

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

ДЖАЛАЛОВ ТЕМУР АСФАНДИЯРОВИЧ

**НАНОТУЗИЛМАВИЙ КОМПОНЕНТЛИ ҚУЁШ
ФОТОЭЛЕМЕНТЛАРИ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ
МЕХАНИЗМЛАРИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент–2018

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

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

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

Джалалов Темур Асфандиярович

Нанотузилмавий компонентли қуёш фотоэлементлари
самарадорлигини ошириш механизмларини ишлаб чиқиш..... 3

Джалалов Темур Асфандиярович

Разработка механизмов повышения эффективности солнечных
фотоэлементов с наноструктурными компонентами 19

Djalalov Temur Asfandiyarovich

Development of mechanisms for increasing the efficiency of solar
photocells with nanostructural components 37

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 41

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

ДЖАЛАЛОВ ТЕМУР АСФАНДИЯРОВИЧ

**НАНОТУЗИЛМАВИЙ КОМПОНЕНТЛИ ҚУЁШ
ФОТОЭЛЕМЕНТЛАРИ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ
МЕХАНИЗМЛАРИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент–2018

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.2.PhD/FM45 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати икки тилда (ўзбек, рус) веб-саҳифанинг fti.uz ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим портали www.ziyounet.uz манзилларига жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	Имамов Эркин Зуннунович физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	Мамадалимов Абдугафур Гишабаевич физика-математика фанлари доктори, академик Расулов Рустам Явкачович физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	Наманган давлат университети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Самарқанд давлат университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «__» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (+99871) 235-42-91; e-mail: info.fti@uzsci.net Физика-техника институти мажлислар зали.)

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (4- рақам билан рўйхатга олинган.) Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Физика-техника институти. Тел./факс: (+99871) 235-42-91.

Диссертация автореферати 2018 йил «__» _____ да тарқатилди.
(2018 йил «__» _____ даги 4- рақамли реестр баённомаси.)

С.А. Бахрамов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., академик

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

И.Г. Атабаев
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 муқобил энергетикани ривожлантиришда нанокиришмали қуёш элементларига катта аҳамият берилмоқда. Бу борада замонавий нанотехнология ютуқларидан фойдаланиб Қуёш элементларининг эффективлиги ва стабил ишлаш муддатини ошириш, нанокиришмаларнинг қуёш элементлари самарадорлигига таъсирини тадқиқ этиш муҳим вазифалардан бири бўлиб қолмоқда.

Ҳозирги кунда нанокиришмали қуёш фотоэлементларининг самарадорлигини оширишга катта аҳамият берилмоқда. Бу борада, мақсадли илмий тадқиқотларни жумладан, қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан ҳисобланади: база соҳасига квант ўлчамли киришмалар киритилган қуёш элементларининг фотоэлектрик характеристикаларини оптималлаштириш, таглик сиртида нанотузилмаларни ўз-ўзидан шаклланиш шартларини аниқлаш, кўп сонли нанотузилмавий компонентли локал гетероўтишларнинг шаклланиш жараёнларини тадқиқ этиш, ток ташувчиларнинг йиғиш коэффициентини кўтариш мақсадида қуёш нурланишининг ютилиш спектрини кенгайтириш.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратиш. Бу борада жумладан, фотоэнергетика соҳасида қайта тикланадиган энергия – қуёшдан электр энергиясини олишга мўлжалланган тадқиқотлар ва уларнинг тежамкорлигини ошириш йўлларини тадқиқ қилиш муҳим аҳамиятга эга. Фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб-қувватлаш йилида олинган илмий натижаларни ҳозирги замон талабларига жавоб берадиган даражага олиб чиқиш, қуёш элементларининг самарадорлигини оширишга хизмат қиладиган қўшимча механизмларни ишлаб чиқиш, қуёш энергетикасини ривожлантириш алоҳида эътиборга сазовор. Фототокни ҳосил қилишнинг янги механизмларини шакллантириш, ишлатилаётган материалларнинг таннархини тушириш ва стабил ишлаш даврини узайтиришга имкон берувчи омилларни аниқлаш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ–2772 -сон «2017–2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисидаги»ги 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 ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар ривожланишининг АТД-4: «Қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланиш усулларини ишлаб чиқиш, нанотехнология, фотоника ва бошқа замонавий технологиялар асосида янги технологиялар ва қурилмалар ишлаб чиқиш» ҳамда ФТД-3 «Қайта тикланадиган энергия манбалари назарияси ва фойдаланиш усуллари»нинг устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунда фототок генерацияси усулларини ривожлантиришда АҚШ лик М.С. Beard ва унинг ҳамкасблари, В.Климов ҳамда Россиялик В.А.Гусев экспериментда мультиэкситон генерация ҳодисасини аниқлашган. Техасс технологик институти қошидаги нанотехнологиялар институти олимлари А.Захидов, Ю.Конюхов, И.Бурмистров ва бошқалар заряд ташувчилар ҳаракатчанлиги юқори бўлган углерод нанонайчаларидан иборат электродлар билан қопланган органик плёнкалар ва металлорганик перовскитларни янги каскад (тандем) тузилмага интеграллаш технологиясидан фойдаланиб, турли спектрал диапазондаги қуёш нуруни электр энергияга айлантириб берувчи, юқори эффективликдаги қурилма яратиш устида тадқиқотлар олиб боришмоқда.

АҚШнинг Лос Аламос шаҳридаги миллий лабораторияда R. Schaller, M. Sykora, J.Pietryga, В.Климов мультиэкситон генерация асосида ишлайдиган ва фойдали иш коэффиценти замонавий аналоглардан юқори бўлган янги авлод фотоэлементларини яратиш устида илмий иш олиб боришмоқда.

Ўтиш металлларини диффузия қилишнинг янги усули ёрдамида нанокластерларни бошқариш технологиясини яратган М.С. Бахадирхановнинг илмий мактаби кўп зарядли кластерларга эга кремнийдаги фотоэлектрик ҳодисаларни ўрганиш билан боғлиқ тадқиқотлар олиб бормоқда. Б.Л. Оксенгендлер томонидан мультиэкситон генерациясининг статистик назарияси ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси илмий-тадқиқот давлат дастури доирасида А4-009: «Нанотузилмавий компонентли қуёш фотоэлементларининг самарадорлигини ошириш» (2012-2014 йй.), А-4-001: «Янги контакт тузилмаларга асосланган эффектив параметрли қуёш элементларини яратиш технологиясини ишлаб чиқиш» (2015-2017йй.) мавзулари бўйича ҳамда АҚШнинг «Фуқаролар тадқиқотларини ривожлантириш фонди» лойиҳасида (U.S. Civilian Research & Development Foundation) CRDF FSAX-14-60115-0, «Қуёш элементларидаги контакт қатламларини таснифлаш ва оптимизациялаш» (11-апрель 2014 й.÷ 10 апрел 2016 й.) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади наноўлчамли компонентлар ёрдамида кремнийли қуёш фотоэлементларининг самарадорлигини ва кафолатли ишлаш муддатини ошириш механизмларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

кафолатли ишлаш муддатини оширувчи ва ишлатилувчи материалларнинг таннархини камайтиришга таъсир қилувчи омилларни аниқлаш;

квант-ўлчовли эффектларнинг намоён бўлиши учун нанокомпонентлар чегаравий ўлчамларини аниқлаш;

нанотузилмаларнинг таглик сиртида ўз-ўзидан ўсиш шарт-шароитларини ўрганиш;

кўп сонли нанокомпонентли локал гетероўтишларнинг ҳосил бўлиш механизмларини тадқиқ этиш;

нанокомпонентли тузилмада қуёш нурланиши ютилиш спектрини кенгайтириш механизмларини излаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида нанокиритмали қуёш фотоэлементлари тузилмаларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг предмети нанокомпонентли қуёш элементларида фототокнинг шаклланиш механизмлари ва электрон-ковак генерациясидаги физик жараёнлар ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида қўйилган масалани ечиш учун қаттиқ жисм физикаси ва яримўтказгичлар физикасининг математик аппарати ҳамда назарий ҳисоблаш ва нанотузилмаларда энергетик, электрон жараёнларини кузатиш каби усуллар қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

нанокомпонентли контакт тузилмани шакллантириш имконини берадиган кремний таглигининг хусусиятлари аниқланган;

доимий панжара орасидаги фарқ, механик кучланишлар ва температура режими билан боғлиқ бўлган таглик устида нанотузилмаларнинг ўз-ўзини ташкиллаштириш шарт-шароитлари ишлаб чиқилган;

контактга кирувчи материалларнинг энергетик характеристикалари билан белгиланувчи нанокомпонентларнинг максимал ва минимал ўлчамлари оптималлаштирилган;

ёруғлик таъсирида вужудга келган электрон-ковак жуфтлигининг ажралишини таъминлайдиган бир ўлчамли, игнасимон электростатик майдон ҳосил қилувчи, наноўлчамли халкогенид-таглик тизимида гетероўтишни шаклланиш механизми аниқланган;

ишлаб чиқилган модель асосида кремний таглик ичидаги қисман компенсацияланган, назоратсиз чуқур киришмалар қуёш нурланишининг эффектив ютилиш спектрини кенгайтириши мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

таглик сиртида текис тақсимланган ва бир хил ўлчамдаги нанотузилмалар ҳосил бўлиш шартлари, чуқур сатҳли киришмалар ҳисобига эффектив ютилиш спектрини кенгайтириш имкониятлари кўрсатилган;

кремнийли қуёш фотоэлементларига наноўлчамли компонентларни ўз ичига олган контакт тузилмани олишда ишлатиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги олинган натижалар ва хулосалар замонавий физика ва яримўтказгичлар техникаси ҳақидаги

қарашларга асосланган бўлиб, бошқа муаллифларнинг назарий ҳамда амалий тадқиқотлар билан тасдиқланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, у қуёш элементларида фототок шаклланишининг янги механизмларини тушунтиришга имкон беради.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, ишлаб чиқилган янги контакт тузилма ёрдамида қуёш элементларини соддароқ технология билан лойиҳалаш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Наноўлчамли компонентлар ёрдамида кремнийли қуёш фотоэлементларининг самарадорлигини ва кафолатли ишлаш муддатини ошириш механизмларини назарий ишлаб чиқиш натижасида:

доимий панжара орасидаги фарқ, механик кучланишлар ва температура режими билан боғлиқ бўлган таглик устида нанотузилмаларнинг ўз-ўзини ташкиллаштириш шарт-шароитлари янги турдаги қуёш элементларининг электр-оптик характеристикалари хусусиятларини аниқлашда ишлатилган (Карнегги Меллони университетининг 2017 йил 10 июлдаги маълумотномаси). Илмий натижадан фойдаланиш яримўтказгичли таглик сиртида наноқопламаларни ўстириш шароитларини оптималлаштириш имконини берган;

нано-гетеротузилмаларнинг шаклланиш жараёнлари, улардаги электр кучланганлик ва потенциални шаклланиши ОТМ-Ф2-62 «Кристалларда киришма-нуқсон турдаги микро- ва нанобирикмаларни ҳосил бўлиш механизмлари ва уларнинг кенг функционал имкониятли кўп қатламли тузилмалар яратишдаги ўрни» грантда нанотузилмаларнинг критик ўлчамларини аниқлашда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фан ва технологиялар агентлигининг 21.07.2017 йилдаги ФТА-02-11/375-рақамли маълумотномаси). Илмий натижадан фойдаланиш микро- ва нанотузилмалардаги оптик ва электрофизик параметрларни аниқлаш методикасини шакллантириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 6 та ҳалқаро ва 9 та республика миқёсидаги илмий-амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 14 та илмий иш ва 1 та монография чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 14 та мақола нашр этилди.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг матни 119 бетда келтирилган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазибалари, объект ва пред-метлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **«Қуёш элементлари самарадорлигини оширишнинг замонавий ҳолати ва тенденцияларини таҳлил қилиш»** деб номланган биринчи бобда келтирилган адабиётлар асосида қуёш энергетикаси соҳасидаги муаммо ва тенденциялар ўрганиб чиқилган. Ушбу бобда қуёш элементларининг самарадорлигига таъсир қилувчи омиллар ўрганилиб, қуёш элементлари эффективлигини ошириш ва таннархини туширишга қаратилган тадқиқотлар шарҳи келтирилган.

Диссертациянинг **«Янги контакт тузилмани ишлаб чиқиш ва назарий тадқиқ этиш»** деб номланган иккинчи бобидананокиритмалардан фойдаланиб, янги контакт тузилма яратиш имкониятлари ўрганиб чиқилган. Ушбу янги контакт тузилма аънавийр-п ўтишлар ва гетероўтишлардан тубдан фарқ қилади. Маълумки, аънавий р-п ўтиш икки ҳил ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичлар орасидаги контактдир. Шу материалларнинг бир-бирига тегиб турган соҳасида Ферми сатҳларини тенглашувига олиб келадиган термодинамик жараён вужудга келади. Натижада, чегарада кучли электр майдонга эга бўлган ҳажмий заряд соҳаси ҳосил бўлади ва ушбу соҳа р-п ўтиш деб номланади.

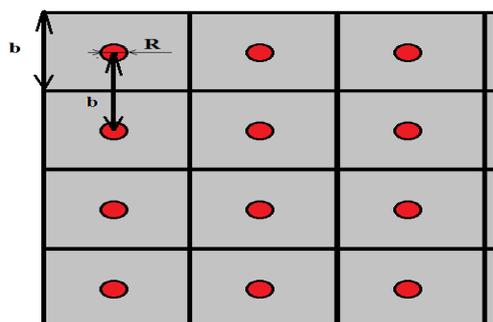
Замонавий фотоэлементларнинг иш принципи яримўтказгичли р-п ўтишга асосланган. Мазкур ўтишга яқин соҳада ютилган ёруғлик нури электрон-ковак жуфтлигини ҳосил қилади, р-п ўтишнинг электростатик майдони ушбу жуфтликни ажратиб юборади ва мос электродларга йўналтиради.

Кремнийли фотоэлементларнинг самарадорлигини чегараловчи иккита асосий омил мавжуд. Биринчиси, кремнийнинг таъқиқланган соҳа кенглиги (хона ҳароратида $E_g=1,12\text{эВ}$), бундан кичик энергияли фотонлар электрон-ковак жуфтлигини ҳосил қилмайди.

Иккинчи омил – электрон-ковак жуфтлиги рекомбинациясининг кремнийли асос тозалигига боғлиқлиги. Ҳар қандай деффектлар, киришмалар, дислокациялар, чегаравий соҳалар ва бошқалар рекомбинацияли жараёнларни кучайтиради. Шу сабабли юқори самара олиш учун юқори тозаликдаги кремнийдан фойдаланилади, бундай кремний нисбатан қиммат ва ушбу ҳолат «қуёш энергияси» таннархининг ошишига сабаб бўлади. Диссертацияда ушбу иккита чегараловчи омилнинг таъсирини камайтиришга ёрдам берувчи имкониятлар тадқиқ қилинган. Ушбу

изланишлар кремний асосида нано ва макрокомпонентлар хусусиятларини ўзида мужассамлаштирган тузилмани ишлаб чиқишга имкон берди.

Нархи монокристалл кремнийдан анча арзон бўлган табиий бирикмаларга бой нокристалл кремний сиртига нанотузилмаларни ўтказиш натижасида янги контакт тузилма яратиш мумкинлиги кўрсатиб берилган (1-расм). Ўз-ўзини шакллантириш жараёни натижасида материал сиртида тартибли жойлашган, тенг ўлчамлардаги нанотузилмаларнинг ҳосил бўлиши ва бунинг учун зарур бўлган баъзи шарт-шароитлар кўрсатиб берилган, бу натижалар эксперимент билан мос тушади¹. Ҳосил бўлган нанотузилмалар юқори кристаллик ҳамда бир жинсли идеал квант нуқта хусусиятларига эга бўлади.



1-расм.
Кремний сиртига ётқизилган нанотузилмалар

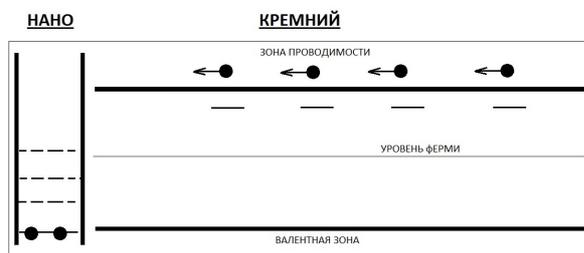
Ишлаб чиқилган модель бегона атомларнинг чуқур ва саёз энергияли киритмаларнинг тенг тақсимланишини талаб қилади. Нанотузилмаларнинг сирт концентрацияси кичик энергияли киритмалар атомларнинг сирт концентрациясига тенг қилиб танланади.

Нанотузилма асос сирти билан контактга келганда ушбу материалларнинг Ферми сатҳларини тенглаштиришга олиб келувчи термодинамик жараён бошланади. Айтиб ўтиш лозимки, нанокиритманинг энергетик сатҳлари дискрет, атомларга ўхшаш бўлади, кремнийли асос эса қаттиқ жисмга хос зонавий тузилмага эга.

Донор ва акцепторли киришмалар атомларининг концентрациялари тенг бўлганлиги сабабли кремнийнинг Ферми сатҳи қарийб ман этилган сатҳнинг ўртасида жойлашган бўлади.

Шуни айтиб ўтиш лозимки, махсус легирламасдан ҳам кремний асос таркибида хона температурасида фаоллашадиган киришмалар мавжуд бўлади.

Шуни айтиб ўтиш лозимки, махсус легирламасдан ҳам кремний асос таркибида хона температурасида фаоллашадиган киришмалар мавжуд бўлади.



а) Контактнинг шаклланиш жараёни



б) Шаклланган контакт

2-расм. Нанокиришма-таглик контактнинг шаклланиши

¹Леденцов Н.Н. ва б. ФТП, 32 (4) 385 (1998).

Нанотузилма билан кремнийли асос ўртасидаги термодинамик мувозанатлашув, айти шу термик ионлашган электронлар ҳисобига рўй беради (2-расм). Нанотузилмалар моддаси шундай танланадики, улардаги биринчи тўлмаган зона чуқурлиги кремнийдаги электроннинг чиқиш ишидан катта бўлсин. Бундай энергетик конфигурация натижасида кремнийдаги фаоллашган электронларни нанотузилмага оқиб ўтиш имконияти туғилади (4-расм).

Юқоридаги жараён натижасида янги контакт тузилмада ҳажмий заряд соҳасини шаклланирувчи зарядланган атомлар занжири ҳосил бўлади. Кўндаланг кесимда буни ўзаро параллел текис зарядланган текисликлар кетма-кетлиги сифатида тасвирласа бўлади (5-расм), бу ерда b – зарядланган атомлар орасидаги ўртача масофа, d – зарядланган атомлар тизими таъсирида шаклланган ҳажмий заряд соҳаси.

Янги контакт тузилманинг ноёб хоссалари:

- ҳар битта нанотузилма ортида ҳажмий заряд соҳасини ҳосил қилувчи зарядланган атомлар занжири вужудга келади;

- ҳажмий заряд соҳаси анъанавий p-n ўтишниқига нисбатан анча катта бўлиб, қарийб бутун ютилиш соҳасини қамраб олади;

- ёруғлик ҳажмий заряд соҳасида кремний ичида рўй беради, нанокиришмалар шу соҳани вужудга келишига сабабчи бўлади;

- ёруғлик таъсирида вужудга келган электрон-ковак жуфтликлар ҳажмий заряд соҳасида пайдо бўлгани сабабли, улар майдон томонидан дарров бири-бирдан ажратилади, ушбу ҳолат рекомбинация жараёнларининг сусайишига олиб келади;

- чуқур энергетик сатҳли киритмалар эффектив ютилувчи спектрни узун тўлқин узунлиги томон кенгайтиришга имкон беради.

Диссертациянинг «**Янги контакт тузилманинг асосий параметрларини аниқлаш**» деб номланувчи учинчи бобида янги контакт тузилманинг ҳажмий заряд соҳасининг узунлиги, ўзига хос электростатик майдон хусусиятлари, унинг потенциали ва кучланганлиги каби асосий параметрлари аниқланган.

Янги контакт тузилманинг узунлиги иккита параметр билан белгиланади: нанотузилманинг электр сиғими ва кичик киришмалар орасидаги ўртача масофа. Нанотузилманинг электр сиғими унинг ўлчамига ва диэлектрик сингдирувчанлигига тўғри пропорционал $C \sim \epsilon R$, шу сабабдан юқори диэлектрик хусусиятларга эга материаллар, масалан, қўрғошин халкогенидларидан фойдаланиш тавсия этилади. Масалан, қўрғошин селениди ва сульфиди мос равишда $\epsilon_{PbSe} = 250$ и $\epsilon_{PbS} = 175$.

Нанотузилманинг минимал ўлчами унинг энергетик потенциал ўрасида ҳеч бўлмаса битта энергетик сатҳ бўлиш шартидан аниқланади.

Ушбу шарт бажарилиши учун кремний билан сферик квант нуқтадаги кенглиги R_{min} бўлган туғри тўртбурчакли квант ўрада электрон (m_e эффектив массали) учун биринчи сатҳ ΔE_1 , ушбу моддалар энергиялари орасидаги узилиш ΔE_C дан кичик бўлиши лозим:

$$\Delta E_C \geq \Delta E_1 = \frac{\hbar^2}{2 \cdot m_e} \cdot \left(\frac{\pi}{R_{min}} \right)^2 \quad (1)$$

Баҳолаш учун ΔE_C қийматини 0,3÷0,5 эВ деб олсак, нанокластернинг минимал ўлчами 3 ÷ 5 нм дан кичик бўлмаслиги лозим эканлиги келиб чиқади.

Нанокиритманинг энг катта ўлчами энергетик сатҳларнинг иссиқлик кенгайиши (кТ га боғлиқ) билан энергетик сатҳлар орасидаги масофадан кичик бўлиши кераклиги шартдан аниқланади. Акс ҳолда электронлар юқори энергетик сатҳларга ўтиб кетадилар. Ушбу шартни қуйидаги кўринишда тасвирласак бўлади:

$$kT \leq \frac{E_2 - E_1}{\alpha} \quad (2)$$

бу ерда E_1 ва E_2 мос ҳолда нанокластердаги охириги тўлган ва биринчи тўлмаган сатҳлар энергиялари. Нанокластернинг эффектив массасасига қараб ҳисобланиб аниқланган ўлчами 20÷35 нм катталигида бўлади.

Демак, реал, ўз-ўзидан шаклланувчи нанотузилмаларнинг ўлчамлари **(3 ÷ 5)нм ≤ R ≤ (20 ÷ 35)нм**

Шарнинг электр сиғими:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R \quad (3)$$

Нисбий диэлектрик сингдирувчанлик **175 ≤ ε ≤ 250** ва нанокластер ўлчами **3нм ≤ R ≤ 35 нм** бўлганида сферик нанокластернинг электр сиғими қуйидаги ораликда бўлади.

$$6 \cdot 10^{-17} \Phi \leq C \leq 100 \cdot 10^{-17} \Phi.$$

Кремний асосдан нанокластерга оқиб ўтган заряд миқдорини қуйидаги муносабатдан аниқлаш мумкин:

$$q = C \cdot \Delta\varphi \quad (4)$$

бу ерда $\Delta\varphi$ нанокластер ва асос материали орасидаги потенциаллар фарқи. Баҳолаш мақсадида $\Delta\varphi = 0,5 \text{ В}$ деб олсак, оқиб ўтган заряд миқдори:

$$6 \cdot 10^{-17} \text{ Кл} \leq q \leq 100 \cdot 10^{-17} \text{ Кл}$$

Кремний асосдан нанокластерга оқиб ўтган электронларнинг сони қуйидагича аниқланади:

$$N = \frac{q}{e} \quad (5)$$

бу ерда e - электрон заряди. Ушбу муносабатлардан:

$$10^2 \leq N \leq 10^3$$

Термодинамик мувозанат ҳолати ўрнатилиши оқибатида асосдан ҳар бир нанокиритмага бир неча юз электрон оқиб ўтади, бунинг натижасида зарядланган донор атомларининг узун занжири ҳосил бўлади, айти шу атомлар ҳажмий заряд соҳасини ҳосил қиладилар.

Одатда кремнийдаги қолдиқ саёз киришмалар концентрацияси $n_D = 10^{12} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Ушбу атомлар орасидаги ўртачамасофа бир микрон атрофида бўлади:

$$b = \sqrt[3]{n_D} \sim 10^{-6} \div 10^{-7} \text{ м} \quad (6)$$

Янги контакт тузилмадаги ҳажмий заряд соҳасининг бўйлама ўлчамлари бир неча ўн микронни ташкил қилади:

$$d = N \cdot b \sim 10 \div 100 \text{ мкм} \quad (7)$$

Ушбу катталик анъанавий p-n ўтишлардаги ҳажмий заряд соҳасидан анча катта бўлиб, қуйидаги афзалликларга эга:

- ушбу масофада қуёш нурланиши спектрининг қарийб ҳаммаси ютилади;

- фотон ютилиши натижасида ҳосил бўлган электрон-ковак жуфтликлари ҳажмий заряд соҳасида вужудга келиб шу заҳотиёк майдон томонидан электрон ва ковакка ажратилади ҳамда мос электронларга йўналтирилади. Бу рекомбинацияли жараёнларнинг салбий таъсирини бартараф этишга имкон беради.

Янги контакт тузилманинг кучланганлиги параллел зарядланган текисликлар ҳақидаги тасаввурлар асосида аниқланган (3-расм).

Электростатик майдон кучланганлигини $E(x)$ аниқлаш учун Гаусс теоремасидан фойдаланамиз. Ҳажмий заряд соҳаси бир қатор зарядланган текисликлар кетма-кетлигидан иборат деб қаралади. Нанокиритмалар жойлашган сирт заряд зичлиги σ^-_N , ҳар бир кейинги сиртнинг заряд зичлиги σ^+ бўлади.

Ёритилувчи сирт устига ўрнашган нанотузилма асос ичидан N та электрон олгани туфайли, бу сиртдаги заряд зичлиги

$$\sigma_N = \frac{Ne^-}{L^2} = e^- N n_D^{2/3} \quad (8)$$

ионлашган донорлар томонидан ҳосил қилинган сиртларнинг заряд зичлиги қуйидагига тенг:

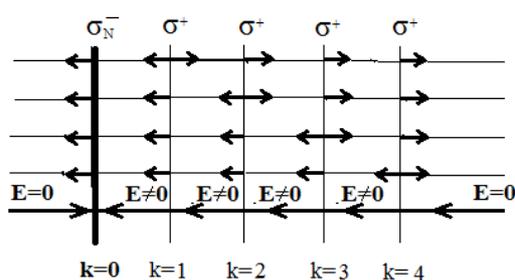
$$\sigma = \frac{e^+}{L^2} = e^+ n_D^{2/3}, \quad (9)$$

3-расмда зарядланган сиртлар ўртасида электростатик майдон шаклланиш схемаси кўрсатилган.

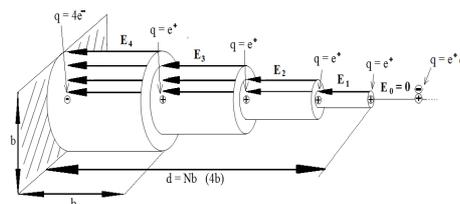
N ва d ларни маълум деб ҳисоблаб, Гаусс теоремаси асосида электростатик майдон кучланганлиги $E_k(x)$ ни ҳар бир текисликлараро фазодаги координатага боғлиқ муносабатини аниқлаймиз. Бу муносабат қуйидаги кўринишга эга:

$$E_k(x) = - \left(\frac{\gamma}{b} \right) \cdot (N - [x_k]) \quad (10)$$

бу ерда $\gamma = \frac{4 \cdot \pi \cdot \kappa \cdot \epsilon^+}{\epsilon_{Si} \cdot b}$, $\kappa = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}$, ϵ_0 – диэлектрик доимий, ϵ_{Si} – ва ϵ_N - мос ҳолда кремний ва нанокиритманинг диэлектрик сингдирувчанлиги, $[x_k]$ – x -координатанинг бутун қисми бўлиб $b \cdot k$ га тенг ($0 \leq k \leq N$).



а) Ҳар бир k -сиртлар ($0 \leq k \leq 3$) орасида электростатик майдоннинг шаклланиш схемаси ($N=4$ бўлганда)



б) Ҳар бир нанотузилма ортида ҳосил бўлувчи игнасимон ҳажмий заряд соҳаси

3-расм. Ҳажмий заряд соҳасининг шаклланиши

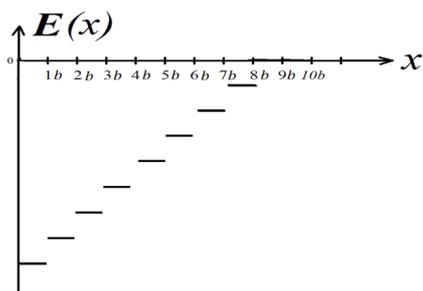
Ушбу муносабат қуйидаги чегаравий шартлар асосида суперпозиция принципи ёрдамида олинган:

$$\text{соҳа охирида } (x = x_N = d) \rightarrow E_N(x = x_N = d) = 0$$

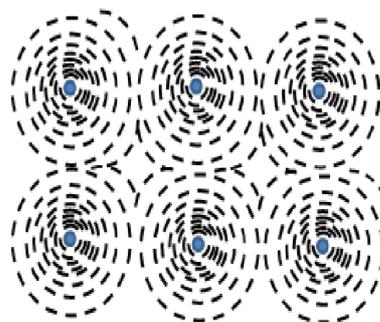
$$\text{соҳа бошида } (x = 0) \rightarrow E_0(x = 0) = E_0 = - \gamma \cdot N/b.$$

$$E_0 = \frac{-\gamma \cdot N}{b} \text{ – электростатик майдоннинг максимал қиймати.}$$

Электростатик майдон кучланганлиги $E_k(x)$ ни координатага боғланиши ва кучланганлик куч чизикларининг шакли 4-расмда тасвирланган.



а) Электростатик майдон кучланганлиги ўзгариши



б) Электростатик майдон куч чизикларининг кўндаланг кесими

4-расм. Янги контакт тузилмадаги электростатик майдон

Танланган модель асосида ҳажмий заряд соҳасидаги кучланганлик ўзгариши ҳақида қуйидаги хулосалар қилиш мумкин:

- ҳар бир текислик орасидаги майдон кучланганлиги ўзгармасдир;
- майдон кучланганлиги кремний асос ичидан нанотузилма томон йўналган;

$-E_k(x)$ майдони дискрет, ҳар бир янги текисликлар орасидаги соҳага ўтганда майдон γ/b қийматга сакраб ўзгарадига гетероўтишнинг охирида нолга тенг бўлади.

Янги контакт тузилманинг ҳажмий заряд соҳасида потенциал тақсимланиши Пуассон тенгламаси ёрдамида аниқланади. Ушбу соҳа текис зарядланган пераллел текисликлар мажмуаси деб каралади. Текисликлар орасидаги фазода электростатик потенциали $\varphi_k(x)$ ни аниқлаш учун кучланганлик $E_k(x)$ ифодасидан ҳосила олиш керак x_k дан x ($0 \leq k \leq N$) гача:

$$E_k(x) = - \frac{d\varphi_k(x)}{dx} \quad \text{ёки} \quad \varphi_k(x) = - \int_{x_k}^x E_k(x) dx \quad (11)$$

Потенциални аниқлаш қарётган моделнинг хусусиятларидан келиб чиқади:

ҳажмий заряд соҳасининг бошида, ёритилаётган сиртда потенциал $\varphi_k(x=0)$ максимал қийматга эга, яъни ўзининг термодинамик қиймати φ_0 га, ҳажмий заряд соҳасининг охирида $x = d$ бўлганда потенциал нолга тенг.

Ушбу чегаравий шартлардан келиб чиқиб ҳажмий заряд соҳасидаги потенциалнинг ўзига хос хусусиятлари аниқланади:

- k – текисликлараро фазодаги потенциал:

$$\varphi_k(x) = \varphi_{k-1} - (\gamma/b) \cdot (N+1-k) \cdot [x_k]^k, \quad (12)$$

- k – текислик чегарасидаги потенциал $\varphi_k = \varphi_k(x=k \cdot b)$:

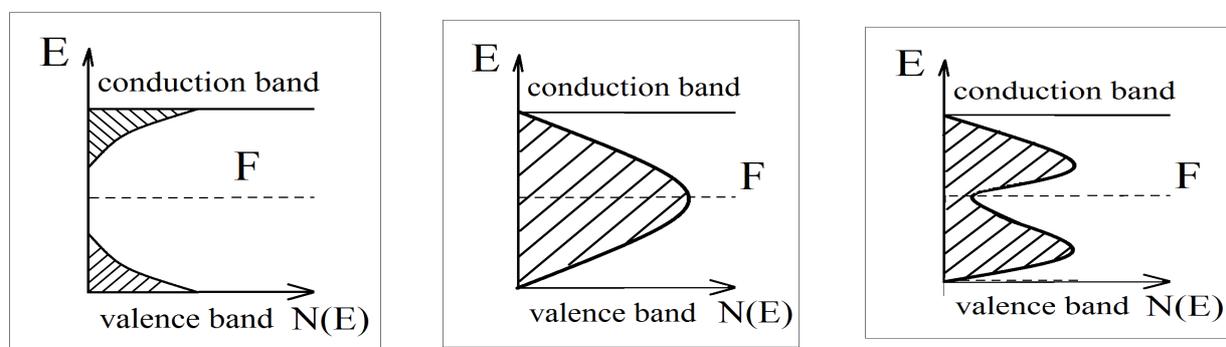
$$\varphi_k = \varphi_0 - \gamma \cdot \sum_{i=1}^k (N+1-i) i = \varphi_0 - \gamma \cdot k \cdot (k+1) \cdot (3 \cdot N + 2 - 2 \cdot k) / 6 \quad (13)$$

- ёритилаётган сирт потенциали :

$$\varphi_0 = \gamma \cdot N \cdot (N+1) \cdot (N+2) / 6 \quad (14)$$

Бутун соҳа бўйлаб потенциал ўзгариши квадрат қонуниятига ўхшаса-да, кетма-кет жойлашган k та зарядланган текисликлардаги потенциалнинг координатага боғлиқлиги чизиклидир.

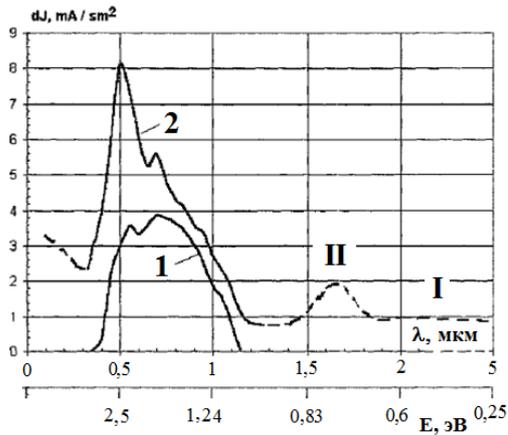
Диссертациянинг «**Янги контакт тузилмадаги фотовольтик ўзгартириш ва заряд ташувчилар транспортини ўрганиш**» деб номланган тўртинчи бобида чуқур аралашмали ҳолатлар кўриб чиқилган. Чуқур аралашмалар концентрацияси 10^{20} - 10^{21} см^{-3} (99,9%) бўлганда, улар орасидаги масофа 1-10нм бўлади. 5-расмда ман этилган зонадаги электрон ҳолатлари тасвирланган (локал ҳолатлар штрихланган), F – Ферми сатҳи. Чуқур аралашма ҳолатлари акцептор ва донор табиатли бўлиши мумкин. Аммо зичликнинг тақсимланишидаги флуктуациялар, битта турдаги киритмалар компенсацияланмай қолганлигига сабаб бўлади. Масалан, донор аралашмаларнинг бир қисми компенсацияланмай қолган бўлиши мумкин.



5-расм. Электрон ҳолатлар зичлигининг энергия бўйлаб, таъқиқланган зонада тақсимланиши.

Натижада таъқиқланган соҳада бир қатор чуқур донор сатҳлар вужудга келади, уларни активлаштириш учун кремний фундаментал ютилиши энергиясидан камроқ бўлган энергия керак бўлади. Бошқача қилиб айтганда, чуқур аралашмалар мавжудлиги янги контакт тузилмада эффектив ютилиш спектри кенгайишига имкон беради.

Фотон томонидан аралашма атомидан уйғотилган электрон, зарядланган саёз донор аралашмалар ҳосил қилган узун зарядланган занжирнинг майдони



1- монокристалл кремнийли фотозаэлементда, 2- экспериментал фотозаэлементда..

6-расм. Фототокнинг тушаётган тўлқин узунлиги (энергияси) билан боғлиқлиги

таъсирида электрод томонига жўнатади. Вужудга келган ковакнинг транспорти аралашмаларнинг бундай концентрациясига хос бўлган қатламли ўтказувчанлик ҳисобига рўй беради. Таклиф этилаётган моделнинг экспериментал тасдиқлари ҳам бор. Кўп аралашмали кремний сиртини жуда кўп бўлақларга бўлиб амалга оширилган фотозаэлементнинг самарадорлиги монокристалл аналогларга нисбатан яхши кўрсаткичларга эга² (6-расм). 6-расмнинг 1 участкасида қатламли ўтказувчанликка хос боғланиш кузатилади, графикнинг II участкасида эса резонансга хос бўлган ўсиш кузатилади. Қатламли ўтишга

кўшимча равишда туннель ўтиш ҳам кўшилганида резонанс содир бўлади. Ушбу тажриба чуқур аралашмалар активацияси ёрдамида эффектив ютилиш спектрини кенгайтириш мумкинлигини кўрсатади.

Шу бобда янги контакт тузилма асосидаги қуёш панелининг фотозаэлектрик параметрлари аниқланган кремний сиртига ўтказилган нанотузилмалардан иборат қуёш элементи макети келтирилган. Қуёш панели талаб этилаётган электр параметрларга қараб ўзаро кетма-кет ва параллел уланган қуёш элементларининг мажмуасидир.

Наноўлчамли p-n ўтишнинг оптимал параметрларини миқдорий баҳолаш учун қуйидаги белгилашларни киритамиз: i_o – фототок, ϕ_o – контакт потенциаллар фарқи ва $p_o (p_o = i_o \cdot \phi_o)$ – ишлаб чиқиладиган қувват. Ушбу параметрлар яримўтказгичли асос ва нанокластер параметрларига боғлиқ.

Қуёш элементи сиртининг юзаси $s (s = k \cdot l)$, узунлиги k ва кенлиги l , нанотузилмалар орасидаги ўртача масофа b , наноўлчамли p-n ўтишлар сони $v = k \cdot l / b^2$.

v та параллел уланган «наноўлчамли p-n ўтишларнинг» умумий фототоки:

$$i = v \cdot i_o = (k \cdot l / b^2) \cdot i_o \quad (15)$$

ишлаб чиқилувчи қувват қуйидагига тенг:

$$p = i \cdot \phi_o = v \cdot i_o \cdot \phi_o = (k \cdot l / b^2) \cdot \phi_o \cdot i_o = (k \cdot l / b^2) \cdot p_o = v \cdot p_o \quad (16)$$

²Цой Б. Способ изготовления пучкового перехода, пучковый преобразователь электромагнитного излучения/ №WO 2011/040838 A2. Патент во всемирной организации интеллектуальной собственности. 07.04.2011

Қуёш панелининг юзаси S ($S = K \cdot L$), узунлиги K ва кенглиги L (14а-расм), Φ_o —чиқиш кучланиши, I — ток кучи.

Қуёш панели бўйлаб кетма-кет равишда K/k дона қуёш элементлари уланган, уларнинг умумий кучланиши:

$$\Phi_o = \varphi_o \cdot K/k, \quad (17)$$

кенглиги бўйича бу қаторлар параллел уланган умумий токи:

$$I = i \cdot L/l. \quad (18)$$

Қуёш панелининг умумий қуввати қуйидагича аниқланади:

$$P = I \cdot \Phi_o = \varphi_o \cdot (K/k) \cdot i \cdot (L/l) = \varphi_o \cdot (K/k) \cdot (k \cdot l/b^2) \cdot i_o \cdot (L/l) = p_o \cdot (K \cdot L)/b^2 = P \quad (19)$$

17-19 формулалар қуёш панели эффектив ишлаши учун оптимал параметрларни аниқлашга ва «наноўлчамли р-п ўтишларнинг» муҳим ролини кўрсатиб беради.

ХУЛОСА

Нанотузилмавий компонентли қуёш элементлари самарадорлигини ошириш механизмларини тадқиқ қилиш натижасида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Нанокластерларни ўз-ўзини ташкиллаштириш фундаментал тамойили асосида когерент, текис тақсимланган ва бир хил ўлчамдаги нанокластерларни кремний асосга жойлаштириш имконияти очиб берилган.

2. Контактга киришувчи моддалар орасида термодинамик мувозанат ўрнатилиши натижасида саёз аралашма электронларини кремнийли тагликдан нанозаррачага оқиб ўтиши асослаб берилган.

3. Оқиб ўтувчи электронлар миқдорининг моддага ва нанозаррача ўлчамига боғлиқлиги аниқланган.

4. Нанокластерга оқиб кирувчи электронлар сони ва кремний асосдаги ҳажмий заряд соҳасининг узунлиги орасидаги боғланиш топилган.

5. Энергетик ҳолатлар ҳақидаги тасаввурлар асосида нанотузилмаларнинг максимал ва минимал ўлчамлари кўрсатиб берилган.

6. Янги контакт тузилманинг анъанавий р-п ўтишлардан принципиал фарқли томонлари кўрсатилиб хусусан янги тузилмада ажратувчи майдон таглик сиртидан бошланиб ичкарига йўналганлиги топилган.

7. Ёруғликни эффектив ютилиш спектрини кенгайтиришда чуқур сатҳли аралашмаларнинг роли кўрсатилган.

8. Кремний тагликдаги дефектлар ва чуқур аралашмаларнинг, ман этилган зона кенглигини камайтириши ҳисобига, ютилишнинг эффектив спектрини кенгайтиришдаги роли кўрсатилган.

9. Янги контакт тузилмага асосланган қуёш панели ва одатий монокристалл қуёш панелларинининг самарадорлиги миқдорий солиштирилган.

10. Назарий ишлаб чиқилган янги контакт тузилма, модернизацияланган техник кремнийдан, фойдали иш коэффициенти монокристаллдан қолишмайдиган арзон қуёш элементларини яратиш имконияти кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,
ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ДЖАЛАЛОВ ТЕМУР АСФАНДИЯРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ С НАНОСТРУКТУРНЫМИ
КОМПОНЕНТАМИ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан, за № В2017.2.PhD/FM45.

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте АН РУз.

Автореферат диссертации на двух языках (узбекский, русский) размещен на веб-странице по адресу fti.uz и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyounet.uz.

Научный руководитель: **Имамов Эркин Зуннунович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Мамадалимов Абдугафур Тишабаевич**
доктор физико-математических наук, академик

Расулов Рустам Явкачович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Наманганский государственный университет**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2018 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM./T.34.01 при Физико-техническом институте. Адрес: 100084, г.Ташкент, ул.Бодомзор йули, дом 2б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (+99871) 235–30–41; e-mail: info.fti@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № 4). Адрес: 100084, г.Ташкент, ул.Бодомзор йули, дом 2б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (+99871) 235–42–91.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 г.
(протокол рассылки № 4 от «__» _____ 2018 г.)

С.А. Бахрамов
председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., академик

А.В. Каримов
ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

И.Г. Атабаев
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 современном мире в интенсивно развивающемся направлении возобновляемых источников энергии одной из важных проблем является повышение эффективности преобразования солнечной энергии, поиск новых материалов и более простых в изготовлении и дешевых конструкций, которые позволили бы повысить эффективность преобразования солнечного излучения. В этом аспекте расширение класса солнечных элементов основанных на новых физических принципах и механизмах функционирования является одной из важнейших задач.

В настоящее время разработка дополнительных механизмов повышения эффективности солнечных фотоэлементов имеет важное значение в преобразовании солнечной энергии. В этом аспекте привлечение новых механизмов формирования фототока, определение факторов обеспечивающих гарантированный срок службы и снижение себестоимости используемых материалов; определение граничных размеров наноконструкций для проявления квантово размерных эффектов; выяснение условий самоорганизованного роста наноструктур на поверхности подложки; исследование механизма возникновения множества локальных гетеропереходов с наноструктурными компонентами; поиск механизмов расширения спектра поглощения солнечного излучения структуры с наноконструкциями.

По Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан обращается особое внимание вопросам создания механизмов применения в практику достижений науки и инновации. В том числе определение возможностей управления электронными процессами, происходящими в наноконструктивных структурах считается одним из важных задач. В год поддержки инновационных идей и технологий, активного предпринимателя поднятие на современный уровень полученных научных результатов достоин особого внимания. В нашей Республике внимание ученых обращено в большей степени исследованию комбинированных фотоэлектрических батарей, в которых наряду с преобразованием солнечной энергии предусматривается использование выделяемого тепла. В этом направлении ведутся работы по разработке новых конструкций фотоэнергетических установок, достигнуты определенные успехи в повышении коэффициента собирания носителей фотопреобразовательных структурах за счет введения нановключений в активную зону солнечного элемента.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан №-УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года и №-ПП-1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг.» от 15 декабря 2010 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 технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан – ППИ-4: «Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий» и ПФИ-3: «Теория и методы использования возобновляемых источников энергии».

Степень изученности проблемы. На сегодняшний день развитию методов генерации фототока определенным вклад внесли ученые из США М.С.Beard с коллегами, а также В.Климов, В.А.Гусев из России, которые на эксперименте реализовали мультиэкситонную генерацию носителей. Учёные из института нанотехнологий при Техасском технологическом институте: А.Захидов, Ю.Конюхов, И.Бурмистров и другие проводят исследования направленные на разработку высокоэффективного устройства преобразования различных спектральных диапазонов солнечного света, с использованием органических пленок, покрытых электродами из углеродных нанотрубок с высокой подвижностью носителей заряда и технологии интеграции металлорганических перовскитов в новую каскадную (тандемную) структуру.

Статистическая теория возникновения явления мультиэкситонной генерации разработана нашим соотечественником Б.Оксенгандлером. Учёные Лос Аламовской национальной лаборатории R.Schaller, M.Sykora, J.Pietryga, В.Климов и др. создали новое поколение фотопреобразователей на основе мультиэкситонной генерации. Эта группа учёных активно работает над созданием солнечных элементов с КПД превышающим многие современные аналоги на основе мультиэкситонной генерации (МЭГ). Большой интерес вызывают исследования научной школы М.С.Бахадирханова, которые создали технологию получения и управления нанокластерами, с помощью разработанного нового способа диффузии переходных металлов. Они также ведут работы направленные на исследования фотоэлектрических явлений в кремнии с многозарядными нанокластерами.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана Государственной программы научно исследовательских работ РУз по темам: № А4-009 «Разработка научных основ повышения эффективности солнечных фотоэлементов (СФЭ) с наноструктурными компонентами» (2012–2014), проекта А-4-001 «Разработка технологии создания солнечных элементов с эффективными параметрами на основе новых контактных структур» (2015–2017), а также проекта Фонда гражданских исследований и развития США (U.S. Civilian Research & Development Foundation) CRDF FSAX-14-60115-0 на тему «Характеристика и

оптимизация контактных слоев в солнечных элементах» (11 апреля 2014 – 10 апреля 2016).

Целью исследования является разработка механизмов повышения эффективности и надежной работы кремниевых солнечных элементов с наноструктурными компонентами.

Задачи исследования:

определение факторов обеспечивающих гарантированный срок службы и снижение себестоимости используемых материалов;

определение граничных размеров наноконпонентов для проявления квантово размерных эффектов;

выяснение условий самоорганизованного роста наноструктур на поверхности подложки;

исследование механизма возникновения множества локальных гетеропереходов с наноструктурными компонентами;

поиск механизмов расширения спектра поглощения солнечного излучения структуры с наноконпонентами.

Объектом исследования являются структуры солнечных фотоэлементов с нановключениями.

Предметом исследования являются механизмы формирования фототока и физические процессы при генерации электронно-дырочных пар в солнечных элементах с наноструктурными компонентами.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе были использованы математические методы теоретических расчетов и моделирования энергетических и электронных процессов в полупроводниковых фотопреобразовательных структурах, в том числе с нановключениями.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определены характеристические свойства кремниевой подложки дающие возможность реализации предложенного механизма формирования контактной структуры с наноконпонентами;

определены максимальные и минимальные размеры наноконпонента, обусловленных энергетическими характеристиками контактирующих материалов;

определен механизм формирования гетероперехода, который включает в себя переход (наноразмерная халкогенидная точка – подложка), образующий одномерное иглообразное специфическое электростатическое поле обеспечивающее разделение фотовозбужденных электронно-дырочных пар;

на основе разработанной модели показано, что неконтролируемые частично компенсированные глубокие примеси, имеющиеся в кремниевой подложке, приводят к расширению спектра эффективного поглощения солнечного излучения в длинноволновую область.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

условия создания одномерных нановключений с глубокими уровнями и их равномерное распределение позволят расширить коэффициент поглощения структур;

предложенная новая контактная структура может быть использована при производстве кремниевых фотоэлементов с нановключениями.

Достоверность результатов исследований и выводов основывается на физических представлениях, теоретических и экспериментальных данных, подтверждённых применением современных научных методов и результатами других авторов, а также их соответствием современным понятиям физики и техники полупроводников.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований заключается в том, что они позволяют объяснить новые механизмы формирования фототока в солнечных элементах.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанная модель новой контактной структуры может быть использована при конструировании солнечных элементов с более простой технологией.

Внедрение результатов исследования. Результаты исследований полученные в диссертации по теоретической разработке механизмов повышения эффективности кремниевых солнечных элементов на основе применения в них наноразмерных компонентов использованы:

для изучения физических и электрооптических характеристик нанотрубок, а также определения свойств нового типа полупроводниковых контактных структур при выполнении исследований направленных на создание прозрачных токосъемных покрытий на основе нанотрубок (Справка университета Карнеги Меллони от 10 июля 2017 года); использование полученных научных результатов позволило оптимизировать условия роста нанопокровов на поверхности полупроводниковой подложки;

при выполнении фундаментального проекта: «Механизмы возникновения примесно-дефектных микро- и наносоединений в кристаллах и их роль в создании широкофункциональных, многослойных структур» ОТМ-Ф2-62 (Справка ФТА-02-11/375 Агентства науки и технологий Республики Узбекистан от 21 июля 2017 года), использование научных результатов позволило объяснить условия возникновения наногетероструктур, выбрать методы определения напряжённости и потенциала электрического поля в них, а также методику определения оптических и электрофизических параметров в микро- и нановключениях.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 6 международных и 9 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 15 научных трудов, из них 1 монография и 14 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 119 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе **«Анализ современного состояния и тенденций повышения эффективности солнечных элементов»** приведены литературные данные по современному состоянию солнечной энергетики, рассмотрены основные проблемы и тенденции развития этой отрасли. В этой главе также рассматриваются факторы влияющие на эффективность солнечных элементов и проводится обзор исследований направленных на увеличение эффективности и удешевление солнечных элементов.

Во второй главе **«Разработка и теоретическое исследование свойств новой контактной структуры»** исследуются возможности создания новой контактной структуры с использованием нановключений, которая принципиально отличается от традиционных p-n переходов и гетероструктур. Как известно традиционный p-n переход – это поле, создаваемое на границе контакта двух типов полупроводников. В области соприкосновения этих материалов возникает термодинамический процесс, приводящий к выравниванию их уровней Ферми. На границе образуются два слоя создающих область пространственного заряда (ОПЗ) с сильным электростатическим контактным полем, которое и называется p-n переходом.

Принцип работы современных фотоэлементов базируется на полупроводниковом p-n переходе. При поглощении света в области прилегающей к p-n переходу рождается электронно-дырочная пара. В результате в p-n переходе заряды разделяются и начинают движение к соответствующим электродам.

При этом существуют два главных фактора ограничивающих эффективность фотовольтаического преобразования в кремниевых фотоэлементах. Первый – это ширина запрещённой зоны кремния (при комнатной температуре $E_g=1,12\text{эВ}$), которая ограничивает поглощение фотонов с меньшей энергией, хотя и составляет существенную часть диапазона солнечного излучения.

Второй фактор – интенсивная рекомбинация электронно-дырочной пары на поверхности и в области поглощения существенно зависит от чистоты кремниевой подложки. Любые дефекты, примеси, дислокации, границы зёрен и другие ведут к уменьшению этой длины и увеличивают рекомбинационные процессы.

Поэтому в основном применяется кремний высокой чистоты и кристалличности, что увеличивает себестоимость солнечных элементов и

цену на «солнечную энергию».

В диссертации проведены исследования позволяющие найти условия, значительно ослабляющие эти два ограничения. Они позволили разработать на основе кремния контактную структуру, сочетающую в себе одновременно нано- и макрокомпоненты. Предложено создание новой контактной

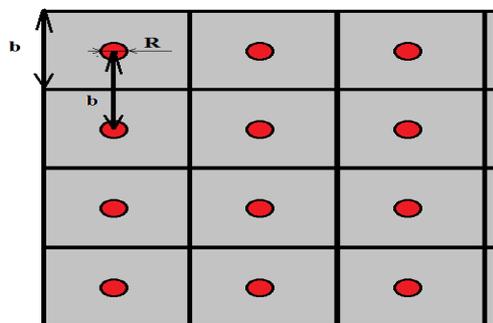


Рис. 1.
Нановключения сформированные на кремниевой подложке

структуры на основе подложки, состоящей из дешёвого кремния «металлургической» чистоты, который по ценовым характеристикам на два порядка ниже монокристаллического, а также нановключений нанесённых на эту подложку (рис. 1). В работах¹ показана технологическая возможность создания на поверхности подложки когерентных, упорядоченных и равномерно распределённых наноструктур благодаря фундаментальному эффекту самоорганизации полупроводниковых систем. Эффект самоорганизации создает на поверхности кремниевой подложки наногетероструктуры, каждая из которых представляет собой сложную систему, состоящую из нанокластера в виде квантовой точки (p-область новой контактной структуры), и достаточно протяженной положительно заряженной n-области. При этом нановключение или нанокластер рассматривается как идеальная квантовая точка с высоким кристаллическим совершенством и высокой однородностью по размерам.

Разрабатываемая модель предполагает равномерное распределение дефектов, атомов глубоких примесей, а также остаточных атомов мелких примесей. Поверхностная плотность нановключений подбирается равной поверхностной плотности атомов мелких примесей.

При возникновении контакта между нановключением и поверхностью подложки, в силу вступает термодинамический процесс, приводящий к выравниванию уровней Ферми контактирующих материалов. Необходимо отметить, что нановключения имеют дискретный, атомоподобный спектр энергетических уровней, кратность вырождения которых пропорционально количеству составляющих его атомов, тогда как кремниевая подложка имеет зонную структуру свойственную твёрдому телу.

Уровень Ферми предлагаемого кремния находится практически в середине запрещённой зоны, вследствие того, что примесные центры располагаются равномерно и количество примесей акцепторной природы примерно равно количеству примесей донорной природы. Флуктуации в их концентрациях могут привести к смещению уровня Ферми от середины запрещённой зоны.

Обратим также внимание на то, что в кремниевой подложке даже без специального легирования есть некоторое количество «остаточных»

¹Леденцов Н.Н. и др. ФТП, 32 (4) 385 (1998).

примесей энергетические состояния которых залегают не глубоко от зоны проводимости (или валентной зоны) и которые активируются при комнатной температуре, т.е. мелкие примеси.

В виде примера рассмотрим случай, когда концентрация мелких донорных примесей преобладает. При комнатной температуре они будут ионизированы.

При контакте нановключения с кремниевой подложкой, термодинамическое выравнивание происходит за счёт термически активированных электронов.

Материал нанобъектов нанесённых на поверхность подложки подбирается таким образом, чтобы энергетическая глубина залегания первой незаполненной зоны была больше, чем сродство электрона в кремнии.

Такая энергетическая конфигурация приводит к термодинамическому процессу, который за счёт перетекания термически активированных электронов мелких примесей в нановключение приводит к выравниванию уровней Ферми в них (рис. 2). В результате данного процесса возникает целая цепочка из заряженных атомов мелких примесей, которая формирует область пространственного заряда в новой контактной структуре.

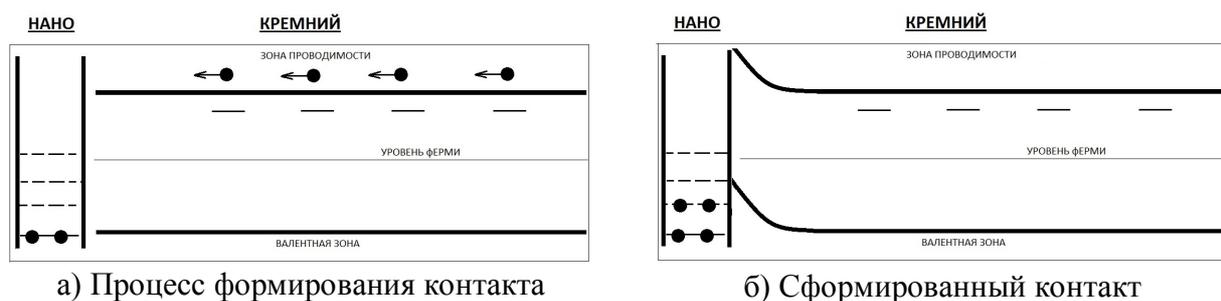


Рис. 2. Формирование контакта нановключение-подложка

Уникальные особенности новой контактной структуры:

за каждым нановключением возникает длинная цепочка заряженных доноров, которые создают область пространственного заряда;

длина области пространственного заряда может быть значительно больше чем у традиционных p-n переходов (как это будет показано в третьей главе), практически на всей длине проникновения солнечного излучения;

поглощение солнечного излучения происходит в области пространственного заряда, в кремниевой подложке, нановключения служат лишь для создания специфической ОПЗ;

электронно-дырочные пары, возникшие при поглощении света, незамедлительно разделяются под действием ОПЗ, в котором происходит их рождение, данный фактор значительно ослабляет роль рекомбинации, которая играет негативную роль в традиционных солнечных элементах;

большое количество глубоких примесей даёт возможность расширения спектра эффективного поглощения в длинноволновую область (показано в четвёртой главе).

В третьей главе «**Определение основных параметров новой контактной структуры**» изучаются такие параметры как длина области пространственного заряда, специфическое электростатическое поле контактной структуры, потенциал и напряжённость этого поля.

Длина ОПЗ новой контактной структуры определяется двумя параметрами: электрической ёмкостью нановключения и средним расстоянием между мелкими донорными примесями.

Електроёмкость нановключения пропорциональна его размеру и относительной диэлектрической проницаемости $C \sim \epsilon R$, по этой причине предлагается использование наночастиц из материала с большой диэлектрической проницаемостью, например из халькогенидов свинца. Например, для селенида и сульфида свинца относительная диэлектрическая проницаемость равна соответственно $\epsilon_{\text{PbSe}}=250$ и $\epsilon_{\text{PbS}}=175$. Также определены границы размеров нановключений. Минимально возможный размер (R_{min}) для реальных, самопроизвольно возникающих наноструктур определяется из условия появления для электрона в её потенциальной яме хотя бы одного дискретного энергетического уровня. В сферической квантовой точке такое возможно в том случае, если величина разрыва зоны проводимости ΔE_C между кремнием и материалом нановключения превышает величину ΔE_1 – первого энергетического уровня электрона (с эффективной массой m_e) в квантовой яме прямоугольной формы шириной R_{min} :

$$\Delta E_C \geq \Delta E_1 = \frac{\hbar^2}{2 \cdot m_e} \cdot \left(\frac{\pi}{R_{\text{min}}} \right)^2 \quad (1).$$

Если при оценке R_{min} величину ΔE_C принять в интервале $0,3 \div 0,5$ эВ, то получим, что минимальное значение диаметра нанокластера не должно быть меньше $3 \div 5$ нм.

Предельный максимальный размер нанокластера (или нановключения) определяется из условия сопоставимости теплового разброса энергии (величина $\sim kT$) с энергетическим расстоянием между уровнями, при котором резко возрастает нежелательная заселенность высоких уровней. Поэтому для квантовой точки условие пренебрежения заселенностью высоколежащих уровней можно представить в виде:

$$kT \leq \frac{E_2 - E_1}{3} \quad (2)$$

где E_1 и E_2 – энергии первого и второго уровней размерного квантования соответственно. Расчетная величина максимально возможного размера нанокластера в зависимости от значения эффективной массы колеблется в интервале $20 \div 35$ нм.

Таким образом, для реальных, самопроизвольно возникающих наноструктур условия: $(3 \div 5) \text{ нм} \leq R \leq (20 \div 35) \text{ нм}$.

Электрическая ёмкость шара:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R \quad (3).$$

При параметрах относительной диэлектрической проницаемости $175 \leq \epsilon \leq 250$, и размера нанокластера $3 \text{ нм} \leq R \leq 35 \text{ нм}$. Величина ёмкости сферического нанокластера

$$6 \cdot 10^{-17} \text{ Ф} \leq C \leq 100 \cdot 10^{-17} \text{ Ф}.$$

Количество заряда перетекающего из кремниевой подложки в нановключение можно определить из соотношения:

$$q = C \cdot \Delta\varphi \quad (4)$$

где $\Delta\varphi$ разность потенциалов между нанокластером и подложкой. Если взять оценочное значение $\Delta\varphi = 0,5 \text{ В}$, то количество заряда:

$$6 \cdot 10^{-17} \text{ Ф} \leq q \leq 100 \cdot 10^{-17} \text{ Ф}.$$

Количество электронов перенёсших этот заряд из кремниевой подложки в нановключение можно определить как:

$$N = \frac{q}{e} \quad (5),$$

где e – заряд электрона. Из этого соотношения получается:

$$10^2 \leq N \leq 10^3.$$

В процессе установления термодинамического равновесия из подложки в нановключение перетекают несколько сотен электронов, при этом оголяя довольно длинную цепочку доноров остаточных примесей, которые в совокупности создают область пространственного заряда.

В кремнии «металлургической» чистоты концентрация остаточных мелких примесей может колебаться в широких пределах $n_D = 10^{12} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Среднее расстояние b между мелкими примесными центрами составляет порядка одного микрона:

$$b = \sqrt[3]{n_D} \sim 10^{-6} \div 10^{-7} \text{ м} \quad b = \sqrt[3]{n_D} \sim 10^{-6} \div 10^{-7} \text{ м} \quad (6).$$

Продольная длина d области пространственного заряда для новой контактной структуры будет составлять несколько десятков микрон:

$$d = N \cdot b \sim 10 \div 100 \text{ мкм} \quad (7).$$

Это существенно превышает ОПЗ традиционных р-п переходов и имеет ряд преимуществ:

на таком расстоянии поглощается практически весь спектр солнечного излучения;

рождение электронно-дырочных пар происходит в области пространственного заряда, поле которого приводит к незамедлительному разделению электронно-дырочных пар и их транспорту к токоёмным электродам. Это также существенно снижает негативное влияние рекомбинационных процессов и необходимость использования кремния высокой чистоты.

Напряжённость электростатического поля новой контактной структуры определена на основании представления о параллельных заряженных плоскостях (рис. 3).

Для нахождения вектора напряженности электростатического поля $E(x)$, используем теорему Гаусса.

Предполагается, что каждое межплоскостное пространство заключено между равномерно заряженными и бесконечными плоскостями с плотностью заряда либо σ_N^- , либо σ^+ .

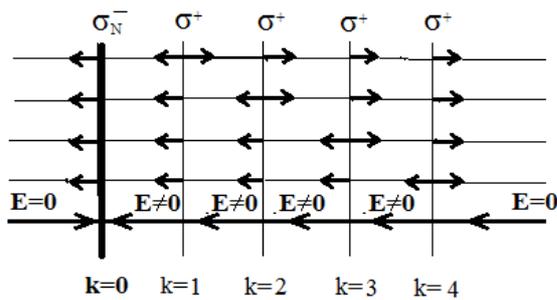
Поверхностная плотность заряда σ_N освещенной поверхности с КТ (с захваченными отрицательными электронами Ne^-)

$$\sigma_N = \frac{Ne^-}{L^2} = e^- N n_D^{2/3} \quad (8)$$

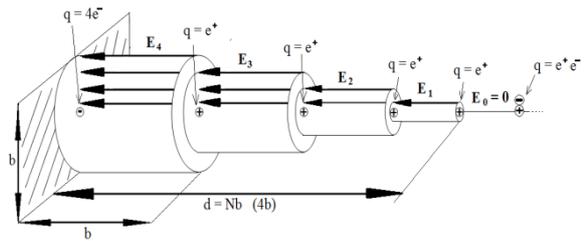
а плотность заряда поверхностей с ионизированными донорами равна:

$$\sigma = \frac{e^+}{L^2} = e^+ n_D^{2/3} \quad (9)$$

На рисунке 3 показана схема формирования электростатического поля в пространстве между плоскостями.



а) Схема (для случая $N=4$) формирования электростатического поля в каждом k -том ($0 \leq k \leq 3$) межплоскостном пространстве.



б) Игольобразное поле ОПЗ образуемое за каждым нановключением

Рис. 3. Формирование области пространственного заряда

Совокупность $N+1$ параллельных, равномерно заряженных и расположенных на равных расстояниях плоскостей нумеруются индексом k от 0 до N . Например, $k = 0$ – эта начальная плоскость, на которой расположены нано включения (с плотностью заряда σ_N). На всех других плоскостях k принимает значения 1; 2; 3; ... N (а плотность заряда одинакова и равна $\sigma^+ = e^+/b^2$).

Предполагая N и d изначально известными, согласно теореме Гаусса найдем координатную зависимость напряженности электростатического поля $E_k(x)$ в каждом из k межплоскостном пространстве области объемного заряда солнечных элементов с нано размерными гетеропереходами. Эта зависимость имеет вид:

$$E_k(x) = - \left(\frac{\gamma}{b} \right) \cdot (N - [x_k]) \quad (10)$$

где $\gamma = \frac{4 \cdot \pi \cdot k \cdot \epsilon^+}{\epsilon_{Si} \cdot b}$, $K = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}$, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; ϵ_{Si} и ϵ_N соответственно диэлектрические проницаемости кремния и материала нановключения, $[x_k]$ – целая часть x-координаты и равна $b \cdot k$ (где k изменяется $0 \leq k \leq N$).

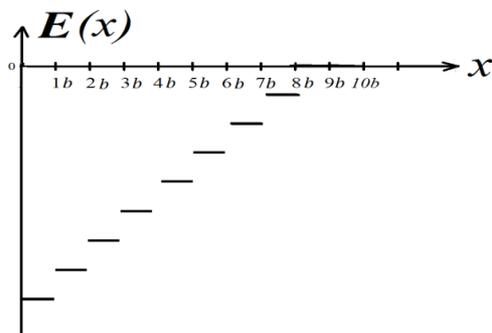
Соотношение получено на основе принципа суперпозиции полей и при следующих граничных условиях для отдельного нано размерного гетероперехода:

$$\text{в конце } (x = x_N = d) \rightarrow E_N(x = x_N = d) = 0$$

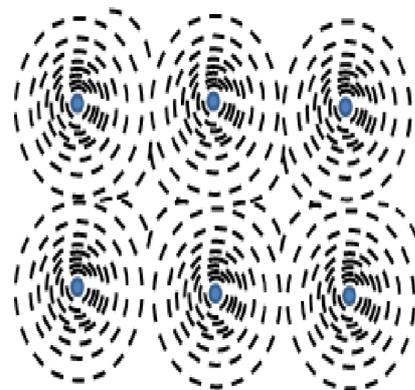
$$\text{в начале } (x = 0) \rightarrow E_0(x = 0) = E_0 = -\gamma \cdot N / b.$$

$$E_0 = \frac{-\gamma \cdot N}{b} \text{ – максимальное значение электростатического поля.}$$

Расчётная координатная зависимость напряженности электростатического поля $E_k(x)$ ОПЗ и вид силовых линий приведены на рисунке 4.



а) ход напряжённости электростатического поля



б) поперечный профиль силовых линий электростатического поля

Рис. 4. Электростатическое поле в новой контактной структуре

В соответствии с принятой моделью, можно сделать следующие выводы о характере изменения напряженности электростатического поля $E_k(x)$ в области объемного заряда солнечных элементов с наноразмерными гетеропереходами:

поле $E_k(x)$ между каждыми плоскостями равномерная и постоянная величина;

поле $E_k(x)$ везде отрицательная (из глубины наноразмерного гетероперехода направлена к поверхности подложки);

поле $E_k(x)$ имеет дискретную структуру и при переходе на очередное межплоскостное пространство скачком изменяется (увеличивается) на γ/b , достигая нуля в конце наноразмерного гетероперехода.

Определение распределения потенциала в области пространственного заряда новой контактной структуры.

Решая уравнение Пуассона, вычисляется потенциал электростатического поля НКС.

Область пространственного заряда НКС рассматривается как система параллельных заряженных и однородных плоскостей. Потенциал электростатического поля $\varphi_k(x)$ в каждом межплоскостном пространстве ОПЗ от x_k до x ($0 \leq k \leq N$) определяется интегрированием $E_k(x)$:

$$E_k(x) = - \frac{d\varphi_k(x)}{dx} \text{ либо } \varphi_k(x) = - \int_{x_k}^x E_k(x) dx \quad (11)$$

Граничные условия для потенциала ОПЗ следует из специфики рассматриваемой модели:

в начале ОПЗ у освещаемой поверхности $\varphi_k(x=0)$ максимальна и равна, термодинамическому значению φ_0 ,

в конце ОПЗ при $x = d$ потенциал равен $=0$.

Исходя из этих граничных условий, определяются три параметра потенциала ОПЗ:

потенциал в пределах k -того межплоскостного пространства:

$$\varphi_k(x) = \varphi_{k-1} - (\gamma/b) \cdot (N+1-k) \cdot [x_k] \quad (12)$$

потенциал $\varphi_k = \varphi_k(x=k \cdot b)$ – на границе k -того межплоскостного пространства:

$$\varphi_k = \varphi_0 - \gamma \cdot \sum_{i=1}^k (N+1-i) i = \varphi_0 - \gamma \cdot k \cdot (k+1) \cdot (3 \cdot N + 2 - 2 \cdot k) / 6 \quad (13)$$

потенциал φ_0 у поверхности:

$$\varphi_0 = \gamma \cdot N \cdot (N+1) \cdot (N+2) / 6 \quad (14)$$

Однако наличие k последовательно расположенных заряженных плоскостей проявляется специфическим образом: зависимость контактной разности потенциалов $\varphi_k(x)$ от координаты в межплоскостных пространствах – линейная, а не квадратичная как в стандартных p - n переходах.

В четвёртой главе «**Механизмы фотовольтаического преобразования и транспорта токоносителей в новой контактной структуре**» рассматривается роль глубоких примесных состояний. В кремнии металлургической чистоты (99,9%) где концентрация глубоких примесей достигает $10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$, среднее расстояние между ними порядка 1–10 нм. На рисунке 5 показаны возможные различные немонотонные формы зависимости плотности электронных состояний $N(E)$ от энергии E в запрещенной зоне (локализованные состояния заштрихованы); F – уровень Ферми вдоль запрещенной зоны (штриховая линия).

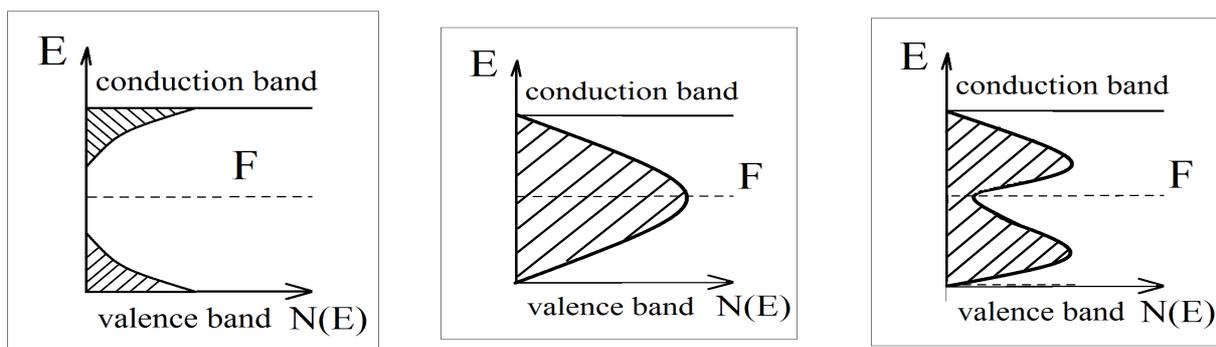
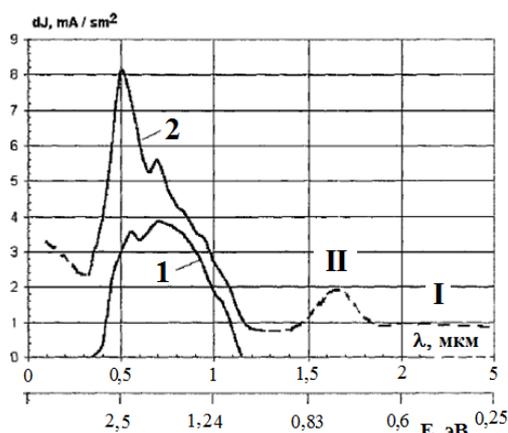


Рис. 5. Зависимости плотности электронных состояний от энергии в запрещенной зоне

Глубокие примесные состояния могут быть как акцепторной, так и донорной природы. Однако флуктуации в плотности распределения приводят к нескомпенсированности одного вида примесей.

В результате образуется ряд глубоких донорных уровней в запрещённой зоне, для активации которых требуется энергия меньше энергии фундаментального поглощения кремния. Другими словами, наличие большого количества глубоких примесей, свойственных кремнию металлургической чистоты, делает возможным расширение спектра эффективного поглощения в новой контактной структуре.



1 – в монокристаллическом кремнии,
2 – в экспериментальном солнечном элементе.

Рис. 6. Зависимость фототока от длины волны (энергии) падающего излучения.

Возбуждённый фотоном примесный электрон транспортируется на соответствующий токосъёмный электрод иглообразным электрическим полем сформированным мелкими примесями, энергетический наклон зон возникает вследствие разности потенциалов на поверхности и в глубине кремниевой подложки.

Транспорт образовавшейся дырки происходит в результате прыжковой проводимости, характерной для такой плотности состояний примесей.

Предлагаемая модель имеет экспериментальные предпосылки. Спектр эффективного поглощения экспериментального образца солнечного элемента², выполненного на техническом кремнии с использованием токосъёмных шин, делящих поверхность элемента на микроскопические площадки, существенно превышает монокристаллические аналоги (рис. 6).

На участке I рисунка 6 наблюдается зависимость характерная для прыжковой проводимости, участок II этого графика имеет характерный для

²Цой Б. Способ изготовления пучкового перехода, пучковый преобразователь электромагнитного излучения/ №WO 2011/040838 A2. Патент во всемирной организации интеллектуальной собственности. 07.04.2011

резонанса пик. Резонанс может иметь место, когда дополнительно к прыжковой проводимости добавляется туннельная проводимость, возникающая при равенстве энергий в начальном и конечном состоянии. Данный эксперимент свидетельствует о возможности расширения спектра эффективного поглощения фотоэлемента за счёт активации глубоких примесей, естественно присутствующих в больших концентрациях в техническом кремнии.

В этой главе также предложен макет солнечного элемента, который представляет собой множество изолированных и параллельно соединенных между собою отдельных «наноразмерных р-п переходов» (нановключений на поверхности кремния), созданных на освещаемой поверхности подложки солнечного элемента. В свою очередь, солнечная панель – это электрическая цепь с требуемыми электрическими параметрами, состоящая из многих солнечных элементов, соединенных частично параллельно, частично последовательно. Такая структура солнечной панели обеспечивает наиболее оптимальный подбор параметров и наиболее эффективный режим её функционирования.

Введем обозначения для количественной оценки наиболее оптимальных параметров одного наноразмерного р-п перехода: i_o – фототок, φ_o – контактная разность потенциалов и p_o ($p_o = i_o \cdot \varphi_o$) – вырабатываемая мощность. Эти параметры зависят, конечно, от параметров полупроводника и, прежде всего, поверхностной концентрации остаточных примесей b^{-2} .

Солнечный элемент будет определяться своей площадью s ($s=k \cdot l$), длиной k и шириной l (рис.10 б), а также числом $\nu = k \cdot l / b^2$ – параллельно соединенных «наноразмерных р-п переходов».

Параллельно соединенные ν – «наноразмерные р-п переходы» на одном солнечном элементе дают вместе суммарный фототок:

$$i = \nu \cdot i_o = (k \cdot l / b^2) \cdot i_o \quad (15),$$

а вырабатываемая суммарная мощность равна:

$$p = i \cdot \varphi_o = \nu \cdot i_o \cdot \varphi_o = (k \cdot l / b^2) \cdot \varphi_o \cdot i_o = (k \cdot l / b^2) \cdot p_o = \nu \cdot p_o \quad (16).$$

Аналогично для солнечной панели введем площадь S ($S = K \cdot L$), длину K и ширину L (рис.14 а). Кроме того, обозначим через Φ_o – выходное напряжение и I – ток солнечной панели.

Вдоль длины солнечной панели последовательно соединены в ряд K/k штук солнечных элементов с суммарным напряжением

$$\Phi_o = \varphi_o \cdot K/k \quad (17),$$

а вдоль ширины солнечной панели эти ряды соединены параллельно с суммарным фототоком

$$I = i \cdot L/l \quad (18).$$

Полная мощность электроэнергии P , вырабатываемой солнечной панелью, будет равна:

$$P = I \cdot \Phi_o = \varphi_o \cdot (K/k) \cdot i \cdot (L/l) = \varphi_o \cdot (K/k) \cdot (k \cdot l/b^2) \cdot i_o \cdot (L/l) = p_o \cdot (K \cdot L)/b^2 = P \quad (19)$$

Формулы 17–19 обеспечивают подбор наиболее оптимальных параметров солнечной панели с целью нахождения эффективного режима её функционирования. Кроме того, они демонстрируют определяющую роль «наноразмерных р-п переходов» в процессе преобразования в электричество солнечного излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследования механизмов повышения эффективности солнечных элементов с наноструктурными компонентами сделаны следующие выводы:

1. Получено аналитическое выражение для определения ширины области пространственного заряда в структуре «макроподложка-наночастица».

2. Показано, что глубина залегания приповерхностной области пространственного заряда имеет линейную зависимость от концентрации остаточных примесей в кремниевой подложке и диэлектрической проницаемости вещества наночастицы.

3. Исследованы преимущества длинной приповерхностной области пространственного заряда в процессе фотовольтаического преобразования и отличия её от классического р-п перехода. В частности, разделяющее поле новой контактной структуры начинается с поверхности подложки и простирается вглубь на несколько десятков микрон.

4. Показано, что в разработанной контактной структуре практически всё поглощение света и рождение электронно-дырочных пар происходит в области пространственного заряда, что приводит к моментальному их разделению и транспорту. Данный фактор снимает строгие требования к чистоте и кристалличности материала подложки, а также даёт возможность использовать в качестве подложки, материал, в котором носители имеют малое время жизни и соответственно малую длину свободного пробега.

5. На основе термодинамических представлений, в частности влияния тепловой энергии на «размытие» энергетических уровней, показана возможность определения максимального размера наночастиц, исходя из критерия сохранения квазидискретности их энергетических уровней. Также проведена численная оценка максимального размера наночастицы.

6. Предложен метод определения минимального размера наночастицы в модели бесконечно глубокой потенциальной ямы, из условия наличия хотя бы одного квазидискретного уровня в области разрыва между зоной проводимости подложки и последнего заполненного уровня наночастицы.

7. На основании теоремы Гаусса для электростатического поля, с использованием граничных условий, получены аналитические выражения для координатной зависимости вектора напряженности электростатического

поля и для потенциала в области пространственного заряда новой контактной структуры. Графически представлены их специфическое координатное распределение.

8. Показана роль структурных дефектов и глубоких примесных центров кремниевой подложки в расширении спектра эффективного поглощения, за счёт примесного поглощения и уменьшения ширины запрещённой зоны. Что приводит к эффективному поглощению фотонов с энергией меньше энергии фундаментального поглощения кремния.

9. Проведён численный, сравнительный анализ солнечной панели из элементов на основе новой контактной структуры и панели из традиционных монокристаллических солнечных элементов.

10. Теоретически разработанная модель новой контактной структуры показывает возможность использования дешёвого, модернизированного технического кремния для создания солнечных элементов, имеющих коэффициент полезного действия сравнимый с аналогами из монокристаллического кремния.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCES AT THE PHYSICAL
AND TECHNICAL INSTITUTE, INSTITUTE OF ION-PLASMA AND
LASER TECHNOLOGIES, SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

PHYSICAL AND TECHNICAL INSTITUTE

DJALALOV TEMUR ASFANDIYAROVICH

**THEORETICAL DEVELOPMENT OF MECHANISMS FOR
INCREASING THE EFFICIENCY OF SOLAR PHOTOCELLS WITH
NANOSTRUCTURAL COMPONENTS**

01.04.10- Physics of semiconductors

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

TASHKENT-2018

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No B2017.2.PhD/FM45.

The dissertation was carried out at the Physical and Technical Institute.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at fti.uz and on the website of «ZiyoNet» information-educational portal at www.ziynet.uz.

Scientific consultant: **Imamov Erkin Zunnunovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Mamadalimov Abdugafur Tishabaevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Rasulov Rustam Yavkachovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Namangan State University**

The defence of the dissertation will be held on «__» _____ 2018, at __ at the meeting of the Scientific Council number Dsc.27.06.2017.FM/T.34.01 at the Physical and Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Samarkand State University (Address: 2B Bodomzoryuli str., 100084 Tashkent. Tel./Fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: info.fti@uzsci.net).

The dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of the Physical and Technical Institute (registered under No 4). Address: 2B Bodomzoryuli str., 100084 Tashkent. Tel.: (+99871) 235-42-91.

The abstract of dissertation was distributed on «__» _____ 2018
(Registry record No 4 dated «__» _____ 2018)

S. A. Bakhrarov
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, D.F.-M.S., academician

A. V. Karimov
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, D.F.-M.S., professor

I. G. Atabaev
Chairman of scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, D.F.-M.S., professor

INTRODUCTION (annotation of the PhD dissertation)

Topicality and relevance of the theme of the dissertation. At present, development of additional mechanisms to increase the efficiency of solar photocells is of great importance in increasing the efficiency of solar energy conversion. Therefore, scientific researches conducted in the following areas are considered one of the important tasks, and indicate the relevance of the topic of this dissertation: attraction of new mechanisms for photocurrent formation, determination of factors that ensure a guaranteed lifetime and reduction in the cost of used materials; determination of the boundary dimensions of nanocomponents for the manifestation of quantum-size effects; clarification of conditions for self-organized growth of nanostructures on a substrate surface; investigation of mechanisms of the appearance of a multitude of local heterojunctions with nanostructural components; search for mechanisms to expand the absorption spectrum of solar radiation of a structure with nanocomponents with the purpose of increasing the coefficient of collecting carriers.

Relevance of the research to the priority areas of science and technology development of the republic. The dissertation research was carried out in accordance with the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan – PPI-4: «Development of methods for the use of renewable energy sources, development of technologies and devices based on nanotechnologies, photonics and other advanced technologies» and PFI-3: «Theory and methods for the use of renewable energy sources».

The aim of the research is the theoretical development of mechanisms for increasing the efficiency of silicon solar photocells, increasing their guaranteed durability and reducing their cost significantly with the help of nanoscale components.

The tasks of the research:

to determine the factors ensuring a guaranteed service life and reducing the cost of used materials;

to determine the boundary dimensions of nanocomponents for the manifestation of quantum-size effects;

to clarify the conditions for self-organized growth of nanostructures on a substrate surface;

to investigate the mechanism of the appearance of a multitude of local heterojunctions with nanostructural components;

to search for mechanisms to expand the absorption spectrum of solar radiation of a structure with nanocomponents.

The object of the research: structures of solar photocells with nanoinclusions.

The subject of the research: mechanisms of photocurrent formation and physical processes in the generation of electron-hole pairs in solar cells with nanostructural components.

The methods of research. Mathematical methods of theoretical calculations and modelling of energy and electronic processes in semiconductor photoconductive structures, including with nanoinclusions, were used to solve the tasks set in the research.

The scientific novelty of the research consists of the following:

The characteristic properties of a silicon substrate enabling the realization of the proposed mechanism for the formation of a contact structure with nanocomponents were determined;

The conditions were clarified for the self-organization of nanostructures on the surface determined by the difference of constant lattices between the substrate and nanoinclusions that arise by mechanical tension and temperature regime;

The maximum and minimum sizes of nanocomponents were determined, which are conditioned by the energy characteristics of contacting materials;

A mechanism was identified for the formation of a heterojunction, which includes a transition, a nanoscale chalcogenide point-a substrate forming a one-dimensional needle-shaped specific electrostatic field that ensures the separation of photoexcited electron-hole pairs;

On the basis of the developed model it was shown that uncontrolled partially-compensated deep impurities that are available in the silicon substrate lead to an expansion of the spectrum of effective absorption of solar radiation into the long-wave region.

Implementation of the research results. The obtained research results on the theoretical development of mechanisms for increasing the efficiency of silicon solar cells based on the use of nanoscale components in them were used:

to study the physical and electrooptical characteristics of nanotubes, as well as to determine the features of a new type of semiconductor contact structures when carrying out researches aimed at creating transparent current collector coatings based on nanotubes (Certificate of the University of Carnegie Melloni of July 10, 2017). The use of the obtained scientific results allowed to optimize the growth conditions of nanocoatings on the surface of a semiconductor substrate;

in the implementation of the fundamental project: «Mechanisms of the appearance of impurity-defective micro- and nanocomponents in crystals and their role in the creation of wide-ranging, multilayer structures» (project manager S. Zainobiddinov) OTM-F2-62 performed at Andijan State University (Certificate FTA-02-11/375 of the Agency of Science and Technology of the Republic of Uzbekistan of July 21, 2017). The use of the scientific results made it possible to explain the conditions for the appearance of nano-heterostructures, to choose the methods for determining the tension and potential of the electric field in them, as well as the method for determining optical and electrophysical parameters in micro- and nanoinclusions.

Publication of the research results. 14 scientific works and 1 monograph were published on the theme of the dissertation, 14 of them in the journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of dissertations.

The volume and structure of the dissertation. The dissertation is presented on 119 pages consisting of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references and appendixes.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; Part I)

1. Джалалов Т.А., Имамов Э.З. Принципы наногелиоэнергетики // Монография,–Ташкент, из-во «Дитаф», 2015, с. 98.
2. Imamov E.Z., Djalalov T.A., Muminov R.A., Rakhimov R.K. Analysis of the role of nano-object in the cheaper silicon solar cells // Computational nanotechnology. Moscow, 2017. - № 3. P. 14-17. [01.00.00, (18)]
3. Imamov E.Z., Djalalov T.A., Muminov R.A., Rakhimov R.K. Unique opportunity to create cheap but effective silicon solar // Computational nanotechnology. Moscow, 2017. - № 1. P. 61-64. [01.00.00, (18)]
4. Imamov E.Z., Djalalov T.A., Muminov R.A., Rakhimov R.K. The difference between the contact structure with nanosize inclusions from the semiconductor photodiodes // Computational nanotechnology. Moscow, 2016. - № 3. P. 203-206. [01.00.00, (18)]
5. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Формирование молекулярных термов PbS И PbSE // Узбекский физический журнал. – Ташкент 2016.–Т.18, №1, –С. 16-19. [01.00.00, № 5].
6. Djalalov T.A. Solar cells on the new contact structure basis // International Journal of Scientific & Engineering Research –USA, 2016. –V. 7, Issue 8. P. 680-686. [01.00.00, (12)].
7. Imamov E.Z., Djalalov T.A., Muminov R.A., Rakhimov R.K. The theoretical model of new contact structure «nanoobject-semiconductor» // Computational nanotechnology. Moscow, 2015. - № 4. P. 58-61. [01.00.00, (18)]
8. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Электрофизические свойства новой контактной структуры «нанообъект-полупроводник // Журнал технической физики.–Россия,2015. –Т. 85, № 5. –С.110-115. [01.00.00, № 20]
9. Джалалов Т.А.Формирование спектра электронных состояний нанокластеров // Доклады академии наук Узбекистана.–Ташкент, 2015. №5, – С. 29-32. [01.00.00, № 7].
10. Джалалов Т.А., Lisa M.Porter, Имамов Э.З., Муминов Р.А. Теория электростатического поля в наноразмерных р-п- переходах // Узбекский физический журнал. –Ташкент 2015.–Т.17, № 3, –С. 131-139. [01.00.00, № 5].
11. Dzhalalov T. A., Imamov E. Z., Muminov R. A. The Electrical Properties of a Solar Cell with Multiple Nanoscale p–n Transitions // Applied Solar Energy. – USA, 2014. –V. 50, №. 4, –P. 228–232. [01.00.00, № 3].
12. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Состояние и перспективы проблемы прямого преобразования солнечного излучения в электрическую энергию на основе кремниевых преобразователей.// Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» журнали. – Тошкент, 2013. №3-4. –С.б.50-55. [05.00.00, № 21].

13. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Особенности энергетического спектра и мультиэкситонной генерации в наночастицах PbSe и PbS // Журнал Гелиотехника Ташкент, 2011. №2, –С.18-21. [01.00.00, № 1].

14. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Фотоўзгартирувчиларининг кристалларда нанокўшимчалар мавжудлигида самарадорлигини ошириш янги механизмлари тўғрисида // Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» (махсус нашр) журнали. –Тошкент, 2011. б. 37-48. [05.00.00, № 21].

15. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Механизм повышения эффективности солнечных фотоэлементов // Журнал Гелиотехника. – Ташкент, 2010. №4, –С.3-9. [01.00.00, № 1].

II бўлим (II часть; Part II)

16. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Анализ возможных методов повышения эффективности гелиоэнергетических устройств // Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование: 9-Международная научная конференция 12-14 октября 2016. – Алматы. 2016. –С. 255-256.

17. Алибеков С., Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Особенности процесса эпитаксиального роста на поверхности кремниевой подложки нановключений из халькогенидов свинца. // Республиканская научная конференция: Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах. 1-2 февраля. – Ташкент. 2017. С.62-64.

18. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Технологические инновации в солнечной энергетике // Источники альтернативных энергий и актуальные проблемы их использования: Республиканская конференция. 25-26 ноября 2015. –Бухара. 2015. –С. 144-145.

19. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Технология формирования контакта «нановключение-полупроводник» // Современные проблемы физики полупроводников: Республиканская конференция. 26-27 октября 2015. –Нукус. 2015. –С. 60-61.

20. Джалалов Т.А., Имамов Э.З. Требования к материалу подложки и роль дефектов в новой контактной структуре // III международная конференция по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах. 14-15 ноября 2014. –Фергана. 2014. –С. 126-128.

21. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Уникальная возможность существенного повышения эффективности солнечных элементов на кремниевой основе // Республиканская конференция посвященная 100-летию академика С.А.Азимова. 6-7 ноября 2014. –Ташкент. 2014. –С. 230-231.

22. Абдуллаева Ш.И., Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Разработка нанofизического механизма решения проблемы эффективности солнечных элементов // XXI аср илм ва технологиялар соҳасидаги устувор йўналишлар: XII халқаро илмий конференция 30-31 мая 2014. –Ташкент. 2014. –С. 294-298.

23. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А., Насимова Н. Нанотехнология в решении проблемы солнечной энергетики // Актуальные проблемы использования альтернативных источников энергии: Республиканская научно-техническая 28-29 апреля 2014. –Карши. 2014.–С. 15-16.

24. Абдуллаева Ш.И., Джалалов Т.А., Имамов Э.З. Физическая модель экологически чистого фотовольтаического преобразователя с использованием нанотехнологической обработки // Республиканская научно-практическая конференция с участием зарубежных ученых посвященная 60-летию профессора кафедры физики Аджимурата Жумамуратова 11-12 декабря 2013. –Нукус. 2013. –С. 106-108.

25. Абдуллаева Ш.И., Джалалов Т.А., Имамов Э.З. Насимова Н. Моделирование процесса преобразования солнечной энергии в гелиоустановках с нанотехнологической обработкой материалов // Современные проблемы моделирования механических и технологических процессов основанных на высоких технологиях: Республиканская научно-практическая конференция 26-28 ноября, 2013. –Бухара. 2013. –С. 244-245.

26. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Каримходжаев А.А. Нанофизика в повышении эффективности солнечного преобразования // Актуальные проблемы теоретической и ядерной физики: Республиканская научная конференция 25-26 октября 2013. –Ташкент. 2013. – С. 52-54.

27. Джалалов Т.А., Имамов Э.З. Влияние нанотехнологической обработки материала солнечных элементов на эффективность и стоимостные показатели оборудования гелиоэнергетики // Замодавий физика ва астрономия ютуқлари: Республика илмий-амалий конференция материаллари 4 ноябр 2013. –Ташкент. 2013. –Б. 16-18.

28. Джалалов Т.А., Имамов Э.З. Теория фотоэлемента с многими наноразмерными р-п переходами // Международная конференция посвященная 70-летию Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» 14-15 ноября 2013. –Ташкент. 2013.–С. 136-138.

29. Джалалов Т.А., Имамов Э.З.Использование полупроводниковых наноструктур в процессах фотопреобразования // Актуальные вопросы и тенденции развития биологии, химии, физики: Международная научно-практическая 6-7 июня 2012.–Новосибирск. 2012. –С.111-115.

30. Джалалов Т.А., Имамов Э.З. Инновационные решения проблемы фотопреобразования // Инновация – 2012: Международная научная конференция 7-8 октября 2012. –Ташкент. 2012. – С. 27-31.

31. Джалалов Т.А., Имамов Э.З. Повышение эффективности фотоэлементов с использованием специфических свойств наноструктур //Международная конференция посвящённая 80-летию адемика М.С.Саидова: Фундаментальные и прикладные вопросы физика 24-25 ноября. –Ташкент. 2010. – С. 77-78.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририясида таҳрирдан ўтказилди.
(04.09.2017 йил)

Босишга рухсат этилди: 09.02.2018 йил.
Бичими 60x44 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 2,75. Адади: 100. Буюртма: № _____.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.