

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

МУЙДИНОВА МАДИНА АЛИШЕРОВНА

**КРЕМНИЙ ВА КРЕМНИЙ АСОСИДАГИ *p-n*-СТРУКТУРАЛАРНИНГ
ФОТОЭЛЕКТРИК ХУСУСИЯТЛАРИНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PHD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент-2021

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

**Автореферат диссертации
доктора философии (PhD) по физико-математических наук**

**Contents of dissertation abstract
of doctor of philosophy (PhD) on physics and mathematics**

Муйдинова Мадина Алишеровна

Кремний ва кремний асосидаги *p-n*-структураларнинг фотоэлектрик хусусиятларини тадқиқ қилиш

3

Муйдинова Мадина Алишеровна

Исследование фотоэлектрических свойств кремния и *p-n* структур на его основе.....

21

Muydinova Madina Alisherovna

Investigation of the photoelectric properties of silicon and *p-n* structures based on it

39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works

43

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

МУЙДИНОВА МАДИНА АЛИШЕРОВНА

**КРЕМНИЙ ВА КРЕМНИЙ АСОСИДАГИ *p-n*-СТРУКТУРАЛАРНИНГ
ФОТОЭЛЕКТРИК ХУСУСИЯТЛАРИНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PHD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент-2021

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.1.PhD/FM82 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Андижон давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати икки тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (ispm.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) манзилларига жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Насриддинов Сайфилло Саидович
техника фанлари доктори, доцент

Расмий оппонентлар:

Аюханов Рашид Ахметович
физика математика фанлари доктори, к.и.х.

Кучкаров Кудратулла Мамарасулович,
физика математика фанлари доктори, б.и.х.

Етакчи ташкилот:

Тошкент давлат техника университети

Диссертация ҳимояси Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университети Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 рақамли илмий кенгашнинг 2021 йил «24» май соат 12⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100057, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (998 95) 146-77-44; Факс: (998 71) 248-79-94. e-mail: info@ispm.uz)

Диссертация билан Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университети Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий тадқиқот институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (25 рақам билан рўйхатга олинган.) Манзил: 100057, Тошкент ш., Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (998 95) 146-77-44; Факс: (998 71) 248-79-94.

Диссертация автореферати 2021 йил «11» май да тарқатилди.
(2021 йил «11» май даги 25 рақамли реестр баённомаси.)



Ш.Б.Утамурадова
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор
Ж.Ж. Хамдамов,
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, (PhD)
З. Т. Азаматов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф. д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда кремний асосли структураларнинг фотоэлектрик самарадорлигини оширишда тезкор ривожланаётган яримўтказгичлар физикаси соҳасининг катта илмий ва амалий аҳамиятга молик бўлган илмий-тадқиқотлар натижаларидан кенг кўламда фойдаланиб келинмоқда. Кремнийли қуёш элементларининг фронтал сиртига тушаётган ёруғлик оқимидан самарали фойдаланиш, нурнинг классик оптика назариясига таянган ҳолда икки муҳит чегарасида қайтиши, синиши ва ўтишини кутбланганлик ҳодисасини қўллаган ҳолда таҳлил этиб, структуранинг эмиттер ва база қисмларида эффектив ютилишини таъминлаш шартларини аниқлаш алоҳида аҳамиятга эга.

Жаҳонда турли замонавий конструкцияли кремний асосли фотоэлектрик қуёш элементлари яратилган. Қуёш элементларининг самарадорлигини оширишда уларда кечадиган оптик жараёнларни аниқлаш, қуёш элементларининг фронтал сиртлари нур қайтишига қарши оптик қатламларни шакллантириш бўйича илмий тадқиқотлар амалга оширилмоқда. Бу борада кремний сирти ва унинг асосига қурилган *p-n*-ўтишли структураларда нур қайтишини ҳамда фотогенерацияланган заряд ташувчиларнинг сиртий ва ҳажмий рекомбина-цияланиш даражасини камайтириш эвазига фотоэлектрик жараёнларнинг оптик самарадорлигини ошириш шартларини аниқлаш, фронтал ва орқа сиртларда бир ва кўпқатламли оптик қопламалар ҳамда текстураланган сиртларни шакллантириш орқали нурнинг кремнийда самарали ютилишини таъминлаш тартибларини аниқлаш, *p-n*-ўтишнинг ноясси фронтни шакллантириш орқали фотоэлектрик самарадоликни ошириш механизмларини яратишга алоҳида эътибор берилмоқда.

Республикамизда анъанавий кремний асосли *p-n*-структураларда оптик стимуллашган фото-электрик заряд кўчиш жараёнларини самарали бошқаришни тадқиқ қилишга алоҳида эътибор қаратилиб, яримўтказгичлар асосидаги қуёш элементларининг самарадорлигини ошириш бўйича муайян натижаларга эришилмоқда. Кремний асосидаги қуёш элементларининг фойдали иш коэффицентини оширишда кремний сиртида текстураларни ҳосил қилиб яратилган ушбу турдаги материалларга бўлган эҳтиёж ортиб бормоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясининг тўртинчи бандида «...илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш, илмий ва инновацион ютуқларни амалиётга жорий этишнинг самарали механизмлари...»¹ бўйича муҳим вазифалар белгилаб берилган. Бу борада анъанавий кремний асосли *p-n*-структураларда фотоэлектрик самарадорликни оширишнинг инновацион ечимларини излаш, кенг қамровли тадқиқ этиш, иқтисодий мақбул конструкцияларини ишлаб чиқиш, шунингдек қимматбаҳо кремний моддаси ҳаражатини камайтириш имкониятларини комплекс тарзда тадқиқ қилиш

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг ПФ-4947 «2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналишлари бўйича ҳаракатлар стратегияси» тўғрисидаги Фармони

муҳим илмий аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон 2017-2021 йилларда Ўзбекистоннинг иқтисодий ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида», 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон «Электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарори, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори ва 2019 йил 22 августдаги ПҚ-4422-сон «Иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг тезкор чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори ва мазкур соҳа фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергия, энергия ресурсларини тежаш, транспорт, машинасозлик ва асбобсозлик; замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобсозликнинг ривожлантириш» устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Кремний асосли қуёш элементларининг самарадорлигини ошириш бўйича фундаментал ва амалий тадқиқотлар жаҳоннинг бир қатор илғор мамлакатларининг илмий марказларида ва университетларида олиб борилмоқда. Хусусан, АҚШда А.Роскет ва Ж.Р.Блиим, Германияда С.В.Глунз, Австралияда М.А.Гриин, Италияда Р.Кенни, Россияда В.А.Летин, В.Р.Заявлин, С.Е.Никитин, М.М.Колтун ва Д.С.Стребков каби етакчи олимларнинг тадқиқотлари натижасида турли замонавий конструкцияли кремний асосли фотоэлектрик қуёш элементлари яратилди. Қуёш элементларининг самарадорлигини оширишда уларда кечадиган оптик жараёнларга катта эътибор берилмоқда. «Фотонларни яримўтказгичда бошқариш» деб аталган янги фан тармоғи юзага келди.

Бир қатор ўзбек олимлари кремнийли қуёш элементларини конструкциялашда нокристал юпқа қатламларни қўллаш (академик М.С.Саидов), голографик оптик тизимларни (академик Р.А.Муминов) ва кремний ҳажмида квантўлчамли молекуляр нанобирикмаларни шакллантириш (академик М.С.Баходирхонов) каби замонавий инновацион ечимларни ишлаб чиқишган. Ватанимизда шаклланган илмий мактабларда қуёш элементларининг фронтал сиртлари нур қайтишига қарши оптик қатламларни шакллантириш бўйича М.Турсунов ва У.Газиёв, текстураларни қўллаш бўйича Р.Алиев, Ш.Клычев ва В.Дыскин каби олимларнинг бир қатор прогрессив илмий ишланмалари тақлиф этилган.

Бироқ, тадқиқотларда қуёш элементи сиртида шакллантириладиган бир ва кўпқатламли оптик қопламаларнинг, ҳамда текстураларнинг физик ва оптик

хусусиятларини, қолаверса, кремний базасининг қалинлигини эътиборга олган ҳолда ўтказиладиган тадқиқот ишлари амалга оширилмаган. Бундай мураккаб ва кўпҳаражатли тадқиқотларга муқобил замонавий рақамли моделлаштириш усуллари қўлланилмаган. Шунинг учун, мазкур муаммоларни ечиш учун йўналтирилган илмий тадқиқот ишлари шу куннинг долзарб вазифаси ҳисобланади.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Андижон давлат университети ва Андижон машинасозлик институти илмий тадқиқот ишлари режасининг №ОТ-Ф-2-28 “Легирланган кремний сирти ва ҳажмидаги квант ўлчамли эффектлар ҳамда уларнинг *p-n*-структуралардаги заряд ташувчилар фотогенерация ва рекомбинация жараёнларига таъсири” (2012-2017 йй.), №БФ3-003 “Киришмавий фотовольтаик эффектга асосланган нано- ва микро-кремнийли муқобил энергия манбаларини яратиш” (2017-2020 йй.) мавзусидаги фундаментал лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади кремний ва кремний асосидаги *p-n*- структураларнинг фотоэлектрик хусусиятларини аниқлаш ҳамда кремний сиртининг оптик хусусиятларини оптималлаштиришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

икки муҳит сиртига ёруғлик нури тушишининг классик назариясига таянган ҳолда текстураларга ҳамда бир ва кўпқатламли оптик қатламларга эга бўлган кремнийнинг оптик характеристикаларини аниқлаш;

оптик қатламлар ва текстураларни қўллаш орқали фотоэлектрик қурилманинг асоси бўлган кремнийнинг қалинлигини камайтириш шартларини аниқлаш;

икки томонлама оптик қатламлар ва текстураларни қўллаш орқали кремнийнинг оптик характеристикаларини такомиллаштириш шартларини аниқлаш;

юқори кучланишли матрицавий фотоэлектрик қурилмаларнинг оптик хусусиятларини такомиллаштириш имкониятини аниқлаш;

“PVlighthouse” дастурий тизими ва ундан кремний сиртининг оптик хусусиятларини ўрганишда фойдаланиш методикасини ҳамда “VisualBasic” дастурий тизимига таянган ҳолда ЭҲМ учун янги дастурий маҳсулот ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида монокристал кремний ва унинг сиртида шакллантирилган TiO_2 , SiO_2 , MgF_2 , SiN_x оптик қатламлар олинган.

Тадқиқотнинг предмети куёш элементлари учун қўлланиладиган монокристал кремнийнинг сиртида шакллантирилган TiO_2 , SiO_2 , MgF_2 , SiN_x оптик қатламлар ва текстураларнинг электрофизик ҳамда оптик характеристикаларини замонавий рақамли моделлаштириш усуллари орқали аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Яримўтказгичлардаги фотоэлектрик жараёнларни “PVlighthouse” рақамли моделлаштириш услуги, “VisualBasic” ва “C#9,1” дастурлаш асосида ишлаб чиқилган янги дастурий маҳсулотлар ва

“Sinton WCT-120”, “Sinton SunVoc” мажмуасида кремний куёш хужайраларининг хусусиятларини ўлчаш усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

илк бор икки муҳит бўлиниш чегарасидан ёруғлик нурининг энг самарали ўтиши учун TiO_2 , SiN_x , SiO_2 ва MgF_2 лардан иборат кўпқатламли кремний асосидаги фотоэлектрик қурилмаларнинг оптимал кетма-кетлик тартиби ва қалинликлари аниқланган;

нур қайтишига қарши қатламлардан фойдаланиш TiO_2 асосидаги фотоэлектрик қурилмаларнинг ток йиғувчи электродлар майдонини 20% гача камайишига олиб келиши аниқланган;

текстураланган сиртга эга бўлган кремнийнинг оптик характеристикаларини компьютерда моделлаштириш орқали текстураларнинг геометрик шакли ва ўлчамлари аниқланган;

вертикал ориентацияланган гетероўтишли “Si/ZnO” структурага эга бўлган фотоэлектрик қурилмаларнинг янги конструкция ишлаб чиқилган;

кремний сиртининг оптик хусусиятларини ўрганишда “PVlighthouse” дастурий тизими ва ундан фойдаланиш методикаси ҳамда “VisualBasic” дастурий тизимига таянган ҳолда ЭҲМ учун янги дастурий таъминот яратилган;

наноўлчамли структураларга эга кремний асосидаги *p-n*-ўтишли элементларнинг фронтал сиртини SiO_2 ва SiN_x оптик материаллар билан қоплаш услуби яратилган;

кремний ва кремний асосидаги *p-n*-структурали фотоэлектрик қурилмалар томонидан нурланишни самарали ютиш учун ёруғликни қайтишига қарши қўлланиладиган текстураларнинг параметрларини аниқлашга имкон берувчи «Кремнийли куёш элементларида тўғри пирамидали текстура ҳосил қилишнинг геометрик асослари» номли янги ЭҲМ дастурий маҳсулот яратилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

юқори самарали куёш элементлари учун қалинлиги $5\div 200$ мкм диапазондаги кремний пластинаси сиртига шакллантирилган қалинлиги 5-150 нм диапазонда бўлган SiO_2 ва SiN_x оптик қатламларининг бир ва кўпқатламли ҳолатлари учун асосий оптик параметрлар – нур қайтиши, ютилиши ва ўтиш кўрсаткичлари аниқланган;

яримўтказгичларда фотоэлектрик жараёнларни моделлаштириш усуллари самарали қўллаш имконини берувчи “STGraphs” янги дастурий маҳсулот ишлаб чиқилган ва жорий қилинган;

кремний ва оптик қатламли ва текстурага эга бўлган кремний асосли *p-n*-структураларнинг оптик хусусиятларини аниқловчи “STGraphs” янги дастурий маҳсулот ишлаб чиқилган;

кремний асосли фотоэлектрик структуралар учун кўпқатламли оптик қатламларни ва текстураларни қўллаш орқали самарадор фотоэлектрик қурилма базаси қалинлигини камайитиришнинг энг мақбул амалий шартлари аниқланган;

оптик хусусиятлари такомиллаштирилган кремний асосли вертикал ориентацияланган гетероўтишли “*Si/ZnO*” структурага эга бўлган юқори кучланишли матрицавий фотоэлектрик қурилманинг янги конструкцияси ишлаб чиқилган;

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги: яримўтказгичларда фотоэлектрик жараёнларни рақамли моделлаштиришга мўлжалланган “*PVlighthouse*” дастурий таъминотидан, Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк Агентлиги рўйхатидан ўтказилган замонавий “*VisualBasic*” ва “*C#9,1*” дастурлаш асосида ишлаб чиқилган янги ЭҲМ учун дастурий маҳсулотлари (Гувоҳнома № DGU 08622 ва № DGU 08078)дан фойдаланилганлиги билан таъминланган. Дастурлар асосида олинган ҳисоблаш натижалари кремнийли қуёш элементларига тегишли экспериментал натижалар билан таққосланиб “*Sinton WCT-120*”, “*Sinton SunVoc*” қурилмаларида бажарилган ўлчов натижалари билан мослиги таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти юқори самарали қуёш элементлари учун қўлланиладиган кремний сиртида шакллантириладиган бир ва кўпқатламли оптик қопламалар ва мунтазам текстураларнинг физик ва оптик параметрларининг ўзаро боғланиш қонуниятларининг аниқланганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти кремний асосли юқори самарали қуёш элементлари учун бир ва кўпқатламли оптик қопламалар ҳамда текстураларнинг физик ва оптик параметрларининг аниқланганлиги, бундай мақсадда қўлланиладиган “*VisualBasic*” ва “*C#9.1*” дастурга таянган ЭҲМ учун дастурий маҳсулотлар ишлаб чиқилганлиги ва оптик хусусиятлари такомиллаштирилган юқори кучланишли матрицавий фотоэлектрик қурилманинг янги конструкцияси ишлаб чиқилганлигидан иборат.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.

Кремний ва кремний асосидаги *p-n*-структураларнинг фотоэлектрик хусусиятларини аниқлаш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

кремний сиртининг оптик хусусиятларидан №Атех-2018-47 рақамли «Дерматология клиник амалиётида қўллаш учун лазер технологиялари ва УБ-ёруғлик манбалари асосидаги фототерапевтик қурилманинг янги авлодини ишлаб чиқиш» лойиҳасида “*PVlighthouse*” дастурий тизими ва ундан фойдаланиш методикасидан ҳамда “*VisualBasic*” дастурий тизимига таянган ҳолда ЭҲМ учун яратилган янги дастурий таъминотдан фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2021 йил 10 февралдаги 2/1255-410-сон маълумотномаси). Натижада яратилаётган лазер асосидаги фототерапевтик қурилма параметрларини яхшилаш ва терини турли оптик хусусиятларини юқори аниқликда ўлчаш имконини берган;

наноўлчамли структураларга эга кремний асосидаги *p-n*-ўтишли элементларнинг фронтал сиртини SiO_2 ва SiN_x оптик материаллар билан қоплаш услубидан №ОТ-Ф2-68 рақамли «Кристалларда киришма-нуқсон

турдаги микро- ва нанобирикмаларини ҳосил бўлиш механизмлари ва уларнинг кенг функционал имкониятли кўпқатламли тузилмалар яратишдаги ўрни» мавзусидаги лойиҳада наноўлчамли структураларга эга кремний асосидаги *p-n*-ўтишли элементларнинг фронтал сиртини SiO₂ ва SiN_x оптик материаллар билан қоплаш мақсадида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 18 августдаги №89-03-2859 - сон маълумотномаси). Натижада, уларнинг фотоэлектрик сезгирлигини 1,28 – 1,33 марта ошириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 5 та халқаро ва 3 та Республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияларда баён этилган ва муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация ишининг мавзуси бўйича жами 21 та илмий иш чоп этилган, шулардан 6 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда нашр этилган. 2 та ЭҲМ учун дастурий маҳсулотларга ЎзР ИМАнинг муаллифлик гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертациянинг ҳажми 46 та расм ва 9 та жадвални ўз ичига олган ҳолда 116 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси очиқ берилган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объекти, предмети ва услуби тавсифланган. Шунингдек, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, ишнинг апробацияси, нашр этилган ишлар, диссертациянинг ҳажми ва тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

“Яримўтказгичлар, улар асосидаги *p-n*-структуралар ва энергетик қурилмаларнинг оптик хусусиятлари” номли 1 бобда тадқиқот иши бўйича адабиётлар таҳлили келтирилган. Яримўтказгичли фотоэлектрик қурилмаларнинг тузилиши, яримўтказгич материаллар ва *p-n*-структураларнинг оптик хусусиятлари ва уларни такомиллаштириш усуллари баён этилиб, тадқиқотнинг долзарблиги, мақсади ва ечилиши зарур бўлган вазифалари белгиланган.

“Яримўтказгич асосли фотоэлектрик қурилмаларни ўрганишда моделлаштириш усулларида фойдаланиш” деб номланган 2-бобда “PVlighthouse” дастурий тизими ва улардан яримўтказгичларда кузатиладиган фотоэлектрик жараёнларни тадқиқ қилиш вазифаларини ечишда, шунингдек,

янги ишлаб чиқилган “VisualBasic” дастурий тизимига асосланган “Кремний асосидаги куёш элементларида тўғри пирамидали текстура ҳосил қилишнинг геометрик асослари” номли ЭҲМ учун дастурий маҳсулот ва ундан илмий мақсадларда фойдаланиш методикаси баён қилинган. “PVLighthouse” дастурий тизимида 120 дан зиёд материалларнинг синдириш кўрсаткичлари жамланган маълумотлар базаси мавжудлиги баён этилган.

“Кремний асосли фотоэлектрик қурилмаларда ёруғлик қайтишига қарши оптик қатламлардан фойдаланиш” деб номланган 3-бобида икки муҳит сиртига ёруғлик нури тушишининг назарий таҳлили, сиртида бир ва кўпқатламли оптик қатламларга эга бўлган кремнийнинг оптик характеристикаларини аниқлаш усуллари, оптик қатламлар қўллаш орқали фотоэлектрик қурилманинг кремний асосининг қалинлигини камайтириш имкониятлари муҳокама этилган.

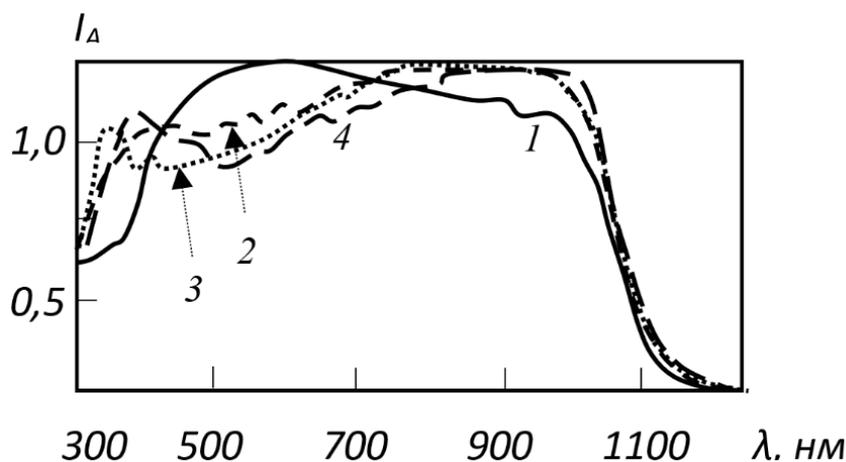
Кремний сиртидан нур қайтишига қарши мақбул оптик қатламнинг турини, қатламлар сонини ва қалинлигини аниқлаш учун икки муҳит сиртига тушган нурнинг қайтиши, синиши ва ўтишини тавсифловчи классик оптика назариясига мурожаат қилинди. Максвелл тенгламалари ва Френел коэффицентлари учун умумий шаклдаги ифодалар ҳамда нурни қутбланган электромагнит тўлқин деб қараб, геометрик оптика фонунларини эътиборга олган ҳолда бир ва кўпқатламли оптик қатламлар учун қайтариш, синиш ва ўтиш коэффицентлари учун рақамли моделлаштиришда фойдаланишга қулай формулалар келтириб чиқарилди. Жумладан m - қатламнинг синдириш кўрсаткич қуйидаги формула билан ҳисобланади:

$$n_m = n_{\text{юқ}}^{[(M+1-m)/(M+1)]} n_{\text{кр}}^{[m/(M+1)]} \quad (3)$$

Бу ерда n_m – m -қатламнинг синдириш кўрсаткичи, $n_{\text{юқ}}$ – энг юқориги қатламнинг синдириш кўрсаткичи, $n_{\text{кр}}$ – кремнийнинг синдириш кўрсаткичи, M – қатламлар сони.

Шунингдек, бир ва кўпқатламли оптик қопламаларни қўллаганда компьютерда ҳисоблаш операцияларини тубдан қисқартирадиган (тезлаштирадиган) матрицалар методини қўллаш орқали сиртнинг натижавий қайтариш ва ўтиш коэффицентларини аниқлаш имкониятлари кўрсатилди. 1-расмда нур қайтишига қарши қатламли кремнийда нур ютиш кўрсаткичининг ёруғлик тўлқин узунлигига боғлиқлиги келтирилган. Кремний сиртини пассивлаштириш хусусиятидан келиб чиқиб, амалиётда кенг қўлланиладиган SiN_x ва SiO_2 қатламларни кўпқатламли (1, 2, 3 ва 4 қатламли) НКҚҚ сифатида қўллаш натижалари қуйидаги графикларда келтирилган. Мазкур графиклардаги қатламлар 1 - жадвалда келтирилган тартиб рақамига мос келади.

№	НҚҚҚлар сони	Структура	Қалинликлари
1	1 қатламли НҚҚҚ	“ $Si / SiN_x / \text{ҳаво}$ ”	200 мкм / 100 нм
2	2 қатламли НҚҚҚ	“ $Si / SiN_x / SiO_2 / \text{ҳаво}$ ”	200 / 75 / 25
3	3 қатламли НҚҚҚ	“ $Si / SiN_x / SiO_2 / SiN_x / \text{ҳаво}$ ”	200 / 50 / 25 / 25
4	4 қатламли НҚҚҚ	“ $Si / SiN_x / SiO_2 / SiN_x / SiO_2 / \text{ҳаво}$ ”	200 / 25 / 25 / 25 / 25

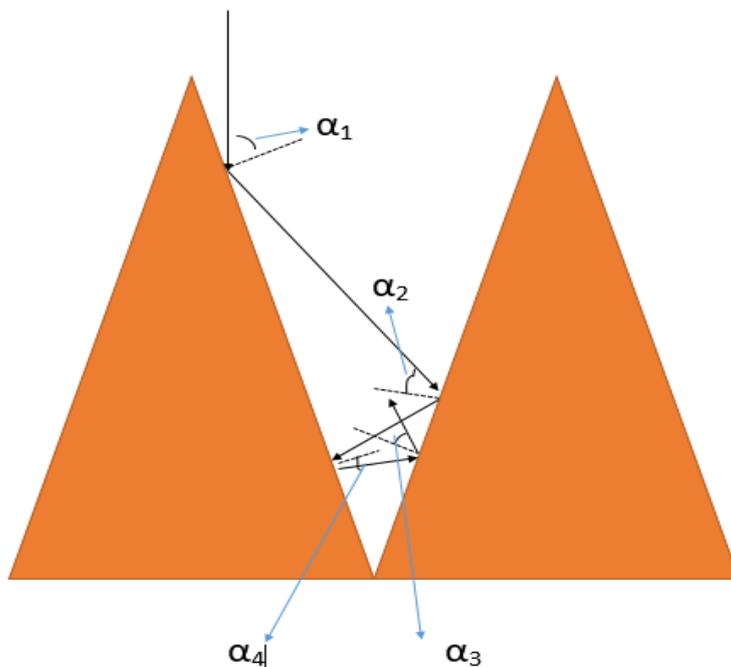


Расм-1. 1, 2, 3 ва 4 нур қайтишига қарши қатламли кремнийда нур ютиши кўрсаткичининг ёруғлик тўлқин узунлигига боғлиқлиги.

Ўтказилган тадқиқот натижаларидан кўринадики, кўринма нурнинг қисқа тўлқинли соҳасида ирқатламли нур қайтишига қарши қатламларни, қолаверса “ $Si / SiN_x / \text{ҳаво}$ ” тизимдан фойдаланиш мақсадга мувофиқдир. Кўпқатламли нур қайтишига қарши қатлам сифатида иккиқатламли “ $Si / SiN_x / SiO_2 / \text{ҳаво}$ ”, учқатламли ва “ $Si / SiN_x / SiO_2 / SiN_x / \text{ҳаво}$ ” тўртқатламли “ $Si / SiN_x / SiO_2 / SiN_x / SiO_2 / \text{ҳаво}$ ” тизимлардан фойдаланилганда кўринма нурнинг инфрақизил ва ультрабинафша нурлар томонида юқори даражадаги ютилиш таъминланишини кўриш мумкин. Бундай натижалар кремнийли ФҚда, унинг дастлабки спектрал характеристикасига қараб, кўпқатламли нур қайтишига қарши қатлам қўллашда оптик нур спекторининг қайси диапазонида ютилишни ошириш эҳтиёжидан келиб чиққан ҳолда танлашни амалга ошириш мақсадга мувофиқ эканлигини кўрсатади.

Шу билан бирга икки муҳит сиртига ёруғлик нури тушганда кузатиладиган қайтиш ва синиш ҳодисаларининг физик назарияси асосида кўпқатламли оптик қатламларни фотоэлектрик қурилмаларда қўллаш шартлари аниқланган. Кремний асосли фотоэлектрик структуралар учун кўпқатламли оптик қатламларни қўллаш орқали самарадор фотоэлектрик қурилма базасининг қалинлигини камайтириш имкониятлари ва шартлари аниқланган.

“Кремний сиртини текстуралаш орқали оптик хусусиятларини такомиллаштириш ва юқори самарали фотоэлектрик қурилмалар яратиш” деб номланган 4-бобида икки муҳитнинг текстураланган сиртига ёруғлик нури тушишининг назарий таҳлили, текстуралар турлари ва текстураланган сиртга эга бўлган кремнийнинг оптик характеристикаларини аниқлаш ҳамда текстураларни қўллаш орқали фотоэлектрик қурилманинг кремний асосининг қалинлигини камайтириш юзасидан олинган тадқиқот натижалари таҳлил этилган. 2-расмда пирамида шаклида текстураланган сиртда нурнинг синиши кўрсатилган.



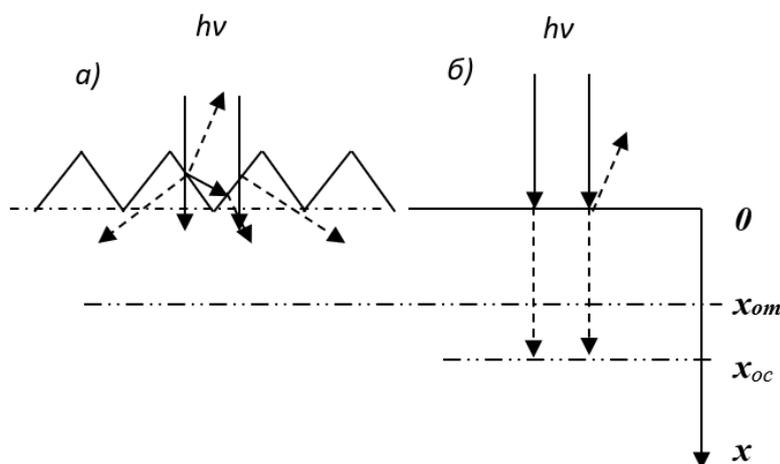
Расм-2. Пирамида шаклида текстураланган сиртда нурнинг синиши

$$a_1 = \alpha; \quad a_2 = 3\alpha - \pi; \quad a_3 = 5\alpha - 2\pi; \quad a_4 = 7\alpha - 3\pi, \quad (4)$$

бу ерда α – пирамида асосидаги бурчак; $\alpha = \arctg(2h/d)$, h – пирамиданинг баландлиги, d – пирамида асосининг кенглиги.

Умумий қайтариш коэффициенти қуйидаги ифода орқали аниқланади:

$$R(a) = r_1(a_1)r_2(a_2)r_3(a_3)r_4(a_4) \quad (5)$$



Расм-3. Текстураланган ва силлиқ сиртда нурнинг тарқалиши

3-расм текстураланган ва силлиқ сиртда нурнинг тарқалиши келтирилган. Фронтал сиртга пирамидал текстура шакллантириш яримўтказгичда нур йўлининг ясси сиртга нисбатан узайишига олиб келади. Яримўтказгич ҳажмида нурнинг, яъни фотонларнинг ҳаракат йўли катталашар экан, табиийки, ЗТ генерацияси эҳтимоллиги ҳам ортади. Худди шунингдек пластинанинг орқа томонига ҳам текстура шакллантирилса, юқорида айтилган ижобий натижа янада яхшиланиши қатор рақамли моделлаштиришга асосланган ҳисоблашларда кўринди. Тегишли қайтариш коэффициентларини Френел тенгламаларидан топилади. Умумий қайтариш коэффициентини пирамида асосидаги бурчак функцияси сифатида олиб, уни дифференциалланса ва нолга тенглаштирилса, экстремал қийматни берувчи бурчакни топиш мумкин бўлади:

$$r_1(\alpha) r_2(\alpha) r_3(\alpha) [d r_4(\alpha)/d(\alpha)] + r_1(\alpha) r_2(\alpha) r_4(\alpha) [d r_3(\alpha)/d(\alpha)] + r_1(\alpha) r_3(\alpha) r_4(\alpha) [d r_2(\alpha)/d(\alpha)] + r_4(\alpha) r_2(\alpha) r_3(\alpha) [d r_1(\alpha)/d(\alpha)] = 0 \quad (6)$$

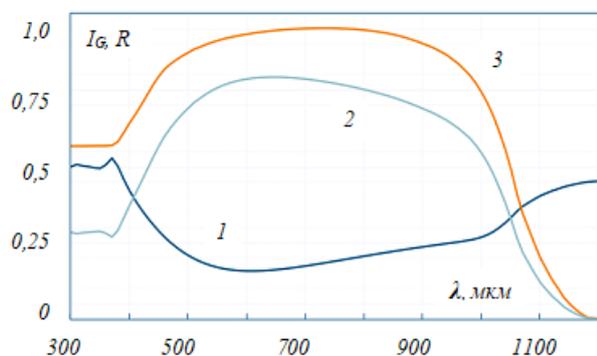
Бу формула ёрдамида 4 марта синишни таъминлай оладиган пирамида асосидаги мақбул бурчак 73,12 град бўлишини кўрсатди.

Кремний сиртини текстуралаш орқали куёш элементининг базаси қалинлигини камайтириш имкониятларини тасдиқловчи бир қатор натижалар олинди. Қалинликни 3 тартибга камайтирганда қисқа туташув токи текстурали структуралар учун 45 дан 36 мА/см² гачагина, текстурасиз структураларда эса, 42 дан 12 мА/см² гача камаяди.

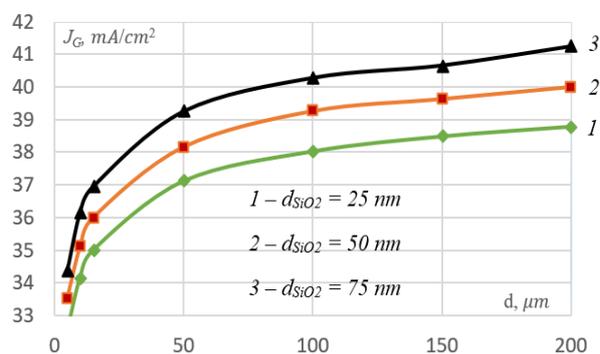
Таъкидлаш жоизки, тадқиқотда қўлланган дастур бир қатор бошқа физик параметрларнинг ҳам таъсирини ўрганишга имкон беради. Базанинг солиштирма қаршилиги ρ , акцепторлар концентрацияси N_p , диффузия узунлиги L_p ёки заряд ташувчиларнинг яшаш вақти τ_p кабиларнинг куёш элементининг асосий фотоэлектрик параметрларига таъсирини аниқлаш

мумкин бўлади. Масалан, акцепторлар концентрацияси N_p нинг қуёш элементининг салт ишлаш кучланиши U_{cu} га таъсири кўрилса, концентрациянинг ортиши билан диффузия узунлиги L нинг тез тушишига қарамай акцепторлар концентрацияси $N_p > 1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ бўлганда салт ишлаш кучланиши U_{cu} нинг қиймати номонотон ўзгаради ва акцепторлар концентрацияси $N_p = 1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ бўлганда у максимум қийматга эга бўлади.

Илмий асосланган таҳлил асосида текстураланган сиртга эга бўлган кремнийнинг оптик характеристикаларини ҳисоблаш орқали фотоэлектрик қурилмаларда қўлланиладиган текстураларнинг геометрик шакл ва ўлчамларига боғлиқлик қонуниятлари ва шартлари аниқланган. Шунингдек, кремний асосли фотоэлектрик структуралар учун текстураларни қўллаш эвазига самарадор фотоэлектрик қурилма базасининг қалинлигини камайтириш имкониятлари ва шартлари аниқланган. 4-расмда кремний асосли структуранинг текстураланган сиртидан қайтган нурнинг квант самарадорлик графиклари келтирилган. Бизга маълумки ташқи квант самарадорлик доимо юқори бўлиш керак. Шу мақсадга янада юқори бўлишлиги учун текстурага эга бўлган кремний ва текстурага эга бўлмаган кремний фотогенерация токининг ёруғлик тўлқин узунлигига боғлиқлиги келтирилган. Расмдан кўришиб турибдики 3-чи зикр яъни текстурага эга бўлган кремний ташқи квант самарадорлиги юқорилигини кўришимиз мумкин.



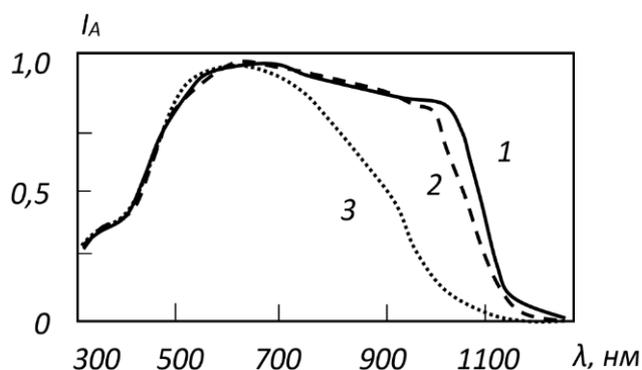
Расм-4. Кремний асосли структуранинг текстураланган сиртидан қайтган нурнинг (1), ички (2) ва ташқи (3) квант самарадорлиги



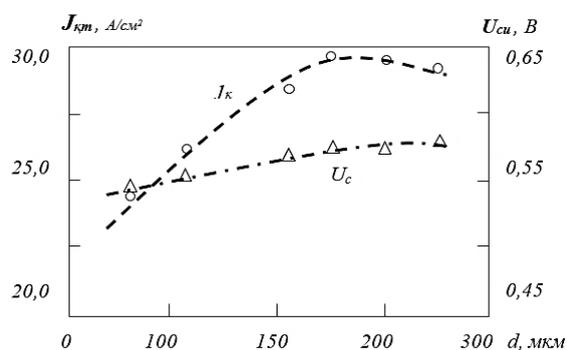
Расм-5. Пирамидал текстураланган сиртли кремнийда фотогенерация токининг база қалинлигига боғлиқлик самарадорлиги

5-расмда кремний сиртида пирамидал текстураланган фотогенерация токининг база қалинлигига боғлиқлиги келтирилган. Бу натижадан кўринадиги кремний қалинлигининг ортиб бориши билан генерация токининг ортиб бориши қонуниятини унинг сиртига нур қайтишига қарши қатлам қопланган ҳолда ҳам сақланади. Бундан кўринадиги, нур қайтишига қарши қатлам қалинлигининг ролини ҳам асосий мақбул шартлардан бири эканлигини кўришимиз мумкин.

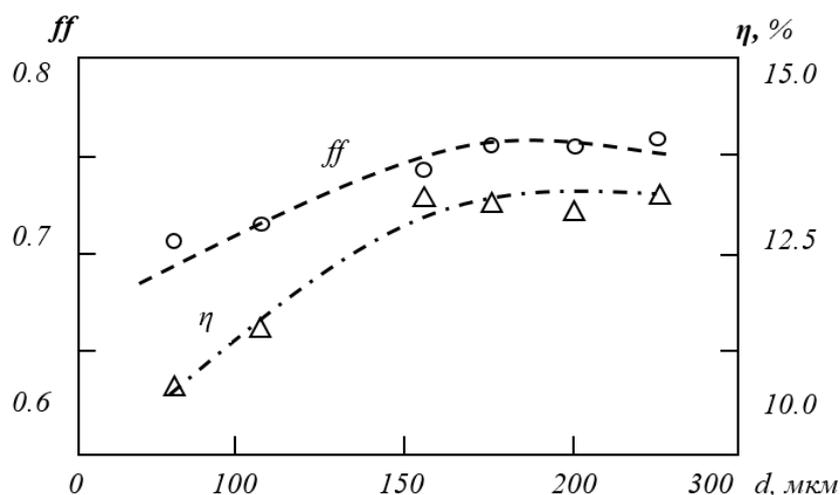
Диссертациянинг кейинги босқичида фотоэлектрик қурилма сиртидаги текстура турларига устки оптик қатламларни қоплашнинг зарурати ва шартлари, турли шаклдаги текстурага эга бўлган сиртларга оптик қатламлар қоплаш орқали оптик характеристикаларнинг ўзгариши, иккитомонлама текстурали ва оптик қатламли структураларнинг оптик характеристикалари, шунингдек юқори кучланишли матрицавий фотоэлектрик қурилмаларнинг оптик хусусиятларни такомиллаштириш бўйича тадқиқот натижалари муҳокама қилинган. 6-расмда сиртида (SiN_x , $d=75$ нм) қатламга эга турли қалинликдаги кремний нур ютиш кўрсаткичининг спектрал боғланиши келтирилган. Расмлардаги чизиқларга эътибор берадиган бўлсак, кремний база қалинлиги 200 мкм дан 100 мкм га камайтирилганда ҳам нур ютилиш коэффиценти сезиралли даражада камаймаган ҳолатда бўлганлигини кўришимиз мумкин ва асосан инфрақизил соҳага тўғри келишини кўришимиз мумкин. Бундан хулоса сифатида таъкидлаш мумкинки бир ва кўпқатламли НКҚҚ структураларни кремний базасини камайтириш учун етарли кўшимча оптик мосламалар деб қабул қилиш етарли эмас. Келиб чиқадики, кремний базасини етарли даражада камайтириш учун текстуралар ёки бошқа инновацион оптик ечимларни қўллаш мақсадга мувофиқ бўлар экан. НКҚҚлар ана шундай конструкцияларда ҳам нурнинг қайтишини камайтирувчи ва қолаверса сиртнинг рекомбинацион хусусиятларини пассивлаштирувчи бўлиб хизмат қилади.



Расм-6. Сиртида (SiN_x , $d=75$ нм) қатламга эга турли қалинликдаги кремний нур ютиш кўрсаткичининг спектрал боғланиши: 1 – $d=200$ мкм; 2 – $d=100$ мкм; 3 – $d=10$ мкм;



Расм -7. Қуёш элементининг асосий фотоэлектрик параметрларининг кремний база қалинлигига боғлиқлиги



Расм - 8. Қуёш элементининг асосий фотоэлектрик параметрларининг кремний база қалинлигига боғлиқлиги

7-расмда сиртига кремний икки оксиддан НКҚҚ сифатида қопланган турли қалинликдаги кремний пластиналари негизида яратилган фотоэлектрик қурилманинг асосий фотоэлектрик параметрларининг база қалинлигига боғлиқлиги келтирилган. Ҳисоблаш натижаларининг кўрсатишича, кремний қалинлигининг ўзгариши аввало қисқа туташув токига таъсир қилади, масалан $d \approx 50 \div 150$ мкм диапазонда $\Delta J_{кз}/\Delta d \approx 0,006 \text{ mA} \times \text{cm}^{-2} \times \text{mkm}^{-1}$ қиймат кузатилади. Фототокнинг максимал қийматига $d \approx 50 \div 150$ мкм да эришилади.

8-расмда кремнийнинг қалинлигига иккинчи сезгир параметр – бу тўлдириш коэффициенти келтирилган. Унинг ўзгариши $d \approx 50 \div 150$ мкм диапазонда $\Delta FF/\Delta d \approx 0,0006 \text{ mkm}^{-1}$ коэффициентни ташкил этади. Фотоэлектрик қурилманинг самарадорлиги кремнийнинг қалинлиги 150 мкм дан юқори бўлганда деярли ўзгармайди ва бу нурнинг деярли максимал даражада ютилганидан далолат беради.

Кейинги тадқиқотларимизда яримўтказгичда нурнинг ютилишига доир

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

заряд ташувчилар генерациясига доир

$$G = \alpha N_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

маълум ифодалардан фойдаланиб, кремнийда нур ютилишининг айрим физик параметрлари ҳисобланди (бу ерда I_0 – сиртдаги нур интенсивлиги, x – нурнинг кириш чуқурлиги. N_0 – сиртдаги фотонлар концентрацияси). 1-жадвалда кремнийда нур ютилиш коэффициенти ва нурнинг кириш чуқурлиги $\alpha(\lambda)$ ва $\Delta x(\lambda)$ боғланишларни ҳисоблаш натижалари келтирилган. Таъкидлаш жоизки кремнийнинг тақиқланган зонасидаги зарядларнинг ўтиши тўғри бўлмайди, шунинг учун яқин ИҚ-соҳада нурнинг ютилиши мавжуд бўлади, лекин унинг қиймати жуда кам бўлгани учун жадвалга киритилмаган. Электрон-ковак жуфтликларнинг генерацияланиш тезлиги чуқурлик бўйича экспоненциал камайиб боради (жадвал 2).

Жадвал 1.

Кремнийда нур ютилиш коэффициенти ва нурнинг кириш чуқурлиги $\alpha(\lambda)$ ва $\Delta x(\lambda)$ боғланишларни ҳисоблаш натижалари

λ , нм	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
α , см^{-1}	$1,5 \times 10^6$	1×10^5	1×10^4	4×10^3	2×10^3	1×10^3	5×10^2	$0,7 \times 10^1$	3×10^0
Δx , мкм	7×10^{-2}	1×10^0	1×10	2×10	7×10	1×10^2	3×10^2	2×10^3	3×10^4

Жадвал 2.

Кремнийда электрон-ковак жуфтликлари генерацияланиши тезлигининг чуқурлик бўйича ўзгариши $G(\Delta x)$

Δx , мкм	0	50	100	150	200	250	300
g , м^{-3}	6×10^{21}	6×10^{18}	$1,6 \times 10^{18}$	$1,1 \times 10^{18}$	9×10^{17}	7×10^{17}	6×10^{18}

Диффузион p - n -ўтишга эга бўлган моно-, мульти- ва поли- кристалл кремнийнинг турли қалинликлари учун НКҚҚга эга бўлмаган куёш элементининг қисқа туташув токи ҳисобланди ва натижалар 3-жадвалда келтирилди.

Жадвал 3.

Моно-, мульти- ва поли- кристалл кремнийнинг турли қалинликлари учун куёш элементининг қисқа туташув токини ҳисоблаш натижалари

d , мкм	10	50	100	150	200	250	300
$J_{\text{кз}}$, $\text{мА}/\text{см}^2$ для моно-Si	23	24	26,6	28,5	29	29,2	28
$J_{\text{кз}}$, $\text{мА}/\text{см}^2$ для мульти-Si	22	23	25	27	28,3	28	27
$J_{\text{кз}}$, $\text{мА}/\text{см}^2$ для поли-Si	20	23	24	24,4	24	23	22

Мазкур тадқиқотни бажаришда қисман экспериментал усуллар ҳам қўлланилди. Солиштирма қаршилиги $\rho \approx 0,001 \text{ Ом} \times \text{см}$ бўлган кремний тагликка эпитаксиал ўстирилган $\rho \approx 1 \div 3 \text{ Ом} \times \text{см}$ бўлган эпитаксиал p -типли қатламга фосфор атомларини термик диффузиялаш орқали p - n -ўтишли куёш элементлари тайёрланди. Турли қалинликдаги базага эга бўлган бундай куёш элементларининг ВАХ стандартлаштирилган қурилмаларда сунбий куёш симулятори остида ўлчанди.

Натижада самарали оптик хусусиятларга эга бўлган фотоэлектрик структуралар олиш учун текстураланган сиртга қўшимча оптик қатламларни қоплашнинг текстуралар шакли ва ўлчамларига боғлиқ равишда зарурий шартлари аниқланди. Юқори самарадор фотоэлектрик структуралар олиш мақсадида оптик қатламга металл нанозаррачаларини киритиш учун мақбул текстураланган кремний сиртидан фойдаланиш усули таклиф этилди.

Юқори кучланишли матрицавий фотоэлектрик қурилманинг микроэлементларидаги кучли легирланган эмиттер қатламлари ва оралиқ боғловчи юпқа металл қатламларни легирланган металлоксид қатламларга алмаштириш орқали оптик хусусиятлари такомиллаштирилган кремний асосли янги конструкцияси ишлаб чиқилган.

УМУМИЙ ХУЛОСАЛАР

Яримўтказгичли куёш элементлари учун асосий материал ҳисобланган кремний сиртининг оптик хусусиятларини такомиллаштириш мақсадида нур қайтишига қарши оптик кўпқатлам ва мунтазам текстуралар қўллашнинг мақбул шартларини аниқлашга бағишланган тадқиқот натижалари асосида қуйидаги хулосалар келтирилган:

1. Икки муҳит сиртига ёруғлик нури тушганда кузатиладиган қайтиш ва синиш ҳодисалари табиатининг классик назарияси асосида TiO_2 , SiN_x , SiO_2 ва MgF_2 лардан иборат кўпқатламли оптик кўпқатламларни кремний асосли фотоэлектрик қурилмаларда қўллашнинг кетма-кетлик тартиби ва қалинликларининг мақбул физикавий чегаралари аниқланган.

2. Кремний асосли фотоэлектрик структуралар учун кўпқатламли оптик қатламларни ва текстураларни қўллаш орқали нурнинг ҳажмда ютилишини орттирилиши ҳисобига самарадор фотоэлектрик қурилма базасининг қалинлигини $200 \div 100$ мкм га камайтиришнинг физикавий шартлари ва технологик имкониятлари аниқланган.

3. Самарали оптик хусусиятларга эга бўлган кремний асосли фотоэлектрик структуралар олиш учун текстураланган сиртга кўшимча SiO_2 ва SiN_x оптик қатламларни қоплашнинг пирамидал текстуралар (тўғри ва тескари) шакли ва уларнинг ўлчамларига боғлиқ равишда зарурий физикавий шартлари аниқланган.

4. Текстураланган сиртга эга бўлган кремнийнинг оптик характеристикаларини компьютерда моделлаштириш орқали ҳисоблаш асосида фотоэлектрик қурилмаларнинг асосий чиқиш характеристикаларининг уларда қўлланиладиган пирамидал текстураларнинг геометрик шакли (тўғри ва тескари пирамида), “пирамида асосидаги бурчак” ($20 \approx 80$ град), “асос ўлчами” ва “балаңдлик ўлчами” ($0,5 \div 5,5$ мкм) каби параметрларига чизикли боғланишлари аниқланган.

5. Моно-, мульти- ва поликристалл кремний негизига қурилган диффузиявий $p-n$ -ўтишга эга фотоэлектрик қурилмаларда база қалинлигининг самарадорликка таъсири таққослаб ўрганилган ҳамда уларнинг аниқланган турлича қийматли оптимал қалинликлари материалнинг ҳажмий структуравий ножинслиликларда нурнинг сочилиши ҳодисаси орқали тушунтирилган.

6. Фронтал сиртига ZnO қатламнинг амалиётда қўлланиладиган катта диапазондаги қалинликлари $200 \leq d \leq 800$ нм ва пирамидал текстураланган сирт учун нур ютилиши кўрсаткичининг спектрал характеристикасидаги номонотонлик аниқланган ҳамда бу номонотонликнинг сиртга кўшимча SiO_2 юпқа ($d \approx 100$ нм) қатламни қоплаш орқали бартараф қилиш имконияти кўрсатилган.

7. “*PVlighthouse*” рақамли дастурий тизимидан фойдаланган ҳолда кремний ва кремний асосли $p-n$ -ўтишли фотоэлектрик структураларнинг оптик хусусиятларини аниқлашнинг замонавий “*C#9,1*” дастури асосида “*STGraphs*” ЭХМ учун дастурий маҳсулот ишлаб чиқилган.

8. Кремний ва кремний асосли *p-n*-ўтишли структураларнинг оптик хусусиятларини текстура ва кўп қатламли ёруғлик қайтишига қарши оптик қатламларни қўллаш орқали аниқлашга мўлжалланган ва “VisualBasic”га таянган ЭХМ учун янги дастурий маҳсулот ишлаб чиқилган.

9. Юқори кучланишли матрицавий фотоэлектрик қурилманинг микроэлементларидаги кучли легирланган эмиттер қатламлари ва оралиқ боғловчи юпқа металл қатламларни легирланган металлоксид қатламларга алмаштириш орқали оптик хусусиятлари такомиллаштирилган кремний асосли янги конструкцияси ишлаб чиқилган.

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

**АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

МУЙДИНОВА МАДИНА АЛИШЕРОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЕМНИЯ И
p-n-СТРУКТУР НА ЕГО ОСНОВЕ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Ташкент-2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2021.1.PhD/FM82

Диссертация выполнена в Андижанском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (ispm.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net.uz).

Научный руководитель: **Насриддинов Сайфилла Саидович**
Доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Аюханов Рашид Ахметович**
Доктор физико-математических наук, с.н.с.

Кучкаров Кудратулла Мамарасулович,
Доктор физико-математических наук, г.н.с.

Ведущая организация: **Ташкентский государственный технический университет**

Защита диссертации состоится «24» мая 2021 года в 12⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 по присуждению ученых степеней Института физики полупроводников и микроэлектроники Национального Университета Узбекистана (Адрес: 100057, г.Ташкент, улица Янги Алмазар, дом №20. Тел.: (998 95) 146-77-44; Факс: (998 71) 248-79-94. e-mail: info@ispm.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института физики полупроводников и микроэлектроники Национального Университета Узбекистана (зарегистрирована за № 25). Адрес: (Адрес: 100057, г.Ташкент, улица Янги Алмазар, дом №20. Тел.: (998 95) 146-77-44; Факс: (998 71) 248-79-94.

Автореферат диссертации разослан «11» мая 2021 г.
(протокол рассылки № 25 от «11» мая 2021 г.).



Ш. Б. Утамурадова,
Председатель Научного совета
по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор
Ж. Ж. Хамдамов,
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней, PhD
З. Т. Азаматов
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. Сегодня в мире результаты исследований в области физики полупроводников, имеющей большое научное и практическое значение, широко используются для повышения фотоэлектрической эффективности структур на основе кремния. Определение условий обеспечивающих эффективное поглощение солнечного излучения в эмиттерном и базовом слоях кремниевых солнечных элементов (СЭ) путем анализа классической теории отражения, преломления и прохождения луча с использованием эффекта поляризации на границе двух сред является одной из наиболее важных задач.

В мире созданы фотоэлектрические солнечные элементы на основе кремния различных современных конструкций. С целью повышения эффективности солнечных элементов проводятся научные исследования по определению протекающих в них оптических процессов, формирования оптических слоев на фронтальных поверхностях солнечных элементов против отражения света. В связи с этим необходимо определение условий повышения оптической эффективности фотоэлектрических процессов за счет уменьшения отражения света поверхностью кремния и структур с *p-n*-переходом на его основе, а также формирования однослойных и многослойных оптических покрытий и текстурированных поверхностей на передней и задней поверхностях. Особое внимание уделяется выявлению механизмов, обеспечивающих эффективное поглощение кремния, разработки способов повышения фотоэлектрической эффективности за счет формирования неплоского фронта *p-n*-перехода.

В нашей стране особое внимание уделяется изучению эффективного управления оптически стимулированными процессами фотоэлектрического переноса заряда в традиционных *p-n*-структурах на основе кремния, и достигаются определенные результаты по повышению эффективности солнечных элементов на основе полупроводников. Растет потребность в материалах этого типа, которые создаются путем создания текстур на поверхности кремния, одновременно повышая эффективность кремниевых солнечных элементов. В четвертом абзаце Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан определены важные задачи по «... эффективным механизмам стимулирования исследований и инноваций, внедрению научных и инновационных достижений...»¹. В связи с этим актуальным является поиск инновационных решений для повышения фотоэлектрической эффективности традиционных *p-n*-структур на основе кремния, комплексные исследования, разработка экономически выгодных конструкций, а также комплексное изучение возможности снижения стоимости ценного кремниевого материала. Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по пяти приоритетам экономического развития Узбекистана на 2017-

¹Указ Президента Республики Узбекистан УП-4947 «Стратегия действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан на 2017-2021 годы».

2021 годы», № ПП-2772 от 13 февраля 2017 года » О приоритетах развития электротехнической отрасли», Постановление № ПП-2789 от 17 февраля 2017 г.«О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования исследований » и № ПП-4422 от 22 августа 2019 года «О секторах экономики и социальной сфере. Данное диссертационное исследование в определенной степени способствует реализации задач, поставленных в Постановлении« Об оперативных мерах по повышению энергоэффективности, внедрению энергосберегающих технологий и развитие возобновляемых источников энергии »и другие нормативные акты в этой области.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий на 2012-2020 годы: «III. Энергетика, энергоресурсосбережение, транспорт, машина и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Фундаментальные и прикладные исследования по повышению эффективности кремниевых солнечных элементов проводятся во многих научных центрах и университетах разных стран мира. В частности, исследования проводились такими учеными, как А.Роскет и Ж.Р.Блиим в США, С.В.Глунз в Германии, М.А.Грин в Австралии, Р.Кенни в Италии, В.А.Летин, В.Р.Заявлин, С.Е.Никитин, М.М.Колтун и Д.С.Стребков в России, которыми разработаны различные конструкции солнечных элементов на основе кремния. Большое внимание уделяется изучению роли оптических процессов в повышении эффективности солнечных элементов. Появилась новая отрасль науки, называемая «Менеджмент фотонов в кристаллах».

Ряд ученых Узбекистана предложили и разработали современные инновационные решения с целью конструирования кремниевых солнечных элементов: использования некристаллических тонких пленок (академик М.С.Саидов) и фронтальных голографических оптических систем (академик Р.А.Муминов), формирование в объеме кремния квантоворазмерных молекулярных нановключений (академик М.С.Баходирхонов). Предложены представителями научных школ страны ряд новые прогрессивные разработки по формированию антиотражающих оптических покрытий М.Н.Турсуновым и У.Газиевым, по использованию методов текстурирования поверхности Р.Алиевым, Ш.Клычевым и В.Дыскином.

Однако в исследовании не учитывались физические и оптические свойства однослойных и многослойных оптических покрытий, а также текстуры, образующиеся на поверхности солнечного элемента, а также толщина кремниевой основы. Никакие современные методы цифрового моделирования не использовались в качестве альтернативы столь сложным и дорогостоящим исследованиям. Поэтому научные исследования, направленные на решение этих проблем, являются актуальной задачей современности.

Связь темы исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, в котором выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в рамках фундаментальных исследовательских проектов № ОТ-Ф-2-28. «Кванто-размерные эффекты на поверхности и в объёме легированного кремния и их влияние на процессы фотогенерации и рекомбинации носителей зарядов *p-n*-структур» (2012-2017 гг.), включенного в план научно-исследовательских работ Андиганского государственного университета и БФЗ-003 “Разработка альтернативных нано- и микро-кремниевых источников энергии, основанных на примесном фотовольтаическом эффекте” (2017-2020 гг.) Андиганского машиностроительного института.

Целью исследования является исследование фотоэлектрических свойств кремния и *p-n*-структур на его основе и оптимизация оптических свойств поверхности кремния.

Задачи исследования заключаются в следующем:

определение оптических свойств кремния с сформированными на поверхности одно и многослойными антиотражающими покрытиями и с регулярной текстурой основываясь на теории лучепреломления на границе двух сред;

определение физических условий снижения толщины базового слоя кремния путем использования оптических покрытий и текстур;

определение условий усовершенствования оптических свойств кремния путем использования двухсторонних оптических покрытий и текстур;

определение возможности усовершенствования оптических свойств высоковольтных матричных фотоэлектрических устройств;

разработка методики применения программной системы *Pvlighthouse* для изучения оптических свойств кремния и новых программных продуктов для ЭВМ, основанных на “*VisualBasic*” и “*C# 9.1*”.

Объектами исследования являются монокристаллический кремний и сформированные на его поверхности оптические слои TiO_2 , SiO_2 , MgF_2 , SiN_x .

Предмет исследования заключается в определении методов современного цифрового моделирования физических и оптических характеристик монокристаллического кремния, используемого для изготовления солнечных элементов, сформированных на его поверхности TiO_2 , SiO_2 , MgF_2 , SiN_x .

Методы исследования: Использовано цифровое моделирование фотоэлектрических процессов в полупроводниках “*PVlighthouse*”, новые программные продукты на основе программирования “*VisualBasic*” и “*C# 9.1*”, а также методы измерения свойств кремниевых солнечных элементов в комплексах “*Sinton WCT-120*”, “*Sinton Sun-Voc*”.

Научная новизна исследования:

впервые определены оптимальный порядок следования и толщины многослойных фотоэлектрических устройств на основе кремния, состоящих из TiO_2 , SiN_x , SiO_2 и MgF_2 , для наиболее эффективного прохождения света через границу раздела двух сред;

установлено, что применение антиотражающих слоёв на основе TiO_2 позволяет уменьшить площадь токосъемных электродов фотоэлектрических устройств до 20%;

методом компьютерного моделирования оптических характеристик кремния с текстурированной поверхностью определены линейные размеры и геометрические формы отражающих текстур;

разработана новая конструкция фотоэлектрических устройств с вертикально ориентированной гетеропереходной структурой Si/ZnO ;

при исследовании оптических свойств поверхности кремния было разработано новое компьютерное программное обеспечение на основе программного комплекса «*PVlighthouse*» и методов его использования, а также программного комплекса «*VisualBasic*».

разработан метод покрытия лицевой поверхности кремниевых *p-n*-переходных элементов с наноразмерными структурами оптическими материалами SiO_2 и SiN_x .

разработан новый программный продукт «Геометрические основы создания прямых пирамидальных текстур на кремниевых солнечных элементах», который позволяет определять параметры текстур, используемых для эффективного поглощения излучения фотоэлектрическими устройствами на основе кремния и кремниевых *p-n*-структур.

Практические результаты исследования заключаются в следующих:

Определены оптимальные параметры показателей отражения, поглощения и прохождения солнечного луча через пластины кремния толщиной в диапазоне $5 \div 200$ мкм с поверхностными одно и многослойными оптическими покрытиями из SiO_2 и SiN_x с толщиной в диапазоне $5 \div 150$ нм для создания высокоэффективных солнечных элементов;

Создан и внедрен новый программный продукт “*STGraphs*”, позволяющий более эффективно применять метод моделирования фотоэлектрических процессов в полупроводниках;

Создан и внедрен новый программный продукт “*STGraphs*”, позволяющий определить оптические свойства кремния и кремниевых *p-n*-структур с поверхностными оптическими покрытиями и текстурой;

Определены наиболее приемлемые условия снижения толщины базового слоя кремния для создания эффективных фотоэлектрических устройств с оптическими покрытиями и текстурой на поверхности;

Предложена и разработана новая конструкция высоковольтного фотоэлектрического устройства с усовершенствованными оптическими свойствами на основе кремния с вертикально ориентированным “ Si/ZnO ” гетеропереходом.

Достоверность результатов исследования обеспечена использованием широко известной системы цифрового моделирования фотоэлектрических процессов в полупроводниках “*PVlighthouse*”, программных продуктов, основанных на современных языках программирования “*VisualBasic*” и “*C# 9.1*” и официально зарегистрированных Агентством интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. (Свидетельство № DGU 08622 и №

DGU 08078). Результаты расчета моделирования сопоставлены с результатами известных экспериментальных исследований и подтверждены измерениями характеристик кремниевых солнечных элементов с использованием комплексов “*Sinton WCT-120*”, “*Sinton Sun-Voc*”.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в определении закономерностей взаимной зависимости физических и оптических параметров сформированных одно и многослойных оптических покрытий и регулярной текстуры на фронтальной поверхности кремния, предназначенных для создания эффективных солнечных элементов.

Практическая значимость результатов исследования заключается в определении физических и оптических параметров одно и многослойных оптических покрытий и регулярной текстуры на фронтальной поверхности кремния, предназначенной для создания эффективных солнечных элементов, в разработке новых программных продуктов, основанных на языках “*VisualBasic*” и “*C# 9.1*”, а также новой конструкции высоковольтного матричного фотоэлектрического устройства на кремниевой основе.

Внедрение результатов исследования.

На основании полученных научных результатов по определению фотоэлектрических свойств кремния и кремниевых *p-n* структур:

При исследовании оптических свойств кремниевой поверхности в проекте Атех-2018-47 «Разработка нового поколения фототерапевтического аппарата на основе лазерных технологий и источников УФ-излучения для использования в клинической практике дерматологии» был использован *PVlighthouse*» программный продукт и методика его использования, а также новое программное обеспечение для ЭВМ на базе программного комплекса *VisualBasic*. (Справка АН РУз № 2/1255-410 от 10 февраля 2021 г.) Использование научных результатов позволило улучшить параметры созданного лазерного фитотерапевтического устройства и позволило с высокой точностью измерять различные оптические параметры кожи.

Для нанесения оптических материалов SiO_2 и SiN_x на фронтальную поверхность элементов с *p-n*-переходом на основе кремния с наноразмерной структурой в проекте ОТ-Ф2-68 «Механизмы образования микро- и наночастиц из примесных дефектов в кристаллах и их роль в формировании многофункциональных многослойных структур» использован метод нанесения оптических материалов SiO_2 и SiN_x на фронтальную поверхность элементов с *p-n*-переходом на основе кремния с наноразмерной структурой (справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 18 августа 2020 г. №89-03-2859). В результате удалось повысить их фотоэлектрическую чувствительность в 1,28 - 1,33 раза.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации были представлены и обсуждены на 5 международных и 3 республиканских научных конференциях.

Публикация результатов исследования. Всего по теме диссертации опубликованы 21 научная статья, из них 6 статей опубликованы в научных журналах, рекомендованных к публикации основных научных результатов докторских диссертаций ВАК Республики Узбекистан. Авторские свидетельства АИС Республики Узбекистан получены на 2 компьютерных программных продукта.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Объем диссертации 116 страниц, в том числе 46 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики, раскрыта степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, приведены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна и практическая значимость исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации и публикации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **“Оптические свойства полупроводников, *p-n*-структур на их основе и энергетических устройств”** приводятся обзор научной литературы. В частности, описано строение и принцип работы полупроводниковых фотоэлектрических устройств, оптические свойства полупроводниковых материалов и *p-n*-структур, а также методов их усовершенствования, изложены актуальность, цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе диссертации **“Применение методов моделирования в исследовании полупроводниковых фотоэлектрических устройств”** изложена методика использования общедоступной международной программной системы цифрового моделирования фотоэлектрических процессов в полупроводниках *“PVlighthouse”* и разработанных диссертантом новых программных продуктов для ЭВМ на основе современных языков программирования *“VisualBasic”* и *“C#9.1”* позволяющие более эффективно применять *“PVlighthouse”*. Подчеркнуто, что одной из важных особенностей программной системы *“PVlighthouse”* заключается в том, что имеется база данных по физическим и оптическим параметрам более 120 наименований материалов.

В третьей главе диссертации **“Использование антиотражающих покрытий в кремниевых фотоэлектрических устройствах”** обсуждены результаты теоретического анализа падения и преломления оптического луча, падающего на границу двух сред, определения оптических характеристик кремния с сформированными поверхностными одно и многослойными оптическими покрытиями, а также выявлены возможности уменьшения

толщины базового слоя кремния фотоэлектрических устройств за счет использования антиотражающих покрытий.

Для определения оптимального вида, толщины и количество слоев антиотражающего оптического материала на поверхности кремния использована классическая теория оптического отражения, преломления и прохождения луча через границу раздела двух сред. Основываясь на уравнениях Максвелла и выражениях для коэффициента Френеля, а также учитывая, что луч представляет собой электромагнитную волну с эффектом поляризации на границе двух сред и учитывая законы геометрической оптики получены формулы для определения коэффициентов отражения, преломления и пропускания луча. В частности, коэффициент преломления m -слоя можно вычислить при помощи формулы:

$$n_m = n_{\text{юк}}^{[(M+1-m)/(M+1)]} n_{\text{кр}}^{[m/(M+1)]} \quad (3)$$

Здесь n_m – коэффициент преломления m -слоя, $n_{\text{юк}}$ – коэффициент преломления верхнего слоя, $n_{\text{кр}}$ – коэффициент преломления кремния, M – количество слоев. Также показана возможность использования методов матриц с целью сокращения операций компьютерного вычисления при определении итоговых коэффициентов отражения, преломления и прохождения луча через многослойные оптические покрытия. На рис.1. показана спектральная зависимость коэффициента поглощения кремния для 1, 2, 3 и 4 слойного антиотражающего покрытия. Слои на этих графиках соответствуют порядковому номеру, указанному в таблице 1.

№	Номер антиотражающего слоя	Структура	толщина
1	1 антиотражающий слой	“Si / SiN _x / воздух”	200 мкм / 100 нм
2	2 антиотражающих слоя	“Si / SiN _x / SiO ₂ / воздух”	200 / 75 / 25
3	3 антиотражающих слоя	“Si / SiN _x / SiO ₂ / SiN _x / воздух”	200 / 50 / 25 / 25
4	4 антиотражающих слоя	“Si / SiN _x / SiO ₂ / SiN _x / SiO ₂ / воздух”	200 / 25 / 25 / 25 / 25

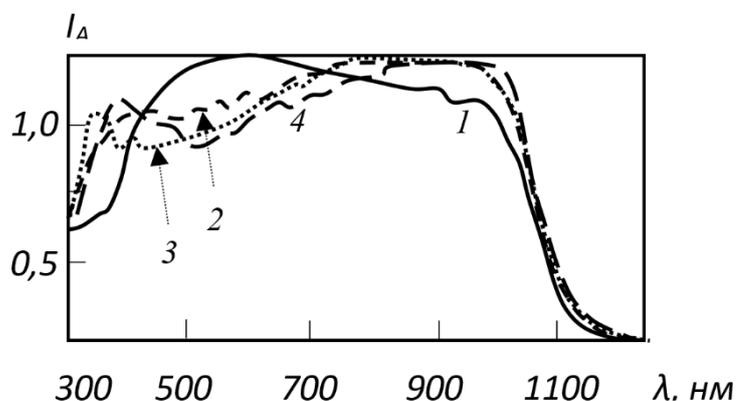


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента поглощения кремния для 1, 2, 3 и 4 слойного антиотражающего покрытия

Результаты исследования показывают, что в коротковолновом поле видимого света целесообразно использовать слоистые отражающего слоя, а также систему «Si / SiN_x / воздух». При использовании двухслойных «Si / SiN_x / SiO₂ / воздух», трехслойных «Si / SiN_x / SiO₂ / SiN_x / воздух» и четырехслойных систем «Si / SiN_x / SiO₂ / SiN_x / SiO₂ / воздух» в качестве многослойного отражающего слоя, наблюдается увеличение поглощения в области инфракрасный и ультрафиолетовый границ спектра. Такие результаты показывают, что в кремниевые фотоэлектрических устройств, в зависимости от его исходных спектральных характеристик, целесообразно делать выбор, исходя из необходимости увеличения поглощения. в каком диапазоне оптического светового спектра при использовании многослойного отражающего слоя. В результате на основе физической теории эффектов отражения и преломления падающего на границу двух сред луча определены необходимые и достаточные условия для применения многослойных оптических покрытий в кремниевых фотоэлектрических устройствах. Также показана возможность и определены условия снижения толщины базового кремния в кремниевых фотоэлектрических устройствах путем применения фронтальных поверхностных многослойных антиотражающих покрытий.

Четвертая глава диссертации **“Улучшение оптических свойств и создание высокоэффективных фотоэлектрических устройств путем текстурирования поверхности кремния”** посвящена физическому анализу теории отражения и преломления луча на текстурированной поверхности границы двух сред, изучению видов текстуры, определению оптических характеристик текстурированного кремния, а также выявлению возможности уменьшения толщины базового кремния в кремниевых фотоэлектрических устройствах за счет применения текстурирования поверхности кремния. На рис. 2 показано преломление света текстурированной поверхностью пирамидальной формы.

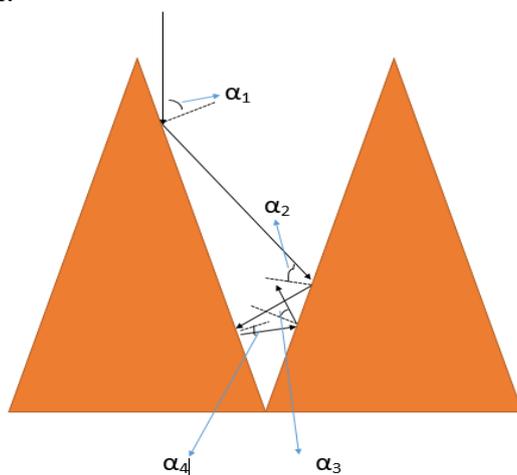


Рис. 2. Схема преломления света текстурированной поверхностью

$$a_1 = \alpha; \quad a_2 = 3\alpha - \pi; \quad a_3 = 5\alpha - 2\pi; \quad a_4 = 7\alpha - 3\pi, \quad (4)$$

здесь α – угол у основания пирамиды, $\alpha = \arctan(2h/d)$, h – высота пирамиды, d – ширина основания пирамиды. Общий коэффициент отражения определяется выражением:

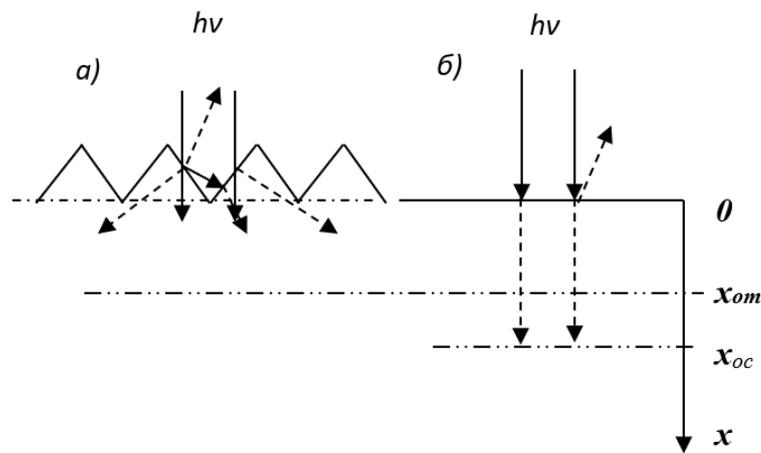
$$R(\alpha) = r_1(\alpha)r_2(\alpha)r_3(\alpha)r_4(\alpha) \quad (5)$$


Рис. 3. Рассеивание луча текстурированной (а) и плоской (б) поверхностью

На рис. 3 показано рассеяние света текстурированной и гладкой поверхностью. Пирамидальная текстура на фронтальной поверхности приводит к увеличению длины пути светового луча в полупроводнике. При увеличении пути луча фотона увеличивается генерация носителей заряда. Точно так же происходит если текстура была сформирована на обратной стороне пластины. Соответствующие коэффициенты отражения определяются из уравнений Френеля. Взяв общий коэффициент отражения в виде функции от угла α у основания пирамиды можно дифференцировать последнее уравнение и приравняв его нулю можно определить величину угла, соответствующую экстремальному значению:

$$r_1(\alpha) r_2(\alpha) r_3(\alpha) [d r_4(\alpha)/d(\alpha)] + r_1(\alpha) r_2(\alpha) r_4(\alpha) [d r_3(\alpha)/d(\alpha)] + r_1(\alpha) r_3(\alpha) r_4(\alpha) [d r_2(\alpha)/d(\alpha)] + r_4(\alpha) r_2(\alpha) r_3(\alpha) [d r_1(\alpha)/d(\alpha)] = 0 \quad (6)$$

Расчет показывает, что величина угла, соответствующая 4 кратному отражению луча составляет $73,12^\circ$.

Полученные результаты позволяют заключить, что применение текстурирования поверхности позволяет уменьшить толщину базового слоя кремния СЭ. Если уменьшается толщина кремния в 3 раза, то плотность тока короткого замыкания в структурах с текстурированной поверхностью уменьшается с 45 до 36 мА/см², а в случае без текстурирования фототок уменьшается с 42 до 12 мА/см². Необходимо отметить, что использованная в исследовании методика и программа позволяют выявить влияние ряда других факторов. В частности, можно определить влияние удельного сопротивления базы ρ , концентрации акцепторов N_p , диффузионной длины L_p или времени жизни носителей заряда τ_p и т. п. на основные фотоэлектрические параметры СЭ. Например, при рассмотрении влияния N_p на напряжение холостого хода СЭ (U_{xx}) выявлено, что с ростом концентрации, не смотря на быстрое снижение L , при $N_p > 1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ U_{xx} изменяется не монотонно и при $N_p = 1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ принимает максимальное значение.

На основе вычисления оптических характеристик кремния с рассматриваемой текстурой определены зависимости фотоэлектрических параметров фотоэлектрических устройств от геометрических форм и размеров регулярной текстуры. Также определены возможности и условия уменьшения толщины базового кремния для обеспечения высокой эффективности кремниевых фотоэлектрических устройств за счет использования регулярной текстуры поверхности. На рис. 4 показаны графики квантовая эффективность отраженного луча от текстурированной поверхности (1), внутренняя (2) и внешняя (3) квантовая эффективность кремниевых структур. Как известно, внешняя квантовая эффективность всегда должен быть больше. С этой же целью, приведена информация о токи фотогенерации в кремнии без текстурированной поверхностью и в кремнии с текстурированной поверхностью. Как видно из рисунка, мы видим, что 3-я кривая, то есть внешняя квантовая эффективность кремния, имеющая текстуру, больше.

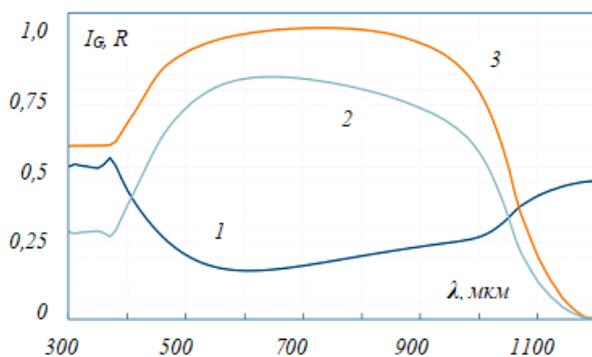


Рис. 4. Квантовая эффективность отраженного луча от текстурированной поверхности (1), внутренняя (2) и внешняя (3) квантовая эффективность кремниевых структур.

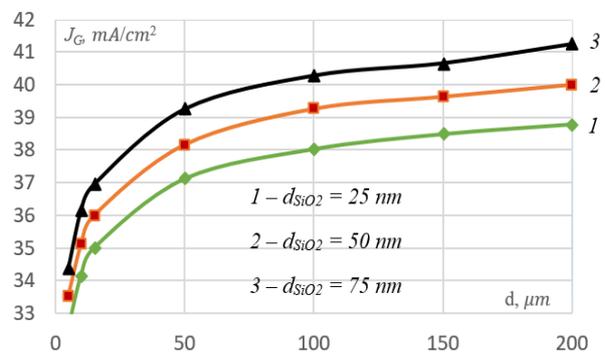


Рис. 5. Зависимость тока фотогенерации от толщины пирамидального текстурированного слоя

На рис. 5 приведена зависимость фотогенерационного тока в структуре с пирамидальным текстурированием на поверхности кремния в зависимости от толщины подложки. Как видно из рисунка, с увеличением толщины кремния увеличивается ток генерации и это увеличение сохраняется в случае нанесения на поверхность отражающего слоя. Это видно из того, что роль толщины отражательного слоя также является одним из основных факторов.

В данном разделе диссертации приведены и обсуждены результаты исследования по улучшению оптических свойств текстурированных поверхностей за счет нанесения дополнительных оптических слоев с различными формами текстурирования, оптические характеристики кремния с двухсторонней текстурой, а также по усовершенствованию оптических свойств высоковольтных матричных фотоэлектрических устройств.

На рис. 6 представлена спектральная зависимость коэффициента поглощения антиотражающих покрытий различной толщины сформиро-

ванных на поверхности кремния (SiN_x $d=75$ нм). Из рис. 6 видно, что при уменьшении толщины кремниевой основы с 200 мкм до 100 мкм изменение коэффициента поглощения света ничтожно мало, и видно, что эти изменения характерны для инфракрасной границы поглощения. В заключение можно отметить, что недостаточно предполагать, что одиночные и многослойные отражающие слои являются дополнительными оптическими устройствами, достаточными для уменьшения толщины кремниевой подложки. Из выше сказанного выходит, что для уменьшения кремневой базы целесообразно пользоваться текстурами или другими инновационными оптическими решениями. В таких конструкциях отражательного слоя также служат для уменьшения отражения света и пассивирования рекомбинационных свойств поверхности.

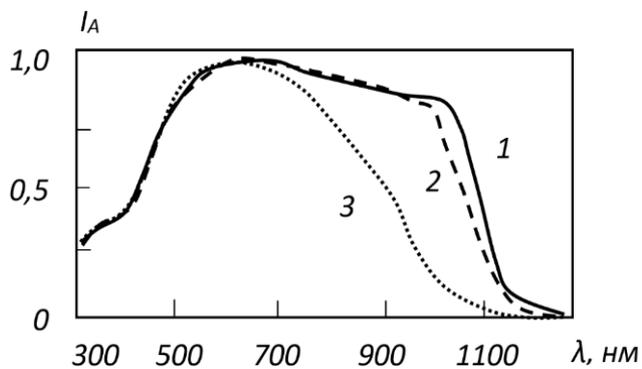


Рис. 6. Спектральная зависимость коэффициента поглощения антиотражающих покрытий различной толщины сформированных на поверхности кремния (SiN_x $d=75$ нм): 1 – $d=200$ мкм; 2 – $d=100$ мкм; 3 – $d=10$ мкм

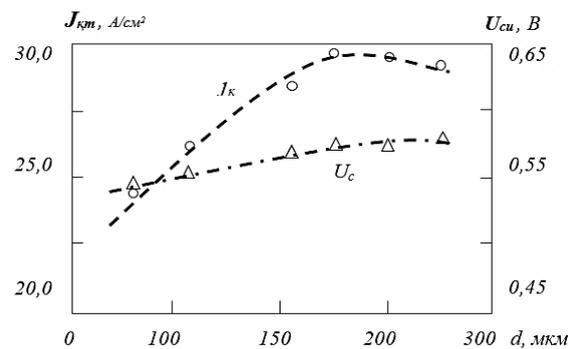


Рис. 7. Зависимость основных фотоэлектрических параметров кремневых СЭ от толщины базы.

На рис. 7 показана зависимость основных фотоэлектрических параметров от толщины подложки фотоэлектрического устройства, которое создано на основе кремниевых пластин различной толщины, нанесенных на поверхность в виде антиотражающего слоя из диоксидов кремния. Как показывают результаты расчета, изменение толщины кремния в первую очередь влияет на ток короткого замыкания, например, в диапазоне $d \approx 50 \div 150$ мкм наблюдается величина $\Delta J_{кз}/\Delta d \approx 0,006 \text{ mA} \times \text{cm}^{-2} \times \text{mkm}^{-1}$. Максимальное значение фототока достигается при $d \approx 50 \div 150$ мкм.

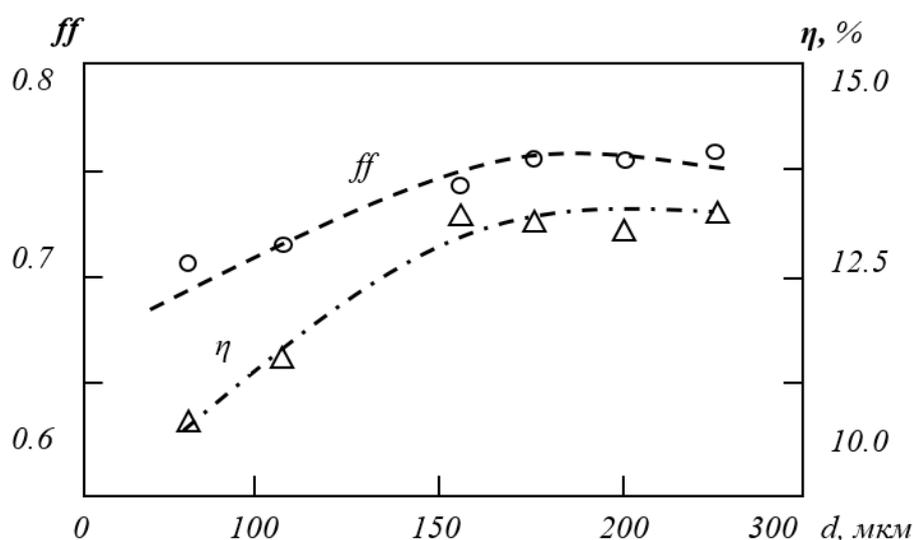


Рис. 8. Зависимость основных фотоэлектрических параметров кремниевых СЭ от толщины базы

На рис. 8 вторым чувствительным параметром к толщине кремния является коэффициент заполнения. Его изменение представляет собой коэффициент $\Delta FF/\Delta d \approx 0,0006 \text{ мкм}^{-1}$ в диапазоне $d \approx 50 \div 150 \text{ мкм}$. Эффективность фотоэлектрического устройства практически не меняется, когда толщина кремния превышает 150 мкм, и об этом свидетельствует тот факт, что свет полностью поглощается.

Основываясь на показателе и выражение для поглощения луча в полупроводнике

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

генерации носителей заряда

$$G = \alpha N_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

определены некоторые физические параметры поглощения луча в кремнии (где I_0 – интенсивность луча на поверхности, x – глубина проникновения луча. N_0 – концентрация фотонов на поверхности). В частности, результаты расчета зависимости $\Delta x(\lambda)$ в сопоставлении с данными коэффициента поглощения света $\alpha(\lambda)$ приведены в табл. 1. Необходимо отметить, что кремний является не прямозонным полупроводником, поэтому, имеется поглощение ИК-излучения, но его величина не большая и не приведена в таблице. Скорость генерации электронно-дырочных пар носителей заряда экспоненциально уменьшается по глубине (Таблица 2).

Таблица 1.

Результаты расчета зависимости $\Delta x(\lambda)$ в сопоставлении с данными коэффициента поглощения света $\alpha(\lambda)$

$\lambda, \text{ нм}$	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
$\alpha, \text{ см}^{-1}$	$1,5 \times 10^6$	1×10^5	1×10^4	4×10^3	2×10^3	1×10^3	5×10^2	$0,7 \times 10^1$	3×10^0
$\Delta x, \text{ мкм}$	7×10^{-2}	1×10^0	1×10	2×10	7×10	1×10^2	3×10^2	2×10^3	3×10^4

Таблица 2.

Изменение скорости генерации электронно-дырочных пар по глубине $G(\Delta x)$

$\Delta x, \text{ мкм}$	0	50	100	150	200	250	300
$g, \text{ м}^{-3}$	6×10^{21}	6×10^{18}	$1,6 \times 10^{18}$	$1,1 \times 10^{18}$	9×10^{17}	7×10^{17}	6×10^{18}

Выполнен расчет плотности тока короткого замыкания СЭ с диффузионным p - n -переходом и без антиотражающего оптического покрытия для различных толщин базового моно-, мульти- и поликристаллического кремния и результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Результаты расчета плотности тока короткого замыкания СЭ для различных толщин базового моно-, мульти- и поликристаллического кремния

$d, \text{ мкм}$	10	50	100	150	200	250	300
$J_{кз}, \text{ мА/см}^2$ для моно-Si	23	24	26,6	28,5	29	29,2	28
$J_{кз}, \text{ мА/см}^2$ для мульти-Si	22	23	25	27	28,3	28	27
$J_{кз}, \text{ мА/см}^2$ для поли-Si	20	23	24	24,4	24	23	22

При выполнении диссертационного исследования было проведено сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными. Изготовлены СЭ с термически диффузионным p - n -переходом на основе эпитаксиальных пленок p -типа кремния с $\rho \approx 1 \div 3 \text{ Ом} \times \text{см}$, выращенных на кремниевых подложках с $\rho \approx 0,001 \text{ Ом} \times \text{см}$. Измерены нагрузочные ВАХ таких СЭ, созданных как на основе эпитаксиальных пленок кремния с различной толщиной и кристаллического кремния при помощи стандартного измерительного комплекса “Sinton WCT-120”, “Sinton Sun-Voc” (результаты измерения приведены в таблице 3).

Путем расчета оптических параметров смоделированных кремниевых фотоэлектрических структур определены необходимые и достаточные условия обеспечения высокой эффективности СЭ путем текстурирования фронтальной поверхности и нанесения дополнительных оптических покрытий в зависимости от формы и размеров регулярной текстуры.

На основе проведенных исследований и анализа свойств матричных фотоэлектрических структур с традиционным p - n -переходом и предполагаемой гетероструктурой предложена и разработана новая конструкция высоковольтного фотоэлектрического устройства с усовершенствованными оптическими свойствами на основе кремния с вертикально ориентированным “Si/ZnO” гетеропереходом (Заявка на Патент № FAP 2020 0034 от 14.02.2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного исследования, посвященного определению оптимальных условий применения оптических многослойных и регулярных

отражающих текстур с целью улучшения оптических свойств поверхности кремния, являющегося основным материалом для полупроводниковых солнечных элементов, опирающихся на законы классической оптики и методы численного моделирования, были сформулированы следующие общие выводы.

1. На основе классической физической теории природы явлений отражения и преломления, наблюдаемых при падении света на поверхность двух сред, была определена последовательность применения многослойных оптических слоев, состоящих из TiO_2 , SiN_x , SiO_2 и MgF_2 , в фотоэлектрических устройствах на основе кремния.

2. Определены физические условия и технологические возможности уменьшения толщины подложки эффективного фотоэлектрического устройства на $200 \div 100$ мкм за счет увеличения объемного поглощения света и за счет применения многослойных оптических слоев а также текстур для фотоэлектрических структур на основе кремния.

3. Основываясь на расчете оптических характеристик кремния с текстурированной поверхностью путем компьютерного моделирования, основными выходными характеристиками фотоэлектрических устройств являются геометрическая форма используемых в них пирамидальных текстур (прямые и перевернутые пирамиды), «угол основания пирамиды» (20-80 градусов), «размер основания» и «измерения высоты» ($0,5 \div 5,5$ мкм).

4. Для получения фотоэлектрических структур на основе кремния с эффективными оптическими свойствами были определены необходимые физические условия для нанесения дополнительных оптических слоев SiO_2 и SiN_x на текстурированную поверхность в зависимости от формы пирамидальных текстур (прямых и перевернутых) и их размеров.

5. Выявлено различие в выборе оптимальной толщины базового моно-, мульти- и поликристаллического кремния, обеспечивающего наиболее высокую эффективность СЭ с диффузионным $p-n$ -переходом и обоснован механизм рассеивания света на объемных структурных неоднородностях материала.

6. Выявлена немонотонность спектрального поглощения кремния с поверхностными оптическими ZnO слоями с толщиной в диапазоне $200 \leq d \leq 800$ нм и пирамидальной текстурой, а также показана возможность преодоления такой немонотонности путем нанесения дополнительного ($d \approx 100$ нм) тонкого SiO_2 слоя.

7. Создан и внедрен новый программный продукт, основанный на языке программирования “C#9,1” (“STGraphs”, Свидетельство № DGU 08622), позволяющий более эффективно применять достаточно развитую методику цифрового моделирования фотоэлектрических процессов в полупроводниках “PVlighthouse”;

8. Создан и внедрен новый программный продукт, основанный на языке программирования “VisualBasic” (Свидетельство № DGU 08078), позволяющий определить оптические свойства кремния и кремниевых $p-n$ -структур с поверхностными оптическими покрытиями и текстурой;

9. Разработана новая конструкция на основе кремния с улучшенными оптическими свойствами за счет замены эмиттерных слоев из прочного сплава и промежуточных тонких металлических слоев микроэлемента высоковольтного матричного фотоэлектрического устройства слоями сплава оксида металла.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.21.2019.FM/T.01.12 ON SCIENTIFIC
DEGREES AWARD AT SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF THE
PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND MICROELECTRONICS OF
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

**ANDIJAN STATE UNIVERSITY
RESEARCH INSTITUTE OF PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND
MICROELECTRONICS**

MUYDINOVA MADINA ALISHEROVNA

**INVESTIGATION OF THE PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF
SILICON AND *p-n* STRUCTURES BASED ON IT**

01.04.10 - Physics of semiconductors

**The author's abstract of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD)
Physical and mathematical sciences**

Tashkent - 2021

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of research work is the study of the photoelectric properties of silicon and p-n-structures based on it and the optimization of the optical properties of the silicon surface.

The object of research are monocrystalline silicon and optical layers of TiO₂, SiO₂, MgF₂, SiN_x formed on its surface.

Scientific novelty of results consists in the following:

for the first time the optimal sequence and thicknesses of multilayer TiO₂, SiN_x, SiO₂ and MgF₂ structures of silicon-based photovoltaic devices necessary for the most efficient passage of a light beam through the interface between two media have been determined;

it was found that the use of antireflection layers based on TiO₂ makes it possible to reduce the area of the current-collecting electrodes of photovoltaic devices up to 20%;

by the method of computer modeling of the optical characteristics of silicon with a textured surface, the linear dimensions and geometric shapes of the reflecting textures are determined;

a new design of photovoltaic devices with a vertically oriented Si / ZnO heterojunction structure has been developed;

while investigating the optical properties of the silicon surface, new computer software was developed based on the PVlighthouse software package and methods of its use, as well as the VisualBasic software package.

a method of coating the front surface of silicon p-n-junction elements with nanoscale structures with optical materials SiO₂ and SiN_x has been developed, which made it possible to increase their photoelectric sensitivity by 1.28 - 1.33 times.

a new software product "Geometrical Foundations of Creation of Direct Pyramidal Textures on Silicon Solar Cells" has been created, which allows one to determine the parameters of textures used for effective absorption of radiation by photovoltaic devices based on silicon and silicon p-n-structures.

Implementation of the research results.

Based on the scientific results obtained to determine the photoelectric properties of silicon and silicon p-n structures:

In the study of the optical properties of a silicon surface in the Atex-2018-47 project "Development of a new generation of phototherapeutic apparatus based on laser technologies and UV radiation sources for use in clinical practice of dermatology" PVlighthouse was used "software product and method of its use, as well as a new software computer software based on the VisualBasic software package. (Reference of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2 / 1255-410 dated February 10, 2021) The use of scientific results made it possible

to improve the parameters of the created laser phytotherapeutic device and made it possible to measure various optical parameters of the skin with high accuracy.

For deposition of optical materials SiO_2 and SiN_x on the front surface of elements with a pn-junction based on silicon with a nanoscale structure in the project OT-F2-68 "Mechanisms of the formation of micro- and nanoparticles from impurity defects in crystals and their role in the formation of multifunctional multilayer structures». The method of applying optical materials SiO_2 and SiN_x to the front surface of elements with a pn-junction based on silicon with a nanoscale structure was used (certificate of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan dated August 18, 2020 No. 89-03-2859). As a result, it was possible to increase their photoelectric sensitivity by 1.28 - 1.33 times.

Structure and volume of dissertation. Dissertation consists of introduction, four chapters, conclusions, list of references, 46 figures and 9 tables. The text of the thesis is printed on 116 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. С.Зайнабидинов, Р.Алиев, М.Муйдинова, Б.Урманов. Об оптической эффективности кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. // Гелиотехника (Applied solar energy), том. 50, №5, 2018, С. 3-9. [01.00.00. №1].

2. С.Зайнабидинов, Р.Алиев, М.Муйдинова. Особенности поглощения излучения в кремнии с поверхностной текстурой и излучение на свойства фотоэлектрических преобразователей. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» 2019, № 28-33. С. 264-266. [01.00.00 МДХ № 9, № 18 Ulrich's Periodicals Directory, №14 ResearchBib].

3. С.С.Насриддинов, М.А.Муйдинова. Цифровое моделирование процесса оптимизации антиотражающих покрытий для кремниевых солнечных элементов. // «Физика полупроводников и микроэлектроника», Ташкент, 2021 г., т.3, в. 1, С. 69-72 (01.00.00; №16).

II бўлим (2 часть; part 2)

4. R.Aliev, M.Muydinova, J.Kahhorov. Modern problems and working out of the new method of characteristics of laser radiation. // Physics and Astronomy International Journal. 2018, № 2 (4). pp. 269-271. [№35; CROSREFF].

5. М.Муйдинова. Стимулирование оптических свойств кремния путем текстурирования поверхности. // East European Scientific Journal. 2019, 12 (52), С. 28-32.

6. Л.О.Олимов, М.Муйдинова, Ф.Л.Омонбобоев. Электрические свойства межзеренных границ в объеме поликристаллического кремния. // Физическая инженерия поверхности. 2013, № 2. С. 72-76. [01.00.00. МДХ №4].

7. А.Тешабоев, М.Муйдинова. Поликристал кремний донадорликлараро чегараларида заряд кўчиш жараёнлари ҳақида. // АДУ Илмий хабарнома, махсус сон, 2012, 33-35 б.

8. А.Усмонов, Н.Носирова, М.Муйдинова. Донадорликлараро чегараларнинг электрон хоссалари. // АДУ илмий хабарнома, Махсус сон, 2012, с.33-31.

9. М.Н.Носиров, М.Муйдинова, М.Усмонов. Поликристал яримўтказгичларда заряд кўчиш жараёнлари. // АДУ илмий хабарнома, Махсус сон, 2012, С. 33-36 б.

10. М.Муйдинова, Ж.Фуломов, Н.Юлдашева. “Кремнийли куёш элементларида тўғри пирамидали текстура ҳосил қилишнинг геометрик асослари” физик тажрибаларнинг виртуал моделлари. Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги хузуридаги Интеллектуал мулк агентлиги, Гувоҳнома № DGU 08078.

11. М. Муйдинова, Ж. Гуломов, М. Абдувохидов, Ж. Зиёитдинов, С. Насриддинов, Р. Алиев. “STGRAPHS”. Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги хузуридаги Интеллектуал мулк агентлиги, Гувоҳнома № DGU 08622

12. Р. Алиев, Б. Урманов, М. Муйдинова, Ж. Каххаров. “Стимулирование времени жизни носителей заряда за счет флексо-электрического эффекта на поверхности кремния”, // Материалы IV Международной конференции по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро - и наноструктурах» ФерПИ, 26-27 май 2018, Фергана. 2018. С. 277-279.

13. Л. О. Олимов, М. Муйдинова. Донадорликлараро чегара кенглигининг температурага боғлиқлиги. // “Физика, математика ва информатика фанларини ўқитишнинг долзарб муаммолари” илмий-услубий анжуман материаллар тўплами. АДУ Андижон, 2013, 76-77 б.

14. Л. О. Олимов, М. Муйдинова. Некоторые электрические свойства межзеренных границ в объеме поликристаллического кремния. // “Яримўтказгичлар физикаси ва қурилмалари ҳамда уларни ўқитишнинг муаммолари” мавзусидаги анжуман материаллари тўплами. НамДУ, Наманган, 2013, С. 18-19.

15. Зияитдинов Ж., М. Муйдинова, Алиев Р., Мирзаалимов А. Фотоэлектрические преобразователи энергии и актуальные проблемы их усовершенствования. // Посвященной 28-летию независимости республики Узбекистан и 60-летию заслуженного деятеля науки республики Каракалпакстан, профессору Исмайлову Канатбаю Абдреймовичу. ККГУ, Нукус, 2019, С. 27-28.

16. Р. Алиев, М. Носиров, Н. Юлдашева, Ж. Зияитдинов, М. Муйдинова, А. Мирзаалимов. Повышение оптической эффективности кремниевых солнечных элементов путем использования наночастиц металлов. // Материалы международной конференции «Современные проблемы возобновляемых источников энергии и устойчивой окружающей среды», 26-27 сент., 2019 г. – Ташкент, С. 14-18.

17. М. Муйдинова, А. Абдугоффоров, Х. Гуломжонов. Влияние пирамидальной текстуры на оптические свойства кремния. // Материалы Российско – Узбекского международного научно - методического семинара «Возобновляемые источники энергии и устойчивая окружающая среда», Воронеж, 15-22 окт., 2019 г. Андижан, С. 114-118.

18. Ж. Зияитдинов, М. Муйдинова, Ж. Гуломов. Фронтал сирти текстурланган куёш элементи оптик хусусиятларининг назарий таҳлили. // Сборник тезисов “Международной научной конференции “Нано-структурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике”, 9-10 окт., 2020 й. ТГТУ, Тошкент, 110-113 б.

19. М. К. Абдувохидов, Ж. Ж. Гуломов, Р. Алиев, Ж. Зияитдинов, М. Муйдинова. Цифровое моделирование температурных свойств кремниевых солнечных элементов. // Сборник тезисов “Международной научной конференции “Нано-структурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике”, 9-10 окт., 2020 й. ТГТУ, Тошкент, С. 108-110.

20.М.Муйдинова, Ж.Гуломов, М.Абдувохидов, С.Насриддинов. «PVLighthouse» да олинган натижаларни «STGRAPHS» визуаллаштириш дастури ёрдамида тахлил қилиш. // Сборник тезисов “Международной научной конференции “Нано-структурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике”, 9-10 окт., 2020 й. ТГТУ, Тошкент, С. 99-101.

21.М.Муйдинова, Р.Алиев, Б.Урманов. Усовершенствование оптической эффективности кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. // Сборник тезисов докладов V Международной научной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро - и наноструктурах». 16-17 окт., 2020 г., ФерПИ, Фергана, С. 155-159.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида тахрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.

Бичим 60×841/16. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.

Шартли босма табағи: 3

Адади 30. Буюртма № 19

Гувоҳнома reester № 10-4434 Яримўтказгичлар физикаси ва икромэлектроника илмий-тадқиқот институти босмахонасида чоп этилган. Босмахона манзили:

100057, Тошкент ш., Янгиолмазор кўчаси 20-уй.

