

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

АДИЛОВ МУХАММАДЖОН МАШАРИБОВИЧ

ГРАНУЛЛАНГАН КРЕМНИЙНИНГ ТЕРМОЭЛЕКТРИК
ХОССАЛАРИ

01.04.04. – Физик электроника

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2019

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

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

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

Адилов Мухаммаджон Машарибович Грануллиланган кремнийнинг термоэлектрик хоссалари	3
Адилов Мухаммаджон Машарибович Термоэлектрические свойства гранулированного кремния	21
Adilov Mukhammadjon Masharibovich Thermoelectric properties of granular silicon	39
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works	43

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

АДИЛОВ МУХАММАДЖОН МАШАРИБОВИЧ

ГРАНУЛЛАНГАН КРЕМНИЙНИНГ ТЕРМОЭЛЕКТРИК
ХОССАЛАРИ

01.04.04. – Физик электроника

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2019

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.2.PhD/FM65 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ион-плазма ва лазер технологиялари институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.iplt.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот таълим порталида (www.ziyo.net) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Ашуров Хатам Бахронович
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Эгамбердиев Баҳром Эгамбердиевич
Физика-математика фанлари доктори, профессор

Исаханов Зинаобидин Абилпейзович
Физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим

Етакчи ташкилот:

**Ўзбекистон миллий университети қошидаги
яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника
илмий - тадқиқот институти**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (+99871) 262-32-54, e-mail:info@iplt.uz, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел: (+99871) 262-31-69.

Диссертация автореферати 2019 йил «___» _____ куни тарқатилди.

(2019 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)



С.С. Курбанов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раис ўринбосари, ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

Д.Т. Усманов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., катта илмий ходим



Б.Е. Умирзаков

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда энергетика муаммоси асосий муаммолардан бири ҳисобланади. Шунинг учун бутун дунёда анъанавий энергия манбаларини такомиллаштириш ва асосий талаблари кўп, арзон ҳамда экологик тоза бўлган муқобилларини топиш ишлари олиб борилмоқда. Бу изланишларнинг асосий йўналишларидан бири термоэлектрик қурилмалардан фойдаланиб, табиий ёки техноген ҳосил бўлган иссиқликдан тўғридан тўғри электр энергияси олиш ҳисобланади, термоэлектрик қурилмалар тайёрлаш учун, охириги пайтларда «электрон кристалл ва фонон шиша» хусусиятини ўзида жамлаган янги турдаги термоэлектрик материаллар тайёрланмоқда. Монокристалл бўлмаган бошқа турдаги яримўтказгич шу жумладан кремнийни олиш технологияси арзонлиги ва ўзлаштирилганлиги, ер қобиқи минералларида тарқалганлиги учун, BiTe туридаги анъанавий материаллар олдида устунликка эга, шу сабабдан термоэлемент сифатида фойдаланишга бўлган қизиқиш кузатиляпти. Шу муносабат билан ҳар хил турдаги кремнийнинг электрофизик, айниқса термоэлектрик хусусиятлари билан боғлиқ бўлган муаммо ва масалалар, шунингдек уларнинг асосида иссиқлик энергияси ўзгартиргичларини яратиш долзарб ҳисобланади.

Ҳозирги пайтда дунёда кўплаб ихтисослаштирилган илмий марказларда бу масалани ечиш учун микродонатор поликристалл ва ғовак туридаги микро - ва наноўлчам тузилишли ўзгартирилган кремний хусусиятларини ўрганиш ишлари олиб борилмоқда, чунки электрон техникада ва қуёш энергетикасида кенг қўлланиладиган ҳамда ~ 150 Вт/м·К иссиқлик ўтказувчанликка ва ~ 44 мкВ/К кичик Зеебек коэффициентига эга бўлган монокристалл ёки йирик блокли поликристалл кремний бу жиҳатдан самарасиздир.

Ўзбекистон Республикасида охириги вақтда, турли материаллар силицидларининг термоэлектрик хусусиятларини ўрганишга этибор кучайтирилди, шунингдек яримўтказгичлардаги иссиқлик энергиясини электр энергиясига айлантириш самарадорлигини оширишга йўналтирилган термоэлектрик ва иссиқликвольтаик ҳодисалар физикасининг долзарб саволлари бўйича тадқиқот ва инноватцион ишлар олиб борилмоқда. Мамлакатимиз илмини ривожлантириш учун катта аҳамиятга эга бўлган бу фундаментал тадқиқотларнинг ва ишланмаларнинг йўналишлари ҳамда уларнинг амалий қўлланилиши 2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида¹ акс эттирилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги Фармонида ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий

¹ 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947 – сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси» тўғрисидаги Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

хужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республикада фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот Ўзбекистон республикаси фан ва технологияларини ривожланишининг: III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши» ва II. «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Мазкур мавзу бўйича бир қатор илмий тадқиқотлар турли хорижий илмий марказларда ўтказилган, жумладан ҳар хил яримўтказгич материалларнинг термоэлектрик катталикларини ошириш мақсадида термоэлектрик хусусиятлари баҳоланган. Бу соҳада энг кўп аҳамиятли натижалар хорижлик олимлар томонидан эришилган, масалан: россиялик (А.А. Снарский, А.К. Сарычев, А.В. Дмитриев, И.П. Звягин, Я.Б. Магомедов, М.И. Федоров, М.М. Гаджиалиев, В.В. Каминский), германиялик (Ж. Дебур, С. Стиве, Ш. Фолькер, Е. Муллер, К. Забреки), америкалик (Е.Ж. Тимм, Т.П. Хоган, Д. Кендиг, А. Шакури, А.И. Хочбаум), япониялик (Т.К. Хиромаса, И. Аояма, С. Сано, Ш. Ямамото, Т. Аизава, А. Ямамото) ва бошқалар, шунингдек мамлакатимиз олимлари (М.С. Саидов, Б.М. Абдурахманов, Л.О. Олимов, Г. Абдурахманов, Н.А. Матчанов, А.М. Касымахунова, Т.С. Камилов).

Кремнийнинг иссиқлик ўтказувчанлиги юқори бўлгани учун термоэлектрик материал сифатида қаралмайди, лекин охириги вақтларда ғовакли кремний ва кремний нанотрубкаларини термоэлектрик хусусиятларини ўрганиш орқали иссиқлик ўтказувчанлигини камайтириб, фойдалилигини оширишга ҳаракат қилинмоқда

В.В. Каминский ва унинг ҳамкасблари SmS намунасини бир текисда қиздирганда, яъни ташки ҳарорат градиенти бўлмаганда, электр кучланишининг ҳосил бўлишини кузатиш ва ўрганиш орқали янги термовольтаик эффектни топишди. Бу эффект 400 – 500 К ҳароратда самарий сульфиднинг монокристалларида кузатилди.

Ўзбекистонлик олимлар академик М.С. Саидов, Б.М. Абдурахманов, Л.О. Олимов, А.Ю. Лейдерман и А.С. Саидов поликристалл ва техник кремний намуналарини қиздирганда ҳосил бўладиган киришмали тепловольтаик эффектни топишди ва тадқиқ қилишди. Бу эффект қоронғилик токи ва кучланиши кўринишида, термоэлектрик катталикларини жудаям кўпайиши билан номаён бўлади, бу кремнийдаги киришмалар ҳисобига ҳосил бўладиган чуқур энергия сатхларнинг иштирокида фотонларнинг ютилиши натижасида заряд ташувчиларнинг генерацияси содир бўлиши билан изоҳланади.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.

Диссертация тадқиқоти Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг ФА-Ф2-ФО 98 «Микронадор поликристал кремнийнинг электрофизик ва фотовольтаик хусусиятларини ўрганиш» (2007-2011) и Ф3-ФА-Ф158 «Кичик ўлчамли нотекис киритмали органик ва ноорганик грануланган ярим

ўтказгичлар асосидаги системаларда энергия ўзгартириш жараёнлари» (2012-2016), ФА-А4-Ф061 «Наноўлчамли структурага эга кремний олишнинг ион – плазмали технологиясини ишлаб чиқиш» (2015-017), ОТ-ФЗ-11 «Қуёш энергетикаси ва электроника материаллари қарашида турли ўлчамли кремний ва унинг оксиди структураларида ташиш ва релаксация жараёнлари» (2017-2020) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади грануллиланган кремнийнинг электрофизик ва термоэлектрик хусусиятларини 300-1000 К температуралар оралиғида комплекс баҳолаш ва шулар асосида иссиқлик энергия ўзгартиргичи қурилмасини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

зарраларининг ўлчами 1-30 мкм бўлган грануллиланган кремний асосида иссиқлик энергияси ўзгартиргичининг корпусланган намуналарини тайёрлаш методикасини ишлаб чиқиш;

0-250 МПа босим оралиғида сиқилган ва 300-1000 К температураси оралиғида бўлган турли хом ашёдан тайёрланган кремний кукунларининг солиштирма қаршилигини ўзгариш қонуниятини тадқиқ қилиш;

300-1000 К температура оралиғида, зарраларининг ўлчами 1-30 мкм бўлган грануллиланган кремнийнинг электрофизик хусусиятларини ўрганиш;

грануллиланган кремнийнинг асосий термоэлектрик хусусиятларини ўрганиш ва методиканиси ўзлаштириш, айнан, 300-1000 К температура оралиғида электр ўтказувчанлик, иссиқлик ўтказувчанлик ва Зеебек коэффициентини ўрганиш;

ишчи жисмда температура градиенти ҳосил қилиб, грануллиланган кремний намуналарининг параметрларини ўлчаш;

грануллиланган кремнийнинг термоэлектрик катталикларини ошириш йўллари физикавий асослаш;

иссиқлик энергияси ўзгартиргичларининг янги турлари макетларини ишлаб чиқиш ва тавсифларини ўлчаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида n- ва p- тип ўтказувчанликли монокрисалл кремний ҳамда термоэлектрик катталиклари бошқариладиган техник кремнийдан майдалаб тайёрланган, грануллиланган кремний ва ҳар хил вариантларда грануллиланган кремнийдан тайёрланган корпусланган намуналар, шунингдек ҳар хил типдаги иссиқлик энергияси ўзгартиргичлари макети ҳисобланади.

Тадқиқотнинг предмети грануллиланган кремний намуналарининг вольт-ампер, термоэлектрик ва бошқа электрофизик тавсифлари ҳамда унинг асосида тайёрланган иссиқлик энергияси ўзгартиргичларининг макетлари, шунингдек грануллиланган кремний зарралари сиртининг оптик ва электрон микроскоп ёрдамида олинган натижалари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Солиштирма қаршилиқни ўлчайдиган тўрт зондли методдан дастлабки материалларнинг электрофизик тавсифларини ўлчаш учун фойдаланилди. Солиштирма термоэюк ни аниқлаш учун дифференциал усули ва иссиқлик ўтказувчанликни аниқлаш учун солиштириш усули танланди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

ўлчами 1-30 мкм бўлган кремний зарраларини ўхшаш бўлган иккита металл контакт оралиғида механик сиқилган грануллиланган намунаси қиздирилганда электр юритувчи куч ва ток ҳосил бўлиши аниқланган;

заррачалар катталиги 1–30 мкм бўлган кремний кукунидан тайёрланган ва қиздирилган намуналарда эркин юриш кучланишининг ($U_{э.ю.}$) миқдори 0-250 МРа оралиғидаги босимга эмас, балки намунанинг узунлиги бўйлаб ҳарорат фарқига боғлиқлиги топилган;

заррачалар катталиги 1–30 мкм бўлган грануллиланган кремнийдан тайёрланган ва қиздирилган намуналарда қисқа туташув токининг (I_{к.т.}) миқдори 0–250 МРа оралиғида қўлланилган босимга кучли боғлиқлиги топилган;

100 МРа босим билан сиқилган кукун шаклидаги грануллиланган кремнийнинг 300–350 К ҳарорат оралиғидаги иссиқлик ўтказувчанлиги ~16 Вт/м*К эканлиги, бу эса монокристалл кремнийнинг иссиқлик ўтказувчанлигидан 9 марта кичиклиги аниқланган;

грануллиланган кремнийнинг Зеебек катталиги 300–350 К ҳарорат оралиғида ~500 мкВ/К эканлиги, бу эса монокристалл кремнийнинг Зеебек катталигидан 10 марта катталиги аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

заррача ўлчами 1-30 мкм бўлган, грануллиланган кремний асосида иссиқлик энергияси ўзгартиргичи ишлаб чиқилган,

иссиқлик энергияси ўзгартиргичи ёрдамида паст потенциалли манбадан олинган иссиқликни, ҳамда йиғилган қуёш нурланишини электр энергиясига айлантириш мумкинлиги кўрсатилган;

техник кремнийни майдалаш орқали тайёрланган, грануллиланган кремний асосида иссиқлик энергиясини электр энергиясига айлантириш учун яримўтказгичли қурилма ишлаб чиқариш мумкинлиги кўрсатилган;

грануллиланган кремнийнинг ўтказувчанлигини оширишга ноноўлчамли SiO₂ плёнка орқали заряд ташувчиларнинг резонансли туннелини ташкил қилиш орқали эришиш мумкинлиги ва бунга кремний диоксидига махсус киришмалар киритиш ёки радиация таъсирида эришиш мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги тадқиқот учун замонавий стандарт, синовдан ўтган ва метрологик сертификатланган ўлчов асбоблар ва жихозлардан фойдаланиш билан изоҳланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, грануллиланган кремнийдан тайёрланган изотип ҳамда бир - бирига механик ёпиштирилган электрон ва ковак ўтказувчанликга эга бўлган намуналар қиздирилганда, кремнийни майдалаш жараёнида ҳосил бўладиган грануллиланган кремний юзасидаги нуқсонлар, шунингдек тозаллиги 98.8% бўлган бошланғич ҳомашё яни техник кремнийдаги қўшимчалар туфайли ҳосил бўладиган чуқур энергетик сатҳлар иштирокида фотонларнинг ютилиши ҳисобига заряд ташувчиларнинг ҳосил бўлиши натижасида электр юритувчи куч ва ток оқими юзага келиши тажрибада кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, таклиф қилинган илмий-техник ечимлар грануланган кремний асосида термоэлектрик материаллар яратиш учун кўп тарқалган ва нисбатан арзон хом ашёлардан, шу жумладан монокристал ва поликристал кремний, кремний яримўтказгич асбоблари ва техник кремний ишлаб чиқариш чиқиндиларидан фойдаланиш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.

Грануланган кремнийнинг электрофизик ва термоэлектрик хусусиятларини комплекс баҳолаш ва шулар асосида иссиқлик энергия ўзгартиргичи қурилмасини ишлаб чиқиш асосида:

иссиқлик вольтаик эффекти асосида иссиқлик энергиясини электр энергиясига айлантирувчи «Иссиқлик-вольтаик энергия ўзгартиргич» қурилмасига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтиро патенти олинган (27.10.2015 й., №IAP 05121). Ишлаб чиқилган қурилма грануланган кремний асосида бир хил ўтказувчанликка эга бўлган иссиқлик энергияси ўзгартиргичини яратиш имконини берган;

иссиқлик энергиясини электр энергиясига айлантириш учун «Энергия ўзгартиргич» қурилмасига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг (22.01.2014 й., №IAP 04831) ихтиро патенти олинган. Ишлаб чиқилган қурилма грануланган кремний асосида ҳар хил типдаги ўтказувчанликка эга бўлган кремний кукунларини бир-бирига сиқиш орқали иссиқлик энергияси ўзгартиргичини яратиш имконини берган;

энергия ўзгартиргичларини параллел ва кетма-кет улаб фойдаланиш учун «Энергия ўзгартиргич (вариантлари)» қурилмасига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтиро патенти олинган (05.12.2013 й., №IAP 04824). Ишлаб чиқилган қурилма грануланган кремний асосида тайёрланган иссиқлик энергияси ўзгартиргичларини параллел ва кетма-кет улаб батарея сифатида ишлатиш имконини берган;

йиғилган қуёш нурини электр энергиясига айлантириш учун «Қуёш нурланишини ўзгартиргич» қурилмасига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтиро патенти олинган (22.04.2014 й., №IAP 04884). Ишлаб чиқилган қурилма йиғилган қуёш нурланишининг фотоактив бўлмаган қисмидан фойдаланиб, грануланган кремний асосида электр энергия олиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 8 та халқаро ва республика анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 18 та илмий иш чоп этилган, жумладан, 6 та мақола диссертация ишларининг асосий илмий натижалари Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан тавсия қилинган журналларда чоп этилган ва 4 таси ихтирога патент билан ҳимояланган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, адабиётлар рўйхати, 47 та расм ва 7 та жадвалдан иборат. Диссертациянинг ҳажми 119 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация иши мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти, предмети ва усуллари аниқланган, тадқиқотнинг Республика фан ва технологиялари ривожланишининг асосий устувор йўналишларига мослиги, тадқиқотнинг илмий янгилиги кўрсатилган, олинган натижаларнинг ишончлилигига асосланган, унинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, натижаларнинг қўлланилиши ҳақида маълумотлар диссертация ишининг апробацияси, ҳамда ҳажми ва тузилиши келтирилган.

Диссертациянинг **«Диссертация тематикаси бўйича адабиётлар манбаси таҳлили»** деб номланган биринчи бобида мавзу бўйича батафсил адабиётлар шарҳи қилинган.

Анъанавий ва кўп қўлланиладиган BiTe, PbTe, SiGe каби қотишмали термоэлектрик материалларнинг физикаси, техникаси ва технологияси бўйича илмий ишлар ва патентлар таҳлили ўтказилган.

Термоэлектр соҳасида янги ишланмалар натижалари: нанотузилишли материаллар, квант нуқталарига эга материаллар, квант толалари ва симлари, квант ўрасига эга структуралар, яна скуттерудитлар ва клатратлар баён қилинган. Обзорда турли модификациялардаги силицидлар ва кремнийнинг термоэлектрик хусусиятларини алоҳида эътибор қаратилган. Босим таъсирида ва гетероструктура тайёрлаш воситасида термоэлектрик параметрларни ошириш усуллари таҳлили ўтказилган. Обзорда яна яқинда очилган янги термовольтаик ва тепловольтаик эффектлар ҳақида қисқача баён қилинган.

Диссертациянинг **«Грануланган кремний намуналарини тайёрлаш ва электрофизик ва термоэлектрик хусусиятларини баҳолаш учун усуллар, қурилмалар ва ускуналар»** деб номланган иккинчи бобида қуйидагилар келтирилган: хом ашё танлаш ва параметрларини аппаратурали баҳолаш, грануланган кремний тайёрлаш методикаси, яъни хом ашёни ўлчами 1÷30 мкм бўлган кукун ҳолигача майдалаш, корпусланган намуналар тайёрлаш методикаси, ўтказувчанликни ва иссиқлик ўтказувчанлик ва Зеебек коэффициентини ўлчашда қўлланиладиган воситалар ва усуллар тавсифи каби маълумотларга алоқадор эксперимент методикасига бағишланади.

Ўлчашларда қўлланилган метрологик тавсия этилган ускуналарнинг қисқача қўлланмаси келтирилган:

ўтказувчанлик типларни аниқловчи, «Термозонд» ва «Учзондли» усуллар;

солиштирма қаршилигини аниқловчи 4-зондли усул;

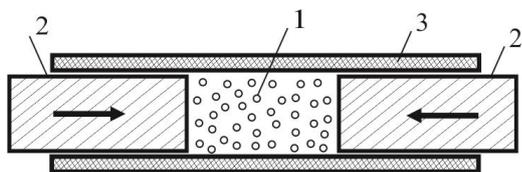
кремний кукунининг электр ўтказувчанлигини доимий ток ёрдамида 2-контактли усулни қўллаган ҳолда ўлчаш;

грануланган кремнийнинг солиштирма термоЭЮК ни дифференциал усулни қўллаган ҳолда ўлчаш;

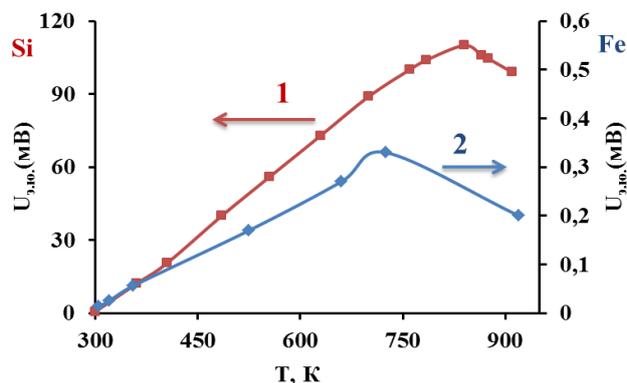
солиштирма усулларга асосланган материалларнинг иссиқлик ўтказувчанлигини ўлчаш методикаси батафсил баён қилинган.

Диссертациянинг «Гранулланган кремний намуналарининг асосий электрофизик ва термоэлектрик хусусиятлари» деб номланган учинчи бобида гранулланган кремнийнинг термоэлектрик хусусиятларини батафсил ўрганиш орқали унинг электрофизик ва термоэлектрик хусусиятларининг тадқиқот натижалари келтирилган.

Биз гранулланган кремнийни электрофизик ва термоэлектрик катталикларини корпусланган ҳолатда ўргандик, 1-расмда одатий корпусланган намуналарнинг кесими келтирилган. 3-корпус ички диаметри 2 мм ва ташқи диаметри 4 мм бўлган керамик трубка шаклида ясалган. 1 – кремний кукуни, 2 – қилинган контактлар, улар ўтказувчан материалдан, яъни пўлатнинг П.3 маркасидан тайёрланган, узунлиги ~10 мм.

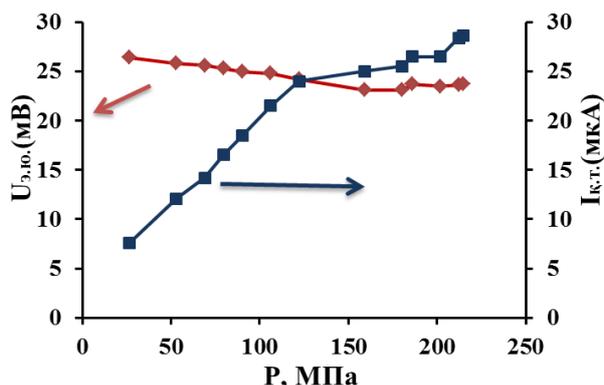


1-расм. Корпусланган намунанинг кесими



2-расм. Салт юриш кучланишининг температурага боғлиниши

2-расмда гранулланган кремнийдан тайёрланган корпусланган намунадан (1) ва контактловчи материалдан, яъни Ст.3 маркали пўлатдан (2) олинган салт юриш кучланишининг температурага боғлиниши келтирилган. Ушбу ўлчаш намуналарнинг термоэлектрик хусусиятларини баҳолашда контакт материалларининг ролини кўрсатиш учун келтирилган. Кўриниб турибдики, 300 ÷ 900 К оралиғида контакт материалининг термоЭЮК кремний намунасидан ~200 ÷ 400 марта кичик. Шундай қилиб, гранулланган Si намуналарида ўлчанган термоЭЮК қийматлари контакт металлларининг ва контакт соҳасининг эмас, балки гранулланган кремнийнинг ўзига хос хусусияти ҳисобланади. Гранулланган материаллар, шунингдек кремнийнинг электрофизик ва термоэлектрик хусусиятлари умумий ҳолда жуда кўп катталикларга боғлиқ (босим, температура ва ҳ.к.).

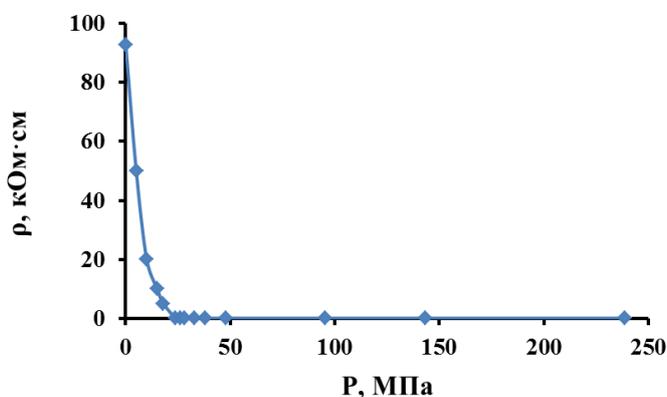


3-расм. Гранулланган кремний намунасида $U_{с.ю.}$, $I_{к.т.}$ нинг корпусланган намуна бўйлаб бир хил температура градиентида босимга боғлиқлиги

3-расмда 150 °C температурада грануланган кремний хусусиятларига ташқи босимнинг таъсири кўрсатилган.

(20 – 200 МПа) оралағида грануланган кремнийнинг қоронғидаги $U_{э.ю.}$, кукунни сиқувчи босимнинг қийматига боғлиқ эмаслиги, $I_{к.т.}$ эса кукунни сиқувчи босимнинг қийматига кучли боғлиқлиги аниқланди.

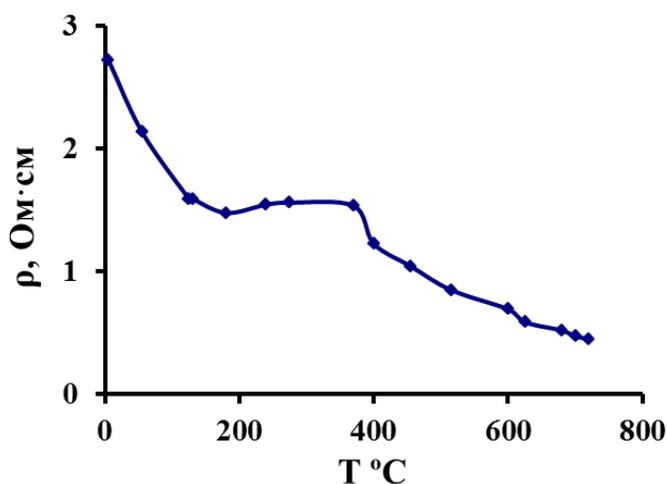
4-расмда КЭС 0,01 маркали монокристалл Si пластинкаси бўлагидан тайёрланган кремний кукунини, 0-250 МПа ташқи босим оралағида солиштирма қаршилигига боғлиқлиги келтирилган. Кўриниб турибдики, 300 К да босимни анча мураккаб тарзда оширишда заррачаларнинг ўлчами 1-30 мкм бўлган ушбу турдаги кукуннинг солиштирма қаршилиги камаймоқда. Дастлаб, 50 МПа гача бўлган паст босим соҳасида жуда кескин жойи мавжуд, солиштирма қаршилиқнинг $\sim 10^5$ Ом·см дан ~ 10 Ом·см гача, тўрт даража камайиши, шундан сўнг $\sim 100-120$ МПа гача бўлган соҳада $\Delta\rho/\Delta P$ 0,05 Ом·см/МПа коэффиценти билан ушбу параметрда квазичизикли ўзгаради, кейинчалик ρ 0,009 Ом·см/МПа коэффицент бўйича ўзгаради.



4-расм. Солиштирма қаршилиқни босимга боғлиқлиги

Таъкидлаш керакки, босимнинг энг кўп қўлланилган 250 МПа қийматида хона температурасида қаршилиқ R ни тўғридан-тўғри ўлчаш ва $\rho = R \cdot s/l$ формула орқали, бу ерда R -ўлчанган қаршилиқ, s -намуна юзаси $\sim 0,03$ см², – грануланган кремний намунаси узунлиги $\sim 0,6$ см, ҳисоб-китоблар шуни кўрсатадики, грануляцияланган кремнийнинг солиштирма қаршилиги ўзи тайёрланган хом ашё солиштирма қаршилигидан 100 марта катта экан.

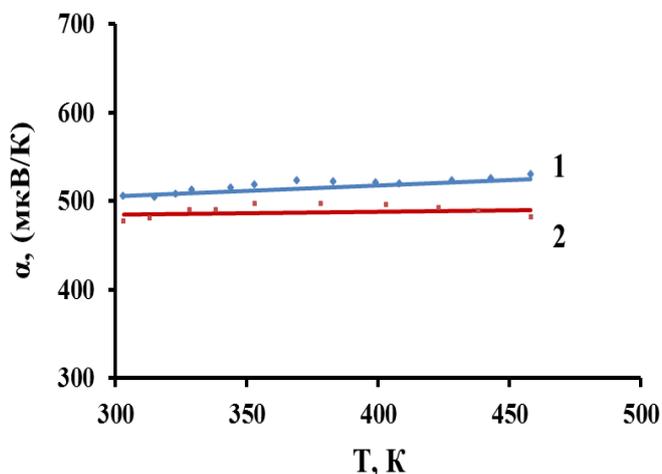
5-расмда заррача ўлчами 1-30 мкм бўлган 100 МПа босимда КЭС – 0,01 кремний хом ашёсидан тайёрланган грануланган кремнийнинг корпусланган намунасини солиштирма қаршилигининг температурага боғланиши кўрсатилган. Кўриниб турибдики, ~ 400 К температурагача қиздирилганда ρ икки каррали пасайиш ўрнига деярли чизикли пасайишга эга, кейинчалик $\rho = f(T)$ боғланиш 450 ÷ 650 К температура диапазолида платога чиқиб, солиштирма қаршилиқ температурага кам боғлиқ бўлади ва ниҳоят яна қиздириб бориш билан ρ нинг қиймати яна камайиб боради, 1050 К да қиймати $\sim 0,5$ ом·см га етади. Дефектсиз монокристалл Si дан фарқли равишда температура 700 К дан юқори бўлганда ўтказувчанликнинг ошиши солиштирма термоЭЮКни ошириш имкони натижасида иссиқлик энергиясини юқори самарадорликда алмаштиргичларни тайёрлаш учун грануланган кремний асос бўлиши мумкин бўлган шартлардан бири ҳисобланади.



5-расм. 100 МПа босимда КЭС – 0,01 кремний хом ашёсидан тайёрланган грануланган кремнийнинг корпусланган намунасини солиштирма қаршилигининг температурага боғлиқлиги

Солиштирма термоЭЮК бошқача айтганда Зеебек коэффициентини α термоэлектрик материалларнинг асосий параметрларидан бири ҳисобланади ва анъанавий ва кўп қўлланиладиган термоэлектрик материаллар (BiTe, PbTe, SiGe) каби қотишмалар учун 200 - 300 мкВ/К қийматларга эга. Монокристалл кремний учун 300 К да $\alpha \sim 44$ мкВ/К га эга ва шу сабабли олдинлари илғор термик ўтказувчан материал сифатида қаралмас эди.

6-расмда грануляцияланган кремнийнинг 300 дан 350 К гача бўлган интервалдаги Зеебек коэффициентининг температурага боғлиқлиги келтирилган. α ни ҳисоблаш натижалари n-типтаги (1-эгри чизик) ва p-типтаги (2-эгри чизик) намуналарни ушбу диапазонда қиздириш натижасида қоронғиликдаги $U_{э.ю.}$ нинг ўлчашларидан олинган.



6-расм. n-типли – 1 ва p-типли – 2 гранула ўлчами 1÷30 мкм бўлган изотип намуналарнинг дифференциал термоЭЮК нинг температурага боғлиқлиги

Иссиқлик ўтказувчанлик λ ҳам термоэлектрик материалнинг асосий параметрларидан бири ҳисобланади, бундан ташқари яна йўналишдан бири уни асиллигининг (Z) ошиши айнан унинг иссиқлик ўтказувчанлигининг камайишига асосланган, масалан «фононли шиша – электрон кристалл» каби материалларни тайёрлаш орқали.

Заррача ўлчами 1 – 30 мкм бўлган грануланган кремнийнинг, тажриба йўли билан олинган иссиқлик ўтказувчанлиги қиймати, 20 ÷ 60 °C температура оралиғида, 15,3 дан 16,7 Вт/м·К гача бўлган оралиқда ётади, бу монокристалл кремнийникига нисбатан ~ 9 марта кичик.

Диссертациянинг «Грануллиланган кремнийга асосланган иссиқлик энергияси ўзгартиргичлари макетларининг физик таъсир принципи, конструкцияси ва характеристикалари» деб номланган тўртинчи бобида грануллиланган кремний учун Зеебек коэффициенти эришилган қийматгача ошиши ва иссиқлик ўтказувчанлик камайишининг физикавий сабаблари келтирилган, шунингдек бажарилиш хусусиятлари ва ихтиро даражасида ишлаб чиқилган иссиқлик энергиясини алмаштиргичларнинг турли хилдаги 4 та макетларининг асосий параметрлари тавсифланган.

Зеебек коэффициенти ошишини тушунтириш учун субзонли фотонларнинг ютилиши ҳисобига заряд ташувчилар генерацияси билан яқунланадиган тепловольтаик эффектнинг намоён бўлиш позицияси билан тадбиқ қилинади, яъни грануллиланган кремний намунасига бериладиган чуқур энергетик сатҳларда иштирок этишда содир бўладиган паст потенциал иссиқлик, кукун заррачаси сиртидаги нуқсонлар туфайли, механик майдалашда ҳосил бўладиган ва хом ашёда мавжуд чуқур аралашмалар каби омиллар билан тушунтирилди.

Грануллиланган яримўтказгичларни, хусусан кремнийни баҳолаш ва унинг қўлланилиш истикболлари, термоэлектрик ишланмаларда гранула ўлчами d_1 ва ушбу гранула атрофидаги соҳа, яъни заррачалар чегарасидаги ўлчам эса d_2 бўлган система сифатида ўзини намоён қилувчи яримўтказгичнинг махсус ишлаб чиқилган моделига олиб келди. Тахмин қилсак, барча термоэлектрик хусусиятлар (α , σ , λ) зарралар-гранулалар ва уларга туташ соҳалар кескин фарқ қилса, у ҳолда бу система аслида адабиётларда ёзилган идеал термоэлектрик материал «электрон кристал-фонон шиша» нинг варианты ҳисобланади. Бошқа томондан, равшанки ушбу система грануллиланган кремнийдаги вазиятга жуда мос келади, бу ерда кремний кукунининг ҳар бир заррача-грануласи нано ўлчамли кремний диоксиди плёнкаси билан қопланган «электрон кристалл» ҳисобланади, юқорида келтирилган барча термоэлектрик катталиклар қийматлари кремний ва SiO_2 учун кескин фарқ қилади.

Ушбу система учун эффектив ўтказувчанлик σ_{eff} қуйидаги кўринишга эга:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_2 \frac{d_1}{d_1 + d_2} + \sigma_1 \frac{d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1)$$

Ушбу система учун иссиқлик ўтказувчанликнинг эффектив қиймати χ_{eff} қуйидаги кўринишга эга:

$$\chi_{eff} = \frac{d_1 + d_2}{\frac{d_1}{\chi_1} + \frac{d_2}{\chi_2}} \quad (2)$$

Нихоят, кремний грануласи- SiO_2 қатлам системасида солиштирма термоЭЮК нинг эффектив қиймати α_{eff} қуйидагича:

$$\alpha_{eff} = \alpha_1 \frac{\chi_2 d_1}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} + \alpha_2 \frac{\chi_1 d_2}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} \quad (3)$$

Энди $Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi}$ дан келиб чиққан ҳолда, (1), (2) ва (3) лардан фойдаланиб

Z_{eff} қийматини қуйидагича ёзамиз:

$$Z_{eff} = \left[\alpha_1 \frac{\chi_2 d_1}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} + \alpha_2 \frac{\chi_1 d_2}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} \right]^2 \left[\frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_2 \frac{d_1}{d_1 + d_2} + \sigma_1 \frac{d_2}{d_1 + d_2}} \right] \left[\frac{1}{d_1 + d_2} \left(\frac{d_1}{\chi_1} + \frac{d_2}{\chi_2} \right) \right] \quad (4)$$

Яримўтказгич гранулалари ва унинг гранулалараро чегараси ёки уларни ўраб олувчи оксид қатлам заррача хусусиятлари кучли фарқ қилса, яъни $\sigma_1 \gg \sigma_2$, $\chi_1 \gg \chi_2$, $\alpha_1 > \alpha_2$, $d_1 \gg d_2$ бўлса комбинацияланган ифода оламиз:

$$Z_{eff} = \frac{\alpha_1^2 \sigma_2}{\chi_2} \quad (5)$$

(5) ифодадаги Z_{eff} катталиқ α_1 , χ_2 ва σ_2 лар орқали аниқланади. Яъни Z нинг ошиш масаласи зарранинг термоЭЮК сини ошишига, шу билан бирга ўтказувчанликнинг ошишига ва гранулалар орасидаги чегара ёки SiO_2 қатламнинг иссиқлик ўтказувчанлигини камайишига олиб келади. Олинган ифодадан χ_{SiO_2} нинг кичик қийматидан келиб чиқиб, нима учун Z нинг қиймати гранулланган кремнийда монокристалл кремнийникига, яна куқундан қиздириб бириктирилган поликремнийникига нисбатан катта эканлигини тушунтиришга имкон беради.

Z нинг ошиши яримўтказгичли гранулада Зеебек коэффициентининг ошишига бевосита боғлиқ ва унга тепловольтаик эффектнинг вужудга келиши сабабли эришилади. Бу мантиқий ва ҳал қилувчи аҳамиятга эга, аммо бир-бирига тегиб турувчи гранулани қоплаб турувчи наноўлчамли оксид қатлами ўтказувчанлиги қиймати Z . Шундай қилиб, асосий вазифа- гранулланган Si учун Z ни ошириш, юқорида айтилган наноўлчамли SiO_2 қатламда грануладан гранулага заряд ташувчиларнинг туннеллашуви ҳисобига юзага келадиган, SiO_2 қатламнинг ўтказувчанлигини оширишдир. Демак, техник ечимларни излаш туннеллашув шароитларини яхшилашга қаратилган бўлиши керак. Шунинг таъкидлаш жоизки, анъанавий термоэлектрик материалларда заряд ташувчиларнинг туннеллашуви билан боғлиқ ишларда одатдаги электроннинг («гамов») туннеллашуви ҳақида қуйидаги эҳтимоллик билан сўз кетади:

$$D^{(1)}(E) = \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(V-E)} x \right] \quad (6)$$

Бу ерда $V-E$ -энг юқори патенциал тўсиқ энергияси ва заррачаларнинг энергетик сатхлари орасидаги фарқ, x -тўсиқ кенглиги.

Биз «гамов» туннеллашуви моделини туннель контакти ичидаги оралик нуқсонли ҳолат орқали иккита электроннинг нокогерент сакрашини киритиш йўли билан ўзгартирдик. Бу ҳолат қуйидагича кўрсатилади:

$$D^{(2)}(E) = \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(V-E)} x/2 \right] \quad (7)$$

Ҳисоблашларга кўра, бу туннель контактнинг ўтказувчанлигини оширишга имкон беради, буни бизнинг тажрибамиз тасдиқлади, шу билан бирга юқорида кўрсатилган наноўлчамли диоксиди билан қопланган кремний заррачалари сирти, ташқаридан кремний диоксидини эслатувчи ўтиш металлларининг ўтказувчан оксид қатлами хусусан қалай диоксиди асосида «оролча» плёнкаси яратилди. Яъни, ҳар бир бирламчи гранулада кремний диоксидининг наноўлчамли оралиғи орқали заряд ташувчиларнинг туннеллашуви учун қалай диоксид оролидан ҳамда наноўлчамли қалинликдан ўзига хос ўтказувчан «плацдарм» ҳосил қилинди.

Туннель контакти ўзини ичидага ҳолатлар оралиғидан заряд ташувчилар резонанс туннеллашувини ташкил қилиш янада истиқболли намоён қилади, яъни наноқалинликли SiO_2 плёнкасининг ўзида туннеллашувнинг оптимал шартларни ташкил қилиш.

Шуни таъкидлаш керакки, резонанс туннеллашуви «гамов» туннеллашувидан принцип жиҳатдан фарқ қилади ва композит термоэлектрик материаллар соҳасида сўнги ютуқларга бағишланган аналитик шарҳга кўра, илк бора биз термоэлектрикада фойдаланиш учун таклиф қилдик.

$$D^{(3)}(E) = \frac{1}{1 + \left(\tau_0 \Theta^2 / \hbar \right)^2 (E - E_N)^2}, \quad (8)$$

Бу ерда τ_0 и E_N – потенциал ўра ичидаги электроннинг тебраниш даври ва энергияси, $\Theta = \exp\left(\int_b^a P_I \frac{dx}{\hbar}\right)$, P_I – электрон импульси.

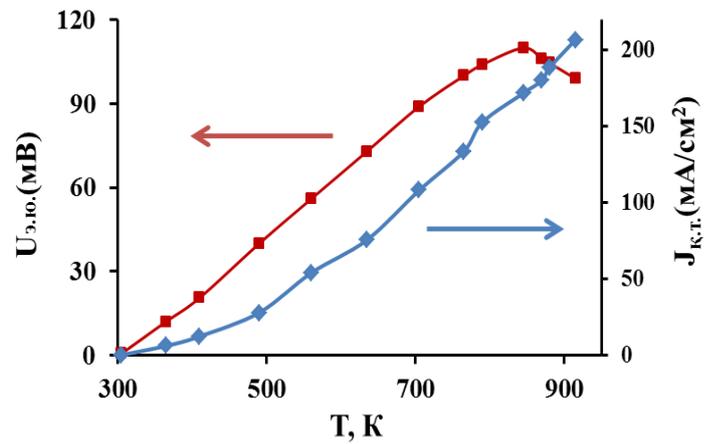
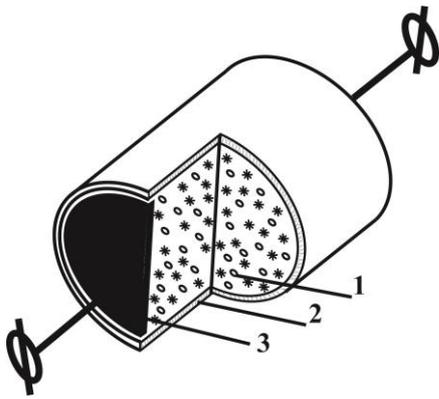
Шубҳасиз, $\Theta \gg 1$ бўлганда, резонанс кенглиги $E - E_N = \hbar / \tau_0 \Theta^2$ кичик бўлади.

(8) ифода асосида туннель контакти ўтказувчанлигини ҳисоблаш, (7) ифода орқали ҳисоблаш билан солиштирганда сезиларли ошишни беряпти, бунинг устига (6) ифода бўйича ҳисоблашлар айниқса, агар E_N сатҳ зонали тузилишга $E_c^{Si} \leq E_N < E_c^{SiO_2}$ каби келтирилган бўлса.

Резонанс туннеллашуви ёрдамида амалга ошириш мумкин бўлган технологиялар ҳақидаги саволларни кўриб чиқамиз. Биз амалга оширган ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, асосий ютуқни тўғридан-тўғри кремний диоксиди қатламида жойлашган аралашмалар ва нуқсонлар бериши мумкин.

Кремний диоксидида E_N локал энергетик стаҳларни альтернатив усули радиацион нурлантириш масалан, протонлар, нейтронлар ёки гамма-квантлари ёрдамида ҳосил қилиш мумкин.

Бу бобда, қиздириш натижасида электр энергиясини олишга олиб келадиган тоза кремний ва техник кремний кукунлари аралашмасидан тайёрланган изотипли энергия алмаштиргичи конструкция келтирилган. (7-расм)



7-расм. Иссиқлик энергияси алмаштиргичи ва $U_{3.ю.}$ ва $I_{к.т.}$ нинг температурага боғлиқлиги

Кўришиб турибдики, узунлиги 6 мм бўлган ишчи жисмни бир четини $T = 700$ К температурагача қиздириш натижасида, яъни температура градиентини ҳосил қилиш натижасида ускуна ~ 100 мВ кучланишда ~ 200 мА/см² ток олиш имконини беради. Ушбу конструкция № IAP 05121 номерли ЎзР Патенти билан ҳимояланган.

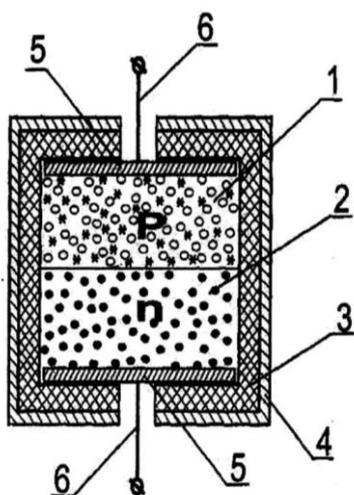
Бундан ташқари иссиқлик энергияси ўзгартиргичларини кетма-кет ва параллел улашнинг ўзига хос хусусиятлари келтирилган (1-жадвалга қаранг). Ушбу батарейканинг конструкцияси ЎзР № IAP 04824 патенти билан ҳимояланган.

1- жадвал

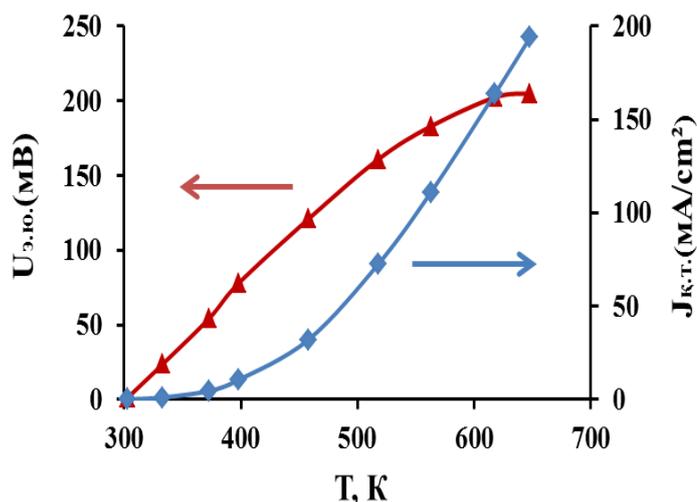
Иссиқлик энергияси алмаштиргичларини кетма-кет ва параллел улаш

Иситиш №	Улашгача бўлган параметрлар						Уланишдаги параметрлар			
	№1 (16)		№2 (17)		№3 (39)		Кетма-кет		Параллел	
T (K)	U (мВ)	I (мкА)	U (мВ)	I (мкА)	U (мВ)	I (мкА)	U (мВ)	I (мкА)	U (мВ)	I (мкА)
500	13	180	25,5	362	26,4	208	67,5	247	21,5	745
650	24,4	688	54,4	2800	50,6	1036	128	1222	46,2	4570
800	34	1430	69,7	5970	61,6	2210	164	2570	59,1	9450
900	42,3	2360	70,9	7870	65,8	3548	184	4080	63,5	13250

Шунингдек турли ўтказувчанлик типига эга ҳажмли материалларни майдалаш орқали тайёрланган ўзини механик бир-бирига тегиб турувчи кремний кукунлари сифатида намоён қилувчи янги типдаги иссиқлик энергияси алмаштиргичи келтирилган. 9 расмда уни макетини унча катта бўлмаган температураларда солиштириш учун схемаси ва одатдаги характеристикалари келтирилган. Ушбу конструкция ЎзР № IAP 04831 патенти билан ҳимояланган.



1 - p соҳа, 2 - n соҳа, 3 - диэлектрик материалдан тайёрланган корпус ,
4 - селектив қоплама, 5 – омик контакт 6 - чиқиш



9 - расм. Гранулланган кремнийдан тайёрланган p ва n соҳали иссиқлик энергияси алмаштиргичи

4-бобда гранулланган кремнийдан ясалган изотип иссиқлик алмаштиргичи макетининг экстремал шароитларда ўзини тутишига тегишли маълумотлар келтирилган.

1. Макетни суюқ азотга ($T \sim 77\text{K}$) жойлаштириш натижасида ток ва кучланиш, худди уни қиздиргандаги каби пайдо бўлади, фақатгина ишораси қарама-қарши бўлиши кузатилди. Иккала параметр ҳам иситилгандагига нисбатан 10 баробар кичик, масалан температура 500 K гача ва совутилаётган металл-кремний контакти термоЭЮК билан мутлақо боғлиқ. Яъни солиштирма термоЭЮК нинг аномал юқори қиймати ва мос равишда $U_{э.ю.}$ ва $I_{к.т.}$ қиздирилганда термоэлектрик ва тепловольтаик эффектнинг умумлашган таъсири юзага келади.

2. Иссиқлик энергияси алмаштиргичи макетини юқори қувватли лазер нурланиши (ROFIN-SINAR лазери) ёрдамида нурлантирилганда 357mA/cm^2 ток зичлиги ва 350 мВ кучланиш ҳосил бўлди. Қурилма унга тушган импульсларни қайд қилди ва ишдан чиқмади.

3. Иссиқлик энергияси алмаштиргичи макетида барча турдаги ва типдаги яримўтказгичли қурилмалар ва ускуналар учун шаксиз ҳалокатли ҳисобланадиган Co^{60} билан 10^9 рад дозали γ квантлар билан нурлантиришгача ва нурлантирилгандан кейинги ўлчашлар натижаларини таққослашлардан, гранулланган кремний асосида тайёрланган иссиқлик энергияси алмаштиргичи параметрларида ҳеч қандай ўзгариш кузатилмади.

ХУЛОСА

1. Илк бор гранула кўринишидаги, яъни кукун ҳолатидаги кремнийнинг электрофизик хусусиятлари ўрганилди. Намуналарни қиздиришда қоронғилик кучланиши $U_{э.ю}$ ва токи $I_{к.т.}$ юзага келиши аниқланди.

2. 300-500 К температура оралиғида $U_{э.ю}$ кучланиши грануллашган кремнийдан тайёрланган намунанинг кукунларини сиқиш босимида (20-200 МПа) амалий жиҳатдан боғлиқ эмаслиги, температура фарқига кучли боғлиқлиги лекин намунанинг ўртача температурасига эса кам боғлиқлиги кўрсатилди. Қисқа туташув токи $I_{к.т.}$ эса аксинчи, кукунларини сиқиш босимида, температура фарқининг мутлоқ қийматига ва намунанинг узунлиги бўйлаб тақсимотининг ҳолатига ҳам боғлиқ бўлади.

3. Илк бор ўлчанган КЭС 0,01 ва КДБ 10 маркали монокристалл кремнийдан тайёрланган р- ва n-типтаги грануллашган кремний намуналарида Зеебек коэффиценти 300÷350 К температура диапазонида монокристалл кремнийникидан 10 баробар катта экан ва ~500 мкВ/К ни ташкил қилади, иссиқлик ўтказувчанликнинг қиймати ~16 Вт/м·К, бу эса монокристалл кремнийникидан ~9 марта кичик экан, кремний кукунини қиздириб бириктирилган намунасида 4-5 марта кичик экан ва ғовакли кремнийга хос бўлган қийматларга яқинлашади.

4. Грануллашган кремнийни монокристалл ва поликристалл модификацияларидан тубдан фарқ қилиши кўрсатилган, бу ўзини икки компонентли гетероген муҳит сифатида ўзини намоён қилади, унда микроўлчамли заррачалар-кремний гранулалари ҳар томондан наноўлчамли оксид қатлами билан қопланиши ҳақиқатан «электрон кристал-фонон шиша» хусусиятларини ўзида бирлаштирган система каби ўзини намоён қилади. Ушбу

система учун асосий термоэлектрик катталиқ $Z_{eff} = \frac{\alpha_1^2 \sigma_2}{\chi_2}$ ифода билан

аниқланади, бу ерда α_1 – кремний грануласи учун Зеебек коэффиценти, χ_2 – кремний грануласини ўраб турган SiO_2 плёнкасининг иссиқлик ўтказувчанлиги ва σ_2 –кўрсатилган оксиднинг ўтказувчанлиги. Шундай экан, иссиқлик ўтказувчанлиги χ SiO_2 учун кремнийникига нисбатан анча кичик, бундан Z бу каби системалар учун монокристалл ва поликристалл кремнийникига нисбатан анча катта бўлади.

5. Ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, наноқалинликдаги SiO_2 плёнкаси орқали заряд ташувчиларни резонансли туннель ўтишини ташкил қилиш орқали грануллашган кремнийнинг ўтказувчанлигини оширишга эришиш мумкин, бунинг учун ўтказувчанлик зонаси ости яқинида оксиднинг тақиқланган зонасида аралашмалар киритиш ёки нурланиш билан таъсир қилиш орқали $E_c^{Si} \leq E_N < E_c^{SiO_2}$ шартни қаноатлантирувчи локал энергетик сатҳ E_N ни ҳосил қилиш керак, бу ерда $E_c^{SiO_2}$ SiO_2 нинг ўтказувчанлик зонасининг қуйи қисми, E_c^{Si} эса кремнийнинг ўказувчанлик зонасининг қуйи қисми.

6. Илк бор кремнийда чуқур энергетик сатҳни берадиган аралашма киритилган грануллашган изотип кремний материалдан тайёрланган ишчи жисмдан ташкил топган иссиқлик энергиясини алмаштиргичи ишлаб чиқилди.

Макетни 900 К гача қиздириш натижасида ўлчашлардан $U_{э.ю} \sim 100$ мВ кучланишини ва $I_{к.т.} \sim 200$ мА/см² ток зичлигини олиш мумкинлиги кўрсатилди. Иссиқлик энергиясини алмаштиргичларини батарейкаларга улашнинг ўзига хос хусусиятлари аниқланди. Бу қурилмадан фойдаланиб йиғилган қуёш нуруни электр энергиясига ўзгартириш учун фойдаланиш мумкинлиги кўрсатилган.

7. Илк бор турли хил ўтказувчанлик типидagi кремнийдан тайёрланган грануланган кремнийни бир-бирига механик сиқиш йўли билан ишлайдиган шаклида иссиқлик энергияси алмаштиргичи тайёрланди. 650 К ҳароратда энг юқори энергетик хусусиятлари $U_{э.ю} \sim 200$ мВ ва $I_{к.т.} \sim 200$ мА/см² ни ташкил этди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

АДИЛОВ МУХАММАДЖОН МАШАРИБОВИЧ

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННОГО
КРЕМНИЯ**

01.04.04. – Физическая электроника

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

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2017.2.PhD/FM65.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета по адресу www.iplt.uz и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyo.net.

Научный руководитель: **Ашуров Хатам Бахронович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич**
доктор физико-математических наук, профессор

Исаханов Зинаобидин Абилпейзович
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: **Институт физики полупроводников и микро-электроники при национальном университете Узбекистана**

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2019 г. в ____ часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г.Ташкент, ул.Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (+99871) 262-32-54, e-mail:info@iplt.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № ____), по адресу: 100125, г.Ташкент, ул.Дурмон йули, 33. Тел.: (+99871) 262-31-69.

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2019 года.

(реестр протокола рассылки _____ от « ____ » _____ 2019 года).



С.С. Курбанов
Заместитель председателя научного совета по присуждению учёных степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Д.Т. Усманов
Учёный секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник



Б.Е. Умирзаков
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время одной из основных мировых проблем является энергетическая. Поэтому в мире проводятся усовершенствование традиционных источников энергии и поиск альтернативных, основными требованиями к которым являются доступность, дешевизна и экологическая чистота. Одно из направлений этих поисков – получение электроэнергии прямым преобразованием тепла природного или техногенного происхождения с использованием термоэлектрических устройств, для изготовления которых в последнее время создаются новые типы термоэлектрических материалов, сочетающих свойства «электронного кристалла и фононного стекла». Отмечается также интерес к использованию для этих целей не монокристаллических модификаций полупроводников, в том числе и кремния, имеющего преимущества перед традиционными материалами типа BiTe, а также других полупроводников среди распространенных в минералах земной коры, освоения технологии извлечения и дешевизны. В этой связи актуальны проблемы и задачи, связанные с изучением электрофизических и особенно термоэлектрических характеристик различных модификаций кремния и созданием на их основе преобразователей тепловой энергии.

В последние годы в мире во многих специализированных научных центрах для решения этих задач ведутся исследования свойств модификации кремния с микро- и наноразмерными структурами типа пористого, микрозернистого поликристаллического и гранулированного кремния, поскольку монокристаллический или крупноблочный поликристаллический кремний, широко используемые в электронной технике и солнечной энергетике и обладающие высокой ~ 150 Вт/м·К теплопроводностью и малым коэффициентом Зеебека ~ 44 мкВ/К, в этом качестве не пригодны.

В последнее время в Республике Узбекистан усилилось внимание к изучению термоэлектрических свойств силицидов различных металлов, а также ведутся исследовательские и инновационные работы по актуальным вопросам физики термоэлектрических и тепловольтаических явлений в полупроводниках, направленные на увеличение эффективности прямого преобразования тепловой энергии в электричество. Направления этих фундаментальных исследований и разработок, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и их практического применения, отражены в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы¹.

Данное диссертационное исследование, в определённой степени, соответствует задачам, поставленным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года и № УП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности»

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017 г.

от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, имеющих отношение к данной области деятельности.

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

Степень изученности проблемы. Ряд важнейших научных исследований по данной тематике проведен в различных зарубежных научных центрах, в том числе были оценены термоэлектрические свойства различных полупроводниковых материалов с целью улучшения их термоэлектрических характеристик. Наиболее значительные результаты в указанной области были достигнуты зарубежными учеными, например, российскими (А.А. Снарский, А.К. Сарычев, А.В. Дмитриев, И.П. Звягин, Я.Б. Магомедов, М.И. Федоров, М.М. Гаджиалиев, В.В. Каминский), немецкими (Ж. Дебур, С. Стиве, Ш. Фолькер, Е. Муллер, К. Забреки) американскими (Е.Ж. Тимм, Т.П. Хоган, Д. Кендиг, А. Шакури, А. И. Хочбаум), японскими (Т.К. Хиромаса, И. Аояма, С. Сано, Ш. Ямамото, Т. Аизава, А. Ямамото) и другие, а также ученые из нашей страны (М.С. Саидов, Б.М. Абдурахманов, Л.О. Олимов, Г. Абдурахманов, Н.А. Матчанов, А.М. Касымахунова, Т.С. Камиров)

Кремний не считается термоэлектрическим материалом из-за его высокой теплопроводности, но в последнее время снизив теплопроводность, повысили его добротность путем изучения термоэлектрических свойств пористого кремния и кремниевых нанотрубок.

В.В. Каминский с сотрудниками обнаружили и исследовали новое явление - возникновение электрического напряжения при равномерном нагреве образца SmS в условиях отсутствия внешнего градиента температуры (термовольтаический эффект). Этот эффект наблюдался в монокристаллах сульфида самария при температурах 400 – 500 К.

Ученые Узбекистана академик М.С. Саидов, Б.М. Абдурахманов, Л.О. Олимов, А.Ю. Лейдерман и А.С. Саидов обнаружили и исследовали примесный термовольтаический эффект возникающий при нагреве образцов из поликристаллического и технического кремния, проявляющийся в аномальном увеличении термоэлектрических показателей в виде темновых тока и напряжения, что обусловлено генерацией носителей заряда при поглощении субзонных фотонов с участием примесей, дающих в кремнии глубокие энергетические уровни.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в рамках следующих проектов Института Ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз: ФА-Ф2-ФО 98 «Исследование электрофизических и фотовольтаических свойств микрозернистого поликристаллического кремния»

(2007-2011 гг.), ФЗ-ФА-Ф158 «Процессы преобразования энергии в системах на основе органических и неорганических гранулированных полупроводников с примесными неоднородностями малого размера» (2012-2016 гг.), ФА-А4-Ф061 «Разработка ионно-плазменной технологии получения кремния с наноразмерными структурами» (2015-2017 гг.), ОТ-ФЗ-11. «Исследование процессов переноса и релаксации в структурах кремния и его оксида различной размерности с точки зрения материалов для альтернативной энергетики и наноэлектроники» (2017-2020 гг.).

Целью исследования является комплексная оценка электрофизических и термоэлектрических свойств гранулированного кремния в диапазоне температуры 300-1000 К и разработка преобразователей тепловой энергии на его основе.

Задачи исследования:

разработка методики изготовления корпусированных образцов преобразователей тепловой энергии из гранулированного кремния с размером частиц 1-30 мкм;

исследование закономерностей изменения удельного сопротивления порошков кремния из различного сырья от усилия сдавливания в диапазоне 0-250 МПа и варьирования температуры в диапазоне 300-1000К;

изучение электрофизических свойств гранулированного кремния с размером частиц порошка 1-30 мкм в диапазоне температур 300-1000 К;

освоение методик и изучение основных термоэлектрических свойств гранулированного кремния, а именно, электропроводности, теплопроводности и коэффициента Зеебека в диапазоне температур 300-1000 К;

измерение параметров образцов гранулированного кремния в условиях намеренно созданного градиента температуры в рабочем теле;

физическое обоснование путей улучшения термоэлектрических характеристик гранулированного кремния;

разработка и измерение характеристик макетов новых типов преобразователей тепловой энергии.

Объектом исследования являются гранулированной кремний, изготовленный размолотом заготовок из монокристаллического кремния n и p типа проводимости и технического кремния с контролируемыми термоэлектрическими характеристиками, корпусированные образцы, выполненные из гранулированного кремния в различных вариантах, а также макеты преобразователей тепловой энергии различного типа.

Предметом исследования являются вольтамперные, термоэлектрические и другие электрофизические характеристики образцов гранулированного кремния и макетов преобразователей тепловой энергии на его основе, а также результаты исследований поверхности частиц-гранул кремния с помощью оптического и электронного микроскопов.

Методы исследования. Для измерения электрических характеристик исходных материалов использовался 4-х зондовый метод измерения удельного сопротивления. Для определения удельной термоэдс применен дифференциальный метод, а для теплопроводности - сравнительный метод.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

обнаружено появление электродвижущей силы и тока при нагреве образца гранулированного кремния, представляющего собой механически сжатый между двумя контактами из идентичного металла порошок кремния с размерами частиц 1-30 мкм;

установлено, что U_{xx} образцов гранулированного кремния, сформированного из кремниевого порошка с размером частиц 1-30 мкм не зависит от усилия приложенного давления в диапазоне $0 \div 250$ МПа, но сильно зависит от градиента температуры по длине образца;

установлено, что $I_{кз}$ нагреваемых образцов гранулированного кремния, сформированного из кремниевого порошка с размером частиц $1 \div 30$ мкм сильно зависит от усилия приложенного давления в диапазоне $0 - 250$ МПа;

определена теплопроводность γ гранулированного кремния в виде, сжатого с давлением ~ 100 МПа, порошка, которая составила в диапазоне температур $300 \div 350$ К величину ~ 16 Вт/м·К, что в ~ 9 раз ниже чем у монокристаллического кремния;

определен коэффициент Зеебека, α , гранулированного кремния в диапазоне $300 \div 350$ К, величина которого составила ~ 500 мкВ/К, что в ~ 10 раз превышает этот важнейший термоэлектрический показатель у монокристаллического кремния.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан преобразователь тепловой энергии на основе гранулированного кремния, с размером частиц порошка $1 \div 30$ мкм,

показано, что с помощью преобразования тепловой энергии, можно преобразовывать на электричество тепло от низкопотенциальных источников, включая слабо концентрированное солнечное излучение;

показано, что на основе гранулированного кремния, изготовленного размолотом технического кремния может быть изготовлено полупроводниковое устройство для преобразования тепловой энергии в электричество;

показано, что повышение проводимости гранулированного кремния можно обеспечить путем организации резонансного туннелирования носителей заряда через нанотолщинную пленку SiO_2 , что может быть достигнуто специальным легированием двуокиси кремния или радиационным облучением.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением для исследования современных стандартных, апробированных устройств и метрологически аттестованных приборов и оборудований.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований диссертации заключается в установлении экспериментального факта генерации носителей заряда за счет поглощения субзонных фотонов с участием глубоких энергетических уровней, обусловленных дефектами на поверхности частиц гранулированного кремния в изобилии возникающих при механическом размолотом кремниевого сырья, что в совокупности с примесями дающими аналогичные уровни, присутствующими в исходном сырье типа технического кремния с чистотой 98,8 % вызывает появление электродвижущей силы и протекание тока при нагреве, как изотипных образцов гранулированного кремния, так и образцов содержащих

механически контактирующие друг с другом области, сформированные из порошков кремния с электронной и дырочной проводимостью.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что полученные научно-технические решения могут быть применены для создания термоэлектрических материалов на основе гранулированного кремния, изготавливаемого из доступного и сравнительно дешевого сырья, включая отходы производства моно и поликристаллического кремния, кремниевых полупроводниковых приборов, а также технического кремния.

Внедрение результатов исследования.

На основе комплекса исследований электрофизических и термоэлектрических свойств гранулированного кремния и проведена разработка преобразователей тепловой энергии:

получен патент на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на устройство «Тепловольтаический преобразователь энергии» (№ IAP 05121, 27.10.2015 г.). Разработанное устройство даёт возможность создать преобразователей тепловой энергии на основе изотипных порошков кремния;

получен патент на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на устройство «Преобразователь энергии» (№ IAP 04831, 22.01.2014 г.). Разработанное устройство позволяет создать преобразователей тепловой энергии, с рабочим телом выполненным из порошков кремния с различным типом проводимости, приведенных в механическое соприкосновение друг с другом;

получен патент на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на устройство «Преобразователь энергии (варианты)» (№ IAP 04824, 05.12.2013 г.). Разработанное устройство позволяет создать батарей из последовательно и параллельно соединенных устройств на основе гранулированного кремния;

получен патент на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на устройство «Преобразователь солнечного излучения» (№ IAP 04884, 22.04.2014 г.). разработанное техническое решение обеспечивает получение электрической энергии за счет преобразования нефотоактивной части концентрированного солнечного излучения устройством на основе гранулированного кремния.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 международных и республиканских конференциях.

Публикация результатов исследования. Результаты, полученные по теме диссертации, изложены в 18 научных трудах, в том числе в 6 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистана для публикации основных научных результатов диссертационных работ и защищены 4 патентами на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы включая 47 рисунка и 7 таблиц. Текст диссертации изложен на 119 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, определены объект, предмет и методы исследования, а также связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республики Узбекистан, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены данные о внедрении результатов, апробации работы, объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ литературных источников по тематике диссертации»** сделан подробный литературный обзор по теме.

Проведён анализ обзорных и оригинальных научных работ и патентов по физике, технике и технологии традиционных и наиболее применяемых термоэлектрических материалов, типа сплавов BiTe, PbTe, SiGe. Описаны результаты новых разработок в области термоэлектричества: наноструктурированные материалы, материалы с квантовыми точками, квантовые нити и проволоки, структуры с квантовыми ямами, а также скуттерудиты и клатраты.

В обзоре особо уделено внимание термоэлектрическим свойствам силицидов и самого кремния, в различных модификациях.

Проведён анализ методов повышения термоэлектрических параметров, в том числе, воздействием давления и путем изготовления гетероструктур.

Кратко описан недавно открытый новый термовольтаический и тепловольтаический эффект.

Во второй главе диссертации **«Методы, приборы и установки для изготовления и оценки электрофизических и термоэлектрических свойств образцов гранулированного кремния»**, посвященной методике экспериментов приведены данные касающиеся: выбора и аппаратурной оценки параметров исходного сырья, методике подготовки гранулированного кремния, то есть размола сырья до порошков с размером частиц $1 \div 30$ мкм; методике изготовления корпусированных образцов; описанию примененных средств и методик измерения проводимости, а также теплопроводности и коэффициента Зеебека.

Дано краткое описание метрологически аттестованных установок, использованных для измерения:

типа проводимости, методами «Термозонд» и «Трехзондовый метод»;

удельного сопротивления 4 - х зондовым методом;

электропроводности кремниевых порошков на постоянном токе с использованием 2-контактного метода;

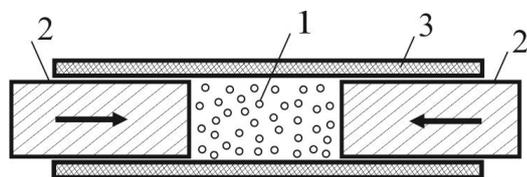
термоэдс гранулированного кремния с использованием дифференциального метода;

Подробно описана методика измерения теплопроводности материалов, основанная на сравнительном методе.

В третьей главе «**Основные электрофизические и термоэлектрические характеристики образцов гранулированного кремния**» приведены результаты исследования электрофизических свойств гранулированного кремния с подробным изучением его термоэлектрических характеристик.

Исследования вели на корпусированных образцах. На рис.1 приведен внешний вид большинства корпусированных образцов. Корпус выполнен в виде керамической трубки 3, с внутренним диаметром 2 мм и внешним диаметром 4 мм. Контакты 2 к порошку кремния 1 выполнены из проводящего материала, а именно из стали марки Ст.3 длиной ~10 мм.

На рис.2 приведены температурные зависимости напряжения холостого хода, снятые у корпусированного образца из гранулированного кремния (1), и у контактного материала, то есть стали марки Ст.3 (2).



ис. 1 Разрез корпусированного образца

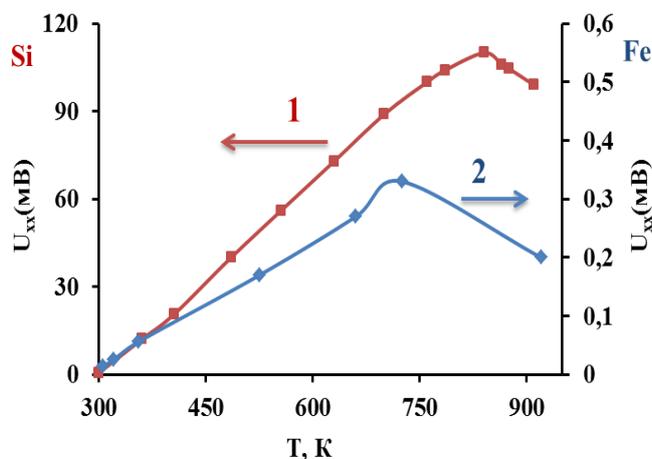


Рис. 2 Температурная зависимость напряжения холостого хода

Данные измерений контакта приведены для показания роли контактных материалов при оценке термоэлектрических свойств образцов. Видно, что термоэдс материала контакта в диапазоне 300 ÷ 900 К в ~200 ÷ 400 раз меньше, чем у образца кремния. Таким образом, измеренные на образцах из гранулированного Si значения термоэдс являются свойствами собственно гранулированного кремния, а не контактных металлов и контактной области. Электрофизические и термоэлектрические свойства гранулированных материалов, в том числе кремния, в общем случае зависит от множества факторов (давление, температура, и т.д.).

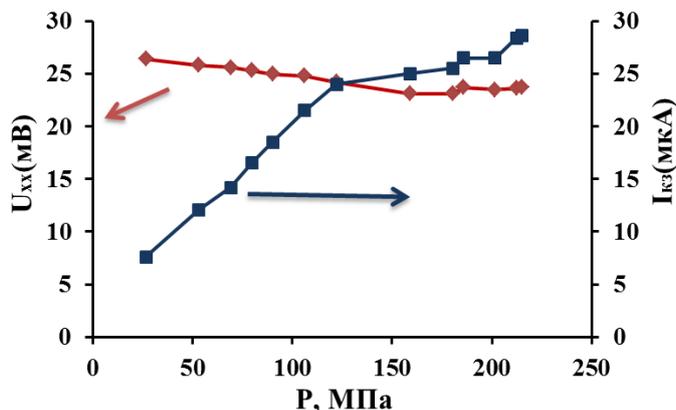


Рис. 3. Зависимость U_{xx}, I_{кз} образцов гранулированного кремния от давления при одинаковом градиенте температуры

На рисунке 3 показано влияние внешнего давления на свойства гранулированного кремния при температуре 150 °С.

Определено, что темновое U_{xx} гранулированного кремниевого образца практически не зависит от величины усилия (давления) с которым сжимается порошок, а $I_{кз}$ гранулированного кремния сильно зависит от величины внешнего давления, с которым сжимается порошок по крайней мере, в диапазоне (20 – 200 МПа).

Рисунок 4 иллюстрирует влияние внешнего давления в диапазоне 0-250 МПа на величину удельного электрического сопротивления порошка кремния, изготовленного помолом боя монокристаллических пластин Si марки КЭС 0,01. Видно, что удельное сопротивление этого вида порошка с размером частиц 1-30 мкм уменьшается при 300К с ростом давления достаточно сложным образом. Сначала в области малых давлений до 50 МПа имеет место очень резкое, на четыре порядка, падение сопротивления от $\sim 10^5$ Ом·см до ~ 10 Ом·см, затем идет квазилинейное изменение этого параметра до давлений ~ 100 -120 МПа с коэффициентом $\Delta\rho/\Delta P$ 0,05 Ом·см/МПа, а потом ρ изменяется с коэффициентом 0,009 Ом·см/МПа. Отметим, что и при самых больших использованных нами величинах давления, ~ 250 МПа, при комнатной температуре удельное сопротивление порошка, определенное из прямых измерений R и вычислением по формуле $\rho=R \cdot s/l$, где R – измеренное сопротивление, s – площадь образца, $\sim 0,03$ см², а l – длина образца гранулированного кремния, $\sim 0,6$ см, оказалось в ~ 100 раз больше чем удельное сопротивление сырья, из которого он изготовлен.

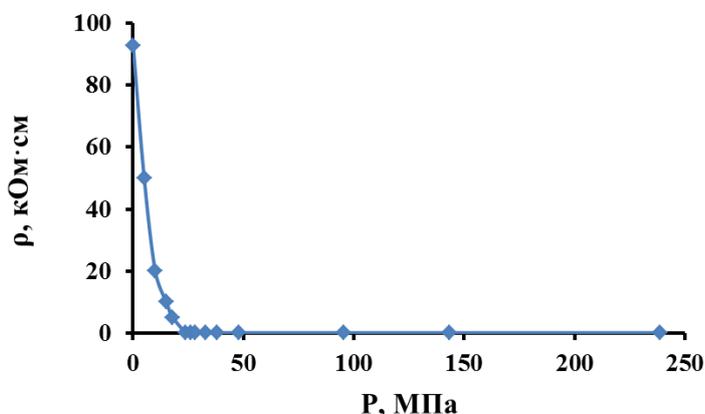


Рис.4 Зависимость удельного сопротивления от давления

На рисунке 5 показана типичная температурная зависимость удельного сопротивления корпусированного образца гранулированного кремния, изготовленного из сырья марки КЭС – 0,01 с размером частиц 1 – 30 мкм при давлении 100 МПа.

Видно, что до температур нагрева ~ 400 К имеет место двукратное почти линейное падение ρ , затем зависимость $\rho=f(T)$ выходит на плато в пределах которого в диапазоне температур $450 \div 650$ К удельное сопротивление слабо зависит от температуры и, наконец, при дальнейшем нагреве ρ вновь начинает уменьшаться, достигая при 1050К величины $\sim 0,5$ ом·см. Увеличение, в отличие от бездефектного монокристаллического Si, проводимости при T выше 700 К является одной из предпосылок того, что гранулированный кремний может

явиться основой для изготовления высокоэффективных преобразователей тепловой энергии, за счет возможности увеличения удельной термоэдс.

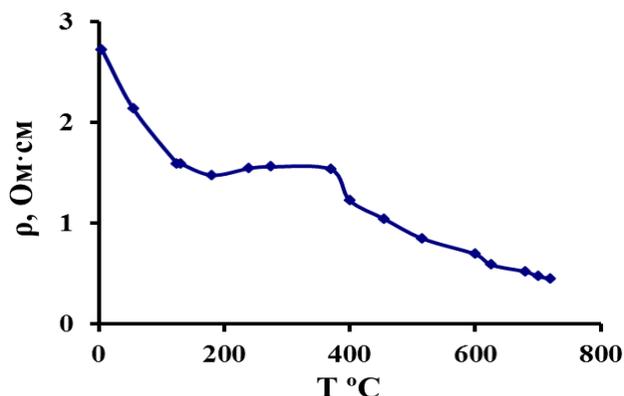


Рис.5 Температурная зависимость удельного сопротивления корпусированного образца гранулированного кремния, изготовленного из кремниевого сырья КЭС – 0,01 при давлении 100 МПа

Удельная термоэдс иначе называемая коэффициентом Зеебека, α , считается одним из основных параметров термоэлектрического материала, и составляет у традиционных и наиболее применяемых термоэлектрических материалов типа сплавов (BiTe, PbTe, SiGe) величину $\sim 200 - 300$ мкВ/К. У монокристаллического кремния α составляет ~ 44 мкВ/К при 300 К, и по этой причине он ранее не считался перспективным материалом для термопреобразователей.

На рисунке 6 приведена зависимость коэффициента Зеебека гранулированного кремния от температуры в интервале от 300 до 350 К. Результаты расчета α получены из измерений темновых U_{xx} снятых на нагреваемых в этом диапазоне n-типного (кривая 1) и p-типного (кривая 2) образцов.

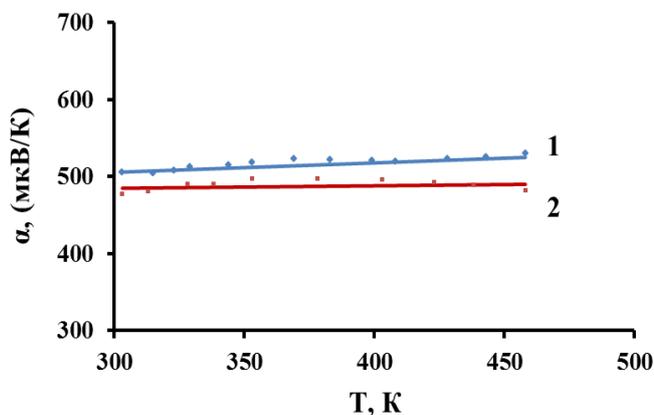


Рис.6 Температурная зависимость дифференциальной термоэдс изотипных образцов с размером зерен $1 \div 30$ мкм, n-тип –1 и p-тип –2

Теплопроводность λ также является одним из основных параметров термоэлектрического материала, причем одно из направлений увеличения его добротности (Z) как раз и основано на уменьшении его теплопроводности, например, путем создания материала типа «фононное стекло – электронный кристалл».

Из сопоставления полученных в эксперименте значений λ было получено, что величина теплопроводности гранулированного кремния с размером частиц $1 - 30$ мкм в диапазоне температур $20 \div 60$ °C лежит в пределах от 15,3 до 16,7 Вт/м·К, что в ~ 9 раз ниже чем у монокристаллического кремния.

В четвертой главе «Физический принцип действия, конструкция и характеристики макетов преобразователей тепловой энергии на основе гранулированного кремния» приведены физическое объяснение достигнутого повышения коэффициента Зеебека и уменьшения теплопроводности гранулированного кремния, а также описаны особенности выполнения и основные параметры разработанных на уровне изобретений 4 – х макетов различных видов преобразователей тепловой энергии.

Объяснение повышения коэффициента Зеебека проведено с позиций проявления тепловольтаического эффекта, заключающегося в генерации носителей заряда за счет поглощения субзонных фотонов, то есть низкопотенциального тепла подводимого к образцу гранулированного кремния, происходящего с участием глубоких энергетических уровней, обусловленных дефектами на поверхности частиц порошка, возникающими при механическом помолу и глубокими примесями имеющимися в сырье.

Оценка и перспектива применения гранулированных полупроводников и, в частности, кремния в термоэлектрических разработках велась с позиций специально разработанной модели полупроводника, представляющего собой систему из зерен – гранул с размером d_1 , имеющих, окружающую эти гранулы область межзеренных границ с размером d_2 . Если предположить, что все термоэлектрические характеристики (α , σ , χ) зерен – гранул и примыкающих к ним областей резко отличаются, то есть система фактически является вариантом описанного в литературе идеального термоэлектрического материала «электронный кристалл – фононное стекло». С другой стороны, очевидно, что эта система полностью совпадает с ситуацией имеющей место в гранулированном кремнии, где каждая частица – гранула кремниевого порошка, являясь «электронным кристаллом», покрыта наноразмерной пленкой двуокиси кремния, а значения всех вышеуказанных термоэлектрических величин у кремния и SiO_2 кардинально отличаются.

Эффективная проводимости, σ_{eff} , в данной системе будет:

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_2 \frac{d_1}{d_1 + d_2} + \sigma_1 \frac{d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1)$$

Эффективное значение теплопроводности χ_{eff} в данной системе будет:

$$\chi_{\text{eff}} = \frac{d_1 + d_2}{\frac{d_1}{\chi_1} + \frac{d_2}{\chi_2}} \quad (2)$$

И, наконец эффективное значение удельной термоэдс, α_{eff} , в системе гранула кремния – слой SiO_2 будет описываться как:

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_1 \frac{\chi_2 d_1}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} + \alpha_2 \frac{\chi_1 d_2}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} \quad (3)$$

Теперь, исходя из $Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi}$, запишем, комбинируя (1), (2) и (3), выражение для величины Z_{eff} :

$$Z_{eff} = \left[\alpha_1 \frac{\chi_2 d_1}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} + \alpha_2 \frac{\chi_1 d_2}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} \right]^2 \left[\frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_2 \frac{d_1}{d_1 + d_2} + \sigma_1 \frac{d_2}{d_1 + d_2}} \left[\frac{1}{d_1 + d_2} \left(\frac{d_1}{\chi_1} + \frac{d_2}{\chi_2} \right) \right] \right] \quad (4)$$

При имеющей место сильном различии свойств зерна – гранулы полупроводника и его МЗГ, или покрывающей их пленки окисла т.е. при $\sigma_1 \gg \sigma_2$, $\chi_1 \gg \chi_2$, $\alpha_1 > \alpha_2$, $d_1 \gg d_2$, получаем комбинированное выражение:

$$Z_{eff} = \frac{\alpha_1^2 \sigma_2}{\chi_2} \quad (5)$$

Из (5) следует, что Z_{eff} определяется через α_1 , χ_2 и σ_2 . То есть задача повышения Z сводится к увеличению удельной термоэдс зерен, а также к увеличению проводимости и уменьшению теплопроводности МЗГ или слоя SiO_2 . Исходя из малого значения χ_{SiO_2} , полученное выражение позволяет объяснить, почему Z у гранулированного кремния выше, чем у монокристаллического, а также поликремния спеченного из порошков.

Повышение Z напрямую связано также с повышением коэффициента Зеебека в грануле полупроводника и оно достигается за счет диспергирования вследствие возникающего тепловольтаического эффекта. Логичным представляется и определяющее влияние на величину Z проводимости наноразмерного окисного слоя, покрывающего соприкасающиеся гранулы. Таким образом, главной задачей – увеличения Z гранулированных Si является повышение проводимости слоя SiO_2 , происходящего за счет туннелирования носителей заряда от гранулы к грануле через упомянутую наноразмерную прослойку SiO_2 . Следовательно поиск технических решений надо сосредоточить на улучшение условий туннелирования. Важно отметить, что в работах, связанных с туннелированием носителей заряда в традиционных термоэлектрических материалах речь идет об обычном («гамовском») туннелировании электрона с вероятностью:

$$D^{(1)}(E) = \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(V-E)} x \right] \quad (6)$$

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

Нами была модифицирована модель «гамовского» туннелирования путём введения двух некогерентных прыжков электрона через промежуточное дефектное состояние внутри туннельного контакта. Было показано, что в этом случае:

$$D^{(2)}(E) = \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(V-E)} x/2 \right]. \quad (7)$$

Это по расчетам способствует увеличению проводимости туннельного контакта, но, к сожалению, незначительно, что было подтверждено нами экспериментом, в ходе которого на поверхности частиц кремния, покрытых, как было указано выше, наноразмерным слоем его двуокиси, снаружи упомянутой двуокиси кремния создавали «островковую» пленку из проводящих окислов переходных металлов, в частности, на основе двуокиси олова. То есть, для туннелирования носителей заряда через наноразмерный промежуток двуокиси кремния у каждого единичного зерна создавался своеобразный проводящий «плацдарм» из островка двуокиси олова также наноразмерной толщины.

Более перспективным представляется организация так называемого резонансного туннелирования носителей заряда через промежуточное состояние внутри самого туннельного контакта, то есть организация оптимальных условий туннелирования в самой нанотолщинной пленке SiO_2 .

Отметим, что резонансное туннелирование принципиально отличается от «гамовского» и, судя по аналитическому обзору посвященному последним достижениям в области композитных термоэлектрических материалов, предлагается нами для применения в термоэлектричестве впервые.

$$D^{(3)}(E) = \frac{1}{1 + \left(\tau_0 \Theta^2 / \hbar \right)^2 (E - E_N)^2}, \quad (8)$$

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.

Очевидно, что, поскольку $\Theta \gg 1$, ширина резонанса $E - E_N = \hbar / \tau_0 \Theta^2$ мала.

Расчёт проводимости туннельного контакта на основе выражения (8) даёт существенное увеличение по сравнению с расчетом на основе выражения(7), а тем более с расчетом по (6), особенно, если уровень E_N приведён к зонной структуре так, что $E_c^{Si} \leq E_N < E_c^{SiO_2}$:

Рассмотрен вопрос о технологиях, с помощью которых может быть реализовано резонансное туннелирование. Проведенные расчеты показали, что особый выигрыш могут дать примеси и дефекты, находящиеся непосредственно в слое двуокиси кремния.

Альтернативным путем создания в двуокиси кремния локальных энергетических уровней E_N может быть радиационное облучение, например, протонами, нейтронами или гамма-квантами.

В данной главе описана также конструкция изотипного преобразователя энергии, выполненного из смеси порошков кремния электронной чистоты и технического кремния, нагрев которого сопровождается получением электроэнергии (рис. 7).

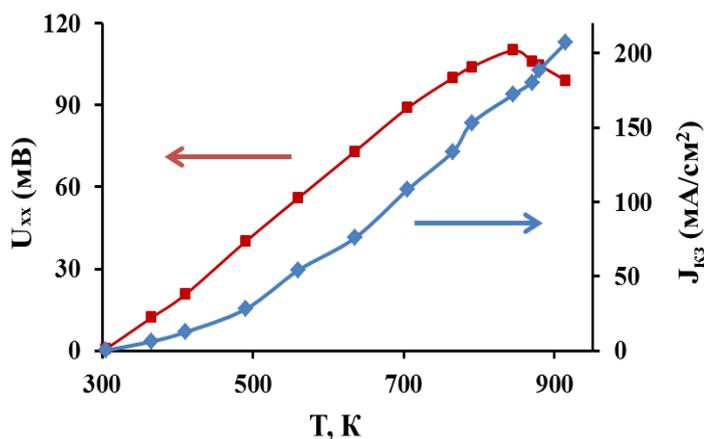
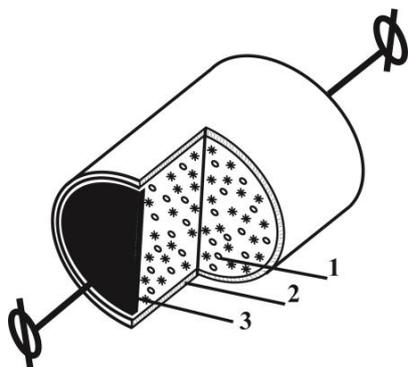


Рис. 7. Преобразователь тепловой энергия и температурные зависимости U_{xx} и J_{kz}

Видно что при нагреве одного из концов рабочего тела длиной всего 6 мм до $T = 900$ К, то есть при создании градиента температуры, прибор позволяет получить ток ~ 200 мА/см² при напряжении ~ 100 мВ. Конструкция защищена патентом РУЗ IAP № 05121.

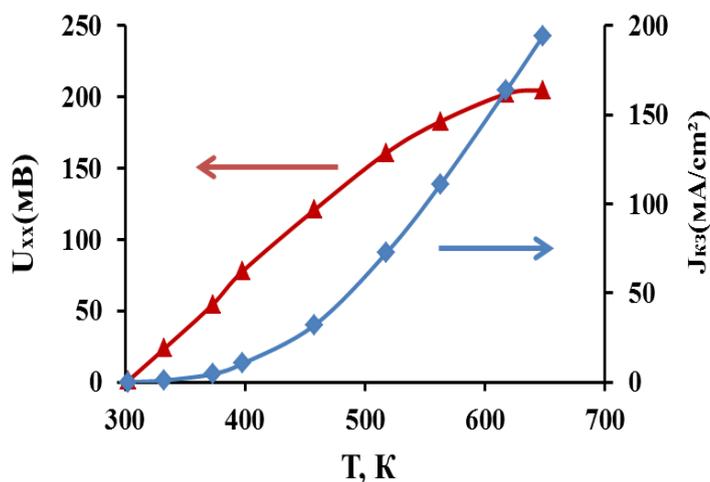
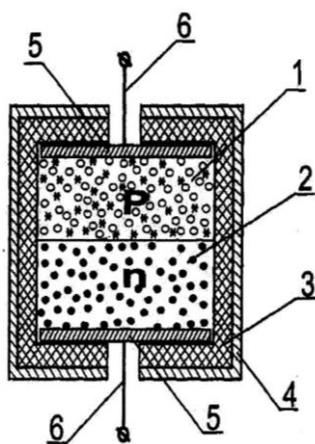
Описаны особенности последовательного и параллельного соединения единичных преобразователей в батарею (см. таблицу 1). Конструкция защищена патентом РУЗ IAP № 04824.

Таблица 1.

Последовательное и параллельное соединение преобразователей тепловой энергии.

нагрев	Параметры до соединения						Параметры при соединении			
	№1 (16)		№2 (17)		№3 (39)		последовательно		параллельно	
T (K)	U (мВ)	I (мкА)	U (мВ)	I (мкА)	U (мВ)	I (мкА)	U (мВ)	I (мкА)	U (мВ)	I (мкА)
500	13	180	25,5	362	26,4	208	67,5	247	21,5	745
650	24,4	688	54,4	2800	50,6	1036	128	1222	46,2	4570
800	34	1430	69,7	5970	61,6	2210	164	2570	59,1	9450
900	42,3	2360	70,9	7870	65,8	3548	184	4080	63,5	13250

Описан также новый тип преобразователя тепловой энергии, представляющий собой приведенные в механическое соприкосновение кремниевые порошки, изготовленные размолотом объемных материалов с различным типом проводимости. На рис.8 приведена схема и энергетические характеристики. Максимальные энергетические характеристики при температуре 650К составляют $U_{xx} \sim 200$ мВ и $J_{kz} \sim 200$ мА/см². Конструкция защищена патентом РУЗ IAP № 04831.



1 - p область, 2 - n область, 3 - корпус из диэлектрического материала,
4 - селективное покрытие, 5 - омический контакт 6 - вывод

Рис.8. Преобразователь тепловой энергии с p и n областями изготовленными из гранулированного кремния

В заключительной части главы 4 приведены данные, касающиеся поведения макета изотипного преобразователя тепловой энергии из гранулированного кремния в экстремальных условиях.

1. При помещении макета в жидкий азот ($T \sim 77\text{K}$) возникают ток и напряжение, со знаками противоположными тем, что наблюдаются при нагреве. Оба эти параметра в 10 раз меньше, чем при нагреве, например, до температуры, 500 К и связаны исключительно с термоэдс охлаждаемого контакта металл-кремний. То есть, аномально высокие значения удельной термоэдс и, соответственно U_{xx} и I_{kz} , при нагреве обусловлены суммарным воздействием термоэлектрического и тепловольтаического эффектов.

2. При облучении макета преобразователя тепловой энергии лазерным излучением большой мощности (398 Вт/см^2 , $\lambda=1064 \text{ нм}$) возникает ток с плотностью 357 мА/см^2 и напряжение 350 мВ. Прибор фиксирует подаваемые на него импульсы и из строя не выходит.

3. Из сопоставления результатов измерений макета преобразователя тепловой энергии до и после облучения γ квантами Co^{60} с дозой 10^9 рад, являющейся безусловно разрушающей для всех видов и типов полупроводниковых приборов и устройств, никаких изменений параметров у преобразователя тепловой энергии на основе гранулированного кремния не отмечено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые изучены электрофизические свойства кремния в гранулированном виде, то есть в порошкообразном состоянии. При нагреве образцов возникают темновое напряжение (U_{xx}) и ток ($I_{кз}$).

2. Показано, что U_{xx} в диапазоне температур 300-500 К нагреваемого образца из гранулированного кремния практически не зависит от величины внешнего давления с которым сжимается порошок, по крайней мере в диапазоне 20 – 200 МПа, в то же время сильно зависит от градиента температуры, но мало зависит от средней температуры образца. Ток же короткого замыкания $I_{кз}$, наоборот, зависит, от величины внешнего давления, так и от абсолютной величины градиента температуры и характера её распределения по длине образца.

3. Впервые измеренный коэффициент Зеебека (α) у образцов p и n-типа гранулированного кремния, изготовленных из порошка монокристаллического кремния марок КЭС 0,01 и КДБ 10, в диапазоне температур 300 ÷ 350 К более чем в 10 раз больше, чем у монокристаллического кремния и составляет ~ 500 мкВ/К, а величина теплопроводности ~ 16 Вт/м·К, что в 9 раз меньше, чем у монокристаллического кремния и в 4-5 раз меньше, чем у образцов спеченных из кремниевых порошков и приближается к значениям характерным для пористого кремния.

4. Показано, принципиальное отличие гранулированного кремния от его моно и поликристаллической модификаций, состоящее в том, что он представляет собой двухкомпонентную гетерогенную среду, в которой микроразмерные частицы – гранулы кремния со всех сторон покрытые наноразмерным слоем окисла фактически представляют собой систему, сочетающую в себе свойства «электронного кристалла и фононного стекла». Для этой среды, согласно которой главная термоэлектрическая величина определяется выражением $Z_{eff} = \frac{\alpha_1^2 \sigma_2}{\chi_2}$, где α_1 – коэффициент Зеебека самой

кремниевой гранулы, χ_2 - теплопроводность пленки SiO_2 , окружающей кремниевую гранулу и σ_2 – проводимость указанного окисла. Так как χ SiO_2 намного меньше чем у кремния следует, что Z у такой системы будет намного больше чем у моно и поликремния.

5. Расчетом показано, что повышение проводимости гранулированного кремния можно обеспечить путем организации резонансного туннелирования носителей заряда через нанотолщинную пленку SiO_2 для чего в запрещенной зоне окисла вблизи дна зоны проводимости необходимо создать введением примесей или радиационным воздействием локальные энергетические уровни E_N , удовлетворяющие соотношению $E_c^{Si} \leq E_N < E_c^{SiO_2}$, где $E_c^{SiO_2}$ - дно зоны проводимости SiO_2 , а E_c^{Si} - дно зоны проводимости кремния.

6. Впервые разработан преобразователь тепловой энергии, содержащий рабочее тело из гранулированного изотипного кремниевого материала с примесями, дающими в кремнии глубокие энергетические уровни. Измерения макета при нагреве до 900 К показали, что можно получить U_{xx} ~100 мВ, и

плотность тока $J_{кз} \sim 200 \text{ мА/см}^2$. Выявлены особенности соединения преобразователей тепловой энергии в батарею. Показано, что данное устройство может быть использовано для преобразования в электричество концентрированного солнечного излучения.

7. Впервые создан преобразователь тепловой энергии, выполненный в виде механически прижатых друг к другу областей, представляющих собой гранулированный кремний, изготовленный из кремния с различным типом проводимости. Максимальные энергетические характеристики при температуре 650К составляют $U_{кк} \sim 200 \text{ мВ}$ и $J_{кз} \sim 200 \text{ мА/см}^2$.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC
DEGREES DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 INSTITUTE
OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES**

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LAZER TECHNOLOGIES

ADILOV MUKHAMMADJON MASHARIBOVICH

THERMOELECTRIC PROPERTIES OF GRANULAR SILICON

01.04.04 –Physical electronics

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

TASHKENT – 2019

The subject of PhD dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number B2017.2.PhD/FM65.

Dissertation has been prepared at the Institute of Ion-Plasma and Laser technologies.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.iplt.uz) and on Information-educational portal «ZiyoNet» (<http://www.ziynet.uz>).

Scientific supervisor:

Ashurov Khatam Bakhronovich

Doctor of technical sciences, professor

Official opponents:

Egamberdiev Bakhrom Egamberdievich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Isakhanov Zinaobidin Abilpeyzovich

doctor of physical and mathematical sciences,
senior researcher

Leading organization:

**Institute of semiconductor physics and microelectronics
under the national university of Uzbekistan**

The defense will take place on «___» _____ 2019 at _____ at the meeting of the Scientific Council number DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str., Phone: (+99871) 262-42-54, e-mail: info@iplt.uz).

The doctoral dissertation is can be looked through in the Information-resource centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered №___) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str., Phone: (99871) 262-32-54.)

The abstract of dissertation is sent out on «___» _____ 2019.

(Mailing report № _____ on «___» _____ 2019).



S.S. Kurbanov

Deputy of chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher

D.T. Usmanov

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher



B.E. Umirzakov

Chairman of scientific Seminar under scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The importance and necessity of the topic of dissertation. Today, the energy supply is one of the major problems in the world. Hence, countless efforts are being made to improve the existing traditional energy sources as well as to find renewable, cost-effective, and environmentally friendly alternatives. One of the main research areas is direct electricity generation from natural or man-made heat using thermoelectric devices. These devices have been constructed from new type of thermoelectric materials, which usually have both «electronic crystal and phonon glass» properties. BiTe is one of such traditional thermoelectric materials. However, non-monocrystalline semiconductors such as silicon (Si) are considered as promising alternative to BiTe due to their low cost, abundance, and possibility to prepare by using well established growth methods. In this regard, it is important to investigate electro-physical, and especially thermoelectric properties of different types of Si materials to fabricate heat energy converters on their basis.

The purpose of the study. To investigate the electro-physical and thermoelectric properties of the granulated (powdered) silicon at wide range of temperatures between 300 and 1000 K in order to create a model of heat energy converter.

Scientific novelty of the research is:

electric current are formed by heating a mechanically compressed Si powders, i.e. particles 1-30 microns in size, between two metal contacts;

prepared samples by heating the silicon powder with particle sizes of 1-30 μm are tested under pressure under a pressure range of 0-250 MPa. It has been found that the U_{SY} amount does not depend on the applied pressure, but it depends on the temperature difference along the sample length;

in prepared samples by heating the silicon powder with particle sizes of 1-30 μm , I_{QT} strongly depends on the applied pressure with a pressure range of 0-250 MPa;

It is found that the thermal conductivity of the sample, i.e. prepared from granulated silicon by compressing at 100 MPa, is $\sim 16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ within the temperature range of 300-350 K, which is 9 times smaller than the thermal conductivity of the monocrystalline silicon;

The Zeebeck coefficient of the granulated silicon is found to be $\sim 500 \text{ mkV/K}$ in the temperature range of 300 to 350 K, which is 10 times the higher than those the monocrystalline silicon.

Scientific and practical importance of the research results.

The scientific significance of the research results is that when the isotype silicon sample is heated, i.e. prepared by the granulated and mechanically pressed silicon as well as in the initial raw material with 98.8% purity, electric current occurs through the formation of charge carriers due to absorption of photons by deep energy levels.

The practical significance of the research results is that the proposed scientific and technical solutions allow the usage of widely available and relatively inexpensive raw materials, including monocrystalline and polycrystalline silicon. In addition,

unused silicon wastes of industrial silicon can be used as source material to create thermoelectric materials.

Structure and volume of dissertation.

The dissertation consists of an introduction, 4 chapters, conclusion, list of references, 47 pictures and 7 tables. The volume of the dissertation is 119 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. М.Х. Ашуров, Б.М. Абдурахманов, М.М. Адилов, Х.Б. Ашуров. «Изотипный преобразователь тепловой энергии на основе микрозернистого кремния». ДАН РУз. 2010, № 3, С.45-49. (01.00.00, №7).

2. Б.М. Абдурахманов, М.М. Адилов, З.Н. Аладьина, Х.Б. Ашуров «Объемные и планарные р-п преобразователи тепловой энергии на основе микрозернистого кремния» ДАН РУз. 2010, №5, С.27-30. (01.00.00, №7).

3. В.М. Abdurakhmanov, М.М. Adilov, М.Н. Ashurov, Н.В. Ashurov, В.Л. Oksengendler «Thermovoltaic properties of microgranular silicon» Applied Solar Energy June 2011, Volume 47, Issue 2, pp 139-142. (01.00.00, №1; IF=0,39).

4. В.М. Abdurakhmanov, М.М. Adilov, М.Кh. Ashurov, Кh.В. Ashurov, S.E. Maksimov, В.Л. Oksengendler, Some peculiarities of thermoelectric transformation of energy in granulated semiconductors, Applied Solar Energy, April 2012, Volume 48, Issue 2, pp 79-83. (01.00.00, №1; IF=0,21).

5. Б.М.Абдурахманов, М.М.Адилов, М.Х.Ашуров, Х.Б.Ашуров, Ш.К.Кучканов, С.Е.Максимов, Б.Л.Оксенгендлер «Термоэлектрические характеристики гранулированных полупроводников с резонансным туннелированием носителей заряда для преобразования тепловой составляющей солнечного излучения» Гелиотехника. 2015. №4. С.22–27. (01.00.00, №1).

6. Б.Л. Оксенгендлер Б.М. Абдурахманов М.М. Адилов, Х.Б. Ашуров. «Новые аспекты термоэлектричества: электронные скуттерудиты». Гелиотехника 2017 й. №2, С.37-40. (01.00.00, №1).

7. Патент РУз IAP № 04824, «Преобразователь энергии» Абдурахманов Б.М., Адилов М.М., Ашуров Х.Б. Расмий ахборотнома, №1, 31.01.2014.

8. Патент РУз IAP № 04831, «Преобразователь энергии» Абдурахманов Б.М., Адилов М.М., Ашуров Х.Б., Аладьина З.Н. Расмий ахборотнома, № 2, 28.02.2014.

9. Патент РУз IAP № 04884, «Преобразователь солнечного излучения» Абдурахманов Б.М., Адилов М.М., Ашуров Х.Б. Расмий ахборотнома, №5, 30.05.2014.

10. Патент РУз IAP № 05121, «Тепловольтаический преобразователь энергии» Абдурахманов Б.М., Адилов М.М., Аладьина З.Н., Ашуров М.Х., Ашуров Х.Б. Расмий ахборотнома, №11, 30.11.2015.

II бўлим (II часть, part II)

11. М.М. Адилов. «Исследование термовольтаических кремниевых преобразователей тепловой энергии» Семинар Актуальные проблемы современной физики. Самарканд – 2010, С.98-101.

12. Б.М. Абдурахманов, М.Х. Ашуров, Х.Б. Ашуров, М.М. Адилов, С.Е. Максимов, Б.Л. Оксенгендлер, Ш.К. Кучканов, «Термоэлектрические

свойства гранулированного кремния: материаловедческий и радиационный аспекты», IX Международная конференция материаловедения и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе «Кремний 2012», 9-13 июля 2012, Санкт-Петербург. С.273.

13. Б.М. Абдурахманов, М.М. Адилов, Х.Б. Ашуров, «Термоэлектрические свойства эпитаксиальных кремниевых n-p структур», VI Международная конференция по физической электронике IPES-6, Ташкент, 23-25 октября 2013 г., С.128-130.

14. Б.М. Абдурахманов, Х.Б. Ашуров, М.М. Адилов, Ш.К. Кучканов, С.Е. Максимов, Б.Л. Оксенгендлер. «Роль резонансного туннелирования в усилении термоэлектрических свойств гранулированного кремния», X Конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний 2014», 7-12 июля 2014, Иркутск. С.99.

15. М.Х. Ашуров, Б.М. Абдурахманов, Х.Б. Ашуров, М.М. Адилов. «Проблемы и перспективы технологии кремниевых преобразователей фотоактивного и теплового излучения» Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари Республика илмий-амалий анжумани Андижон, 2015 йил 4-5 декабрь, С.171-173.

16. Х.Б. Ашуров, Б.М. Абдурахманов, Б.Л. Оксенгендлер, М.М. Адилов Гранулированный кремний: перколяционная проводимость путем резонансного туннелирования Международная конференция «Кремний 2016» 12-15 сентября 2016 г., Новосибирск, С.185.

17. Б.Л. Оксенгендлер, Б.М. Абдурахманов, Х.Б. Ашуров, М.М. Адилов, Ш.К. Кучканов, С.Е. Максимов, В.Н. Никифоров «Новые аспекты термоэлектричества: электронные скуттерудиты» Международная Конференция «Fundamental and applied problems of physics» Ташкент, 13-14 июня 2017, С.265-268.

18. М.М. Адилов, М.Х. Ашуров, Х.Б. Ашуров, Б.М. Абдурахманов. Влияние внешнего давления и температуры на некоторые свойства гранулированного кремния. Седьмая международная конференция по физической электронике. IPES – 7, Ташкент 2018 й 18-19 май, С.100.

Автореферат «Til va adabiyot ta'limi» журналі тахририятида тахрирдан
ўтказилди (12.11.2019 йил).

Босишга рухсат этилди: 16.11.2019 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 2,9. Адади: 100. Буюртма: № _____.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68.

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.