рис.2. В этом методе две термопары, расположенные в разных точках образца, показывают температуру нагревателя и охладителя соответственно, а разность потенциалов между ними измеряется, когда через образец не проходит ток. В этом случае электрическое поле в образце равно $E = \alpha \Delta T$.

Важнейшим условием этого метода является то, что как сам образец, так и проводники термопары должны быть однородными. Таким образом, термоэдс является функцией температуры, которая не зависит от длины образца и проводников. Если эти условия выполняются, мы можем написать для ΔU :

$$\Delta U = - \left(\int_{T_2}^{T_0} S_{Cu} dT + \int_{T_0}^{T_1} S_{ref}^1 dT + \int_{T_1}^{T_2} S_X dT + \int_{T_1}^{T_0} S_{ref}^2 dT + \int_{T_0}^{T_2} S_{Cu} dT \right) \quad (2.5)$$

Для однородных электродов $\alpha_{ref}^1 = \alpha_{ref}^2 = \alpha_{ref}$, то выражение (2.5) можно записать в следующем виде:

$$\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_X - \alpha_{ref}) dT. \quad (2.6)$$

Следует, что

$$\alpha_X(T_{av}) = -\frac{\Delta U}{\Delta T} + \alpha_{ref}(T_{av}) \quad (2.7)$$

$$\text{здесь } \Delta T = T_2 - T_1, \quad T_{av} = (T_2 + T_1)/2, \quad \Delta U = -(\alpha_X - \alpha_{ref})\Delta T.$$

Выражение (2.7) применимо для термоЭДС в тех случаях, когда нет резких изменений в диапазоне температур ΔT . Основной причиной ошибок при определении термоЭДС зачастую является неоднородный характер проводников термопары, они вызывают ошибку в измерении разности температур ΔT . Для неоднородных проводников $\alpha_{ref}^1 \neq \alpha_{ref}^2$, поэтому выражение для $\alpha_X(T_{av})$ меняется на

$$\alpha_X(T_{av}) = -\frac{\Delta V}{\Delta T} + \alpha_{ref}(T_{av}) + \frac{V_0}{\Delta T} \quad (2.8)$$

Здесь

$$U = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{ref}^1 dT - \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{ref}^2 dT \approx (\alpha_{ref}^1 - \alpha_{ref}^2)(T_1 - T_0). \quad (2.9)$$

Погрешность измерения ТермоЭДС $\Delta \alpha = U_0/\Delta T$ пропорциональна $1/\Delta T$ и может быть уменьшена за счет увеличения ΔT при высоких температурах.

Однако при низких температурах это не всегда возможно, и в этом случае существуют два предела для ΔT . 1) $\Delta T \ll T$; 2) тепловой поток через образец ограничен теплоемкостью системы охлаждения, которая обычно имеет малые значения при низких температурах. Этот метод основан на малости $\Delta V \propto \frac{1}{\Delta T}$ и ΔT , тогда первое выражение не зависит от ΔT , так как

$\Delta U_0 \propto (T_{av} - T_0)$. Следовательно, измерение ΔV как функции ΔT для случая, когда $T_{av} = const$, дает линейную функцию вида $\Delta U = -(\alpha_x - \alpha_{ref})\Delta T + U_0$.

Метод сравнения использовали для определения коэффициента теплопроводности порошка. Согласно этому методу один и тот же тепловой поток пропускают через два типа образцов материала, а температуру между каждым теплопроводным слоем измеряют отдельно. Зная коэффициент теплопроводности первого и третьего слоев, можно будет определить коэффициент теплопроводности среднего слоя:

$$\chi_1 = \chi_2 \frac{a_1 t_3 - t_2}{a_2 t_2 - t_1}, \quad \chi_3 = \chi_2 \frac{a_3 t_3 - t_2}{a_2 t_4 - t_3} \quad (2.14)$$

Разработан новый программный продукт для ЭХМ на базе «VisualBasic», который предназначен для расчета относительной теплоемкости образцов методом сравнения гранулированного кремния, зная разность температур между каждым слоем.

В третьей главе "**Микростроение гранулированного кремния, перенос заряда и основные электрофизические свойства**" обсуждены микростроение образцов гранулированного кремния, морфология поверхности частиц порошка, технология изготовления и очистки порошков, а также их электрофизические свойства определяемые процессами переноса заряда в гранулированных полупроводниках с размерами частиц 400 нм ÷ 60 мкм.

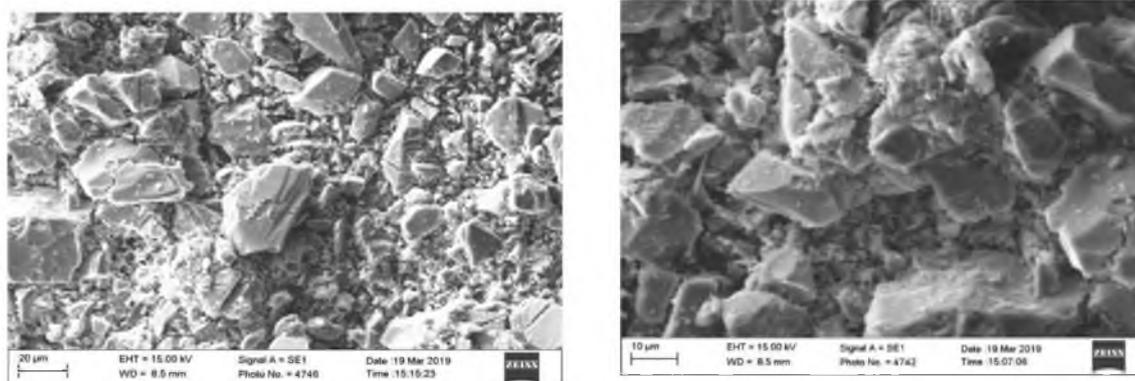


Рис.3 Микрофотография порошка гранулированного кремния

В данной исследовательской работе при проведении опытов были использованы измельченные порошки из поликристаллических кремниевых пластин n-типа, диаметром 3 см, толщиной 400 мкм, с удельным сопротивлением $\rho \sim 3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, в которые намеренно были внедрены атомы Na или Cs с энергией 30 кэВ и концентрацией $D \approx 10^{13} \text{ см}^{-2}$ с использованием ионного ускорителя с масс-сепаратором. Обработанные при температуре 300 ÷ 1000 К и в вакууме 10^{-6} Торр частицы Si диаметром порошков от 400 нм до 60 мкм. Для сравнения были использованы гранулы кремния, идентичные только изготовленные размолотом пластин марки KES-0,01, толщиной 340 мкм, удельное сопротивление $\rho \sim 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (рис.3).

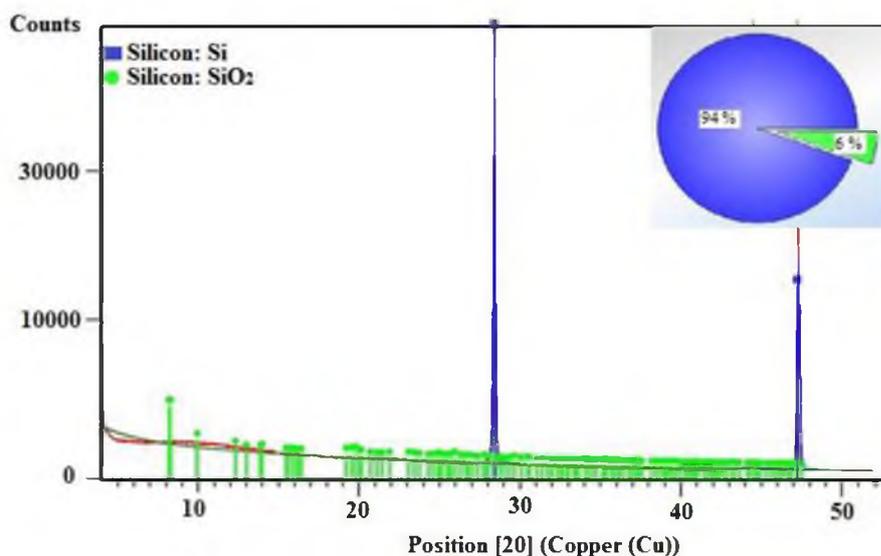


Рис.4. Рентгено-спектральная характеристика порошка гранулированного кремния

Как показали исследования, состав всех типов гранул состоит из 98,54-98,95% чистого кремния, а остальная часть - SiO_2 . Было обнаружено, что количество кремния в гранулах по мере приближения к поверхности уменьшалось с 98,54% до 94,54% и, так же, уменьшалось с повышением содержания кислорода (рис. 2).

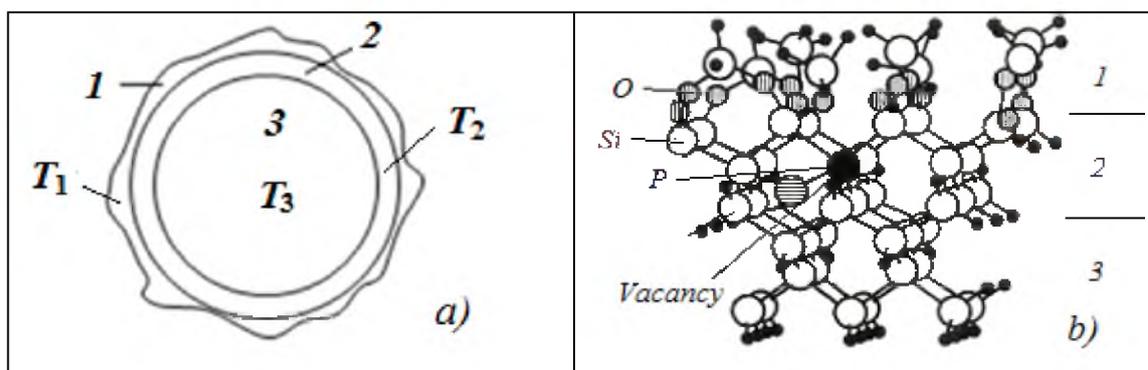


Рис.5. Упрощённая схема гранулы и комплекса гранул. 1 – область неровной поверхности, 2 – промежуточная область, 3 – ядро гранулы, $T_3 \leq T_2 \leq T_1$ – соответственно температуры областей облегающие при нагрева, O - атомы кислорода, Si- атомы кремния, P – атомы примеси, Vacancy – вакансия.

Первоначально все кремниевое сырье измельчалось с помощью планетарной шаровой мельницы и доводилось до порошкообразного состояния. Трение, механическая обработка, нагрев и образование кристаллографических дефектов в процессе порошкообразования приводят к возникновению фазовых переходов от ядра гранулы к ее внешней поверхности. При нагреве возникает разница температур в направлении от ядра гранулы к поверхности ($T_3 \leq T_2 \leq T_1$, 5a - рисунок). Структура гранулы состоит из 3 частей: неровной поверхности с относительно высокой

реакционной способностью (1), ядра (3), а также промежуточной области (2), разделяющей области (1) и (3) (рис. 5а).

Электрофизические свойства гранулированного кремния исследовали, помещением их в диэлектрический корпус (керамическую трубку) с внутренним диаметром 2 мм. На рисунке 6 показан этот метод исследования

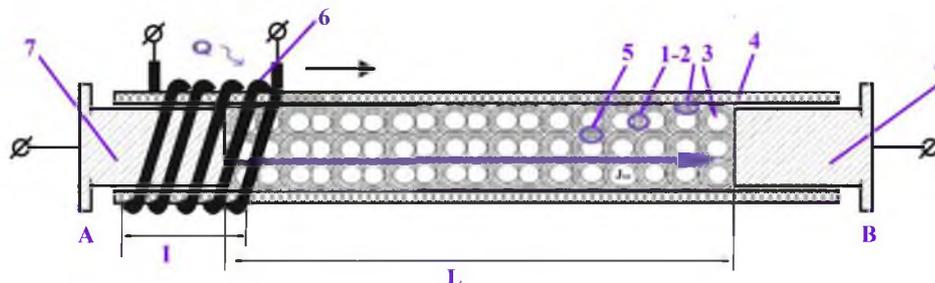


Рис.6. Упрощенная схема расположения гранул. 1- область, где гранулы соединяются друг с другом в ряд, 2 – область гранулы, соединенный с керамической трубкой (4), 3 – полупроводниковые порошки, 4 – керамическая трубка, 5 - область гранул, параллельных друг другу, 6 - нагреватель, 7 - омические контакты, Q - количество теплоты

и, соответственно, схема расположения гранул внутри корпуса.

Когда на образец подается тепло Q ближе к области А, то на контактах M_A и M_B появляется разница температур (рис.6). В этом случае носители заряда, образованные нагревом перемещаются в сторону В, где температура ниже. Концентрация носителей заряда увеличивается под воздействием растущей температуры. В результате происходит перенос носителей заряда из области А с высокой температурой в область В с более низкой температурой, отметим, что гранулы электрически соединены друг с другом не через ядро (3), а через игловолоконистую неровную поверхность (1) и промежуточную область, отделяющую ее от ядра гранулы (Рис.5а), то есть в местах, где они соприкасаются как показано на рисунке 6. Основные процессы переноса заряда реализуются через область соприкосновения гранул.

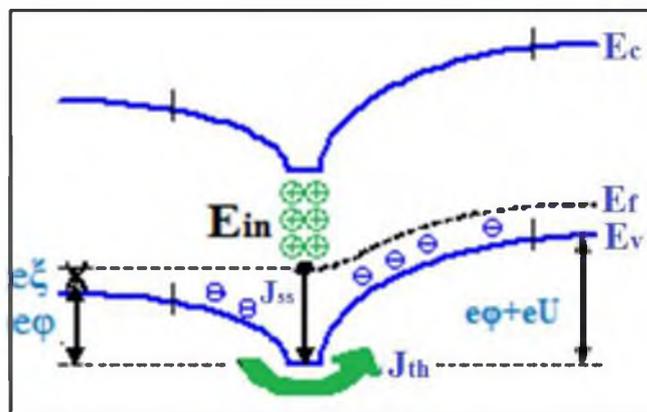


Рис 7. Зонная диаграмма межзеренных границ заряженных областей.

На рисунке 7 показана зонная диаграмма межзеренных границ заряженных областей. Согласно существующим моделям термоэлектронной эмиссии, возникающий ток термоэлектронной эмиссии (J_{th}) идет в процессе перехода зарядов слева направо:

$$J_{th} = A^* \cdot T^2 \exp(-\beta(\zeta + \varphi))(1 - \exp(-\beta U)) \quad (8)$$

здесь - $\beta = e/kT$ разность потенциалов, A^* - эффективная постоянная Ричардсона, U – заданное напряжение, $e\varphi$ – высота барьера в левой части, $e\zeta$ - уровни Ферми, которые зависят от концентрации легирования зернистых гранул.

Этот ток возникает в процессе захвата и повторного высвобождения носителей заряда в локализованных ловушках (E_{in}) в области межзеренных границ, расположенных выше уровня Ферми E_f , когда они перемещаются слева направо. Это связано с полной проводимостью ловушек (Y_{ss}) и высотой потенциального барьера ($\delta\varphi$) следующим образом:

$$J_{ss} = Y_{ss} \delta\varphi \quad (9)$$

Общий ток в этом случае может быть выражен следующим образом:

$$J_{tot} = J_{th} + J_{ss} \quad (10)$$

Как видно из выражения (10), общий ток зависит от скоростей захвата и повторного высвобождения носителей заряда в ловушках. В процессе повышения температуры общий ток, возникающий за счет усиления генерации электронно - дырочных пар, также увеличивается. Это означает, что процесс переноса заряда в гранулированном Si как и в поликристаллических полупроводниках в значительной степени зависит от проницаемости (Y_{ss}) ловушек с током J_{ss} и уровнем E_i , проявляющихся в двух смежных областях.

В четвертой главе диссертационной работы **"Влияние атомов щелочных металлов на электрофизические и термоэлектрические свойства гранулированного кремния"** представлены данные о физических свойствах гранулированного кремния. В частности, впервые представлены результаты исследований, полученные при изучении влияния атомов щелочных металлов на образование электронно - дырочных пар в зависимости от температуры, и на процессы переноса зарядов, определяющих основные параметры гранулированного Si.

На рис. 8 показана температурная зависимость удельного сопротивления образцов гранулированного кремния, изготовленного из пластины поликристаллического кремния n-типа с добавлением атомов щелочного металла при внешнем давлении 25 МПа, размер частиц которого составляет от 400 нм до 60 мкм. Как видно из рисунка, при температуре ~350 К значение удельного сопротивления образцов, в которые внедрены атомы щелочных металлов в 2 раза ниже, чем у гранул в которых нет атомов щелочных металлов. При температурах 350 – 450 К эта разница увеличивается до 6 раз, а при температурах 700 – 800 К в 7 раз. В исследованиях, была обнаружена

сильная зависимость удельного сопротивления гранулированного кремния от внешнего давления. Исходя из полученных результатов, следует, что если давление увеличить до 50 МПа, то значение удельного сопротивления образцов при температуре 300 К уменьшается до 4 раз, и составляет в образце с внедренным Cs $\rho \sim 1,78 \cdot 10^{-2}$ Ом*см, а в образце с внедренным Na $\rho \sim 2,25 \cdot 10^{-2}$ Ом*см. По результатам исследования было установлено, что атомы щелочного металла оказывают существенное влияние на удельное сопротивление гранулированного кремния.

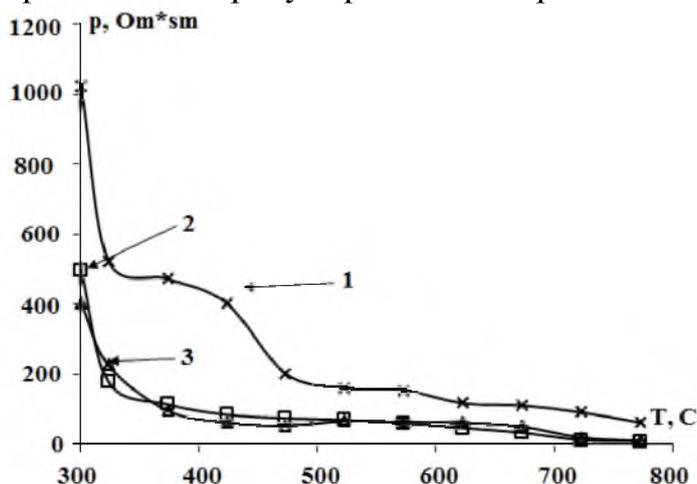


Рис 6. Зависимость удельного сопротивления образцов гранулированного Si от температуры. 1-нелегированный Si, 2-гранулы легированы Na, 3- с внедренными в гранулы атомами Cs

Известно, что одним из основных условий использования в качестве термоэлектрического материала является то, что проводимость материала увеличивается при температурах выше 700 К и, как следствие, увеличивается удельная термоЭДС. Это условие считается основой для приготовления преобразователей тепловой энергии с высоким КПД из гранулированного кремния. Как видно из результатов наших исследований, гранулированный кремний с добавлением атомов щелочных металлов может служить такой основой.

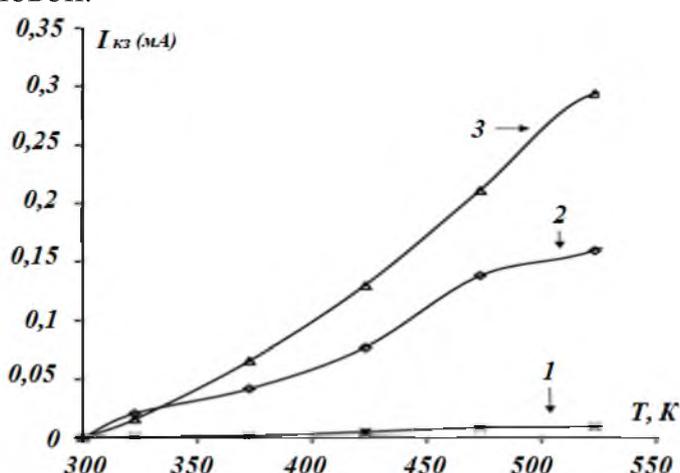


Рис.9. Зависимость темнового тока от температуры. 1 – Si нелегированный (КЭС-0,01), 2 – гранула, содержащая атомы Na, 3 – гранула, содержащая атомы Cs

На рисунках 9-10 представлены графики температурной ($T \approx 300-650$ К) зависимости темнового тока и напряжения в гранулированном кремнии под воздействием внешнего давления 25 МПа. Из графика видно, что результаты, полученные в образцах, в которые включены атомы щелочных металлов,

радикально отличаются от результатов образцов, в которые атомы щелочных металлов не включены. Из результатов исследования было замечено, что при температуре 375 К значение силы тока в образцах, включавших Cs, было в 30 раз выше, чем в образцах, для которых атомы щелочных металлов не были включены, а в образцах включавших Na более чем в 20 раз. Напряжение холостого хода также изменяется в зависимости от силы тока. Можно видеть, что атомы щелочных металлов десорбируются с повышением температуры в неравномерной области гранулированной поверхности, состоящей из SiO_2 , образуют соединения $\text{Na}_x\text{-O}_y$ и $\text{Cs}_x\text{-O}_y$ или $\text{Na}_x\text{-V}_y$, ва $\text{Cs}_x\text{-V}_y$. Это условие приводит к увеличению тока темноты и напряжения по сравнению с гранулами без атомов щелочных металлов в их составе.

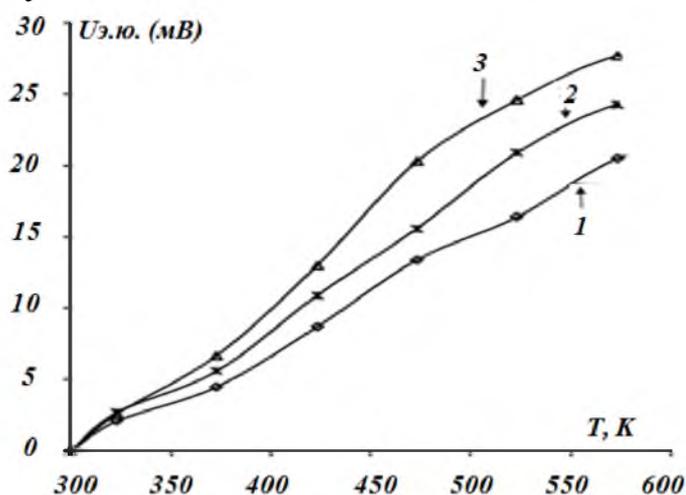


Рис.10. Зависимость напряжения возникающего у нагреваемых образцов гранулированного кремния от температуры. 1 – Si нелегированный (КЭС-0,01), 2 – гранула, содержащая атомы Na, 3 – гранула, содержащая атомы Cs

Атомы щелочных металлов присутствуют во всех областях порошка, как показано на рисунке 11. Химически активные, быстро подвижные атомы щелочных металлов образуют донорные состояния на поверхности гранул кремния и легко взаимодействуют с атомами кислорода и вакансиями. В результате при повышении температуры он десорбируется и образует комплексные соединения $\text{Na}_x\text{-O}_y$ и $\text{Cs}_x\text{-O}_y$ или $\text{Na}_x\text{-V}$ и $\text{Cs}_x\text{-V}_y$. Этот процесс предотвращает появление оксидных соединений, таких как SiO_2 или Si_xO_y , на поверхности гранул кремния, а также позволяет устранить новые типы центров рекомбинации, возникающие под воздействием температуры.

Одной из основных характеристик термоэлектрических материалов является коэффициент Зеебека, а именно удельное термоэдс (α). Значение термоэдс для термоэлектрических материалов которые в настоящее время широко используются, составляет 200÷300 мкВ/К. Однако для монокристаллического кремния они редко использовались в качестве термоэлектрического материала, и использовались только в целевых случаях, поскольку при температуре ~ 300 К значение термоэдс составляло 44÷50 мкВ/К.

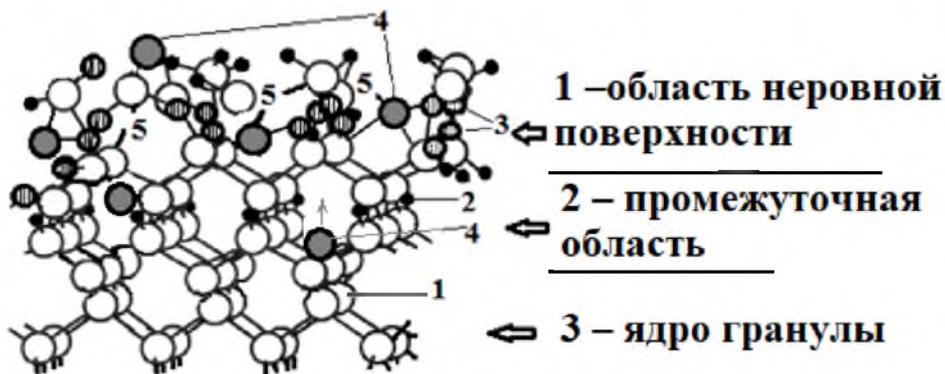
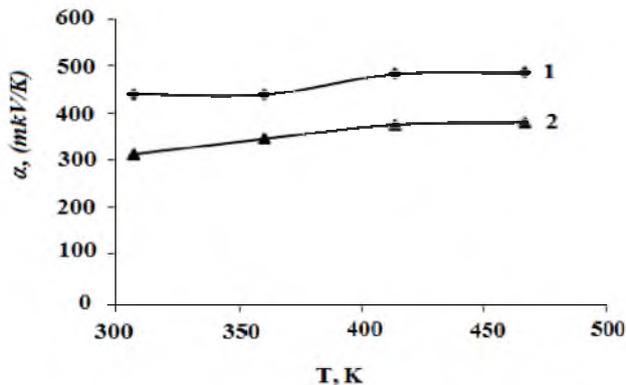


Рис - 11. Кристаллическая структура гранул. 1 – кремний, 2 – водород, 3 – кислород, 4 – атомы щелочных металлов, 5 – разорванная связь атомов кремния или примеси

На рисунке 12 показана зависимость коэффициента Зеебека (α) от температуры в диапазоне температур 300 ÷ 500 К гранулированного кремния. Как видно из результатов исследования, значение коэффициента Зеебека в диапазоне температур 300 - 500К, образцах, включающих Cs, составляет 470 ÷ 510 мкВ/К, а в образцах, включающих Na 370 ÷ 430 мкВ/К и оказалось, что это в 10-8 раз больше, чем у монокристаллического кремния, а также, в отличие от других термоэлектрических материалов, коэффициент Зеебека практически не связан с температурой.



**Рис 12. Зависимость коэффициента Зеебека (α) от температуры.
 1 – гранулы, содержащие атомы Cs,
 2 – Гранулы, содержащие атомы Na.**

Ещё одним из основных параметров термоэлектрических материалов является теплопроводность (χ), и для увеличения добротности (Z) термоэлектрических материалов требуется уменьшить теплопроводность материала.

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi} \quad (11)$$

Z – добротность материалов, σ - электропроводность, α – удельная термоЭДС, χ - теплопроводность.

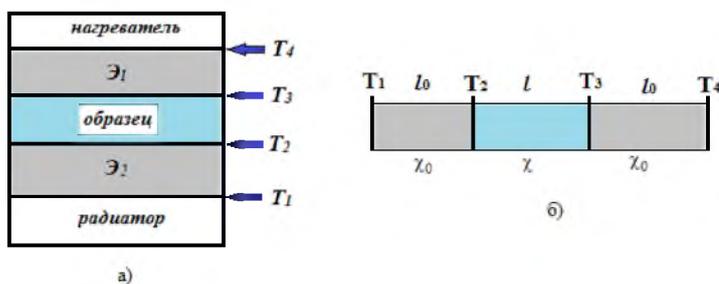


Рис 13. Схема измерения теплопроводности гранулированного кремния с использованием метода сравнения.

В исследовательской работе при определении коэффициента теплопроводности гранулированного кремния с внедренными атомами щелочных металлов, использовался метод сравнения, на рисунке 13 показаны общий (а) и упрощенный (б) вид. Суть метода заключается в том, что образец материала, теплопроводность которого исследуют, готовят и помещают между двумя стандартными образцами (Э_1 , Э_2) с известными значениями теплопроводности, близкими по форме и размерам. Количество тепла между слоями выражается следующим образом:

$$Q_1 = \chi_0 S \frac{\Delta T_{12}}{l_0} \quad Q_2 = \chi S \frac{\Delta T_{23}}{l}, \quad Q_3 = \chi_0 S \frac{\Delta T_{34}}{l_0} \quad (12)$$

здесь χ - теплопроводность исследуемого слоя, χ_0 - теплопроводность эталонных слоев Э_1 и Э_2 . Если считать что

$$Q_2 = \frac{1}{2}(Q_1 + Q_3) \quad (13)$$

исходя из того что $l_0 = l_1$ теплопроводность рассчитывали по следующему выражению:

$$\chi = \frac{\chi_0 \Delta T_{12} + \Delta T_{34}}{2 \Delta T_{23}} \quad (14)$$

Согласно расчета, теплопроводность гранулированного кремния в диапазоне температур 20-70⁰С на образцах без включения щелочных металлов размером частиц 400 нм ÷ 60 мкм составляет $\chi \sim 15,34 \div 16,76$ Вт/м·К. При тех же размерах частиц теплопроводность образцов с введенными атомами натрия составило $\chi \sim 9,62 \div 1,81$ Вт/м·К, а с введенными атомами цезия $\chi \sim 9,14 \div 10,69$ Вт/м·К, из то есть 12,5 ÷ 14 раз меньше чем для монокристаллического кремния.

Следует сказать, что если термоэлектрические параметры гранулы ($d_1, \sigma_1, \chi_1, \alpha_1$) и областей межзеренных границ ($d_2, \sigma_2, \chi_2, \alpha_2$) резко отличаются друг от друга, такая система считается вариантом идеального термоэлектрического материала типа, представленного в литературе «электронный кристалл - фононное стекло». Термоэлектрические характеристики такой системы, следующие:

Эффективное значение проводимости для этой системы:

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_2 \frac{d_1}{d_1 + d_2} + \sigma_1 \frac{d_2}{d_1 + d_2}} \quad (15)$$

Эффективное значение теплопроводности для этой системы:

$$\chi_{eff} = \frac{d_1 + d_2}{\frac{d_1}{\chi_1} + \frac{d_2}{\chi_2}} \quad (16)$$

Эффективное значение коэффициента Зеебека в системе гранула кремния – слой SiO₂:

$$\alpha_{eff} = \alpha_1 \frac{\chi_2 d_1}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} + \alpha_2 \frac{\chi_1 d_2}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} \quad (17)$$

Учитывая, что $Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi}$, мы получаем:

$$Z_{eff} = \left[\alpha_1 \frac{\chi_2 d_1}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} + \alpha_2 \frac{\chi_1 d_2}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} \right]^2 \left[\frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_2 \frac{d_1}{d_1 + d_2} + \sigma_1 \frac{d_2}{d_1 + d_2}} \right] \left[\frac{1}{d_1 + d_2} \left(\frac{d_1}{\chi_1} + \frac{d_2}{\chi_2} \right) \right] \quad (18)$$

Как указывалось выше, если характеристики гранулы и областей межзеренных границ резко отличаются друг от друга, то есть $\sigma_1 \gg \sigma_2$, $\chi_1 \gg \chi_2$, $\alpha_1 \gg \alpha_2$, $d_1 \gg d_2$, то имеем следующее выражение для эффективной значение Z_{eff} (параметры гранул и межзерновых границ соответственно: σ_1 и σ_2 , χ_1 и χ_2 , α_1 и α_2 , d_1 и d_2):

$$Z_{eff} = \frac{\alpha_1^2 \sigma_2}{\chi_2} \quad (19)$$

Следовательно, эффективное значение термоэлектрической добротности Z_{eff} пропорционально удельной термоЭДС частиц и электропроводности области межзеренных границы, а изменяется обратно пропорционально теплопроводности области межзеренных границы или слоя SiO₂. Повышение Z связано с повышением коэффициента Зеебека в гранулированных полупроводниках, это происходит за счет термоэлектрического эффекта.

Таким образом, основной задачей в исследовательской работе является повышение термоэлектрической добротности Z гранулированного кремния, а также достижение увеличения проводимости слоя SiO₂, происходящего за счет туннелирования межгранульных носителей заряда. Таким образом, основное внимание должно быть направлено на улучшение условий туннелирования. Как известно, для объяснения туннелирования носителей заряда в традиционных термоэлектрических материалах на основе «гамовской» модели туннелирования используется следующая вероятность:

$$D^{(1)}(E) = \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(V-E)}x \right] \quad (20)$$

Здесь $V-E$ – расстояние от вершины потенциального барьера до уровня энергии частицы, x – ширина барьера.

Модель туннелирования Гамова была модифицирована в исследованиях путем введения некогерентного прыжка двух электронов через промежуточное дефектное состояние внутри туннельного контакта и это выражается в виде:

$$D^{(2)}(E) = \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(V-E)} x/2 \right] \quad (21)$$

Согласно исследованиям, резонансное туннелирование более эффективно, чем «гамовское» туннелирование для гранулированных полупроводников. В соответствии с ним предлагается использование следующей конечности Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна для резонансного туннелирования.

$$D^{(3)}(E) = \frac{1}{1 + \left(\tau_0 \Theta^2 / \hbar \right)^2 (E - E_N)^2} \quad (22)$$

Здесь τ_0 и E_N – период колебания и энергия электрона внутри потенциальной ямы, $\Theta = \exp \left(\int_b^a P_I \frac{dx}{\hbar} \right)$, P_I – импульс электрона.

Как видно из выражения, поскольку $\Theta \gg 1$, ширина резонанса $E - E_N = \hbar / \tau_0 \Theta^2$ мала.

С учетом вышеизложенных результатов поставленная задача, то есть способ приготовления термоэлектрического материала, состоящего из многокомпонентной гетерогенной среды, выполнялась в следующем порядке. Сначала поликристаллический кремний, легированный атомами щелочных металлов, был измельчен в кислородсодержащей среде до размера порошка от 400 нанометров до 60 микрометров. На поверхности гранул формировались нанослои, состоящие из комплексных соединений атомов щелочных металлов с атомами кислорода или с вакансиями. Затем путем прессования гранул друг с другом под внешним давлением непосредственно через нанослои формировались туннельные контакты и в нанослое создавались локальные энергетические уровни, обеспечивающие резонансное туннелирование электронов и удовлетворяющие соотношению $E_c^{Si} \leq E_N < [E_c^{Si(IM_x - O_y)} \text{ или } E_c^{Si(IM_x - V_y)}]$.

где E_c^{Si} — энергия электронов в зоне проводимости кремния; E_N – энергия локальных уровней в туннельных контактах;

$E_c^{Si(IM_x - O_y)}$ или $E_c^{Si(IM_x - V_y)}$ – энергия электронов, находящихся ниже зоны проводимости, в нанослое $Si(AM_x - O_y)$ или $Si(AM_x - V_y)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе изучения влияния атомов Na и Cs на термоэлектрические свойства гранулированного кремния и разработки технологии получения термоэлектрических материалов из гранулированного кремния, содержащих атомы щелочных металлов, были сделаны следующие основные выводы:

1. На гранулированном кремнии в виде порошка Si, частицы которых легированы атомами щелочных металлов (Cs и Na), и имеют размеры от 400 нм до 60 мкм, помещенных в керамический корпус при сжатии с обеих сторон с давлением 25 МПа возникает ток и электродвижущая сила;

2. Согласно предложенной модели, гранулы представляют слоистое образование, содержащее внешнюю обложку (1) с высокой реакционной способностью, (2) промежуточную оболочку, отделяющую внешнюю обложку от ядра гранулы (3) и само кремниевое ядро гранулы. При нагрева имеет место разница температур на этих участках, а именно $T_3 < T_2 < T_1$;

3. Впервые объяснен механизм переноса заряда в гранулированных полупроводниках, согласно которому, гранулы электрически взаимно соединены не через ядро (3), а через игольчато-волокнистую неровную оболочку (1) на поверхности гранулы и промежуточную оболочку (2), отделяющую ее от ядра гранулы;

4. С повышением температуры быстро движущиеся атомы щелочных металлов десорбируются по направлению к поверхности и образуют примесные состояния с образованием соединений Na_x-O_y и Cs_x-O_y или Na_x-V_y и Cs_x-V_y , что сопровождается увеличением проводимости и генерируемого тока;

5. В случае, когда значение внешнего давления, сжимающее порошок составляет 25 МПа при температуре 500 К, плотность тока, для образцов с внедренным Cs, равняется 30 мА/см², а в образцах, с атомами Na - 15 мА/см²;

6. Впервые определена температурная зависимость коэффициента Зеебека гранулированного кремния, в состав которого входят атомы щелочных металлов. Определено, что в температурном диапазоне 300÷500К значение коэффициента Зеебека в образцах с внедренными атомами Cs составляет 470 ÷ 510 мкВ/К, что в 10 раз больше чем для монокристаллического кремния, а в образцах с внедренными атомами Na 370 ÷ 430 мкВ/К, что в 10-8 раз выше чем монокристаллический кремний соответственно;

7. Впервые определена температурная зависимость теплопроводности в образцах, легированных атомами щелочных металлов. Теплопроводность (χ) гранулированного кремния, с размерами гранул от 400 нм до 60 мкм для внедренными атомами Na в диапазоне температур 300-350 °С она составляет от 9,62 до 11,81 Вт/м•К, у образцов с внедренными атомами Cs составляет 9,14-10,69 Вт/м•К, и это значение в 12-14 раз меньше чем для монокристаллов кремния.

8. В наших экспериментах было подтверждено, что теплопроводность гранулированного кремния зависит не только от размера частиц, но и от состава образца. Установлено, что атомы щелочных металлов образуют комплексные соединения типа $\text{Na}_x\text{-O}_y$, $\text{Cs}_x\text{-O}_y$ или $\text{Na}_x\text{-V}_y$, $\text{Cs}_x\text{-V}_y$ в двух контактных областях гранулированного кремния и вызывают изменения электронного состояния и теплопроводности этой области.

9. Установлено, что эффективное значение термоэлектрической добротности Z_{eff} пропорционально удельной термоЭДС частиц и электропроводности области межзеренных границы, а изменяется обратно пропорционально теплопроводности области межзеренных границы или слоя SiO_2 .

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE FERGANA
POLYTECHNIC INSTITUTE OF UZBEKISTAN**

ANDIJAN MACHINE-BUILDING INSTITUTE

SOKHIBOVA ZARNIGORKHON MUTALIBJON KIZI

**THERMOELECTRIC PROPERTIES OF GRANULAR SILICON
DOPED WITH Na AND Cs ATOMS**

01.04.07 – Condensed matter physics

ABSTRACT
**of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) in physical and
mathematical sciences**

Ferghana – 2023

The subject of doctoral dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number B2021.4.PhD/FM658.

The dissertation was implemented at the Andijan Machine-Building Institute.

The abstract of the dissertation was posted in three (uzbek, russian, english (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.ispm.uz and on the website of "ZiyoNet" Information and Educational Portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor:

Zaynabidinov Sirojiddin

doctor of physical and mathematical sciences, professor
academician of AS Uz

Official opponents:

Imamov Erkin Zunnunovich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Sultanov Nomonjon Akramovich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Leading organization

National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek

The defense will take place on «15» 09 2023 at 14⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council number PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 at the Ferghana Polytechnic Institute. (Address: 150107, Ferghana, Ferghana St., house 86. Phone: (+99873) 241-12-06, fax (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru).

The dissertation is can be looked through in the Information – resource centre of the Ferghana Polytechnic Institute. (is registered № 191). (Address: 150107, Fergana, st. Fergana, house 86. Tel: (+99873) 241-12-06)

The abstract of dissertation is sent out on «04» 09 2023. (Mailing report № 13 on «04» 09 2023)



[Handwritten signature]

N.Kh.Yuldashev

Chairman of Scientific Council on award of PhD scientific degree, DSc in physics and mathematics, professor

[Handwritten signature]

B.J. Axmadaloyev

Scientific secretary of Scientific Council on award of PhD scientific degree, PhD in physics and mathematics

[Handwritten signature]

S.F.Ergashev

Chairman of Scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degree, Doctor of Philosophy, doctor of technical sciences, docent

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research. Comprehensive study of the influence of Cs and Na impurities on the thermoelectric and electrophysical properties of granular silicon in the temperature range $T \sim 300-700$ K and the establishment of patterns of charge transfer processes depending on the size and structure of the granules.

The objects of research work: as an object of study, high-purity silicon samples and silicon samples containing Cs and Na alkali metal atoms, as well as silicon granules of a given size prepared using powder technology methods were used.

The scientific novelty of the research work:

in accordance with the temperature difference, crystallographic perturbations increase from the grain size to the surface, forming an atomic surface consisting of highly reactive SiO_2 in two adjacent boundary regions, desorption of alkali metal atoms with increasing temperature and, due to this, the formation of impurity states on the surface;

when pressing with two homogeneous contacts and heating silicon granules doped with Na and Cs atoms with a particle size from 400 nm to 60 μm , the flow of current and the appearance of an electromotive force depending on the heating temperature and its gradient over the sample body were found;

the temperature dependence of thermal conductivity was studied in samples containing alkali metal atoms, and in the temperature range of 300-350 K, the thermal conductivity was 11.81 W/m•K for a sample containing sodium, and 10.69 W/m•K for a sample containing cesium, based on the fact that 12-14 times lower than the thermal conductivity of monocrystalline silicon;

that in the temperature range of 300–500 K, the value of the Seebeck coefficient of granular silicon is 470–510 $\mu\text{V/K}$ in samples included in Cs and 370–430 $\mu\text{V/K}$ in samples included in Na, which is 8–10 times higher than that of monocrystalline silicon, and also unlike other thermoelectric materials, the Seebeck coefficient was found to be practically independent of temperature.

Implementation of the research results. Based on the scientific results of the study, the following were developed:

methodology for studying the effect of alkali metal atoms on the electrophysical and thermoelectric properties of granular silicon in the process of temperature change, which was used at Andijan State University in 2017-2018 when performing work on the project "I - 2017-7-7 -" Development and implementation of production technology abrasive silicon carbide from local raw materials" (Certificate of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan dated December 31, 2020 № 89-03-5632). Scientific results on the decrease in resistivity by 5-8 times as a result of the organization of desorption and re-adsorption of alkali metal atoms in silicon granules, leading to an increase in temperature and an increase in short-circuit current in samples with alkali metal atoms up to 30 times in the project report;

methods for manufacturing samples of granular silicon based on powder technology; purification, determination of their size and microstructure; a comprehensive assessment of the electrophysical and thermoelectric properties of granular silicon with the addition of alkali metal atoms Cs and Na, in combination with scientific and practical recommendations for the use of electronic devices production, were transferred to FOTON JSC. (Registration number of the letter of the Joint Stock Company "Uzeltekhsanoat" № 04-3/455 dated March 18, 2022).

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references from 133 titles. The dissertation text contains 133 typewritten pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS
I bo'lim (I часть; I part)

1. S. Zaynabidinov, Z.M.Soxibova, M. Nosirov. A method for determining the thermal conductivity of granulated silicon in which alkali metal atoms are included. // The Way of Science International scientific journal, 2022. № 3 (97), (Австралия). - P. 15-17. (IF:0.543)

2. Z.M.Soxibova, G. O'rishev, B.Tojiboyev. Basic thermoelectric properties of granulated silicon with alkali metal atoms // The American journal of engineering and technology. 2020. Vol.2, Issue 12. - P. 50-54. (IF:5.32)

3. L.O. Olimov, Z.M.Sokhibova Some features of charge carrier transfer in granular semiconductors. II. Experiment// International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences. ISSN 2278 – 6252. vol.7/ No.9/September 2018. (IF:7.388)

4. З.М.Сохибова, Л.О. Олимов. Гранулалараро чегара соҳаларида потенциал тўсиклар ҳосил бўлиши ва уларни заряд кўчиш жараёнларига таъсири// ДАН журнали, №4 2019 йил. (01.00.00, №7)

5. С.З.Зайнабидинов, З.М.Сохибова, Б.М.Абдурахманов, Х.Б.Ашуров, М.М.Адилов. Зависимость электропроводности гранулированных полупроводников от размер гранул. // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research. 2021. Vol. 3, Issue 2. – С. 13-18. (01.00.00, №13)

6. Б.М.Абдурахманов, З.М.Сохибова, М.М.Адилов, Х.Б.Ашуров. Определение удельной термоэдс гранулированного кремния, легированного щелочными металлами. // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research. 2021. Vol. 3, Issue 1. –С. 42-45. (01.00.00, №13)

II bo'lim (II часть; II part)

1. L.O. Olimov, Z.M.Sokhibova, I.I. Anarboev. Electronic Properties of Granular Silicon Oxide//International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS), Volume 6, Issue 8, 2019, PP 19-22. ISSN No.2349-7882

2. З.М.Сохибова. “Гранулаланган кремнийнинг иссиқлик ўтказувчанлигини аниқлаш” физик тажрибаларнинг виртуал моделлари. Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги Интеллектуал мулк агентлиги, Гувоҳнома № DGU 14071.

3. З.М.Сохибова, З.Ф.Хамракулова. “Гранулаланган кремний тайёрловчи ускунани бошқарувчи дастурий маҳсулот” деб номланган ЭҲМ дастурий маҳсулоти. Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги Интеллектуал мулк агентлиги, Гувоҳнома № DGU 22431.

4. З.М.Сохибова. Влияние атомов калия на дрейф носителей заряда в гранулированном кремнии. // Universum: Технические науки. 2020. №: 9(78).Часть 2. - С.99-102.

5. Z.M.Soxibova. “Termoelektrik materiallarning termoEYUK va elektr o'tkazuvchanligini yuqori haroratlarda o'lchash usullari” // Mashinasozlik ilmiy-texnik jurnali. 2022/ № 1 (Maxsus son), 132-136 b.

6. Z.M.Sokhibova. “The role of granulated semiconductors in modern physics” // International scientific journal «Global science and innovations 2019: Central Asia» Nur-sultan, Kazakhstan, sep-oct 2019. P. -117-118.

7. Z.M.Sokhibova. “The influence of the flow of radiation defect formation and impurity cases” // Materials of the XIII international scientific and practical conference of young scientists «Innovative development and the requirement of Science in modern Kazakhstan» Тараз, 2019. P. 21.

8. S.Zaynabidinov, Z.M.Soxibova. “A method for determining the thermal conductivity of granulated silicon. “Ilm – fan, madaniyat, texnika va texnologiyalarning zamonaviy yutuqlari va ularning iqtisodiyotga tadbiqui” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. 2022 yil, 25-27 – may. 1627-1628-betlar.

9. Z.M.Soxibova. “Kukun texnologiyasi asosida granullangan yarimo'tkazgichlar olish”. “Ilm – fan, madaniyat, texnika va texnologiyalarning zamonaviy yutuqlari va ularning iqtisodiyotga tadbiqui” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. 2022 yil, 25-27 – may. 1621-1624-betlar.

10. Z.M.Sokhibova, D.M.Ibragimova. “Technology of obtaining silicon granules” // Scientific research results in pandemic conditions Proceedings of International Multidisciplinary Conference. Part 5, June 2020. P. – 140-142.

11. З.М.Сохибова, И.И.Анарбоев, Л.О.Олимов. “Грануллашган яримўтказгичларнинг муқобил энергия манбаларининг самарадорлигини оширишдаги аҳамияти” // Андижон давлат университети «Инновацион ғоялар, ишланмалар ва уларни ишлаб чиқариш ҳамда таълимда қўллашнинг замонавий муаммолари» халқаро илмий-амалий конференция. 15 апрель, 2019. – 288-289 бетлар.

12. З.М.Сохибова, З.Х.Йўлбарсова. “Ишқорий металл атомларини грануллашган кремнийнинг электрофизик хоссаларига таъсири” Андижон машинасозлик институти “Рақамли ҳаёт ва ижтимоий фанларнинг баркамол авлодни вояга етказишдаги ўрни ва аҳамияти: долзарб муаммолар ва истиқбол” халқаро илмий-амалий анжуман. 12 апрель, 2022. 589-591 бетлар.

13. З.М.Сохибова, Ж.Ю.Холмирзаев, И.И.Анарбоев. “Замонавий техникада яримўтказгич моддалар ва композит полимер материалларнинг аҳамияти” // Наманган давлат университети “Полимерли композитлар физикаси ва кимёси ҳамда конструкцион материаллар технологиясини долзарб муаммолари” халқаро конференция. 12-13 июл, 2017. – 8-9 бетлар.

14. З.М.Сохибова. “Ярим ўтказгичларнинг ҳозирги замон физикасида тутган ўрни ва хоссалари” // Андижон машинасозлик институти, “Замонавий илм-фаннинг инновацион ривожланиши мавзусида республика миқёсидаги илмий-амалий анжуман” 2019. 639-641 б.

15. З.М.Сохибова, З.Хурсанбеков. “Қуёш энергиясидан самарали фойдаланишда ультрадисперц яримўтказгич кукунларининг аҳамияти” //

Қарши муҳандислик иқтисодиёт институти “Қайта тикланувчи энергетиканинг замонавий муаммолари” Республика илмий-амалий анжумани. 18-19 май 2018. – 101-102 бетлар.

16. Z.M.Soxibova. “Ilm-fanning rivojlanishida aniq va tabiiy fanlarning tutgan o‘rni”. Andijon mashinasozlik instituti “XXI asr ilm-fanni va ta’lim sohasida ayollar:yutuqlar va muammolar”. Respublika ilmiy-amaliy anjumani. 15-mart 2023 yil, 466-467 betlar.

17. Z.M.Soxibova. “Mikro va nanoo‘lchamli kremniy asosli termoelektrik materiallar olish istiqbollari”. Andijon mashinasozlik institute “XXI asr ilm-fanni va ta’lim sohasida ayollar:yutuqlar va muammolar”. Respublika ilmiy-amaliy anjumani. 15-mart 2023 yil, 469-471 betlar.

Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari Farg‘ona politexnika instituti muassisligidagi “Scientific technical journal” jurnal tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi (31.09.2023 y.).

**Bosishga ruxsat etildi: 2023 y. Nashriyot bosma tabog‘i–3,5.
raqamli bosma usuli. Times garniturası.
Shartli bosma tabog‘i–1,75. Bichimi 64x108 1/16. Adadi 60.**

**“ALPHA BRAND” MCHJ
150107. Farg‘ona shahar, Farg‘ona ko‘chasi 86-uy**