

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ,
АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.31.01.2019.FM./Т.03.05
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

СОДИҚОВ УСМОНХЎЖА ХАСАНОВИЧ

**КРЕМНИЙЛИ ФОТОЭЛЕМЕНТЛАРНИНГ СПЕКТРАЛ СЕЗГИРЛИК
СОҲАСИНИ БИНАР ЭЛЕМЕНТАР ЯЧЕЙКАЛАР ЁРДАМИДА
КЕНГАЙТИРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**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) of
physical-mathematical sciences**

Содиқов Усмонхўжа Хасанович

Кремнийли фотоэлементларнинг спектрал сезгирлик соҳасини бинар
элементар ячейкалар ёрдамида кенгайтириш 3

Содиқов Усмонхўжа Хасанович

Расширение спектральной области fotocувствительности
кремниевых фотоэлементов с бинарными элементарными ячейками ... 19

Sodikov Usmonkhujja Xasanovich

Expansion of the spectral region of photosensitivity of the silicon
photovoltaic cells with binary elementary cells..... 35

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 39

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ,
АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.31.01.2019.FM./T.03.05
РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

СОДИҚОВ УСМОНХЎЖА ХАСАНОВИЧ

**КРЕМНИЙЛИ ФОТОЭЛЕМЕНТЛАРНИНГ СПЕКТРАЛ СЕЗГИРЛИК
СОҲАСИНИ БИНАР ЭЛЕМЕНТАР ЯЧЕЙКАЛАР ЁРДАМИДА
КЕНГАЙТИРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**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 № В2019.1.PhD/FM86 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (tdtu.uz) ҳамда «Ziyonet» Ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Илиев Халмурат Миджидович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Далиев Хожакбар Султонович
физика-математика фанлари доктори, профессор (ЎЗМУ)

Арипов Хайрулла Кабилович
физика-математика фанлари доктори, профессор (ТАТУ)

Етақчи ташкилот:

Физика-техника институти

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети, Андижон давлат университети ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.31.01.2019.FM/Т.03.05 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «___» _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2-уй. Тел. (+99871) 246-46-00, факс (+99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@edu.uz. ТДТУ «Электроника и автоматика» факультети 232-хона).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2-уй. Тел./факс: (+99871) 246-03-41.

Диссертация автореферати 2019 йил «___» _____ да тарқатилди.

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

М.К. Бахадирханов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., академик

Б.Э. Эгамбердиев

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

Н.Ф. Зикриллаев

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. Жаҳон миқёсида бугунги кунда жадал ривожланаётган электроника ва фотоэнергетика соҳасидаги истиқболли йўналишлардан бири яримўтказгич материалларга III, V ва II, VI гуруҳ элементларини киришма сифатида танлаш йўли билан ҳажмда ва сиртда нанокластерлар, жумладан бинар элементар ячейкалар ҳосил қилиш муҳим аҳамият касб этмоқда. Амалий жиҳатдан кремнийда дастлабки материалнинг мавжуд хоссалардан тубдан фарқ қилувчи мутлақо бошқа хоссаларни эга таркибида бинар элементар ячейкалар (БЭЯ) бўлган янги материалларни кашф қилиш жаҳон илмий ҳамжамиятининг долзарб вазифасидир. Бунда янги материалнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини ўрганиш ҳамда юқори сифатли кремний материални тежаш муаммоси долзарб ҳисобланади. Шунингдек кристалл панжарада БЭЯ структуралар ҳосил қилиш йўли билан материалнинг функционал имкониятларини кенгайтирилиши ҳисобига электроника, материалшунослик ҳамда фотоэнергетика соҳаларида янги ярим ўтказгич асбоблар пайдо бўлишига олиб келади.

Ҳозирги кунда жаҳонда кремний материали негизида наноўлчамли кластерлар ҳосил қилиш билан материалнинг физик хоссаларини тубдан ўзгартириш, унинг хусусиятларини ўрганиш ва янги материал асосида фотоэлементлар ва инфрақизил соҳасида ишлайдиган датчиклар тайёрлашга катта аҳамият берилмоқда. Бу борада, мақсадли илмий тадқиқотларни, жумладан, қуйидаги илмий изланишлар муҳим вазифалардан бири бўлиб ҳисобланади: кремний материални III, V ва II, VI гуруҳ элементларидан киришма сифатида фойдаланиб паст ҳароратли диффузия усули билан легирлаш ва юзада емирилиш тўлиқ бартараф этилган намуналар олиш технологиясини жорий қилиш; $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ бинар ячейкаларни олиш учун III, V ва II, VI гуруҳ элементлари иштирокида кремний панжарасида жуфтлашадиган мақбул атомларини аниқлаш; панжарада $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ структуралар БЭЯ лар ҳосил қилиш орқали кремнийнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини бошқарилишини аниқлаш; $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ БЭЯга эга бўлган кремний намунасидаги қисқа туташув токи зичлиги ва салт кучланиши қийматларини инфрақизил нур соҳасида мавжуд бўлишини аниқлаш; $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ БЭЯга эга бўлган кремний материалдан фотоэлементлар ишлаб чиқиш ва яратиш.

2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегиясининг 1-илова 4.4 бандига мувофиқ белгиланган вазифалардан бири, илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш, олий ўқув юртли ва илмий-тадқиқот институтлари ҳузурида ихтисослаштирилган илмий экспериментал лабораториялар, юқори технология марказлари ва технопаркларни ташкил этиш орқали таълим ва фан соҳасини ривожлантириш

масаласини ҳал қилишга қаратилган¹. Шунини таъкидлаш зарурки, 2019 йил дастури бўйича қабул қилинган «Фаол инвестициялар ва ижтимоий ривожланиш йили» Давлат дастури ижросини таъминлашда илмий фаолиятни ривожлантиришга қаратилган бир қатор вазифалар қўйилди. Жумладан микроэлектроника ва яримўтказгичли асбоблар учун асосий яримўтказгич материали ҳисобланган кремнийнинг кристалл панжарасида ташқи таъсирларга сезгирлиги юқори бўлган «кремний-киришма атом» структуралардан таркиб топган янги турдаги яримўтказгичли материаллар олиш технологиясини ривожлантириш масалалари муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Бу борада яримўтказгичли кремний асосида ҳосил қилинган БЭЯ бирикмаларининг электрофизик ва оптик хусусиятларини чуқур тадқиқ қилиш ва шу жиҳатдан янги материал сифатида физик хоссаларини ўрганиш ва уларни кенг ишлаб чиқариш соҳасига тадбиқ қилиш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ПФ-4947-сон Фармони, 2017 йил 13 февралдаги «2017–2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ПҚ-2772 -сон ва 2017 йил 17 февралдаги «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисидаги»ги ПҚ-2789-сон Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши»нинг устувор йўналишига мувофиқ бажарилди.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Таниқли олимлардан J. Zhang, C.J. Glassbrenner (АҚШ), Rune S. Jacobsen (Дания) кремнийда танлов киришмаларнинг унинг оптик характеристикаларини ўзгаришини ўрганган бўлсалар, К.С. Напольский, А.В. Булгаков, О.Н. Королевалар (Россия) ярим ўтказгичларда бинар боғланишларни содир бўлиш шартлари ва уларнинг математик моделларини ўрганганлар. J. Valenta (Чехия) ва бошқалар томонидан кремнийдаги нанокластерларни материалнинг бевосита электрофизик ва фотоэлектрик параметрларига таъсири ўрганилган, М.Г. Мильдвидский, В.В. Чалдышевлар (Россия) наноўлчамли кластерни яримўтказгичлардаги роли мавзусида илмий тадқиқот ўтказганлар. Ярим ўтказгичларда гетероструктуралар ҳосил қилган Ж.И.Алфёров, кўк рангли фотодиод муаллифлари Исами Акасаки, Хироси Аmano ва Сюдзи Накамуре Нобель мукофотиغا сазовор бўлганлар.

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида /Расмий нашр/. ЎЗР Адлия вазирлиги. – Тошкент: «Адолат», 2017. Б. 26.

Ўзбекистонда диффузион технологияни ривожланишига ва уларни ярим ўтказгичли материалларда синаш бўйича академиклар М.С. Саидов, М.К. Баходирханов ва А.Т. Мамадалимовлар мактаблари катта ҳисса қўшдилар. Академик М.К. Баходирхонов ва унинг шогирдлари томонидан ўтиш гуруҳи ва нодир элементлар ҳамда II, III, V, VI элементларини кремнийга киришма атомлар сифатида айнан диффузия усули билан киритиш орқали уларнинг фундаментал параметрлари тубдан фарқ қиладиган янги материаллар авлодини яратишга муваффақ бўлинган². Буларда янги турдаги фотоэлектрик, магнит ва оптик ҳодисалар кузатилган. Шунингдек ушбу киришмаларнинг нафақат кремний юзасида, балки ҳажмида ҳам уларнинг концентрацияларини ошириш, уларнинг ўзаро БЭЯ (бирикмалар)ини ҳосил қилиш ва табиатини, жумладан материалларни инфракизил соҳада сезгирлигини ошириш бўйича ўрганиш олиб борганлар. Профессор И.Г. Атабаев и Н.А. Матчановлар паст ҳароратли диффузия ёрдамида германий-кремний қотишмасига киришма киритиш технологиясини яратганлар³.

Ўзбекистон олимларидан академик А.Т.Мамадалимов ва унинг шогирдлари томонидан кремнийга чуқур сатҳ ҳосил қилувчи киришма атомларини киритиш билан фототокнинг инфракизил нурлар, ҳарорат ва электр майдон таъсирида сўниш ҳодисалари аниқланган ва олинган натижалар илмий асослаб берилган. Шу билан бирга, Р.А.Муминов илмий мактабида литий билан легирланган кремний асосида ядро нурланиш детекторлари яратилган. Н.Юлдашев ва унинг шогирдлари томонидан бирикмали яримўтказгич материалларда люминисценция ҳодисаси аниқланган.

Бироқ улар томонидан ўтказилган нанокластерлар ҳосил қилиш тажриба тадқиқотлари фақат бир элемент асосида бўлиб, нанокластерларнинг икки ва ундан ортиқ киришма атомларидан ташкил топган структураси, хусусан кремнийда уларни бирикиб БЭЯлар ҳосил қилишининг мақбул термодинамик шароитлари ва янги материалнинг электрофизик ва фотоэлектрик параметрлари ҳанузгача ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация Тошкент давлат техника университети илмий тадқиқот режасининг Ф2-44 рақамли «Яримўтказгичларда киришма атомларни ўз-ўзидан ташкил қилиш механизмини тадқиқ қилиш ва уларни параметрларини бошқариш» (2012-2016 йй.) ва МК-37/2012 рақамли «Нановаризон структурага эга бўлган кремний асосида кенг спектрал сезгирликка ($0,1 \div 3$ мкм) эга бўлган тубдан янги фотоэлементларни ишлаб чиқиш ва тайёрлаш» (Ўзбекистон-Туркменистон 2013-2015 йй.) ҳамда ОТ-Ф2-50 рақамли «Кремний панжарасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ яримўтказгич бирикмаларининг элементар ячейкалари шаклланишининг илмий асосларини ишлаб чиқиш – фотоэнергетика ва

² М.К. Бахадырханов, А.Ш. Мавлянов, У.Х. Содиков Кремний с бинарными нанокластерами примесных атомов – как новый класс материалов для фотоэнергетики. III Межд.конф. по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах 14-15 ноября – Фергана. 2014 – с. 51-54.

³И.Г. Атабаев, Н.А. Матчанов и др. Низкотемпературная диффузия лития в твердые растворы кремний-германий ФТТ, 2001, В.12, С. 2140-2143.

фотоника учун истиқболли материаллар олишдаги янги ёндашув» (2017-2020 йй.) мавзусидаги фундаментал лойихалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади бинар элементар ячейкали кремнийнинг фотоэлектрик ва оптик хоссаларини аниқлаш, у асосида фотоэлементларнинг спектрал сезгирлик соҳасини кенгайтиришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

III, V ва II, VI гуруҳлар элементларини киришма сифатида табиатини ҳисобга олган ҳолда кремний панжарасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯлар ҳосил қилиш;

кремний панжарасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯ ларининг шаклланиши ва тақсимланишининг шартларини аниқлаш;

$A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурага эга БЭЯли кремнийнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини ўрганиш;

$A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурага эга БЭЯли кремний асосида $\lambda=1 \div 3$ мкм оралиғида ишлайдиган фотоэлементларни яратишнинг физик асосларини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида электроника саноатида фойдаланилган КЭФ-4,5; КДБ-0,1; КДБ-0,5; КДБ-1 (фосфор ва бор концентрацияси мос равишда $N_P=9,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ва $N_B=2,1 \cdot 10^{17}; 4,2 \cdot 10^{16}; 2,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) маркали кремний монокристаллари танлаб олинди. Киришма атоми сифатида III, V ва II, VI гуруҳ элементлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети кремний монокристаллида $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ БЭЯларга эга бўлган кластерларни ҳосил бўлиш қонунияти, III, V ва II, VI гуруҳ элементлари билан легирланган кремнийнинг электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятлари аниқлаш ва улар асосида фотоэлемент ишлаб чиқаришдан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Ишни бажаришда ва қўйилган масалани ўрганишда намуналарнинг фундаментал параметрларини аниқлаш бир ва тўрт зонд усули ёрдамида аниқланди. БЭЯ структурали кремний намуналарининг бошқа параметрларини аниқлашда ФСМ – 1202 Фурье-спектрометри, қайта янгиланган ИКС – 12 инфрақизил спектроскопияси ва Infram-I русумдаги инфрақизил электрон микроскопи ҳамда фотоэлемент параметрлари учун UT81, Mastech MS8250D ва DT 9205 рақамли ўлчов асбоблари фойдаланилган. Кремний панжарасидаги БЭЯ структураларининг ҳолати SEM EVO MA 10 (Carl Zeiss) сканерловчи электрон микроскоп ва Aztec Energy Advanced X-act (Oxford Instruments) рентгенструктурали таҳлил ва XRD Empyrean (PAAnalytical) кукунли рентген дифрактометр каби замонавий усуллар ёрдамида тадқиқ қилинган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

киришма сифатида III, V ва II, VI гуруҳ элементларининг параметрларини таҳлил қилиш орқали мақбул термодинамик шароитда кремний панжарасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурали бинар элементар ячейкалар (БЭЯ) ҳосил бўлиши илмий асосланган;

киришма атомлари концентрациясини ошириш асосида кремний панжарасида $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯлар ассоциацияси ҳамда $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ нанокристаллар ҳосил бўлиши илмий асосланган;

паст ҳароратли диффузия усулида III, V ва II, VI гуруҳ элементларининг кремний панжарасида бирикиши натижасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯлар ҳосил қилиш технологияси яратилган;

диффузия усулида юза емирилиши бартараф этилган кремний намуналари олиш имконини берувчи ҳароратни босқичма-босқич ошириш йўли билан коэффициент диффузияси кичик бўлган III, V гуруҳ элементларини киритиш технологияси ишлаб чиқилган;

$Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ структурага эга БЭЯли кремнийнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини бошқарилиши аниқланган;

$Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯга эга бўлган кремний материалдан фотоэлементлар яратилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

кремний кристалл панжарасида III, V ва II, VI гуруҳ элементларини киришма атомлари сифатида ишлатилиб, уларнинг табиатига боғлиқ равишда $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯларини шакллантиришнинг технологияси ишлаб чиқилган ва тубдан фундаментал, электрофизик ҳамда фотоэлектрик параметрлари фарқ қилган намуналар олинган;

кремнийда $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯларнинг ҳосил бўлиш табиати ва уларнинг концентрациясини бошқариш ҳисобига кремнийнинг ташқи таъсирларга нисбатан сезгирлигини ошириш усули кўрсатилган бўлиб, бу ҳолат инфрақизил нурлар соҳасида самарали бўлганлиги аниқланган;

III, V ва II, VI гуруҳ киришма атомларига эга бўлган кремний асосида ИҚ нур чегарасида ишлайдиган фотоэлементлар яратилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги маълумотларни ўлчаш ва ишлов беришда бир бирига боғлиқ бўлмаган усулларининг мажмуасидан фойдаланилган, шунингдек, кремнийда панжарасида шаклланган БЭЯ ларнинг ҳолатини сканерловчи электрон микроскоп, кукунли рентген дифрактометр, рентген спектрал таҳлил ва инфрақизил микроскоп ёрдамида ўрганилганлиги билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кремний панжарасида $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯларни ҳосил қилиш, уларни концентрациясини ошириш ва жойлашувини бошқарилиши туфайли локал соҳаларда электронлар энергетик структурасининг қайта тақсимланганлиги билан изоҳланган.

Тадқиқот натижасининг амалий аҳамияти III, V ва II, VI гуруҳ киришма атомларининг БЭЯлари асосида сезгирлик соҳаси инфрақизил ва ультрабинафша оралиқ томон кенгайтирилган фотоэлементлар ва фотоқабулқилгичлар ишлаб чиқишда қўллаш мумкинлиги билан изоҳланган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Кремний кристалл панжарасида БЭЯ структуралар ҳосил қилиш билан янги материал олиш ва фотоэлементларнинг спектрал сезгирлик соҳасини БЭЯ структуралар ёрдамида кенгайтириш асосида:

III, V ва II, VI гуруҳлар элементларининг кремний панжарасида бирикиши натижасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯлар ҳосил қилиш технологияси «FOTON» акциядорлик жамиятида инфрақизил нурлар соҳасидаги сезгирлиги

катта бўлган янги материал олишда қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 25 августдаги 02-1876-сон маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланилиши кремний асосида яратилаётган инфрақизил датчикларнинг спектрал диапазонини ошириш имконини берган;

коэффициент диффузияси кичик бўлган III, V гуруҳ элементларини киришма сифатида ҳароратни босқичма-босқич ошириш йўли билан киритиш технологияси «FOTON» акциядорлик жамиятида кремнийни легирлашда фойдаланилган. («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 25 августдаги 02-1876-сон маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланилиши кремнийни легирлаш жараёни сирт емирилишларисиз содир бўлиши имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси 7 та халқаро ва 10 та республика миқёсидаги конференцияларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 9 та илмий иш чоп этилган ва барчаси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўрт боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 120 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади, вазифалари, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши бўйича маълумотлар берилган.

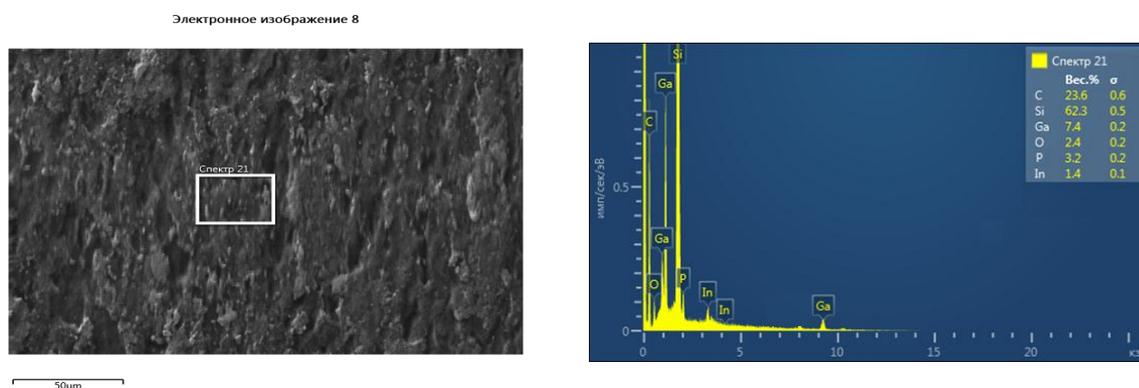
Диссертациянинг «**Ҳозирги замон энергетикасини муаммолари**» деб номланган биринчи бобида илмий адабиётларда келтирилган ҳозирги энергетика соҳаси, қуёш энергиясидан фойдаланиш ва ундан электр энергия ишлаб чиқариш ҳақидаги маълумотлар, шунингдек мавжуд фотоэлементлар ишлаб чиқариш технологияси ва уларнинг фойдали иш коэффициенти таъсир қилувчи омиллар бўйича муаммолар таҳлил этилган. Мавжуд назарий ва тажрибавий маълумотлар таҳлили асосида тадқиқотнинг вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг «**Кремнийда $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯлар ҳосил қилиш технологияси**» деб номланган иккинчи бобида кристалл кремнийни диффузион легирлашнинг назарияси, тегишли концепцияси ҳамда технологик хусусиятларини киришмавий ва туб атомлар диффузия механизмлари ўрганишга бағишланган, ҳамда дефектларни ўрни ва уларни киришмалар билан ўзаро таъсири баён қилинган. Дастлабки кремний кристалли параметрлари ва III, V ва II, VI гуруҳлар элементларини киришма сифатида уларнинг табиатидан келиб танлашга ва кремний панжарасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$

структурали БЭЯлар ҳосил қилиб, тубдан янги электрофизик параметрга эга кремний олиш технологиясига бағишланган.

Таклиф қилинаётган усулда кремний панжарасига III, V ва II, VI гуруҳ элементларини киришма сифатида легирлаш жараёни янги паст ҳароратли диффузия технологияси асосида ҳавоси 10^{-5} мм см.уст.гача сўриб олинган цилиндр шаклидаги кварц ампулаларида $1150\div 1250^{\circ}\text{C}$ ҳарорат оралиғида $30\div 180$ минут мобайнида амалга оширилган ва намуна кристалл юзасида емирилиш содир бўлмаган. Намуналарнинг фундаментал параметрлари бир ва тўрт зонд усули ёрдамида аниқланган. БЭЯ структурали кремний намуналарининг бошқа параметрларини аниқлашда ФСМ – 1202 Фурье-спектрометри, қайта янгиланган ИКС – 12 инфрақизил спектроскопияси ва Infram-I русумдаги инфрақизил электрон микроскопи ҳамда фотоэлемент параметрлари учун UT81, Mastech MS8250D ва DT 9205 рақамли ўлчов асбоблари фойдаланилган. Кремний панжарасидаги БЭЯ структураларининг ҳолати SEM EVO MA 10 (Carl Zeiss) сканерловчи электрон микроскоп ва Aztec Energy Advanced X-act (Oxford Instruments) рентгенструктурали таҳлил ва XRD Empyrean (PANalytical) кукунли рентген дифрактометр каби замонавий усуллар ёрдамида тадқиқ қилинган (1-расм).

Учинчи боб «Кремний панжарасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{IV}$ структурали БЭЯ ларнинг ҳосил бўлиши физик асослари»га бағишланиб, унда БЭЯларнинг кремний материали юзаси ва ҳажмида ҳосил бўлиш шартлари ва уларнинг концентрация микдорини ошириш усулларини ўрганиш натижалари келтирилган.



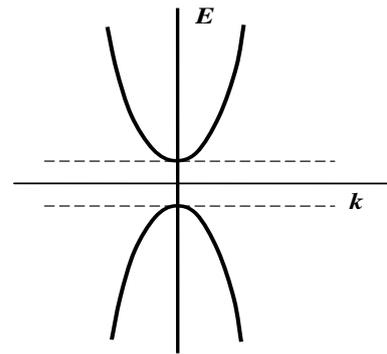
1-расм. Si<GaP> структурали БЭЯ лар ҳосил қилинган намуна (SEM EVO MA 10 (Carl Zeiss) сканерловчи электрон микроскоп).

Кремний панжарасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ бирикмаларнинг ҳосил бўлиш табиати ўрганилди. 1 жадвалда энг кўп тарқалган $A^{III}B^V$ бирикмали ярим ўтказгичлар рўйхати келтирилган⁴. Жадвал маълумотидан кўриниб турибдики, муҳим фундаментал параметрлардан ҳисобланган ҳаракатчанлик юқорилиги ва тўғри ўтиш шакли кремний материали учун тегишли эмас ва бу унинг фотоэнергетика ва оптоэлектроника соҳаларида қўлланишини чеклайди (2-расм).

⁴ Bakhadyrhanov M.K., Sodikov U.X., Iliev Kh.M., Tachilin S.A., Tuerdi Wumaier Perspective Material for Photoenergetics on the Basis of Silicon with Binary Elementary Cells. USA. Journal of Materials Physics and Chemistry, 2018, Volume 1 doi:10.63019/mpc.v1i2.493. pp. 1-7.

1-жадвал

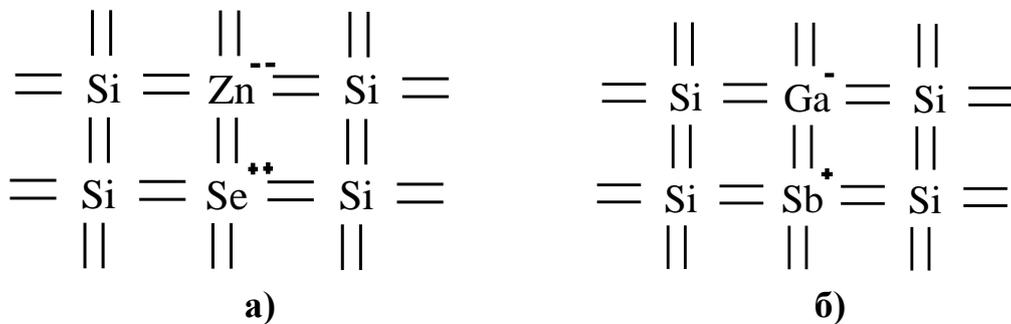
A ^{III} B ^V ярим ўтказгичлар	Таъқиқланган соҳа кенлиги, E _g , эВ	Электрон ҳаракатчанлик, см ² /В·с
InSb	0.18	100 000
InAs	0.36	30 000
InP	1.26	4 600
GaSb	0.73	5 000
GaAs	1.42	9 000
GaP	2.26	110
AlSb	1.65	200
AlP	2.50	
Si	1.12	1 300



2-расм. Энергетик сатҳларнинг тўғри ўтиш графиги

Олинган намуналарда БЭЯларнинг жойлашуви ва тартибини бошқариш ҳамда концентрация миқдорини ошириш термодинамик шароитни ўзгартириш усулига боғлиқ бўлиши аниқланди. Олинган намуналарда бойитилган БЭЯ қатлами бир неча ўн микронни ташкил этди ва бу иш мақсади учун етарли деб ҳисобланди. 3-расмда дастлабки намуна КДБ-1 маркали кремний монокристали панжарасида Si₂A^{III}B^V ва Si₂A^{II}B^{VI} структурали БЭЯларнинг ҳосил бўлиши кўрсатилган.

III, V ва II, VI гуруҳлар элементларини киришма сифатида БЭЯларни ҳосил қилиши учун оптимал жуфтликлари танлаб олинишида уларнинг табиати ва асосий параметрларида келиб чиқиб қуйидаги шартлар инобатга олинди:



3-расм. Кремний панжарасида Si₂A^{III}B^V ва Si₂A^{II}B^{VI} структурали БЭЯларнинг ҳосил бўлиши.

$|\Delta Z| = 2Z_{\text{Si}} - (Z_{(II)III} + Z_{V(VI)}) \leq 0,2 Z_{\text{Si}}$, бу ерда Z_{Si} – кремний атомининг ковалент радиуси, $Z_{(II)III}$ ва $Z_{V(VI)}$ – мос ҳолда III, V ва II, VI гуруҳ элементлари атомларининг ковалент радиуслари;

III, V ва II, VI гуруҳ атомлари электроманфийлик кўрсаткичи кремний атомлари электроманфийлигига жуда яқин бўлиши керак;

кремний панжарасида жойлашган икки қўшни киришмаларнинг валент электронлари йиғиндиси саккизга тенг бўлиши керак;

$r_m \leq 100R$, бу ерда r_m – диффузиядан сўнг III, V ва II, VI гуруҳ элементлари атомлари орасидаги масофа, R – кремнийнинг доимий панжара қиймати (5,4 Å).

2-жадвалда юқоридаги шартларга жавоб берадиган ва кремний монокристал материали юзаси ва ҳажмида БЭЯ лар ҳосил қилиш имконини берадиган III, V гуруҳ элементлари рўйхати киришма атомлари сифатида берилган⁵.

2 - жадвал

A ^{III} B ^V	r _{III+r_V} , Å	Δr, Å	Гуруҳ	A ^{III} B ^V	r _{III+r_V} , Å	Δr, Å	Гуруҳ
BP	1,98	0,36	4	GaP	2,35	0,01	1
BA _s	2,09	0,25	3	GaAs	2,46	0,12	2
BS _b	2,29	0,15	2	GaS _b	2,66	0,32	3
BB _i	2,38	0,06	1	GaB _i	2,77	0,43	4
AlP	2,35	0,01	1	InP	2,60	0,26	3
AlAs	2,46	0,12	2	InAs	2,76	0,42	4
AlS _b	2,66	0,32	4	InS _b	2,96	0,62	4
AlB _i	2,77	0,43	4	InB _i	3,02	0,68	4
2Si	2,34	0	-				
Zr _{Si₃} , Å	0,234	-	-				

Демак, III, V ва II, VI гуруҳлар элементлари кремний панжарасида БЭЯлар ҳосил қилганда туб материалнинг тетраэдрик боғланиши бузилмайди ва панжарада мустаҳкам ион-ковалент боғланишлари вужудга келади. Мос ҳолда III ва V гуруҳ учун иккита кремний атомига битта манфий ионга эга III гуруҳ элементи ва битта мусбат ионга эга V гуруҳ элементи тўғри келади, яъни панжарада янги Si₂A⁻B⁺ структурали БЭЯ ҳосил бўлади. Шунингдек II ва VI гуруҳ учун иккита кремний атомига битта иккиланган манфий ионга эга II гуруҳ элементи ва битта иккиланган мусбат ионга эга VI гуруҳ элементи тўғри келади, яъни панжарада ҳали ўрганилмаган Si₂A⁻B⁺⁺ структурали бинар ячейкалар ҳосил бўлади. Диффузия жараёнида ва кўшимча қиздиришда тугунларга жойлашган A⁻, B⁺ ва A⁻, B⁺⁺ ионлар бир-бирига яқинроқ жойлашишга ҳаракат қилади ва шунинг учун экспериментал йўл билан ҳар бир ҳолат учун алоҳида оптимал термодинамик шароит танланади.

5-расмда II ва VI гуруҳ элементларидан мос ҳолда Zn ва Se киришма атомларининг кремний панжарасида БЭЯлар ҳосил қилиш механизми берилган. Легирлаш жараёни киришмаларнинг паст ҳароратли диффузия технологиясидан фойдаланган ҳолда босқичма-босқич амалга оширилади:

биринчи босқичда VI гуруҳ элементи Se киришма сифатида танлаб олинади. Бунда киришманинг кремнийдаги диффузия коэффиценти ва эрувчанлиги қуйидаги формулалардан топилади:

$$D_{Se} = 9 \cdot 10^{-1} \exp(-2,44 / kT) \quad (1)$$

$$N_{Se} = 1,4 \cdot 10^{25} \exp(-2,3 / kT) \quad (2)$$

⁴ Bakhadyrhanov M.K., Sodikov U.X., Iliev Kh.M., Tachilin S.A., Tuerdi Wumaier Perspective Material for Photoenergetics on the Basis of Silicon with Binary Elementary Cells. USA. Journal of Materials Physics and Chemistry, 2018, Volume 1 doi:10.63019/mpc.v1i2.493. pp. 1-7.

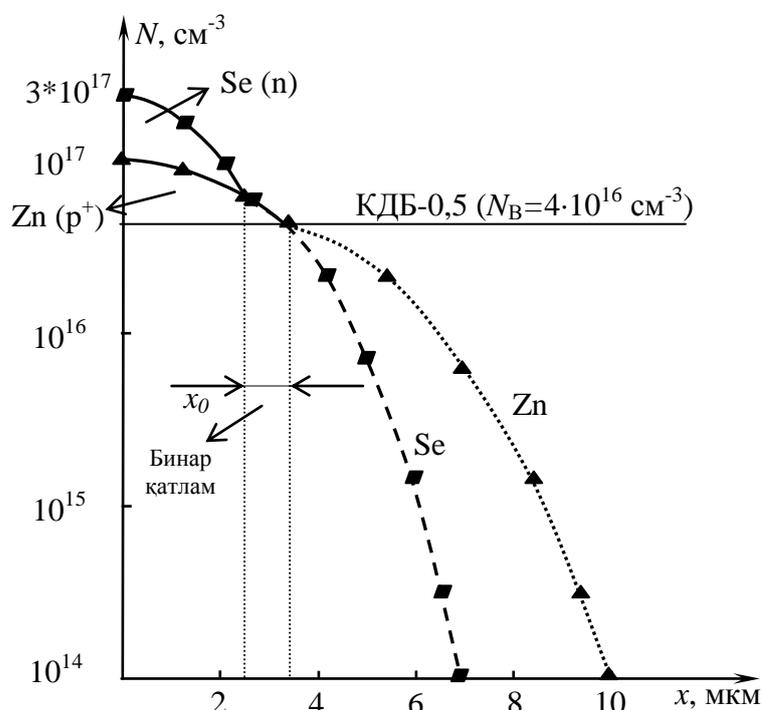
Кремний намуналари ва Se киришмаси жойлаштирилган кварц найчаси ҳавоси сўриб олинган ҳолда горизонтал печкада хона ҳароратидан бошлаб қўйилиб, 1200÷1250 °С ҳароратда 30-60 минут қиздирилди ва диффузия жараёнидан сўнг секин металлда совитилди.

иккинчи босқичда II гуруҳ элементи Zn олинди:

$$D_{Zn} = 1 \cdot 10^{-1} \cdot \exp(-1,5/kT) \quad (3)$$

$$N_{Zn} = 4,0 \cdot 10^{21} \exp(-1,6/kT) \quad (4)$$

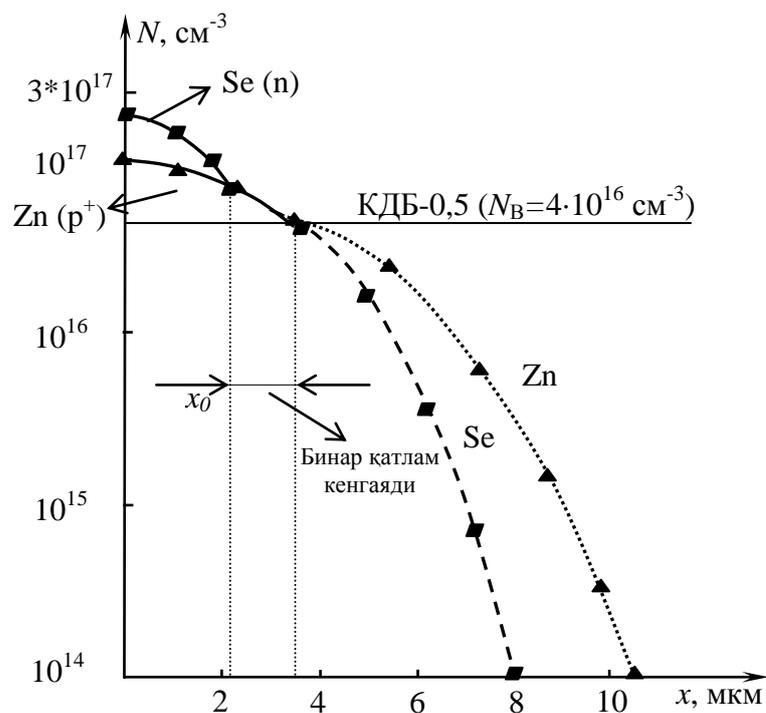
Si<B,Se> намуналари ва Zn киришмаси жойлаштирилган кварц найчасининг ҳавоси сўриб олинган ҳолда горизонтал печкада 1200÷1250 °С ҳароратда 2 соат қиздирилади ва диффузия жараёнидан сўнг секин совитилади. Диффузия жараёнида қандай қилиб Si₂ZnSe структурали БЭЯлар ҳосил бўлишини қуйидаги график ёрдамида тасвирлаш мумкин (4-расм).



4-расм. Кремний монокрсталида Si₂ZnSe структурали БЭЯлар ҳосил қилиш.

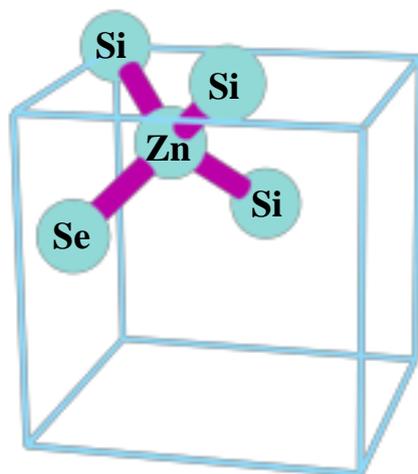
Шуни қайд этиш керакки, мавжуд диффузион технология усулида ҳам кремний параметрларини солиштириш учун III, V ва II, VI гуруҳ элементларидан киришма сифатида фойдаланиб, бу намуналар параллел равишда тайёрланди.

Учинчи босқич Si₂ZnSe структурали БЭЯларнинг концентрациясини ошириш ҳисобланиб, бунда паст ҳароратларда намунани қўшимча қиздириш жараёни амалга оширилади. Паст ҳарорат кўрсатқичи 500÷800 °С оралиғида бўлиб, қиздириш учун 4÷6 соат талаб қилинади. Бундан асосий мақсад иккиланган манфий ионга эга II гуруҳ элементи ва иккиланган мусбат ионга эга VI гуруҳ элементларини ўзаро бирикишига шароит яратиб беришдан иборат (5-расм). 5-расмдан кўриниб турибдики, БЭЯлар қатлами кенгайди, яъни уларни концентрацияси ортади.



5-расм. Si<B,ZnSe> намуналарини кўшимча қиздириш $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 4$ соат

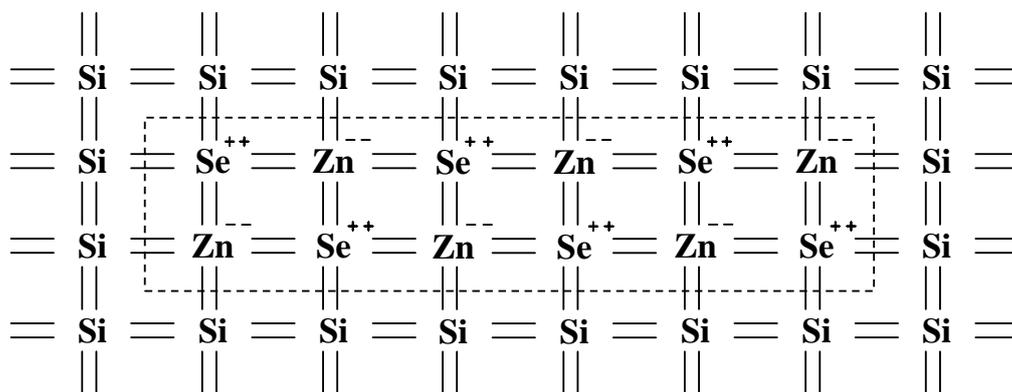
6-расмда таклиф қилинаётган Si_2ZnSe структурали БЭЯ кремний панжарасида жойлашуви модели келтирилган. Моделдан кўриниб турибдики, янги материал на ковалент, на ион боғланиш ҳосил қилган, балки ион-ковалент кўринишига эга мустақкам боғланиш олинган.



6-расм. Кремний панжарасида Si_2ZnSe структурали БЭЯлар ҳосил бўлиши модели

Технологияни такомиллаштириш даражасида $A^{II}B^{VI}$ концентрацияларини ошириб (максимал 10^{16} см^{-3} етади) билан кремний панжарасида $\text{Zn}^{--}\text{Se}^{++}$ нанокластерлари пайдо бўлишига эришиш мумкин (7-расм). Бу тубдан янги материал бўлиб, у фундаментал хоссаларини такрорламайди ва ундаги жараёнлар дастлабки намунадаги каби бўлмайди. Жумладан янги материалнинг юзаси ва ҳажмининг локал жойларида $\text{Zn}^{--}\text{Se}^{++}$ нанокластерлари ҳисобига тўғри ўтишлар юзага келади ва ҳаракатчанлик, заряд ташувчиларнинг яшаш вақти ҳамда ёруғлик ютилиш коэффициентлари ҳам бошқача бўлади. Демак бир

кристалл панжарасида туб материал Si, Si<B,Se>, Si<B,Zn> ва Si₂ZnSe структуралари ҳамда Zn⁻Se⁺⁺ нанокристаллининг хусусиятлари намоён бўлади, яъни ҳар хил таъқиқланган соҳага эга янги материал ҳосил қилинади.

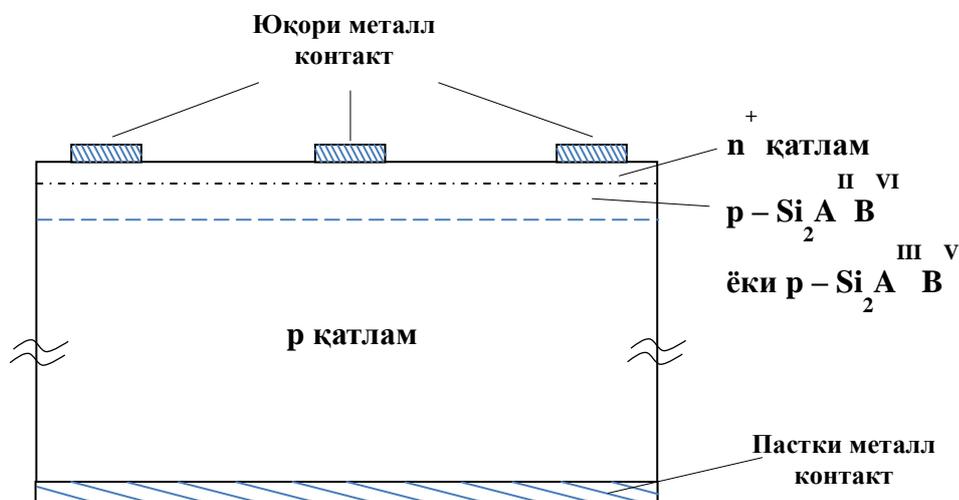


7-расм. Кремний панжарасида Zn⁻Se⁺⁺ (A^{II}B^{VI}) типдаги БЭЯлардан таркиб топган нанокластерларнинг жойлашиши.

Шундан келиб чиқиб янги материал асосида фотоэнергетика соҳасида фотоэлементлар тайёрлаш ва оптоэлектроникада янги синф инфрақизил датчиклари ҳамда кремний материали асосида ёруғлик диодлари ишлаб чиқилиши мумкин.

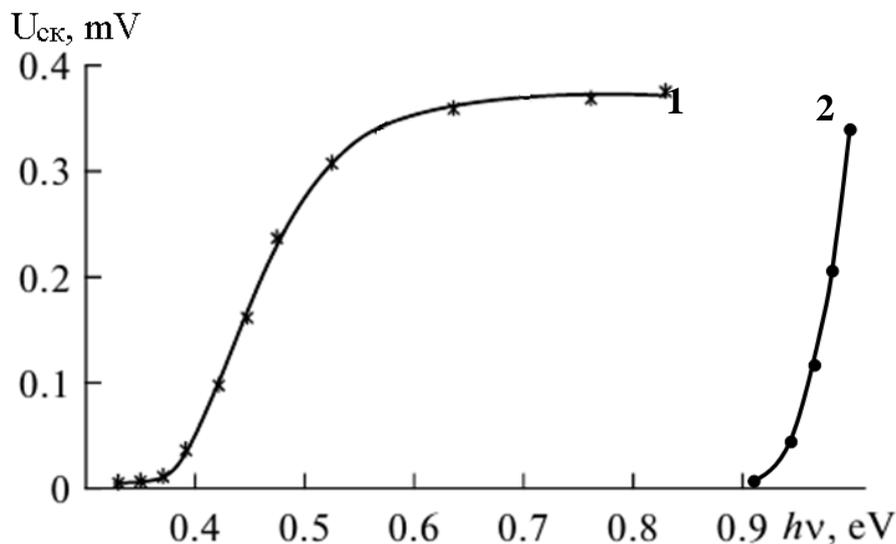
Диссертациянинг «A^{III}B^V ва A^{II}B^{IV} БЭЯли кремний асосида яратилган фотоэлементларнинг хусусиятлари ва асосий параметрларини тадқиқ қилиш» деб номланган тўртинчи бобида таклиф қилинаётган материал асосида янги турдаги инфрақизил ва ультрабинафша нурлар соҳасида сезгирлиги оширилган фотоэлементларни олиш ва параметрларни ўлчаш ёритиб берилган. Материалнинг ўзига хос томонлари ўрганилиб, келажакда ундан инфрақизил нур соҳасида ишлайдиган ўта сезгир датчиклар ва кремний асосида ёруғлик диодлари яратиш таклифлари берилган.

Таклиф қилинаётган материал, яъни кремний панжарасида асосида Si₂A⁻B⁺, Si₂A⁻B⁺⁺ структурали БЭЯлар ҳосил қилинган намуналардан фойдаланиб лаборатория фотоэлементлари ишлаб чиқилди ва тадқиқ этилди. Янги типдаги фотоэлементлар қуйидаги структурага эга бўлади (8-расм).

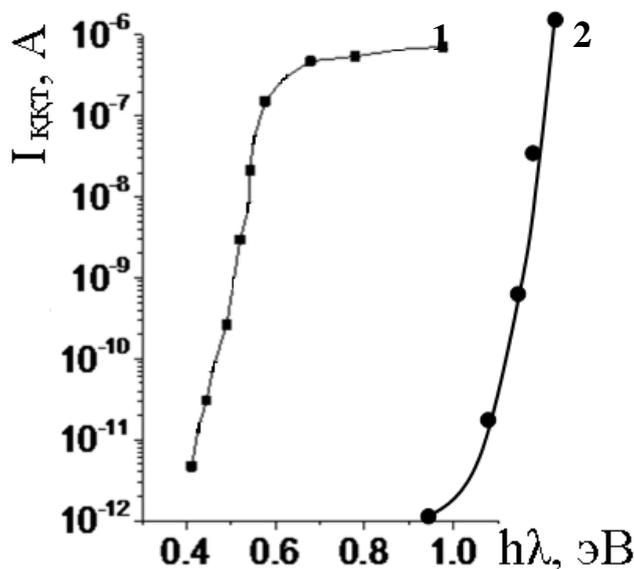


8-расм. Кремний асосидаги янги Si₂A^{III}B^V, Si₂A^{II}B^{VI} структурали БЭЯли фотоэлементлар

9-расмнинг паст ҳароратли диффузия усулида легирлаш йўли билан Si_2ZnSe структурали БЭЯ ҳосил қилинган материалдан тайёрланган фотоэлемент билан таркибида БЭЯ йўқ анъанавий диффузия усулида легирланган кремний материалдан яратилган фотоэлементларнинг салт кучланиш ($U_{ск}$) ва қисқа туташув ток ($I_{ккт}$) қийматининг инфрақизил тўлқин энергиясига боғлиқлик спектрал характеристикаси келтирилган.



а)



б)

9-расм. Кремнийли фотоэлементнинг $U_{ск}$ (а) ва $I_{ккт}$ (б) параметрларини 1 см^2 юзада қуввати $5 \cdot 10^{-6}$ Вт га тенг бўлган ИҚ нур соҳасидаги спектрал боғлиқлик графиги:
 1 – янги технология асосида тайёрланган Si_2ZnSe структурали БЭЯ мавжуд фотоэлемент,
 2 – мавжуд технология асосида тайёрланган фотоэлемент.

Тажриба натижалари шуни кўрсатадики, БЭЯ структурага эга материаллар асосида тайёрланган фотоэлементларнинг инфрақизил нурларни сезиш

бўсағавий қиймати ҳам ток ҳам кучланиш учун кичик қийматни 0,4 эВ ни ташкил этади. Анъанавий диффузия усулида легирланган кремний материалдан яратилган фотоэлементлар учун бу қиймат 0,9 эВ га тенг. Шундай қилиб, БЭЯ структурага эга фотоэлементларнинг инфрақизил соҳада сезгирлик даражаси мавжуд фотоэлементлар билан солиштирилганда ўртача 2,5 марта юқори эканлиги аниқланди.

Диссертация ишимни бажаришда яқиндан кўмак ва кўрсатилган ҳар томонлама ёрдам учун устозимиз академик М.К. Баҳодирхоновга, илмий раҳбаримга ва Тошкент давлат техника университети «Рақамли электроника ва микроэлектроника» кафедраси жамоасига, шунингдек, Қуёш энергияси халқаро институти раҳбариятига раҳмат айтаман.

ХУЛОСА

Диссертация ишини бажаришда бинар элементар ячейкали кремнийнинг фотоэлектрик ва оптик хоссаларини аниқлаш, у асосида фотоэлементларнинг спектрал сезгирлик соҳасини кенгайтиришни тадқиқ этиш ва олинган натижаларнинг таҳлил қилиш натижасида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Монокристалл кремний намунасини III, V ва II, VI гуруҳлар элементлари билан юқори ҳароратли легирлаш натижасида юза емирилишини кузатилинмаган тубдан янги материал олинган.

2. Кремний панжарасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯ шаклланиши имкониятларини илмий асослаш ва бунда III, V ва II, VI гуруҳлар элементларининг фундаментал электрофизик ва кимёвий параметрларини илмий тадқиқ қилинган.

3. Кремний панжарасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯ ларининг шаклланиши ва намуна чуқурлигида уларнинг тақсимланишининг оптимал термодинамик шароитларини, уларнинг таркиби ва структурасига боғлиқлиги аниқланган.

4. Экспериментал усул билан бундай элементар ячейкаларнинг ҳар хил таркиби ва структурасига эга бўлган кремнийнинг электрофизик, фотоэлектрик ва оптик хусусиятлари аниқланган.

5. $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯ ларнинг ҳар хил таркиби, структураси, концентрацияси ва тақсимланишига эга бўлган кремний асосида янги синфдаги фотоэлементларни яратишнинг физикавий асослари ишлаб чиқилган.

6. $\lambda=1 \div 3$ мкм бўлган диапазонда фотоэлементларнинг спектрал соҳа сезгирлигини тадқиқ қилинган, асосий фундаментал параметрлари ва ФИКи ҳисобланган, бунда $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ БЭЯга эга бўлган монокристалл кремний намунасидаги қисқа туташув токи катталиги ва салт кучланишининг қийматларида инфрақизил нурнинг салмоқли ҳиссаси мавжуд бўлиши аниқланган.

7. $Si_2A^{III}B^V$ ва $Si_2A^{II}B^{VI}$ структурали БЭЯга эга бўлган монокристалл кремний асосида самарадор фотоэлементларни олишга имкон берадиган БЭЯ ларнинг оптимал тури, структураси ва концентрацияси аниқланган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.31.01.2019.FM/Т.03.05 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ, АНДИЖАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

СОДИКОВ УСМОНХУЖА ХАСАНОВИЧ

**РАСШИРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ
ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ
С БИНАРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАРНЫМИ ЯЧЕЙКАМИ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**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 № В2019.1.PhD/FM86.

Докторская диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (tdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net.uz).

Научный руководитель: **Илиев Халмурат Миджитович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Далиев Хожиакбар Султанович**
доктор физико-математических наук, профессор (НУУ)

Арипов Хайрулла Кабулович
доктор физико-математических наук, профессор (ТУИТ)

Ведущая организация: **Физико-технический институт**

Защита диссертации состоится «___» _____ 2019 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.31.01.2019.FM./T.03.05 при Ташкентском государственном техническом университете, Андижанском государственном университете. (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, дом 2. Факультет «Электроника и автоматика» ТГТУ, аудитория № 232. Тел. (+99871) 246-46-00, факс (+99871) 227-10-32, e-mail: tstu_info@edu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрирована за № ____). Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, дом 2. Тел. (+99871) 246-03-41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2019 года.
(реестр протокола рассылки № ____ от «___» _____ 2019 г.).

М.К. Бахадирханов
председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.,
профессор, академик

Б.Э. Эгамбердиев
ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.,
профессор

Н.Ф. Зикриллаев
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, в мире в активно развивающемся направлении полупроводниковой физики, пристальное внимание уделяется получению материалов на основе кремния с примесными атомами III, V и II, VI групп элементов, путем создания в его кристаллической решетке наноразмерных кластеров, в том числе бинарных, демонстрирующих абсолютно новые свойства, которые коренным образом отличаются от свойств базового материала. При этом важными задачами остаются изучение электрофизических и фотоэлектрических свойств новых материалов, а также исследование возможностей сокращения расхода дорогостоящего кремния. В этом аспекте важными задачами являются открытие перспективных функциональных возможностей кремния с новыми бинарными элементарными ячейками (БЭЯ) в матрице материала, а также применение этого материала в микроэлектронике, материаловедении и других областях.

В мире на сегодняшний день уделяется большое внимание изучению свойств кремния с БЭЯ и изготовлению на их основе фотоэлементов (ФЭ) и датчиков работающих в ИК области. При этом важнейшей задачей является получение новых материалов на основе кремния, в том числе создавая на поверхности или в объеме БЭЯ, решение которой возможно путем проведения целевых научных исследований по следующим направлениям: внедрение безэрозийной технологии на основе низкотемпературной диффузии для получения кремниевых образцов легированных элементами III, V и II, VI групп; определение оптимальных примесных атомов из состава элементов III, V и II, VI групп для получения структур с БЭЯ типа $Si_2A^{III}B^V$ и $Si_2A^{II}B^{VI}$; определение электрофизических и фотоэлектрических параметров кремния с БЭЯ типа $Si_2A^{III}B^V$ и $Si_2A^{II}B^{VI}$; определение величины тока короткого замыкания и напряжения холостого хода в ИК области в кремнии с БЭЯ типа $Si_2A^{III}B^V$ и $Si_2A^{II}B^{VI}$; разработка и создания фотоэлементов на основе кремния с БЭЯ типа $Si_2A^{III}B^V$ и $Si_2A^{II}B^{VI}$.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах, где в приложении 1 пункт 4.4 отмечено «стимулирование научно-исследовательской и инновационной деятельности, создание эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений в практику, создание при высших образовательных учреждениях и научно-исследовательских институтах научно-экспериментальных специализированных лабораторий, центров высоких технологий, технопарков»¹. В частности, основное внимание уделяется вопросам развития технологии синтеза новых полупроводниковых материалов, состоящих из элементарных ячеек «кремний – примесный атом».

Особо следует отметить, что данная деятельность осуществляется в рамках объявленного года инвестиций и социального развития, нацеленного на

¹ Указ Президента Республики Узбекистан. О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан /Официальное издание/ Министерство юстиции Республики Узбекистан. – Ташкент: «Адолат», 2017. С. 63.

получение научных результатов, отвечающих современным требованиям научного развития. В этом плане особое внимание уделяется вопросам исследования фотоэлектрических и электрических свойств БЭЯ структур с участием примесных атомов III, V и II, VI групп на основе монокристаллического кремния. Вместе с тем, актуальной задачей является определение новых физических свойств полупроводниковых материалов и на этой основе обеспечить их широкое прикладное применение в сфере производства.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач предусмотренных в Постановлениях и Указах Президента Республики Узбекистан, ПП-1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг.» от 15 декабря 2015 года, УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года и ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии республики. Настоящая работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан «Энергетика, энерго - и ресурсосбережение, транспорт, машино - и приборостроение» и имеет важную значимость для развития современной электроники, микроэлектроники, фотоники, спинтроники и электронного приборостроения.

Степень изученности проблемы. Известные всемирные ученые J. Zhang, C.J. Glassbrenner (США), Rune S. Jacobsen (Дания) изучали влияние выборочных примесей на оптические характеристики кремния, а К.С. Напольский, А.В. Булгаков, О.Н. Королевы (Россия) на основе математического моделирования определили условия возможности образования бинарных соединений в полупроводниках. В работах J. Valenta (Чехия) определил непосредственное влияние нанокластеров на электрофизические и фотоэлектрические свойства кремния, со стороны М.Г. Мильдвидского и В.В. Чалдышева (Россия) была проведена исследовательская работа о роли наноразмерных кластеров в полупроводниковых материалах. Ж.И.Алфёров создатель полупроводниковых гетероструктур, создатели синих светодиодов Исаму Акасаки, Хироси Аmano и Сюдзи Накамуре награждены Нобелевскими премиями.

В Узбекистане научные школы академиков М.С. Саидова, М.К. Бахадирханова и А.Т. Мамадалимова внесли большой вклад в развитие технологии диффузии в полупроводниковых материалах. Академик М.К. Бахадирханов и его ученики сумели создать новые материалы на основе кремния, приводящие к существенному изменению его фундаментальных свойств, вводя в качестве примесей переходные и редкоземельные элементы, а

также элементы II, III, V и VI групп². В новых материалах были обнаружены новые магнитные и оптические явления, а также был проведен ряд исследовательских работ по увеличению концентрации БЭЯ. Создание БЭЯ вышеуказанных примесей не только на поверхности, но и в объеме полупроводника, в частности позволило существенно расширить чувствительность нового материала в ИК области. Профессором И.Г. Атабаевым и Н.А. Матчановым была усовершенствована технология низкотемпературной диффузии примесей в сплаве кремний-германий³.

В настоящее время учёными Узбекистана, академиком А.Т.Мамадалимовым и его сотрудниками экспериментально обнаружено инфракрасное, температурное гашение фотопроводимости кремния легированного глубокими примесями и разъяснен механизм этих явлений. Вместе с тем в научной школе Р.А.Муминова был разработан детектор ядерного излучения на основе кремния легированного литием. Н.Юлдашевым и его сотрудниками было обнаружено явление люминесценции в полупроводниковых соединениях.

Однако ими были проведены экспериментальные исследования по созданию нанокластеров только одиночных элементов, поэтому остаются нерешенными вопросы создания нанокластеров на основе атомов двух и более примесей в кристаллической решетке полупроводниковых материалов, в частности кремния, а также определения оптимальных термодинамических условий формирования БЭЯ и изучения электрофизических и фотоэлектрических параметров нового материала и его структуры.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете согласно программе фундаментальных и прикладных проектов, в том числе в рамках Государственной программы научно-исследовательских работ РУз № Ф2-44 на тему: «Исследование механизма самоорганизации примесных атомов в полупроводниках и управление их параметрами» (2012-2016 гг.) и международного проекта «Узбекистан-Туркменистан 2013» №МК-37/2012 «Разработка и изготовление принципиально новых фотоэлементов с широкой спектральной чувствительностью (0,1÷3 мкм) на основе кремния с нановаризонными структурами» (2013-2015 гг.), а также проекта ОТ-Ф2-50 «Разработка научных основ формирования элементарных ячеек $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ в решетке кремния – новый подход в получении перспективных материалов для фотоэнергетики и фотоники» (2017-2020 гг.).

Целью исследования является определение электрофизических и фотоэлектрических свойств кремния с БЭЯ и расширение области чувствительности фотоэлементов на основе нового материала.

² М.К. Бахадырханов, А.Ш. Мавлянов, У.Х. Содиков Кремний с бинарными нанокластерами примесных атомов – как новый класс материалов для фотоэнергетики. III Межд.конф. по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах 14-15 ноября – Фергана. 2014 – с. 51-54.

³ И.Г. Атабаев, Н.А. Матчанов и др. Низкотемпературная диффузия лития в твердые растворы кремний-германий ФТТ, 2001, В.12, С. 2140-2143.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

формировать структуры БЭЯ типа $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$ в решетке кремния в зависимости от природы примесных атомов элементов III, V и II, VI групп;

определить условия возможности формирования и распределения структур БЭЯ типа $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$ в решетке кремния;

изучить электрофизические и фотоэлектрические свойства структур БЭЯ типа $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ в решетке кремния;

разработать физические основы создания нового класса фотоэлементов, работающих в спектральной области $\lambda=1 \div 3$ мкм на основе кремния с БЭЯ $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ с различным составом, структурой, концентрацией и распределением;

Объектом исследования являются промышленные монокристаллические образцы кремния марки КЭФ-4,5; КДБ-0,1; 0,5; 1 (с концентрацией фосфора в диапазоне $N_P=9,3 \cdot 10^{14}$ см⁻³ и бора $N_B=2,1 \cdot 10^{17}$; $4,2 \cdot 10^{16}$; $2,1 \cdot 10^{16}$ см⁻³ соответственно) и примесные элементы III, V и II, VI групп.

Предмет исследования определение закономерности создания структур БЭЯ типа $Si_2A^{III}B^V$ и $Si_2A^{II}B^{VI}$ на основе кремния, исследование электрофизических и фотоэлектрических свойств кремния, легированного элементами III, V и II, VI групп, со структурами БЭЯ и на его основе разработка фотоэлементов.

Методы исследований. Для достижения поставленной цели были использованы однозондовые и четырехзондовые методы для измерения фундаментальных параметров, определение остальных параметров осуществлялось с помощью ИКС - 12 (модернизированный) и современными методами ФСМ - 1202, инфракрасным микроскоп Infram-I, для фотоэлементов были использованы цифровые приборы UT81, Mastech MS8250D и DT 9205. Состояние структур БЭЯ в решетке кремния было исследовано с помощью сканирующего электронного микроскопа марки SEM EVO MA 10 (Carl Zeiss), рентгеноструктурного анализатора марки Aztec Energy Advanced X-act (Oxford Instruments) и порошковыми рентгеновскими дифрактометрами марки XRD Empyrean (PANalytical).

Научная новизна диссертационного исследования:

проанализированы параметры примесей элементов III, V и II, VI групп и научно обосновано формирование БЭЯ со структурой $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ с их участием при оптимальном термодинамическом условии в решетке кремния;

научно обосновано формирование ассоциаций БЭЯ со структурой $Si_2A^{III}B^V$ и $Si_2A^{II}B^{VI}$, а также нанокристаллов $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ при увеличении концентрации примесных атомов в решетке кремния;

разработана технология формирования структур БЭЯ типа $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ примесными элементами III, V и II, VI групп методом низкотемпературной диффузии в решетке кремния;

разработана технология получения безэрозсионных образцов монокристаллического кремния путем многоступенчатого медленного повышения температуры и последовательным легированием элементами III,

V и II, VI групп с маленьким коэффициентом диффузии;

определены электрофизические и фотоэлектрические свойства кремния с БЭЯ со структурой $\text{Si}_2\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{Si}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$;

показана возможность создания фотоэлементов на основе кремния с БЭЯ со структурой $\text{Si}_2\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{Si}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана технология формирования БЭЯ со структурой $\text{Si}_2\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{Si}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ в решетке кремния легированного примесными элементами III, V и II, VI групп в зависимости от их природы, а также получен совершенно новый класс полупроводниковых материалов, отличающийся от исходного в отношении фундаментальных, электрофизических и фотоэлектрических параметров;

разработан метод увеличения чувствительности кремния к внешним воздействиям и в частности в ИК области за счет управления концентрацией БЭЯ со структурой $\text{Si}_2\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{Si}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ в кремнии;

разработаны фотоэлементы работающие в ИК-области на основе кремниевого материала легированного примесными элементами III, V и II, VI групп.

Достоверность полученных результатов: обеспечивается использованием комплексных независимых методик измерения и обработки данных, а также исследованием сформированных кластеров БЭЯ в кремнии с помощью сканирующего электронного микроскопа, порошкового рентгеновского дифрактометра, рентгеноспектрального анализа и инфракрасного микроскопа.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в объяснении особенностей формирования БЭЯ кластеров со структурой $\text{Si}_2\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{Si}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ перераспределением энергетической структуры электронов в локальных областях за счет увеличения их концентрации и управления их расположением в решетке кремния.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что на основе формирования структур БЭЯ примесных атомов элементов III, V и II, VI групп в решетке кремния разработаны солнечные элементы и фотоприёмные приборы с расширенной спектральной чувствительностью в сторону ИК- и УФ-области спектра светового излучения.

Внедрение результатов исследования. На основании результатов получения нового материала за счет формирования структур БЭЯ и расширения спектральной области фоточувствительности кремниевых фотоэлементов со структурами БЭЯ, были внедрены следующие результаты:

технология формирования БЭЯ со структурой $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ элементами III, V и II, VI групп в решетке кремния, которая была применена в акционерном обществе «FOTON» при изготовлении нового материала с большой спектральной чувствительностью в ИК- области спектра (Справка №02-1876 акционерной компании «ЎЗЭЛТЕХСАНОАТ» от 25 августа 2018 года). Использование научных результатов позволило расширить область чувствительности инфракрасных датчиков на основе кремния;

технология диффузионного легирования полупроводниковых материалов путем многоступенчатого медленного повышения температуры была применена для примесей с маленькими коэффициентами диффузии примесных атомов элементов III и V групп, в акционерном обществе «FOTON» при получении легированного кремния (Справка №02-1876 акционерной компании «ЎЗЭЛТЕХСАНОАТ» от 25 августа 2018 года). Использование научных результатов позволило обеспечить однородное легирование кремниевых материалов с устранением эрозии поверхности.

Апробация результатов исследования. Основные научные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 7 международных конференциях и опубликованы в сборниках трудов, а также на 10 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертация опубликовано 9 научных трудов в реферируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 120 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность проведенных исследований, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике. Изложена научная новизна исследования и практические результаты, раскрыта практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Состояние проблем современной фотоэнергетики**» анализируются состояние современной энергетики на основе литературных данных, использование солнечной энергии и информация о производстве электрической энергии от Солнца, технология производства солнечных элементов и факторы влияющие на КПД. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулирована постановка задачи, определены цель и задачи данной диссертации.

Вторая глава диссертации «**Разработка технологии формирования бинарных элементарных ячеек $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ на основе кремния и методы исследования образцов**» посвящена рассмотрению теории и концепции разработки новой технологии диффузии, обеспечивающей диффузию примесных атомов по узлам и максимальное взаимодействие их между собой. Рассмотрены механизмы примесной диффузии и описана роль дефектов и их взаимодействие с примесями. Установлено, что в процессе легирования примесные элементы III, V и II, VI групп выбираются в зависимости от их природы при учете параметров исходных кремниевых образцов. Также рассматривается технология получения

материала с новыми электрофизическими параметрами путем формирования БЭЯ со структурой $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ в решетке кремния.

В предложенном методе в процессе легирования при температуре $1150 \div 1250$ °С в течении $30 \div 180$ минут примесными элементами III, V и II, VI групп в решетке кремния по технологии низкотемпературной диффузии не обнаружен процесс эрозии поверхности образца в кварцевых ампулах откаченных до 10^{-5} мм.рт.ст. Определение фундаментальных параметров осуществлялось с помощью однозондового и четырехзондового методов, определение остальных параметров осуществлялось с помощью ИКС - 12 (модернизированный) и Фурье-спектрометра ФСМ - 1202, инфракрасным микроскопом Infram-I, для определения параметров фотоэлементов были использованы цифровые приборы UT81, Mastech MS8250D и DT 9205. Также было исследовано состояние структур БЭЯ в решетке кремния с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM EVO MA 10 (Carl Zeiss), рентгеноспектрального анализатора Aztec Energy Advanced X-act (Oxford Instruments) и порошкового рентгеновского дифрактометра XRD Empyrean (PANalytical) (Рис.1).

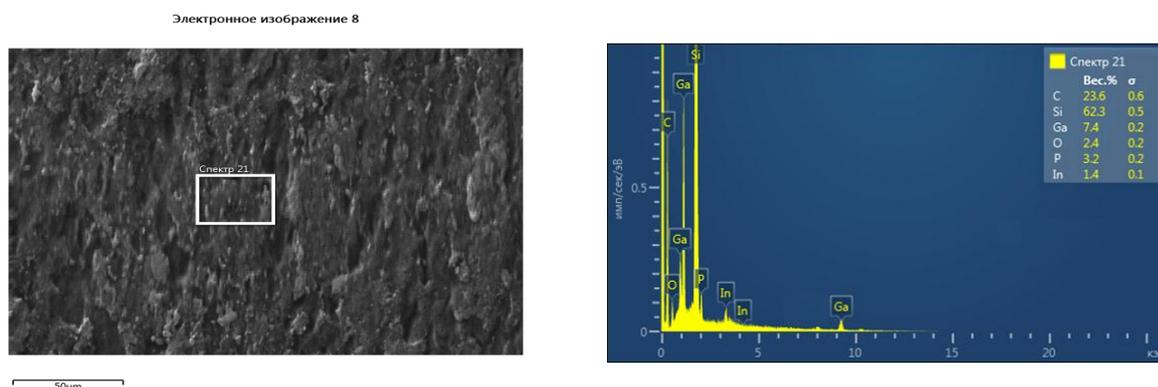


Рис.1. Состояния образца со сформированными структурами БЭЯ Si<GaP>. (Сканирующий электронный микроскоп SEM EVO MA 10 (Carl Zeiss)).

Третья глава «Разработка физических основ формирования бинарных элементарных ячеек $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{IV}$ в решетке кремния» посвящена определению условий формирования структур БЭЯ в кремнии – на поверхности и в объеме, приведены результаты по изучению методов увеличения концентрации структур БЭЯ.

Изучена природа формирования $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ соединений в решетке кремния. В таблице 1 приведен список самых распространенных $A^{III}B^V$ соединений⁴. Как видно информация из таблицы показывает, что один из самых важных фундаментальных параметров – подвижность, невелика в кремнии из-за непрямой зоны и этот факт существенно ограничивает его использование в сфере фотоэнергетики и оптоэлектроники (Рис.2).

⁴ Bakhadyrhanov M.K., Sodikov U.X., Iliev Kh.M., Tachilin S.A., Tuerdi Wumaier Perspective Material for Photoenergetics on the Basis of Silicon with Binary Elementary Cells. USA. Journal of Materials Physics and Chemistry, 2018, Volume 1 doi:10.63019/mpc.v1i2.493. pp. 1-7.

Таблица 1

$A^{III}B^V$ полупроводниковые материалы	Ширина запрещенной зоны, E_g , эВ	Подвижность электронов, $см^2/В·с$
InSb	0.18	100 000
InAs	0.36	30 000
InP	1.26	4 600
GaSb	0.73	5 000
GaAs	1.42	9 000
GaP	2.26	110
AlSb	1.65	200
AlP	2.50	
Si	1.12	1 300

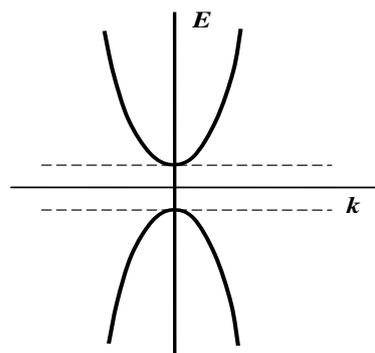


Рис.2. График
прямозонных
энергетических
уровней

В полученных образцах определены оптимальные условия диффузии, позволяющие равномерно легировать образцы с необходимой концентрацией структур БЭЯ и управлять их распределением и упорядоченностью. Слой обогащенный структурами БЭЯ составлял несколько десятков микрон и был достаточен для целей исследования. На рис.3 показано формирование БЭЯ со структурой $Si_2A^{III}B^V$ и $Si_2A^{II}B^{VI}$ в решетке монокристаллического кремния КДБ-1.

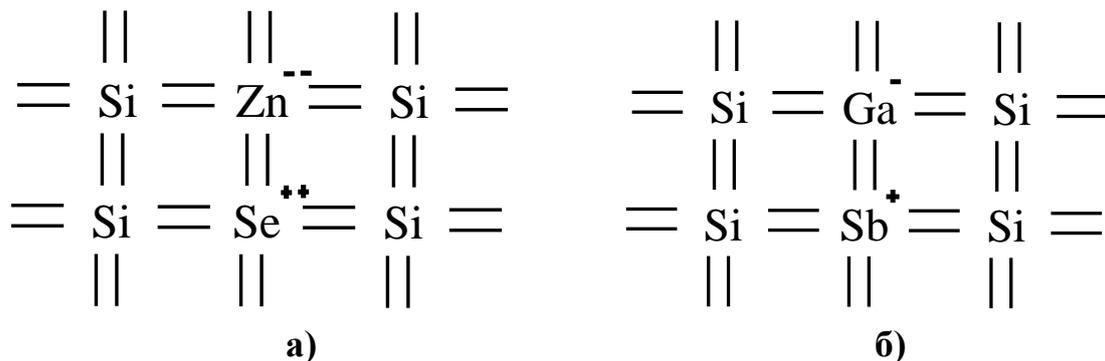


Рис. 3. Формирование БЭЯ со структурой $Si_2A^{III}B^V$ и $Si_2A^{II}B^{VI}$ в решетке кремния

Выбор оптимальных пар элементов III, V и II, VI групп определяется в зависимости от их природы при этом учитываются параметры исходного кремния следующим образом:

$|\Delta Z| = 2Z_{Si} - (Z_{(II)III} + Z_{V(VI)}) \leq 0,2 Z_{Si}$, где Z_{Si} – ковалентный радиус атома кремния, $Z_{(II)III}$ и $Z_{V(VI)}$ – ковалентные радиусы атомов III, V и II, VI групп элементов соответственно;

значение электроотрицательности атомов III, V и II, VI групп должно быть достаточно близко к электроотрицательности атомов кремния;

сумма валентных электронов двух соседних примесных атомов в узлах кристаллической решетки кремния должна быть равна 8;

$r_m \leq 100R$, где r_m – расстояние между атомами III, V и II, VI группы по отдельности, а также между ними после диффузионного легирования, а R – постоянная решетки кремния (5,4 Å).

В таблице №2 представлено выполнение условия 1 для всех возможных комбинаций пар образования БЭЯ на поверхности и в объеме в кремнии с участием всех атомов III и V группы⁵.

Таблица 2

A ^{III} B ^V	r _{III+rV} , Å	Δr, Å	Группа	A ^{III} B ^V	r _{III+rV} , Å	Δr, Å	Группа
BP	1,98	0,36	4	GaP	2,35	0,01	1
BAs	2,09	0,25	3	GaAs	2,46	0,12	2
BSb	2,29	0,15	2	GaSb	2,66	0,32	3
BBi	2,38	0,06	1	GaBi	2,77	0,43	4
AlP	2,35	0,01	1	InP	2,60	0,26	3
AlAs	2,46	0,12	2	InAs	2,76	0,42	4
AlSb	2,66	0,32	4	InSb	2,96	0,62	4
AlBi	2,77	0,43	4	InBi	3,02	0,68	4
2Si	2,34	0	-				
Zr _{Si} , Å	0,234	-	-				

Таким образом, с участием элементов III, V и II, VI групп формируются БЭЯ и в таких ячейках будет прочная частично-ионная ковалентная связь, формирование таких решеток практически не нарушает тетраэдрической связи и они входят в состав кристаллической решетки кремния.

К каждым из двух атомов элементов III и V групп в кремнии подходят однократно положительно заряженные ионы элементов III и отрицательно заряженные ионы элементов V группы соответственно, т.е. в кристаллической решетке появляется новый тип БЭЯ со структурой Si₂A⁻B⁺. К каждым из двух атомов элементов II и VI групп в кремнии подходят дважды положительно заряженные ионы элементов II и дважды отрицательно заряженные ионы элементов VI группы соответственно, т.е. в кристаллической решетке появляется ещё не изученная БЭЯ со структурой Si₂A⁻B⁺⁺. В процессе диффузии и при дополнительном термоотжиге расположенные в узлах ионы A⁻, B⁺ и A⁻, B⁺⁺ стараются находиться рядом и поэтому для каждого случая требуются оптимальные термодинамические условия определяемые экспериментальным путем.

На рис. 5 приведен механизм формирования БЭЯ с участием примесных атомов Zn и Se элементов II и VI групп соответственно. Технология низкотемпературной диффузии или способа легирования заключается в том, что диффузия проводится в несколько этапов с постепенным повышением температуры:

на первом этапе в качестве примеси выбирается элемент VI группы Se. Коэффициент диффузии и растворимости селена в кремнии определяется формулой:

$$D_{Se} = 9 \cdot 10^{-1} \cdot \exp(-2,44 / kT) \quad (1)$$

⁴ Bakhadyrhanov M.K., Sodikov U.X., Iliev Kh.M., Tachilin S.A., Tuerdi Wumaier Perspective Material for Photoenergetics on the Basis of Silicon with Binary Elementary Cells. USA. Journal of Materials Physics and Chemistry, 2018, Volume 1 doi:10.63019/mpc.v1i2.493. pp. 1-7.

$$N_{\text{Se}} = 1,4 \cdot 10^{25} \exp(-2,3/kT) \quad (2)$$

Откачанная ампула вместе с образцами и примесями помещается в рабочую область горизонтальной печи при комнатной температуре. Диффузия проводилась в интервале температур $1200 \div 1250$ °С в течение 30-60 минут и после процесса диффузии ампула охлаждалась медленно в на металле.

на втором этапе в качестве примеси выбирается элемент II группы Zn:

$$D_{\text{Zn}} = 1 \cdot 10^{-1} \cdot \exp(-1,5/kT) \quad (3)$$

$$N_{\text{Zn}} = 4,0 \cdot 10^{21} \exp(-1,6/kT) \quad (4)$$

Откачанная ампула с образцами Si<B,Se> и примесями помещается в рабочую область горизонтальной печи при комнатной температуре. Диффузия проводилась в интервале температур $1200 \div 1250$ °С в течение 2 часов и после диффузии ампула медленно охлаждалась на металле. Формирование структуры Si₂ZnSe в процессе диффузии можно отметить следующим графиком (Рис.4).

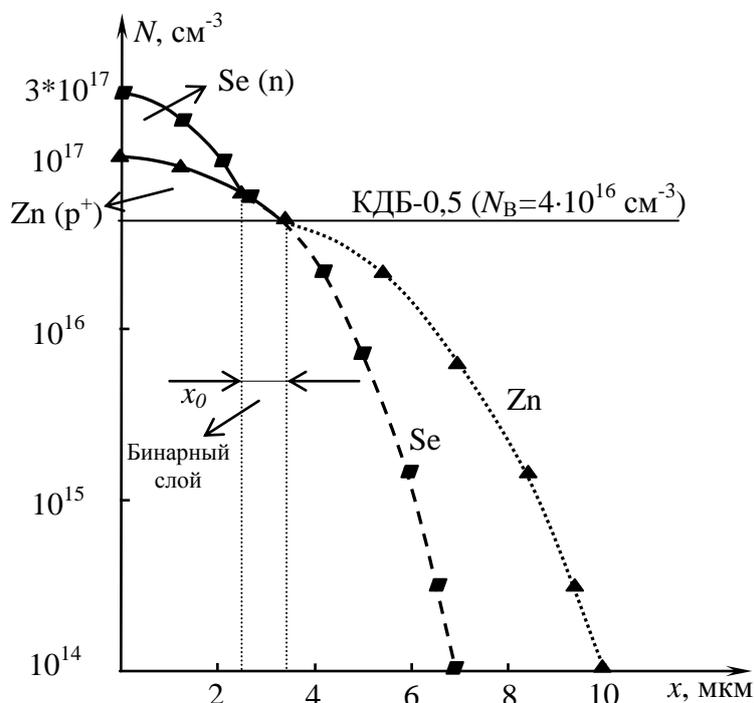


Рис.4. Формирование БЭЯ со структурой Si₂ZnSe в кремниевом монокристалле.

Следует отметить, что параллельно проводилась диффузия примесных элементов III, V и II, VI групп в кремнии по обычной технологии с целью сравнения параметров кремния, полученного по этим двум технологиям.

Третий этап предназначен для увеличения концентрации БЭЯ со структурой Si₂ZnSe, на нем полученные образцы подверглись дополнительному отжигу при более низкой температуре $500 \div 800$ °С в течение 4÷6 часов. Целью настоящей процедуры являлось обеспечение условий формирования между дважды заряженными положительными ионами элементов II группы и дважды заряженными отрицательными ионами элементов VI группы (Рис.5). Как видно из рис.5, слой БЭЯ расширяется, т.е. увеличивается их концентрация.

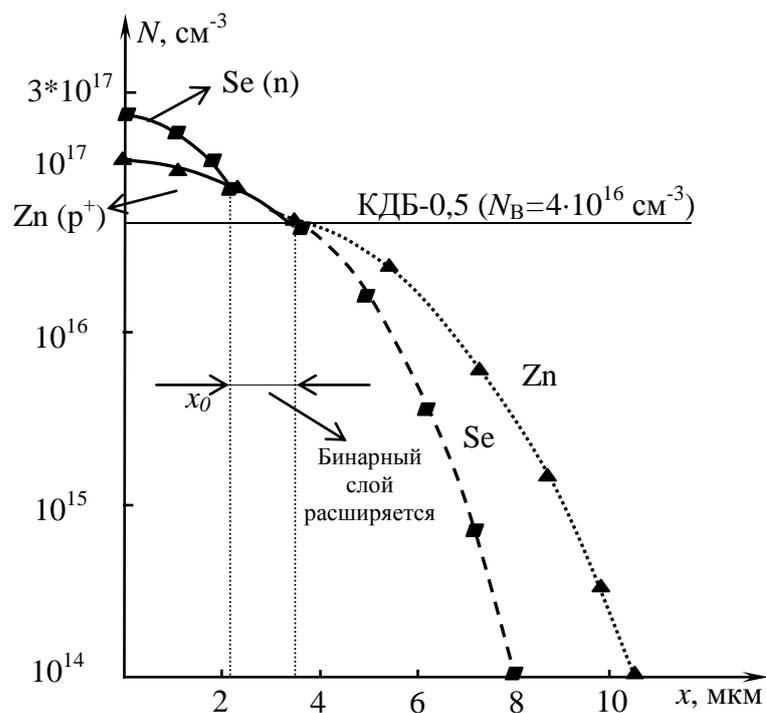


Рис.5. Дополнительный отжиг образцов Si<B,ZnSe> при T = 400 °C, t = 4 час

На рис.6 представлена модель расположения БЭЯ со структурой Si₂ZnSe в решетке кремния. Из этой модели видно, что новый материал создал совершенно новое соединение с прочной частично-ионной ковалентной связью, не похоже на ковалентное или на ионное.

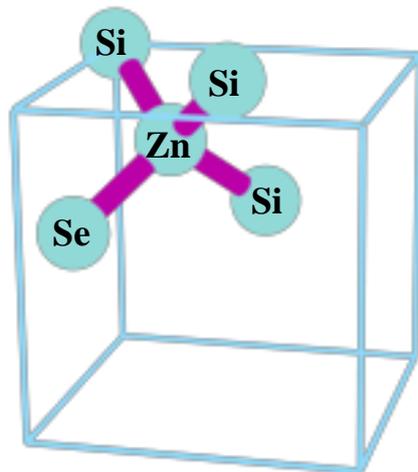


Рис.6. Модель формирования БЭЯ со структурой Si₂Zn^{II}Se^{VI} (Si₂A^{II}B^{VI}) в решетке кремния.

Усовершенствование технологии формирования БЭЯ приведет к увеличению концентрации структур A^{II}B^{VI} (до 10¹⁶ см⁻³), что даёт возможность создать нанокластеры типа Zn⁺⁺Se⁻ (Рис.7). Это совершенно новый материал который не повторяет свойств исходного и процессы внутри кристалла будут другие. Таким образом в локальных местах появляется прямозонность и на поверхности и в объеме нового материала и в итоге подвижность, время жизни носителей зарядов, а также коэффициент поглощения светового излучения будут совсем другие. Это означает, что на основе одной кристаллической

решетки формируя нанокристаллы различных структур (Si , $\text{Si}\langle\text{B,Se}\rangle$, $\text{Si}\langle\text{B,Zn}\rangle$ и Si_2ZnSe) и ассоциации $\text{Zn}^{++}\text{Se}^{--}$ был получен материал с заданной модулированной шириной запрещенной зоны.

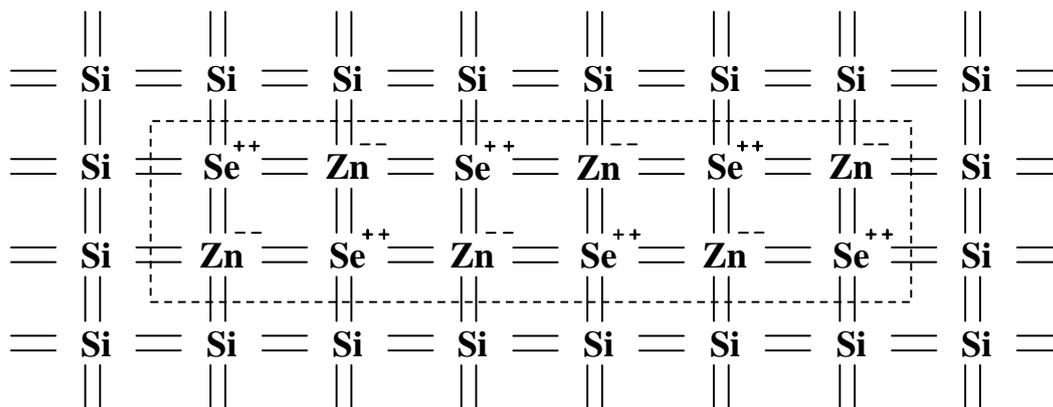


Рис. 7. Расположение нанокластеров БЭЯ со структурой $\text{Zn}^{--}\text{Se}^{++}$ ($\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$) в решетке кремния.

Таким образом, можно предполагать, что такие материалы позволят создать более эффективные фотоэлементы для фотоэнергетики и принципиально новый класс ИК- датчиков для оптоэлектроники, а также производства светодиодов на основе кремния.

В четвёртой главе диссертации «Исследование параметров и свойств фотоэлементов на основе кремния с бинарными элементарными ячейками $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ И $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{IV}}$ » приводится разработка и создание фотоэлементов с расширенной спектральной областью чувствительности в сторону ИК- и УФ-, а также некоторые экспериментальные параметры. Предложено изучение уникальности новых материалов для создания в будущем более эффективных фотоэлементов для фотоэнергетики и принципиально нового класса ИК- датчиков для оптоэлектроники, а также производства светодиодов на основе таких структур.

Разработан и изготовлен лабораторный вариант фотоэлемента на основе БЭЯ со структурами $\text{Si}_2\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, $\text{Si}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. И исследованы фундаментальные параметры нового фотоэлемента. На рис. 8 показан новый фотоэлемент с БЭЯ структурой $\text{Si}_2\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, $\text{Si}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ на основе кремния.

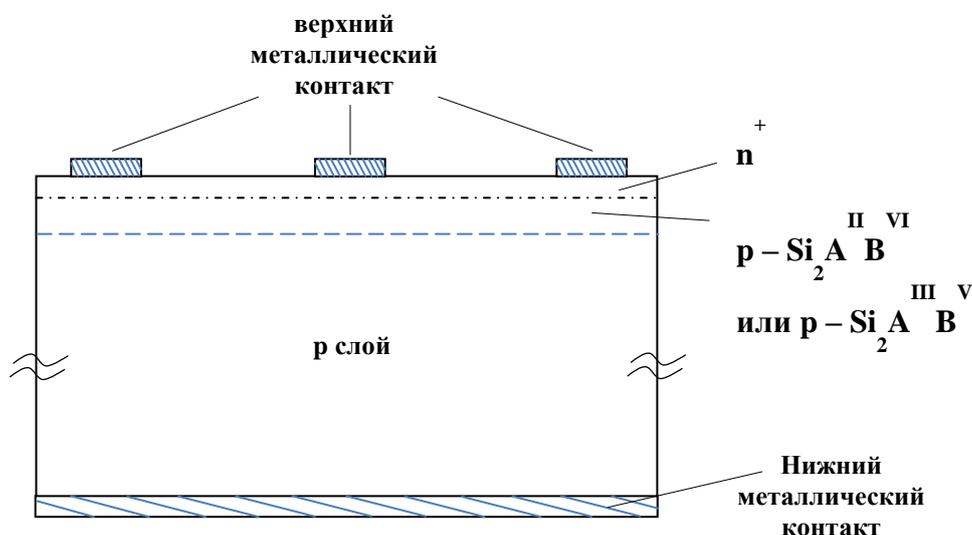
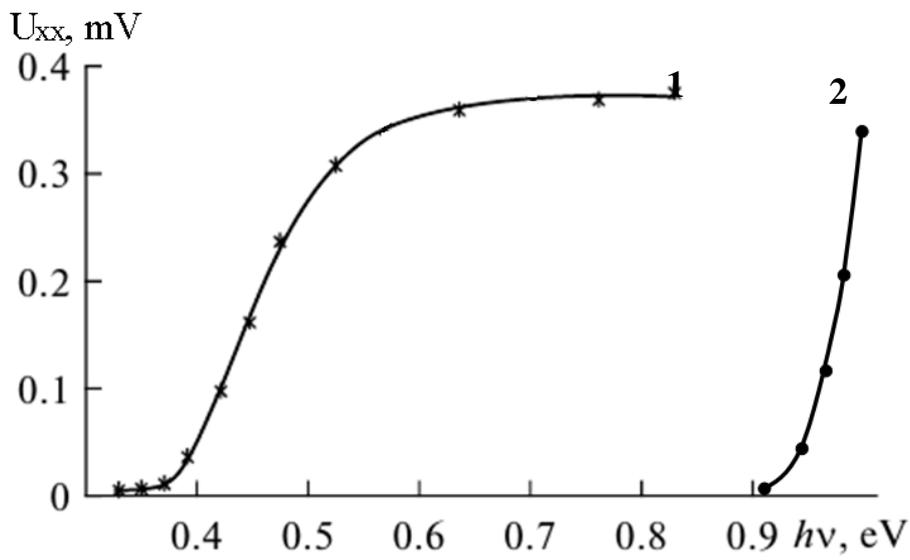
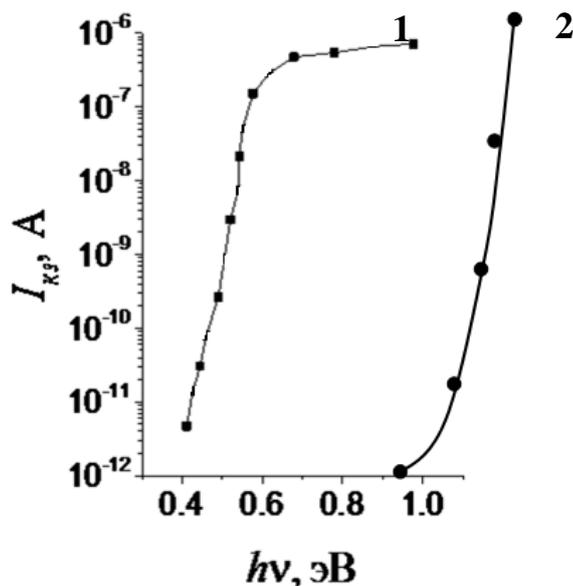


Рис. 8. Новый фотоэлемент с БЭЯ со структурами $\text{Si}_2\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, $\text{Si}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ на основе кремния.

На рис. 9 показаны спектральная зависимость U_{xx} и I_{K3} изготовленных лабораторных экземпляров фотоэлементов на основе кремния с БЭЯ со структурой Si_2ZnSe изготовленного по новой технологии и фотоэлемента полученного по обычной технологии снятая при комнатной температуре.



а)



б)

**Рис. 9. Спектральная зависимость параметров фотоэлемента U_{xx} (а) и I_{K3} (б) при мощности ИК излучения $5 \cdot 10^{-6}$ Вт на 1 cm^2 на основе кремния:
1 - фотоэлемент с БЭЯ со структурой Si_2ZnSe изготовленный по новой технологии,
2 - фотоэлемент изготовленный по обычной технологии.**

Как показали результаты исследования оптических и электрических свойств кремния с такими БЭЯ, была расширена спектральная область чувствительности, начиная от 0,4 эВ в инфракрасной области, а фотоэлементы изготовленный по обычной технологии имели порогое значение от 0,9 эВ. Из полученной зависимости видно, что в исследуемых структурах присутствует

несимметричная зависимость протекающего тока от полярности подаваемого напряжения, т. е. проявляются выпрямляющие свойства; обратный ток в таких структурах очень маленький (J_s). Таким образом, фотоэлементы со структурами БЭЯ изготовленные по новой технологии имеют в 2,5 раза больший коэффициент спектральной чувствительности, чем фотоэлементы изготовленные по обычной технологии.

В заключении хочу выразить благодарность академику М.К. Бахадирханову за ценные научные консультации, моему научному руководителю, всему коллективу кафедры «Цифровая электроника и микроэлектроника» ТГТУ, а также руководству Международного института солнечной энергии за помощь и поддержку оказанные при выполнении моей диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований расширена спектральная область fotocувствительности кремниевых фотоэлементов с бинарными элементарными ячейками и на его основе сделаны следующие выводы:

1. Получены образцы монокристаллического кремния, как нового материала, с практическим отсутствием эрозии поверхности образцов после высокотемпературного легирования элементами III, V и II, VI групп.

2. Научно исследована возможность формирования БЭЯ и природы примесей с учетом фундаментальных электрофизических и химических параметров элементов III, V и II, VI групп в решетке кремния.

3. Определены оптимальные термодинамические условия формирования БЭЯ со структурой $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ и их распределения по глубине проникновения, а также состав и структура БЭЯ в решетке кремния.

4. Исследованы электрофизические, фотоэлектрические и оптические свойства кремния с БЭЯ со структурой $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ в решетке кремния путем экспериментальных методов.

5. Определены физические основы для разработки нового класса фотоэлементов на основе кремния с БЭЯ со структурой $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ в зависимости от их состава, концентрации и распределения.

6. Исследована спектральная область чувствительности фотоэлементов в диапазоне $\lambda=1 \div 3$ мкм, экспериментально измерены основные фундаментальные параметры и КПД таких элементов и обнаружено расширение их ИК-области чувствительности в отношении значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода на основе кремния с БЭЯ со структурой $Si_2A^{III}B^V$ и $Si_2A^{II}B^{VI}$.

7. Показана возможность создания новых видов фотоэлементов с БЭЯ со структурой $Si_2A^{III}B^V$ и $Si_2A^{II}B^{VI}$ в зависимости от их оптимального состава, структуры и концентрации.

**SCIENTIFIC COUNCIL FOR AWARDING SCIENTIFIC
DEGREES DSc.31.01.2019.FM/T.03.05 UNDER TASHKENT STATE
TECHNICAL UNIVERSITY, ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SODIKOV USMONKHUJA XASANOVICH

**EXPANSION OF THE SPECTRAL REGION OF
PHOTOSENSITIVITY OF THE SILICON PHOTOVOLTAIC CELLS
WITH BINARY ELEMENTARY CELLS**

01.04.10- Physics of semiconductors

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

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № B2019.1.PhD/FM86.

Dissertation has been prepared at the Tashkent State Technical University after named Islam Karimov.

Abstract of the dissertation is posted in three (uzbek, russian, english (resume) languages on the website (tdtu.uz) and on Information and educational portal «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Iliyev Khalmurat Midjitovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents: **Daliev Khojakbar Sultanovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor (NUU)

Aripov Khayrulla Kabilovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor (TUIT)

Leading organization: **Physical and Technical Institute**

Dissertation defense will be held on « ____ » _____ 2019 at ____ at the meeting of Scientific Council number DSc.31.01.2019.FM/T.03.05 at the Tashkent State Technical University, Andijan State University (Address: 100095, 2 University Street, Tashkent, Uzbekistan. Phone/fax: (+99871) 246-46-00, (+99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@edu.uz).

Dissertation is possible to review in Information-Resource Centre at the Tashkent State Technical University (registered under № ____). Address: 100095, 2 University Street, Tashkent, Uzbekistan. Phone/fax: (+99871) 246-03-41).

Abstract of dissertation sent out on « ____ » _____ 2019.

(Registry record № ____ on « ____ » _____ 2019).

M.K. Bakhadirkhanov

Chairman of Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, academician

B.E. Egamberdiyev

Scientific secretary of Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor

N.F. Zikrillayev

Chairman of Scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of research work is to determine the electrophysical and photoelectric properties of silicon with binary elementary cells and to expand the range of sensitivity of photocells based on a new material.

Research tasks:

to form the structures of the binary elementary cells (BEC) of the $A^{II}B^{VI}$ and $A^{III}B^V$ types in the silicon lattice depending on the nature of the impurity atoms of elements of the III, V and II, VI groups;

to determine the conditions for the possibility of the formation and distribution of BEC structures of type $A^{II}B^{VI}$ and $A^{III}B^V$ in the silicon lattice;

to study the electrophysical and photoelectric properties of the BEC structures of the type $A^{II}B^{VI}$ and $A^{III}B^V$ in the silicon lattice;

to explore the physical basis for the creation of a new class of effective photovoltaic elements operating in the spectral region $\lambda = 1 \div 3 \mu\text{m}$ based on silicon with BEC $A^{II}B^{VI}$ and $A^{III}B^V$ with different composition, structure, concentration and distribution.

The objects of the research work are samples of industrial monocrystalline silicon of the brand KEF-4.5; KDB-0,1; 0.5; 1 (with a phosphorus concentration in the range of $N_P = 9.3 * 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ and boron $N_B = 2.1 * 10^{17}; 4.2 * 10^{16}; 2.1 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, respectively) and impurity elements III, V and II, VI groups.

The subject of the study is the determination of the patterns of creation of BEA structures of the $\text{Si}_2A^{III}B^V$ and $\text{Si}_2A^{II}B^{VI}$ type based on silicon, the study of the electrophysical and photoelectric properties of silicon doped with elements of III, V and II, VI groups with the BEC structures and development of effective photovoltaic elements on its basis.

The scientific novelty of the research work is as follows:

the parameters of impurities of elements of the III, V and II, VI groups are analyzed and the formation of binary elementary cells (BEC) with the structure of $A^{III}B^V$ and $A^{II}B^{VI}$ structure with their participation is scientifically justified under the optimal thermodynamic condition in the silicon lattice;

the formation of associations of BEC with the structure of $\text{Si}_2A^{III}B^V$ and $\text{Si}_2A^{II}B^{VI}$, as well as $A^{III}B^V$ and $A^{II}B^{VI}$ nanocrystals with increasing concentration of impurity atoms in the silicon lattice is scientifically substantiated;

the technology has been developed for the formation of BEC structures of the $A^{III}B^V$ and $A^{II}B^{VI}$ type by impurity elements of the III, V and II, VI groups by the method of low-temperature diffusion in the silicon lattice;

the technology has been developed for producing erosion-free samples of monocrystalline silicon by the multistep slow rise in temperature and sequential doping with elements of the III, V and II, VI groups with a small diffusion coefficient;

the electrophysical and photoelectric properties of silicon materials with BEC with the structure of $\text{Si}_2A^{III}B^V$ and $\text{Si}_2A^{II}B^{VI}$ are determined;

a possibility of creating photovoltaic cells based on a silicon material with a BEC with a $\text{Si}_2A^{III}B^V$ and $\text{Si}_2A^{II}B^{VI}$ structure is shown..

Implementation of the research results:

On the basis of the results of obtaining a new material due to the formation of the BEC structures and the expansion of the spectral region of the photosensitivity of photovoltaic cells with the BEC structures, the following results were implemented:

the technology of forming the BEC with the $A^{III}B^V$ and $A^{II}B^{VI}$ structures with elements of the III, V and II, VI groups in the silicon lattice, which was used in the joint-stock company «FOTON» in the manufacture of a new material with high spectral sensitivity in the infrared region of the spectrum (Reference №. 02-1876 of JSC «UZELTEKHSANOAT» from 2018 on August 25). Application of the scientific results allowed expanding the sensitivity range of infrared sensors based on silicon;

The technology of diffusion doping of semiconductor materials by multistep slow temperature increase was applied to impurities with small diffusion coefficients of impurity atoms of elements of the III and V groups, in joint-stock company FOTON when obtaining doped silicon (Reference №. 02-1876 of JSC «UZELTEKHSANOAT» from 2018 on August 25). The use of scientific results allowed to ensure uniform doping of silicon materials with elimination of erosion on the surface.

Approbation of the research results. The main scientific results of the dissertation were reported and discussed at 7 international conferences and published in collections of works, as well as at 10 national scientific conferences.

Publication of the research results. On the subject of dissertation, 9 scientific papers in refereed journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of dissertations were published.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. The text of the dissertation is presented on 120 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST of PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Bakhadyrhanov M. K., Sodikov U. X., Melibayev D., Tuerdi Wumaier, Koveshnikov S. V., Khodjanepesov K. A., Jiangxiang Zhan Silicon with Clusters of Impurity Atoms as a Novel Material for Optoelectronics and Photovoltaic Energetics. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, USA DOI: 10.4236/msce.2018.64017 Apr. 30, 2018, 6, 180-190. <http://www.scirp.org/journal/msce> (RG (40) Impact Factor: 0.4).

2. Bakhadyrhanov M.K., Sodikov U.X., Iliyev Kh.M., Tachilin S.A., Tuerdi Wumaier Perspective Material for Photoenergetics on the Basis of Silicon with Binary Elementary Cells. USA. Journal of Materials Physics and Chemistry, 2018, Volume 1 doi:10.63019/mpc.v1i2.493. pp. 1-7. (RG (40) Impact Factor: 1.07)

3. Бахадырханов М.К., Содиков У.Х., Илиев Х.М., Тачилин С.А., Турди Омар Новый подход в получении перспективных материалов для фотоэнергетики. Гелиотехника 2017, №4 3-5. RG (40) Impact Factor 0,65.

4. Бахадырханов М.К., Содиков У.Х., Мавлянов А.Ш., Хаккулов М. Кремний с бинарными элементарными ячейками, как новый класс материалов для будущей фотоэнергетики. Гелиотехника 2015, №4 28-32. RG (40) Impact Factor 0,65.

5. Abdurakhmanov B. A., Bakhadirhanov M. K., Iliyev H. M., Isamov S. B., Saitov E. B., Mavlyanov A., Kamalov H. U., Saparniyazova Z., Sattarov O., Sodikov U. Kh., Zikrillayev N. F. Silicon with Clusters of Impurity Atoms as a Novel Material for Photovoltaics. USA, Nanoscience and Nanotechnology 2014, 4(3): pp. 41-43. © Index Copernicus 2014 (RG (40) Impact Factor: 1.25)

6. М.К. Бахадырханов, У. Содиков, Н.Ф. Зикриллаев, Н. Норкулов. Разработка физических основ наноразмерных структур на основе молекулообразования $S^{++}Mn^{-}$ и $Se^{++}Mn^{-}$ в решетке Si. Электронная обработка материалов, 2007, № 5, С. 106-108 (Springer, IF 0,289).

7. Bakhadirhanov M.K., Zikrillaev N.F., Narkulov N., Sadykov U.Kh., Tuerdi Umaier and Ayupov K.S. The concentration of electroactive atoms of transition group elements in silicon USA, Surface Engineering and Applited Electrohemistry, USA, 2005, No.2, pp.90-93. (Springer, Impact Factor 0,24).

8. Бахадирханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Наркулов Н., Садыков У.Х., Турди Умар., Аюпов К.С. // О концентрации электроактивных атомов элементов переходных групп в кремнии. Электронная обработка материалов, 2005, № 2, С. 90-92. (Springer, Impact Factor 0,289).

9. Абдурахманов Р., Мавлянов А.Ш., Содиков У.Х., Норкулов Н. Новые материалы для солнечных элементов на основе кремния с квантовыми ямами CdS и ZnS. Электронная обработка материалов. 2005, №4, С.89-92. (Springer, Impact Factor 0,289).

II бўлим (III часть, part II)

10. Баходирхонов М.К., Содиков У.Х., Тачилин С.А., Исмаилов К.А., Исаков Б.О., Ибодуллаев Ш.Н., Зикриллаев Н.Ф. Формирование бинарных элементарных ячеек в решетке кремния с участием элементов III и V, II и VI групп // Materials of VI International Scientific - Practical Conference Structural Relaxation in Solids. May 22-24. 2018. Vinnitsia, Ukraine. pp. 206-209.

11. Илиев Х.М., Содиков У.Х., Тачилин С.А., Исаков Б.О. Формирование элементарных бинарных ячеек в решетки кремния с участием Ga и Sb // «Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари» Республика илмий-амалий анжумани материаллари. Андижон. 2018 йил. 20-21 Апрель. 115-116 бетлар.

12. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Содиков У.Х., Тачилин С.А., Саъдуллаев А. Б., Зикриллаев Н.Ф. «Современное состояние и перспективы развития фотоэнергетики» // «Современные проблемы возобновляемой энергетики» Сборник трудов республиканской научно-практической конференции. 18-19 мая 2018 года. Карши. с. 3-4.

13. Бахадырханов М.К., Содиков У.Х., Илиев Х.М., Турди Умар, Jiang Xiang Zhan Новый подход к существенному изменению параметров кремния. Муҳандислик физикасининг илмий-услубий муаммолари илмий-техник анжуман. 2017 йил 8-9 сентябрь, Тошкент ш., 114-115 бетлар

14. Sodikov U.X., Turdi Wuemaer, Iliyev X.M. Formation of binary elementary cells involving elements of III and V group in the silicon lattice as a new approach towards expanding functionality of silicon. Муҳандислик физикасининг илмий-услубий муаммолари илмий-техник анжуман. 2017 йил 8-9 сентябрь, Тошкент ш., 77-79 бетлар

15. Содиков У.Х. О возможности создания кремниевых фотоэлементов, работающих в ИК- области спектра Солнца. Муҳандислик физикасининг илмий-услубий муаммолари илмий-техник анжуман. 2017 йил 8-9 сентябрь, Тошкент ш., 117-120 бетлар

16. Бахадырханов М.К., Курбанова У.Х., Содиков У.Х., Тачилин С.А. Новый подход в получении перспективных материалов для фотоэнергетики. Муҳандислик физикасининг илмий-услубий муаммолари илмий-техник анжуман. 2017 йил 8-9 сентябрь, Тошкент ш., 121-123 бетлар

17. Бахадырханов М.К., Содиков У.Х., Турди Умайэр Новый класс более эффективных фотоэлементов на основе кремния с бинарными элементарными ячейками АПВV Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах Республиканская научная конференция, Ташкент 2017, стр 191-194

18. Содиков У.Х., Тачилин С.А., Сайдахмедов Ш.А., Бабаев Х. Расширение области чувствительности кремниевых фотоэлементов на основе формирования нанокластеров примесных атомов VI группы. Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах Республиканская научная конференция, Ташкент 2017, стр 205-205

19. Содиков У.Х., Тачилин С.А., Сайдахмедов Ш.А. Новый подход в получении перспективных материалов для фотоэнергетики // Материалы

республиканской научно-технической конференции «Актуальные проблемы энергосбережения при использовании альтернативных источников энергии», 28-29 апреля 2017 года. Карши. с.109-110.

20. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Содиков У.Х., Тачилин С.А., Туэрди Умайэр Возможность создания интегральных фотоэлементов на основе кремния // «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» VII – илмий-назарий анжуман материаллари 19-20 май 2017 йил. Термиз. б. 51-53.

21. Iliev Kh.M., Sodikov U.Kh, Mavlyanov A.Sh., Mavlyanov G.Kh. Silicon solar cells with nanoscale structures with expended spectral range of photosensitivity. Физика твердого тела XIII Международная конференция. стр 14-15 Астана 2016.

22. Bakhadyrkhanov M.K., Sodikov U.Kh., Tachilin S. A. Silicon with elementary cell $A^{III}B^V$ is the most of efficient material for photovoltaics V Международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». Самарканд. 22-24 сентября 2016 г. с. 79-80.

23. Илиев Х.М., Мавлянов А.Ш., Содиков У.Х., С.А. Тачилин, Хаккулов М. К., Курбонова У.Х. Интегральные фотоэлементы на основе кремния с бинарными кластерами СПФП-2015г. 26-26 октября 2015 г. Нукус. Каракалпакский государственный университет. 94 б.

24. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Мавлянов А.Ш., Содиков У.Х., Хаккулов М. Кремний с элементарными ячейками типа $Si_2A^nB^{8-n}$ как новый и более эффективный материал для фотоэнергетики. «Возобновляемые источники энергии: технологии и установки» 28-29 июня – Ташкент, 2016 – С. 121-122.

25. Бахадырханов М.К., Содиков У.Х., Мавлянов А.Ш., Зикриллаев Н.Ф. Диффузионная технология формирования элементарных ячеек типа $A^{II}B^{VI}$ в решетке кремния, позволяющая существенно расширить спектральную область чувствительного материала. Физика и физические преобразование: достижение и перспективы развития V Международная конференция. стр 14-15 Бишкек 2015.

26. Мавлянов А.Ш., Содиков У.Х., Хаккулов М. Формирование квантовых точек в решетке кремния с участием примесных атомов». Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rnini» Ilmiy-amaliy konferensiya «IAK-VIII» 24-25 апрель – Ташкент. 2015 – с.409-412.

27. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Мавлянов А.Ш., Содиков У.Х., Хаккулов М. Возможность формирования квантовых точек $Si_2Mn^{2-}A^{VI2+}$ в решетке кремния. Шестая международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» 26-28 мая – Москва, РФ. 2015 – С.50.

28. Bakhadirkhanov M. K., Mavlyanov A., Sodikov U.Kh., Isamov S.B. Design and development of integrated photocells with extended spectral sensitivity on the basis of the silicon material with quantum dots. Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья, Материалы международной научно конференции, Ашгабат – 2015, 11-13 июня, стр. 99-101

29. Бахадырханов М.К., Содиков У.Х., Мавлянов А.Ш. Разработка и создание интегральных фотоэлементов с расширенной спектральной областью чувствительности на основе кремния с квантовыми точками. Фундаментальные и прикладные вопросы физики, Сборник тезисов докладов международной конференции, Ташкент-2015, 5-6 ноября, стр. 94-97

30. Бахадырханов М.К., Содиков У.Х., Илиев Х.М., Мавлянов А.Ш. Новый технологический подход, обеспечивающий существенное расширение спектральной области фоточувствительности кремниевых фотоэлементов. Муқобил энергия манбалари ва улардан фойдаланишнинг долзарб муаммолари, Республика илмий-техник анжумани, Бухоро – 2015, 25-26 ноябрь, 137-139 бетлар

31. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Мавлянов А.Ш., Содиков У.Х., Мавлонов Г.Х., Сайтов Э.Б., Саттаров О.Э., Абдурахманов Б. Физические основы формирования нанокластеров примесных атомов в полупроводниках. X Конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний-2014», 7-12 июля - Иркутск, РФ. 2014 – С.74.

32. Мавлянов А.Ш., Содиков У.Х. Безэрозионная технология диффузии элементов VI группы в кремний. «Яримутказгичлар физикасининг долзарб муаммолари» 22 ноябрь – Тошкент.2014 – с. 78-80.

33. Бахадырханов М.К., Содиков У.Х., Мавлянов А.Ш. Кремний с бинарными нанокластерами примесных атомов – как новый класс материалов для фотоэнергетики. III Международная конференция по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах 14-15 ноября – Фергана. 2014 – с. 51-54.

34. Зикриллаев Н.Ф., Содиков У.Х., Абдурахмонов Б.А., Исамов С.Б. Кремний с кластерами примесных атомов – как новый класс материалов для фотоэнергетики. Муқобил энергиялардан фойдаланишнинг долзарб муаммолари республика илмий-техникавий анжуман, Қарши – 2014, 28-29 апрель, 93-94 бетлар

35. Бахадырханов М.К., Содиков У.Х., Илиев Х.М. Физические основы формирования нанокластеров примесных атомов в полупроводниках. Сборник тезисов Кремний-2014, Иркутск, 7-12 июля, стр. 74

36. Бахадырханов М.К., Содиков У.Х., Аюпов К.С. Самоорганизация кластеров примесных атомов в полупроводниках. Конденсатланган мухитлар физикаси ва материалшуносликнинг долзарб масалалари, Фарғона – 2014, 14-15 май, 64-65 бетлар

37. Содиков У.Х., Зикриллаев Н.Ф., Рахмонов Б.Р., Мавлонов Г.Х. Безэрозионный способ диффузии теллура и селена в кремнии. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», Труды международной конференции посвященной 70-летию физико-технического института НПО «Физика-Солнце» Ташкент 2013, 14-15 ноября стр. 155-156

38. Bakhadir khanov M.K., Sodikov U.Kh., Ayupov M.K. K.S., Azizov M. Generator of acoustic frequencies based on silicon with nanostructures «VI International conference on physical electronics» IPEC-6, Abstracts, October 23-25, 2013, Tashkent, P. 108-109.

39. Bakhadir khanov M.K., Ayupov K.S., Sodikov U., Abdurakhmanov B., Bobonov D., Kadirova F. Development of physical basis of the creation of nanodimensional crystals such as Mn and S, Mn and Se in a matrix of monocrystalline silicon //Труды материалов Всероссийской конференции «ПДММ-2007». – Владивосток, 2007. P. 216-219

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«Тил ва адабиёт таълими» таҳририясида таҳрирдан ўтказилди.
(«___»_____2019 йил)

Босишга рухсат этилди: «___»_____2019 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 2,75. Адади: 100. Буюртма: № 66.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.