

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ,
ЎЗБЕКСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.28.02.2018.FM/T.03.05
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

САИТОВ ЭЛЁР БАХРИДДИНОВИЧ

**НИКЕЛ КИРИШМА АТОМЛАРИГА ЭГА БЎЛГАН КРЕМНИЙ
АСОСИДА САМАРАДОРЛИГИ ЮҚОРИ ФОТОЭЛЕМЕНТЛАР
ТЕХНОЛОГИЯСИНИ ЯРАТИШ ВА ОЛИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси
(техника фанлари)**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

ТОШКЕНТ–2018

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертация
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора философии (PhD) по технический наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) of
technical sciences**

Саитов Элёр Бахриддинович

Никел киришма атомларига эга бўлган кремний асосида самарадорлиги юқори фотоэлементлар технологиясини яратиш ва олиш..... 3

Саитов Элер Бахриддинович

Разработка технологии и получение высокоэффективных фотоэлементов на основе кремния с примесными атомами никеля..... 29

Saitov Elyor Bakhriddinovich

Development of technology and production of highly effective silicon-based photocells with impurity atoms of Nickel 55

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 59

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ,
ЎЗБЕКСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.28.02.2018.FM/T.03.05
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

САИТОВ ЭЛЁР БАХРИДДИНОВИЧ

**НИКЕЛ КИРИШМА АТОМЛАРИГА ЭГА БЎЛГАН КРЕМНИЙ
АСОСИДА САМАРАДОРЛИГИ ЮҚОРИ ФОТОЭЛЕМЕНТЛАР
ТЕХНОЛОГИЯСИНИ ЯРАТИШ ВА ОЛИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси
(техника фанлари)**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

ТОШКЕНТ–2018

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.2.PhD/FM85 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ислон Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбар: **Зикриллаев Нурулло Фатхуллаевич**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Абдукодиров Муҳиддин Абдурашидович**
техника фанлари доктори, профессор

Тагаев Марат Баймуратович
техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: **Фарғона политехника институти**

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети, Ўзбекистон миллий университети ҳузуридаги DSc.28.02.2018.FM./T.03.05 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2-уй. Тел. (99871) 246-46-00, факс (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@edu.uz, ТДТУ «Электроника ва автоматика» факультети 232-хона).

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

Диссертация автореферати 2018 йил «___» _____ да тарқатилди.

(2018 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

М.К.Боходирхонов

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

Б.Э.Эгамбердиев

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

А.Рахматов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси ўринбосари. т.ф.д., катта илмий ходим.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Муқобил энергия манбаларидан фойдаланиш, бугунги кунда дунё бўйича, олимлар ва мутахассислар эътиборини кенг жалб этмоқда. Бу соҳага бўлган қизиқиш, бир томондан экологик жиҳатдан тоза ва арзон энергияни олиш бўлса, иккинчи томондан анъанавий энергия манбаларининг ердаги захираларининг чекланганлиги ва тугаб бориши билан боғлиқдир. Шу сабабли, муқобил энергия манбалари ичида, қуёш энергиясидан фотоэлектрик ўзгартиргичлар асосида электр энергиясини олиш ва уларнинг самарадорлигини ошириш бўйича илмий тадқиқотлар олиб бориш муҳим вазифалардан бири бўлиб қолмоқда.

Бугунги кунда дунёда муқобил энергия манбаларини ривожлантиришда, фотоэлементларни олиш технологиясини такомиллаштириш бўйича илмий изланишлар олиб борилмоқда. Бу борада, мақсадли илмий изланишларни қуйидаги йўналишларда олиб бориш муҳим вазифалардан ҳисобланади: яримўтказгич материалларини киришма атомлари билан лигерлаб фотоэнергетика учун янги турдаги яримўтказгич материалларини яратиш; чуқур энергетик сатҳлар ҳосил қиладиган киришма атомларни кремнийга киритиш асосида микро ва нанокластерларни шакллантириш; олинган материаллар асосида самарадорлиги юқори бўлган фотоэлементларни олиш технологиясини такомиллаштириш; Шоттки микро тўсиғи асосидаги фотоэлементларнинг электрофизик параметрларини ҳарорат ва радиация таъсирига чидамлилигини ошириш.

Ўзбекистон Республикасида ноанъанавий ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ишлаб чиқиш ва ундан оқилона фойдаланиш ҳамда инновация ютуқларини амалиётга кенг тадбиқ этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига катта аҳамият берилган. «Фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб қувватлаш» йилида олинган илмий натижаларни ҳозирги замон талабларига жавоб берадиган даражага олиб чиқишга алоҳида эътибор қаратилган. Жумладан, кремний материали ҳажмида киришма атомларининг кластерларини ҳосил қилиб, унинг электрофизик параметрларини яхшилаш ҳамда электроника соҳасида янги синф асбоб ва қурилмаларини яратиш бўйича катта илмий изланишлар олиб борилмоқда. Бу борада, микро ва нанокластерли кремний материалларининг янги хоссаларини кашф қилиш ва унинг хусусиятлари асосида тубдан янги бўлган фотоэлементларни яратиш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февридаги «Ўзбекистон республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги ПФ–4947-сон Фармонининг 4-банди, 2017 йил 13 февралдаги «2017–2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида» ги ПҚ–2772-сон ҳамда 2017 йил 17 февралдаги «Фанлар академиясининг фаолиятини,

илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ПҚ–2789-сон Қарорлари ва мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда, ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация иши республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергия ресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Таниқли олимлардан В.П.Афанасьев, Ж.И.Алфёров, М.В.Андреев (Россия) яримўтказгич материалларига киришма атомларини киритиш орқали юпка қатламлар олиш ва уларнинг фотоэлектрик параметрларини аниқлаш бўйича илмий изланишлар олиб боришган. Бундай технологиялар ва улар асосида олинган фотосезгир материалларнинг хусусиятлари Н.Л.Dugand, Р.Е.Balzhiser ва К.Г.Ross (Америка) каби таниқли олимлар томонидан назарий ва амалий жиҳатдан яхши ўрганилган. Улар томонидан фотоэлементларни тайёрлаш технологиясининг назарияси, фотоўтказувчанлик механизми ва кинетикаси асосида тушунтириб берилган ҳамда амалиётда фотосезгир материаллар олинган. Бундан ташқари олимлар томонидан фотоэлементларнинг конструкциялари, фотосезгирлик эффекти, фотоўтказувчанликнинг инфрақизил нур ва ҳарорат таъсирида сўниши каби фотоэлектрик ходисалар кузатилган ва уларнинг рўй бериш механизмлари назарий асосланган.

Ҳозирги вақтда Ўзбекистонлик олимлардан академиклар М.К.Баҳодирхонов, С.Зайнобидинов ва Р.А.Мўминов ҳамда уларнинг шогирдлари томонидан кремнийга кластерлар ҳосил қилувчи киришма атомларини киритиш билан фотоэлементларнинг спектрал ютиш соҳасини кенгайтириш имкониятлари илмий асослаб берилган. Профессор М.Н.Турсунов раҳбарлигида, фотоэлектрик модулларининг конструкцияларини Ўзбекистон шароитига мослаштириш бўйича илмий тадқиқотлар олиб борилган.

Кремний ҳажмида микро ва наноўлчамли структураларга эга бўлган материаллар олишда, кластерларнинг тартибланиши билан боғлиқ физик ходисаларни ўрганишга бағишланган, назарий ва амалий тадқиқотларининг тахлили бу соҳанинг имкониятлари янада кенглигини кўрсатди. Бироқ шу даврга қадар яримўтказгич кристалл панжарасида ҳосил бўлган микро ва нанокластерли кремнийнинг фотоэлектрик хусусиятлари, параметрларининг деградацияси ҳамда ҳарорат ва радиация таъсирига чидамлиги ўрганилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Тошкент давлат техника университети «Рақамли электроника ва микроэлектроника» кафедрасининг илмий тадқиқот режасига мос бўлиб,

MT-83/2013 рақамли «Нановаризон структурали кремний асосида спектрал сезиш соҳаси кенг бўлган (0,1÷3 мкм) янги турдаги фотоэлементларни ишлаб чиқиш ва тайёрлаш» (2014–2015 йй.) мавзусидаги Ўзбекистон – Туркменистон халқаро илмий-тадқиқот лойиҳаси ҳамда Ф2-44 рақамли «Яримўтказгичларда киришма атомларининг ўз-ўзини шакиллаштириш механизмини ва уларнинг параметрларини бошқаришни тадқиқ қилиш», (2012–2016 йй.) мавзусидаги фундаментал лойиҳа доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади никел киришма атомларининг тартибланган микро ва наноструктураларга эга кремний материални олиш технологияси асосида самарадорлиги юқори фотоэлементларни ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

кремний асосидаги фотоэлементларни кўшимча никел киришма атомлари билан диффузия қилинганидан сўнг, ҳароратли ишлов бериб, замонавий усуллар ёрдамида, киришма атомларининг кремний материалда жойлашиши, таркиби, тақсимоти ва шаклланишини аниқлаш;

кремний пластиналарида никел микро ва нанокластерларини шакллантириш ва кўшимча равишда юқори ҳароратли ишлов бериб фотоэлементларнинг электрофизик параметрларини ҳарорат таъсирида деградациясини ўрганиш;

никел киришма атомлари кластерларига эга фотоэлементларнинг электрофизик параметрларини γ – нурланиш таъсирига барқарорлигини ошириш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида электроника саноатида фойдаланилган КЭФ-4,5; КЭФ-40; КДБ-0,5; КДБ-10 маркали кремний монокристалларини пластиналари танлаб олинди. Киришма атомлари сифатида никел элементи танланди. Унинг электрон структураси $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8 4s^2$ бўлиб, диффузия жараёнида тозалиги 99,9999 даражада бўлган Ni атомлари ишлатилган.

Тадқиқотнинг предмети монокристалл кремний панжарасида никел атомларининг текис занжирсимон тақсимланган фотосезгир хусусиятли нанокластерларини шакллантиришдан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари никел киришма атомлари кремний материалга диффузия қилинганидан сўнг пластиналарни кўшимча 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 °C ҳароратларда қиздириш усулидан фойдаланилган. Фотоэлементлардаги p-n ўтиш юқори ҳароратли диффузия асосида шакллантирилган. Кремний намуналаридаги никел киришма атомларининг ҳолатини аниқлашда Oxford Instruments ZEISS EVOMA10 маркали микроэлементларни таҳлил қилувчи растерли электрон микроскоп, Solver-Pro маркали атом кучлари микроскопи, X'Pert Powder маркали дифрактометр ҳамда МИК-5 маркали инфракизил микроскопдан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгиллиги қуйидагилардан иборат:

кремний материалларининг ҳажми бўйича тенг тақсимланган ва электрофизик параметрлари бошқариладиган никел киришма

атомларининг тартибланишга имкон берадиган икки босқичли диффузия жараёнининг технологияси мукаммаллаштирилган;

фотоэлементлардаги фотоўтказувчанликда заряд ташувчиларнинг туннел ўтиш эффектини кузатиш учун, никел нанокластерлари ўртасидаги масофаларни ҳажм бўйича тенг тахсимланишига имкон берадиган технология яратилган;

қўшимча ҳароратли ишлов берилган, турли кластер концентрацияларига эга бўлган, материаллар асосида фотоэлементлар тайёрланган ва уларнинг электрофизик параметрлари аниқланган;

никел киришма атомлари кластерларига эга кремний асосида яратилган, фотоэлементларнинг самарадорлиги ҳамда уларнинг параметрларини ҳароратга чидамлилиги ва радиацион нурланишга барқарорлиги илмий асосланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

монокристалл кремний панжарасида никел киришма атомларининг тартибланиши билан боғлиқ бўлган микро ва нанокластерларни ҳосил қилиш технологияси ишлаб чиқилган;

никел киришма атомларининг микро ва нанокластерлари таъсирида кремнийнинг спектрал сезгирлик соҳасини ошириш усули ишлаб чиқилган. Бу, ўз навбатида кремний асосида самарадорлиги юқори бўлган фотоэлементлар технологиясини ишлаб чиқиш имконини берган;

назорат намуналарига нисбатан, никел атомларининг кластерлари мавжуд бўлган фотоэлементларнинг параметрларини ҳароратга барқарорлиги ва радиацияга чидамлиги ҳисобига ФЭларнинг самарадорлиги юқори бўлиши кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги маълумотларни ўлчаш ва ишлов беришда, бир бирига боғлиқ бўлмаган замонавий усуллар ва қурилмаларнинг мажмуасидан фойдаланилган ҳамда олинган натижалар, яримўтказгичлар физикаси ва техникасини замонавий йўналишларига мослиги билан тасдиқланган.

Тадқиқот натижаларини илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти, қўшимча ҳароратли ишлов бериш таъсири натижасида никел киришма атомларининг кластерларини тартибланиши.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти, никел киришма атомларининг кластерлари ҳисобига фотоэлементларнинг спектрал сезгирлик соҳасини кенгайтириш, ФЭларнинг самарадорлигини ошириш ва параметрларининг деградацион хусусиятларини яхшилаш.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши: Никел киришма атомларининг тартибланган микро ва наноструктураларга эга кремний материалларини олиш технологияси асосида, самарадорлиги юқори бўлган фотоэлементларни ишлаб чиқиш таклиф этилган;

никел киришма атомлари КДБ-0,5; КДБ-10; КЭФ-4,5; КЭФ-40 кремний материалларига юқори $T=1220$ °С ҳароратда киритилган бўлиб, ҳосил бўлган никел кластерларига эга материалларни қўшимча 1100, 1000,

900, 800, 700 ва 600 °С ҳароратларда ишлов беришда олинган илмий натижалар «FOTON» акциядорлик жамиятида киришмалар билан лигерланган кремнийга қайта ҳароратли ишлов беришда фойдаланилган («Ўзэлтехсаноат» акциянерлик компаниясининг 2018 йил 9 июлдаги №02-1517 рақамли маълумотномаси). Илмий натижаларни қўлланилиши кремнийда нафақат никел кластерларининг ҳосил бўлишини, балки киришма атомларининг кластерларини тартибланиш имкониятини берган;

кремний материалларининг ҳажми бўйича тенг тақсимланган ва электрофизик параметрлари бошқариладиган никел киришма атомларининг тартибланишига имкон берадиган икки босқичли диффузия жараёнининг технологияси мукаммаллаштирилган бўлиб, «FOTON» акциядорлик жамиятида киришма атомларнинг нанокластерларини тартибли шакллантиришда қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акциянерлик компаниясининг 2018 йил 9 июлдаги №02-1517 рақамли синовдан ўтказилганлиги бўйича маълумотнома мавжуд). Илмий натижалардан фойдаланиш никел киришма атомлари билан лигерланган ФЭларнинг параметрларини ҳароратга ва гамма нурланишига барқарорлигини ошириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари, 16 та илмий – амалий анжуманларда, 9 та ҳалқаро ва 7 республика илмий – амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларини эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 28 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий нашрлари натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий ишларда 12 та мақола, жумладан, 3 таси хорижий ва 9 таси республика журналларида нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш қисми, 4 та боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан ташкил топган. Диссертациянинг ҳажми 125 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, мавзуни республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ҳамда амалий аҳамияти баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий моҳияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **«Адабиётлар таҳлили»**га бағишланган биринчи бобида, илмий адабиётларда келтирилган маълумотлар асосида, киришма атомларининг структураларини яримўтказгич материалларининг фотоэлектрик хоссаларига таъсирини ўрганишдаги муаммолар таҳлил қилинган.

Мавжуд назарий ва амалий маълумотлар таҳлили асосида тадқиқотнинг вазифалари шакллантирилган.

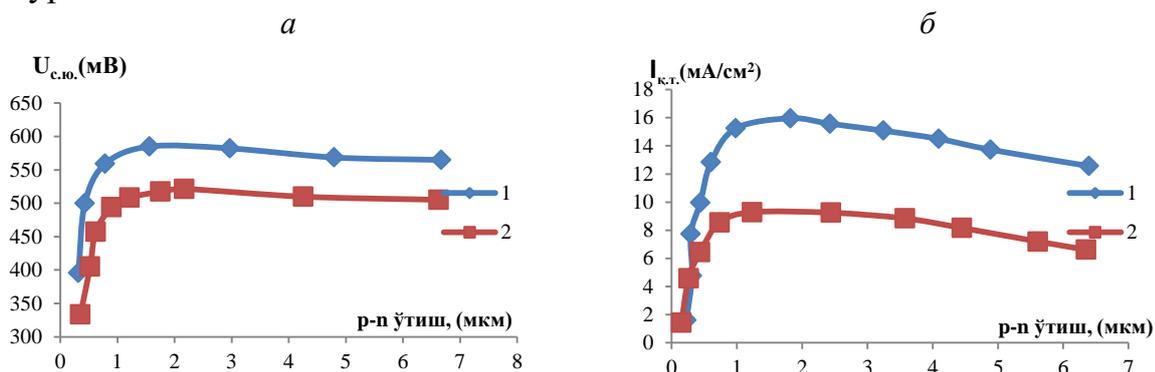
Ишни бажаришда ва тадқиқот вазифаларини белгилашда асосий амалга оширилиши режалаштирилган илмий изланишлар кўрсатиб берилган. Улар қуйидагилардан иборат: фотоэлементларни ишлаб чиқаришнинг замонавий ҳолати ва асосий муаммоларини аниқлаш; наноструктураларни яримўтказгичлар асосида яратилган фотоэлементларнинг электрофизик параметрларини тадқиқ қилиш; замонавий фотоэлементларнинг самарадорлигини чекловчи асосий омилларни тадқиқ қилиш ва уларнинг ечимини ҳал қилишга бағишланган.

Диссертациянинг **«Никел атомлари кластерларига эга фотоэлементларни тайёрлаш технологияси»** деб номланган иккинчи бобида, кремний панжарасида никел киришма атомларининг кластерларини шакллантириш технологиясини яратиш, кремний ҳажмидаги наноструктураларнинг тақсимотини аниқлаш, замонавий усуллар ёрдамида никел киришма атомлари кластерларининг тузулиши, таркиби ва концентрациясини ўрганиш ҳамда уларни бошқариш имкониятларини аниқлаш, талаб этилган электрофизик параметрга эга ФЭлар олиш технологиясини яратиш ҳақидаги маълумотлар берилган.

Намуналарнинг асосий электрофизик параметрлари Холл усули ёрдамида аниқланган. Олинган намуналарнинг фундаментал параметрларини аниқлашда МИК-5 инфрақизил микроскоп таҳлили, Oxford Instruments ZEISS EVOMA10 маркали микроэлементларни таҳлил қилувчи электрон микроскоп, Solwer-pro маркали атом кучлари микроскопи сингари, замонавий усуллар ва рентген нурлари асосида ишлайдиган X'Pert Powder дифрактометр қурилмасидан фойдаланилган.

Фотоэлементларнинг электрофизик параметрларини яхшиланиши никел киришма атомларининг концентрацияси ҳисобига ҳосил бўлган микро ва нанокластерлар асосида Шоттки микро потенциал тўсиқларини шаклланиши билан тушунтирилган. Самарадорлиги юқори

фотоэлементларни олишда бошланғич материалнинг оптимал электрофизик параметрлари ва технологиясини аниқлашдаги катталиклар кўрсатилган.



a - ФЭларнинг $U_{c.ю.}$ салт юриш кучланиши $p - n$ ўтиш чуқурлигига боғлиқлиги.
б - ФЭларнинг $I_{к.т.}$ қисқа туташув токини $p - n$ ўтиш чуқурлигига боғлиқлиги.
 1)КДБ-0,5; 2)КЭФ-4,5.

1 - расм. ФЭларнинг қисқа туташув токи ва салт юриш кучланишининг қиймати, $T=300\text{ K}$

Никел киришма атомларини эрозиясиз диффузия қилиш жараёнида, сиртдаги киришма атомларининг концентрацияси $N=10^{18}\text{ см}^{-3}$ дан кўп бўлмаслиги ва $T=1280\text{ }^\circ\text{C}$ дан юқори бўлмаган ҳароратда олиб борилиши, керакли аниқланган.

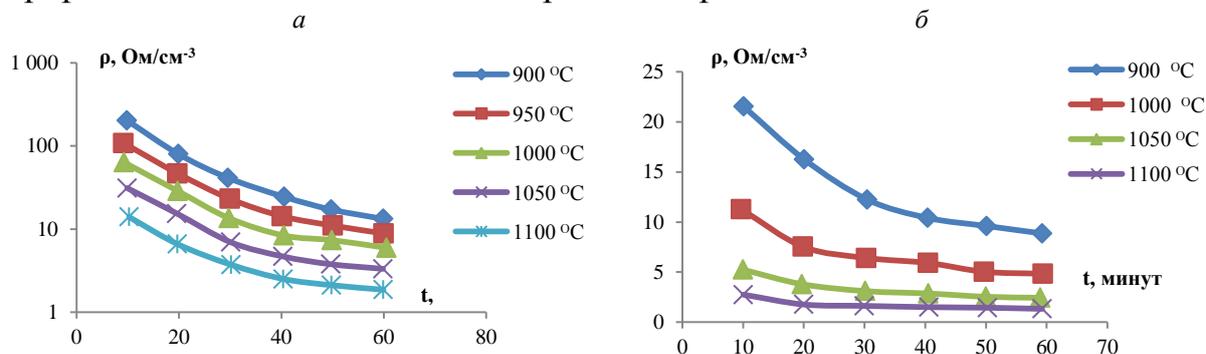
Ишлаб чиқилган технология асосида кремний пластиналарига фосфорни диффузия қилиш орқали, ФЭларни тажриба намуналари лаборатория шароитида яратилган. Бу технология ёрдамида изотип ва $p-n$ ўтишлар шакллантирилган. Кремний намуналарининг сирт қаршилиги қийматларини диффузион қатламлардаги, ўзгариши $\pm 5 \div 10\%$ ни ташкил этган. Диссертация ишида n ва p турдаги заряд ташувчилар концентрацияси $N=10^{15}\text{ см}^{-3}$ дан $2 \times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ гача бўлган, монокристалл кремний пластиналари асосида тайёрланган фотоэлементлардан фойдаланилган.

Ўтказилган тадқиқот натижалари шуни кўрсатдики, ФЭларнинг қисқа туташув токи ва салт юриш кучланишининг қийматлари 1-расмда кўрсатилганидек $p - n$ ўтиш чуқурлиги $0,8 - 1\text{ мкм}$ га тенг бўлганда $I_{к.т.}$ қисқа туташув токи максимал қийматга эришди. $p-n$ ўтиш чуқурлиги 6 мкм гача бўлганда, ФЭларнинг қисқа туташув токининг ўзгариши сезиларли бўлмади. Олинган натижалар қисқа туташув токини $I_{к.т.}$ кескин тушиб кетиш ҳолатларини олдиндан билиш имконини берди. Дастлабки, солиштира қаршилиги катта бўлган намуналарга киришма атомлар киритилганидан сўнг намуналарнинг солиштира қаршилиги кичик бўлди. $0,5\text{ мкм}$ дан кичик чуқурликда бўлган $p-n$ ўтишли ФЭларда $U_{c.ю.}$ ва $I_{к.т.}$ нинг юқори қийматларга эришиши аниқланган бўлиб, бу кичик чуқурликларда сирт структураси билан $p-n$ ўтиш чуқурлигини ўзаро боғлиқ кетиши билан изоҳланган. Намуналарда сирт нуқсонларининг пайдо бўлишига қуйидагилар сабабчи бўлади: кимёвий ишлов беришда; диффузия

жараёнида; қўшимча ҳароратларда қиздиришда; турли хил қалинликдаги оксид қатламлар олишда ва бошқа технологик жараёнларда нуксонларнинг юзага келиши.

ФЭларни тайёрлашда дастлабки КДБ-0,5 ва КЭФ-4,5 материалларидан фойдаланганда $U_{с.ю}$ ва $I_{к.т.}$ юқори қийматларга эришиди. Фотоэлементнинг ВАТ- (вольт ампер таснифи)ни тўлдириш коэффиценти (FF - филь фактор) КЭФ-4,5; КДБ-10; КЭФ-40 маркали яримўтказгич материалларида юқори эканлиги аниқланди. Фотоэлементларни яратишда КЭФ-4,5 ва КДБ-10 маркали солиштирма қаршиликли кичик бўлган дастлабки яримўтказгич материалларидан фойдаланилганда улар асосида тайёрланган ФЭларни кетма-кет улаб катта қаршиликка (R_s) эга бўлиш мумкинлиги кўрсатилди. Натижада $I_{к.т.}$ ни пасайиши кузатилади ва танланган кам миқдордаги концентрацияли киришма атомларни намунага киритганда, жуда кичкина микро Шоттки потенциал тўсиқлари вужудга келди ва бу ўз навбатида $U_{с.ю}$ ни бир неча бор пасайишига сабаб бўлди.

p – n ўтишга эга бўлган ФЭларнинг сирт қаршилигини диффузия ҳарорати ва вақтига боғлиқлиги 2-расмда берилган.



а - p турдаги таглик фосфор атомлари билан диффузия қилинган;
б - n турдаги таглик бор атомлари билан диффузия қилинган.

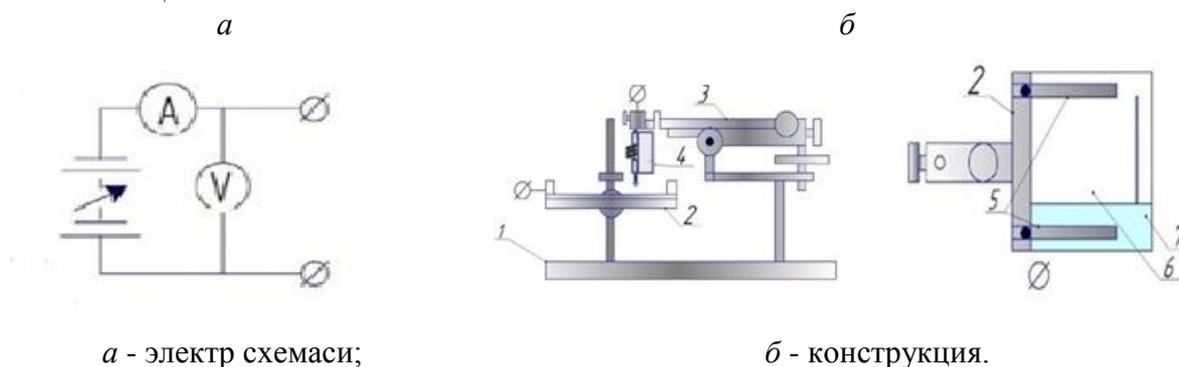
2-расм. ФЭларнинг сирт қаршилигини диффузия вақти ва ҳароратга боғлиқлиги, $T=300\text{ K}$.

Кремний намуналарини лигерлашда маълум бир ҳарорат оралиғида никел кластер сутруктураларининг тартибланиши ва уларнинг электрофизик катталиклари ўрганилганда, Шоттки диод таснифига ўхшаш ВАТ олинган. Кремний намунасининг сиртига ўтказилган никел атомларининг юпқа метал қатламини, ҳароратли ишлов бериш натижасида Шоттки микро потенциал тўсиқни ҳосил қилиши аниқланган. Ni киришма атомлари киритилган Si намуналарини турли ҳароратларда қўшимча ишлов бериб, сўнгра уларнинг вольт - ампер таснифи ўлчанди. Олинган тажриба натижаларининг таҳлили асосида никел киришма атомларининг турли ҳароратлардаги тақсимоти ва ўзаро фарқлари аниқланган.

Кремний намунасининг бутун сиртидаги наноструктурали қатламини ВАТни аниқлашда икки хил контакт олинди. Биринчи вольфрам симдан тайёрланган зонд (W-зонд), иккинчи силлиқланган алюмин (Al-қатлам) сиртдан фойдаланилди.

Бунда ўрганилаётган намунанинг сиртида х-у-з ўқлари бўйича, зонд эркин ҳаракатлана оладиган қилиб яратилди. Зонд вольфрам симнинг бир учи микрон ўлчамида тригонал пирамида шаклида, иккинчи учи пурижинали бўлиб, контактга маҳкамланди.

3-расмда зонд усулида яримўтказгич намуналарнинг ВАТни ўлчаш қурилмасининг электр схемаси ва конструкцияси кўрсатилган. Қурилма қуйидагилардан иборат: 1-таглик; 2-намуна турувчи сирт; 3-зондни ушлаб турувчи мослама; 4- зондни икки томонлама йўналтирувчи мослама; 5- намуна сиртини сиқиб турувчи таянч; 6-таянч сиртга маҳкамланган пластина (полировка қилинган); 7- пластина сиртига қўйиладиган юпқа алюмин қатлам.



3-расм. Зонд усулида вольт ампер таснифини ўлчовчи қурилманинг электр схемаси ва конструкцияси.

ВАТни ўлчашда ФЭ пластинага жойлаштирилган юпқа алюмин қатлам ва вольфрам зонд орасига қистирилади. ФЭнинг ВАТни ўлчашда иккита контакт олинди. Булардан биринчиси алюмин юпқа қатлам бўлиб, қатламни камида $S=10^{-2}$ см² сиртига намуна тегиб туриши талаб этилади. Иккинчи контакт вольфрам симдан тайёрланган бўлиб, зонднинг уч қисмининг сирти $S=6\div 7$ мкм ни ташкил этди.

Қурилма ёрдамида ВАТни ўлчаш никел киришма атомлари кластерларига эга кремний намуналари сиртининг энг камида учта нуқтасида амалга оширилди ва ўртачаси олиниб натижалар сифатида ёзиб борилди ҳамда графиги чизилди. ФЭнинг ёруғлик сезувчи сиртлари зонд ёрдамида аниқланди¹.

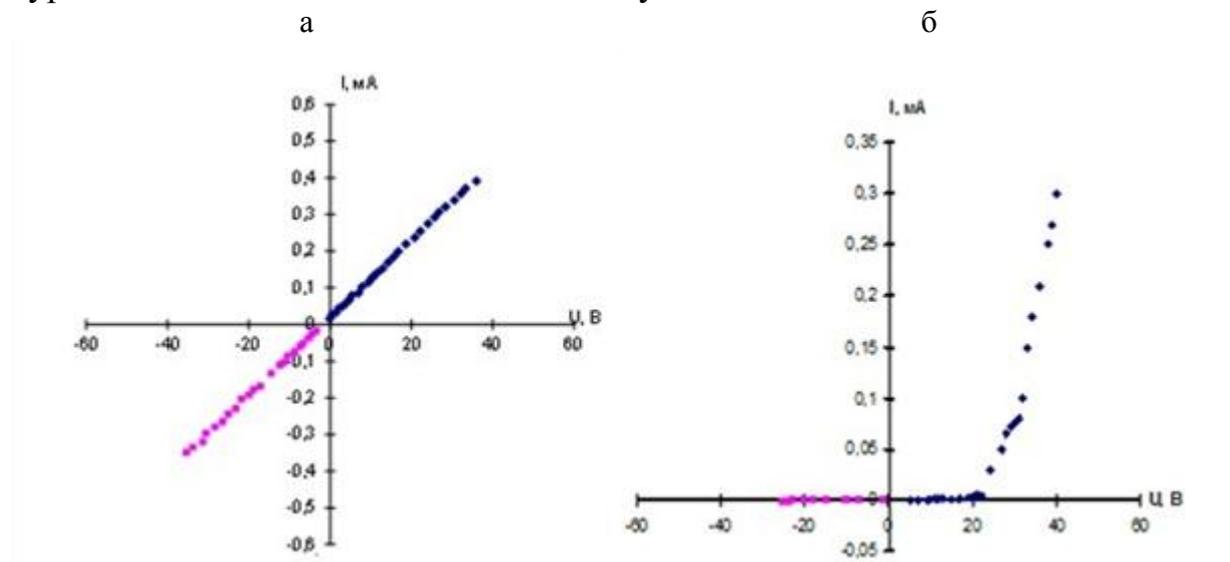
Яримўтказгич намуналари сифатида КЭФ-4,5;КЭФ-40 ва КДБ-0,5; КДБ-10 маркали, кристалл йўналиши (111) бўлган монокристалл кремний пластиналари таглик сифатида танланди. Кремний намунаси икки томонлама қалинлиги 40 ± 20 мкм дан сайқалланди (палирофка қилинди), унинг ғадир будурлиги 10 nm ни ташкил этди.

Намуналарда пайдо бўлган, оксид қатламни олиб ташлаш мақсадида водород фторид (HF) кислотасида чайиб олинди. Намуналарига $8\pm 0,5\times 10^{-5}$ Торр босимдаги вакуум шароитида никел (Ni) атомларининг метал қатламлари учуриб ўтказилди. Металл қатламлар вакуумда спералсимон

¹Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб.пособие. – М.: Высшее образование; Юрайт-Издат, 2009. С. 32.

Ўралган вольфрам сим ёрдамида юқори ҳароратда учирилди. Олинган қатлам қалинлигини назорат қилиш учун намунанинг бир нуқтаси танлаб олинди. Буғланиш усули билан бутун сирт бўйлаб текис қатлам тақсимланган деб, танлаб олинган нуқтада аниқланган қалинлик пластинанинг умумий сиртидаги қатлам қалинлигига тенг деб қабул қилинди. Намуна сиртига Ni атомларини пуркашдан олдин, кўз илғамас ифлосликларни тозалаш мақсадида пластиналар $T=50 \div 300$ °C гача ҳарорат оралиғида қиздирилди.

Намунанинг ВАТни ўлчашда вольфрам W зонд-манфий, силлиқланган алюмин диск мусбат ташқи контактга уланди. Намунанинг вольт ампер таснифини олишда -3 дан +3 гача Вольт кучланиш берилди. Кремний таглиги билан алюмин диск ва вольфрам зондга берилган кучланишлардаги ВАТ 4-расмда келтирилган. Тасвирдан кўриниб турибдики, Ni атомлари кластерларига эга бўлган ФЭлар ВАТнинг кўриниши Шоттки диодининг ВАТ га ўхшашлиги аниқланди.



а - кластерларига эга бўлмаган ФЭнинг ВАТ;

б - никел микро ва нанокластерларига эга бўлган ФЭнинг ВАТ.

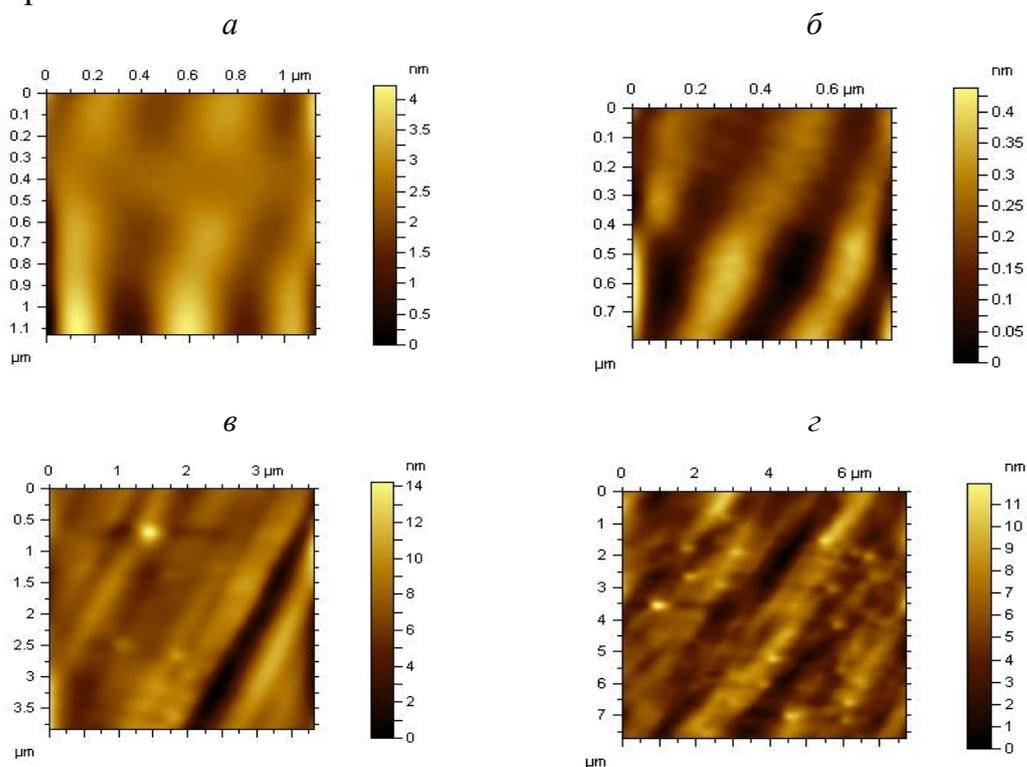
4-расм. ФЭларни зонд усулидаги ВАТ ($T=300$ К).

Кремний намунасидаги Ni киришма атомларининг кластерларини, турли юқори ҳароратларда ($600 \div 1100$) °C қўшимча ҳароратли ишлов бергандан сўнг, сиртда ҳосил бўлган Шоттки микро потенциал тўсиқларининг тўплами деб қабул қилиш мумкин. Турли ҳароратларда намуналарга ҳароратли ишлов бергандан сўнг, намуна сиртида Ni атомлари кластерларининг ўлчамларини катталашини ва ВАТ токни ўсиб бориши кузатилди. ФЭни сирти бўйича ВАТ ўлчанганда, баъзи нуқталарда токни кескин ошиб кетиши ва бошқа нуқталарда токни омик ўзгаришини Ni киришма атомларининг кластерларининг структуралари, яъни микро ва нанокластерлар асосидаги микро Шоттки потенциал тўсиқларини сирт бўйича тақсимланганлиги билан боғлаб тушунтирилди. Кремний

намуналарига 1, 2 ва 3 соат қўшимча ҳароратли ишлов берилганда, уларнинг ВАТда фарқлар кузатилди.

2 соат давомида ҳароратли ишлов берилган намуналарга нисбатан, 3 соат давомида ҳароратли ишлов берилган намуналарнинг ВАТда токни кескин ўсиши кузатилди. Бунда сиртдаги наноструктураларнинг миқдори 0,5 % ни ташкил этди. Намунага қўшимча ҳароратли ишлов беришда ҳарорат қанча юқори бўлса, микро Шоттки потенциал тўсиқдаги токнинг ўсиши шунча тик бўлиши аниқланди. Диффузия жараёнида ҳосил қилинган Ni атомларининг кластерларини қўшимча ҳароратли ишлов берилганидан сўнг кластерларнинг тартибли тузилмаларини шаклланиши кузатилди.

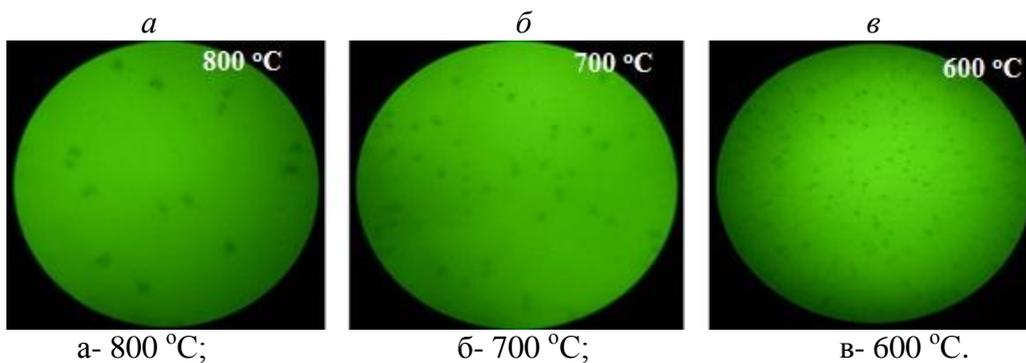
5-расмда атом кучлари (АКМ) микроскопи ёрдамида олинган кремний намунасидаги Ni киришма атомлари ҳосил қилган кластерларнинг тасвири келтирилган.



a - назорат намунасининг сирти;
б - $T=700\text{ }^{\circ}\text{C}$; *в*- $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$;
з - $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ҳароратли ишловдан сўнг.

5-расм. Ni киришма атомлари кластерларига эга бўлган ФЭни сирт топологиясининг АКМда олинган тасвири.

ФЭ пластиналарида никел киришма атомларининг кластерларини ҳажм бўйича тақсимооти МИК–5 маркали инфрақизил микроскоп ёрдамида, ўрганилди ва кластерларни сиртда ҳамда ҳажмда мавжудлиги яъна бир бор ўз тасдиғини топди. *б* – расмда кремний намунасида никел атомларининг кластерларини ҳажм бўйича тақсимооти келтирилган.



6-расм. Диффузиядан кейин турли ҳароратларда ишлов берилган ФЭ ҳажмидаги Ni киришма атомларини тартибсиз жойлашиши (МИК-5)

Тажриба натижалари асосида маълум бир ҳароратлар оралиғида никел кластерларини кремний ҳажмида нафақат ҳосил қилиш, балки тартибланган микро ва нанокластерлар олиш имконияти мавжудлиги очиб берилди. 7-расмда диффузиядан кейин $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ қўшимча ҳароратда ишлов берилганда ФЭларни ҳажмида никел киришма атомларининг тартибли жойлашишини кўрсатувчи тасвирлар келтирилди (МИК-5).

Яримўтазгичли материалларнинг ўзига хос хусусиятларидан бири, бу киришма атомларини киритиш орқали, уларнинг элементар кристалл панжараларининг структурасини ўзгаришига олиб келишидир. Қуйида, тажриба натижаларида ФЭлар X'Pert Powder маркали дифрактометр қурилмаси ёрдамида ҳам ўрганиб чиқилди.

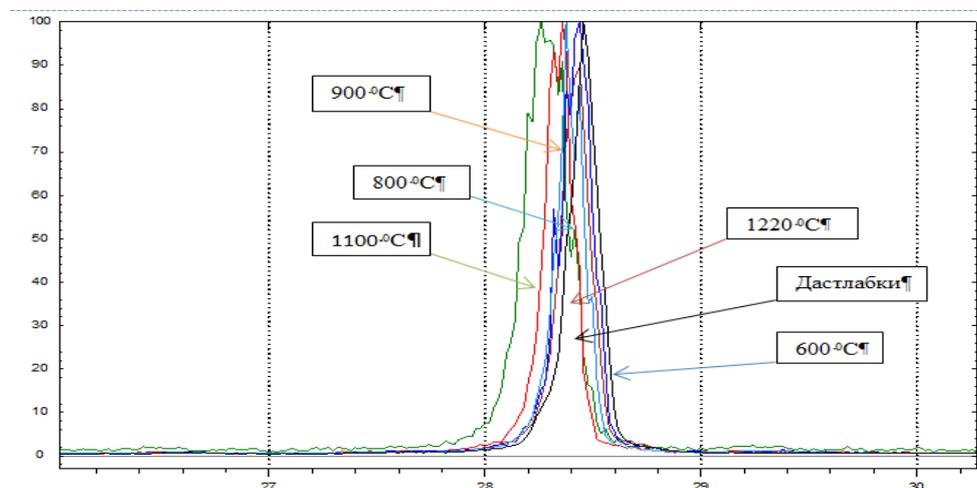


7-расм. Диффузиядан кейин $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ қўшимча ҳароратда ишлов берилганда ФЭ ҳажмидаги никел киришма атомларини тартибли жойлашиши (МИК-5).

Рентген нурлари асосида ишлайдиган X'Pert Powder дифрактометр қурилмасида ФЭларни ўрганиш учун олдин улар кукун ҳолатига келтирилиб сўнгра тадқиқотлар амалга оширилди. Бу қурилма $0\div 360^{\circ}$ бурчак остида намуналарга рентген нурларини Θ - Θ таъсир эттириш мумкин. Намуналар ўрганилган дифрактометр қурилмаси маълум бурчак остида юқори аниқликда ишлайдиган оптик кузатув (DOPS) ҳамда юқори сифатли оптик модуллаш ва калибрлаш тизимига эга бўлиб, ноёб юқори сифатли рентген трубкаси ўрнатилган².

²В.В.Стрельчук и др. Рентгеновская дифрактометрия и сканирующая микро-рамановская спектроскопия неоднородностей структуры и деформаций по глубине многослойной гетероструктуры InGaN/GaN. Физика и техника полупроводников, 2010, том 44, вып. 9

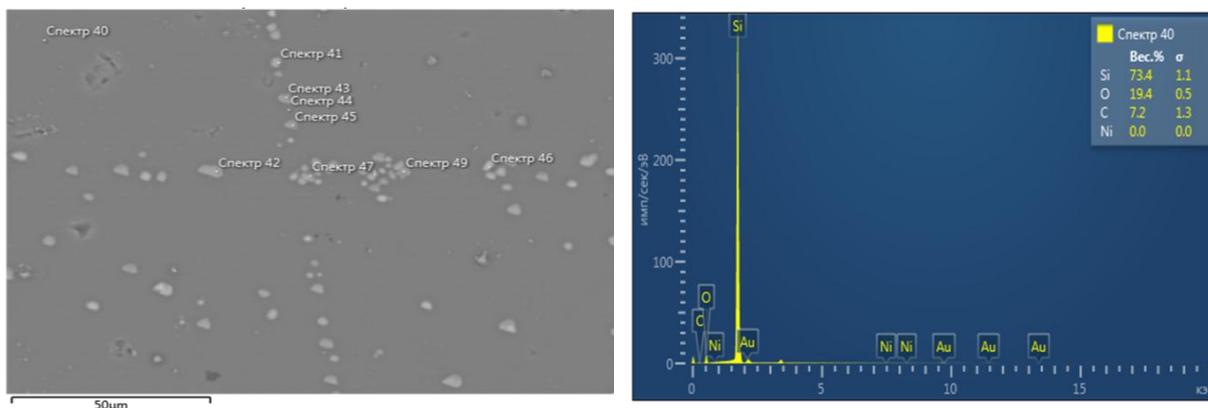
8-расмда таркибида никел атомларининг кластерлари бўлган ФЭларга қўшимча 600, 800, 900, 1100, 1220 °С ҳароратларда ишлов берилган ҳамда таркибига никел киришма атомлари киритилмаган дастлаб олинган ФЭларни ҳам бир хил шароитларда ўтказилган тажриба натижалари келтирилди.



8-расм. 26° – 30° градус бурчаклар остида ФЭларда X'Pert Powder дифрактометрда олинган спектр тасвир.

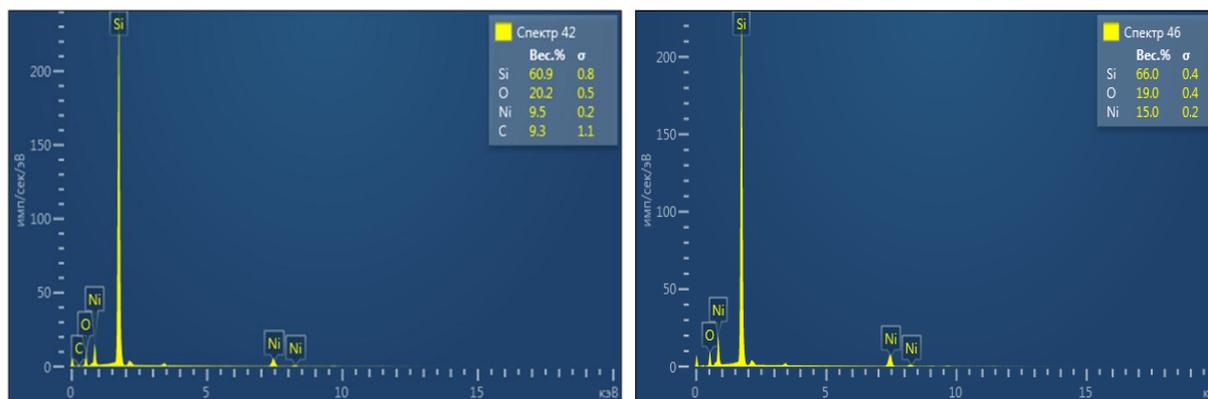
Бир хил бурчакда рентген нурлари юборилганда дастлабки ФЭнинг спектр чўққилари билан никел атомларининг кластерларига эга бўлган кремний ФЭларида олинган, спектр чўққилар ўзаро солиштириб кўрилди. Бунда, 20° дан 80° бурчаккача бўлган спектр чўққиларини ўзаро солиштириш мақсадида улар устма уст жойлаштирилди. 9 – расмда турли ҳароратларда ишлов берилган ФЭларнинг 26° – 30° бурчаклар остидаги спектр чўққиларини солиштиришдаги тасвир келтирилди. Тажриба натижаларининг таҳлили асосида, ФЭлардаги кластер-кремний структурасини металл-яримўтказгич структурасига ўхшаш деб қараш мумкинлиги таклиф этилди. Дифрактометрда олинган спектр чўққиларини солиштиришда назорат учун қўйилган ФЭнинг спектрига нисбатан таркибида никел киришма атомларининг кластерлари бўлган ҳамда 900 °С ва 1100 °С ҳароратларда қиздирилган ФЭларнинг спектрларини маълум бурчакка сурилиши микро ва нанокластерлар ҳисобига микро Шоттки потенциал тўсиқларини ҳосил бўлиши билан тушунтирилди.

Ишқорий емирувчилар ёрдамида сиртда ҳосил қилинган текстураларнинг ҳолатини тадқиқ этишда аниқ ҳарорат ва аниқ вақт давомида мос таркибдаги емирувчилар ёрдамида силлиқланган монокристалл кремний асосидаги ФЭларнинг сиртидаги кластерларни EVO MA10 маркали электрон микроскоп ёрдамида визуал кузатишлар амалга оширилди. 9-расмда Oxford Instruments ZEISS EVOMA10 маркали микроэлементларни таҳлил натижалари қилувчи электрон микроскоп ёрдамида никел киришмаларига эга бўлган ФЭлар таркибининг таҳлилин натижалари келтирилди.



а

Б



в

г

а - сиртда никел кластерларининг тақсимооти; б - кластерлар мавжуд бўлмаган нукта;
в - никел кластерининг таркиби Ni=9,5 % ; г - никел кластерининг таркиби Ni=15 %.

9-расм. Oxford Instruments ZEISS EVOMA10 маркали микроскоп ёрдамида олинган никел кластерларига эга ФЭларни сирт таркиби

Олинган натижалар асосида ФЭларнинг таркибида никел киришма атомлари кластерларининг ҳақиқатдан мавжудлиги ҳамда кремнийда никел кластерларининг таркиби 9÷15% ни, хатолик даражаси $\sigma=0,1\div0,2\%$ гача эканлиги аниқланди.

Диссертациянинг учинчи боби «**Никел атомлари кластерларига эга кремний асосидаги фотоэлементларнинг параметрларини аниқлаш**»га бағишланиб, таркибида никел киришма атомларининг кластерлари эга бўлган кремний асосидаги фотоэлементларнинг асосий параметрларининг ўзгаришларини ўрганиш натижалари келтирилган.

ВАТ қурилмаси ФЭларнинг $I_{к,т}$ токи ва $U_{с,ю}$ кучланишини ўлчашга асосланган бўлиб, бунда токнинг йўналишини ўзгартириш мумкин. Қурилма фотоэлементнинг қоронғуликда ёки ёруғликдаги вольт-ампер таснифларини ўрганишга имкон беради. ВАТ ўлчашни соддалаштириш учун 2 координатали ўзи ёзадиган асбобдан фойдаланилди. Унинг кириш қисмига ФЭнинг кучланиши ҳамда токи уланди. Ўзи ёзадиган асбоб автоматик тарзда ҳар бир нуктани ўлчаш учун 8 секунд талаб этиб, ФЭдан тесқари ва тўғри ўтадиган $J=1A$ гача токнинг қийматини чизиб берди.

Яратилган технология асосида тайёрланган ФЭларнинг салт юриш кучланишнинг қийматлари 1 – жадвалда келтирилган.

1-жадвал.

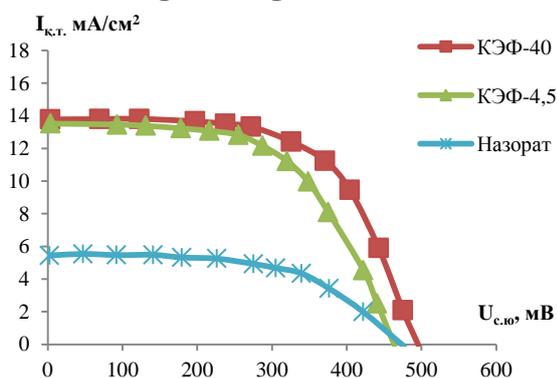
	Материал маркаси,	500-525 мВ	525-550 мВ	550-575 мВ	575-600 мВ	600 мВ ортиқ
	$U_{c.ю}$					
1.	КДБ-0,5	1 %	5 %	7 %	78 %	9 %
2.	КДБ-10	10 %	85 %	5 %	0 %	0 %
3.	КЭФ-40	1 %	2 %	18 %	74 %	5 %
4.	КЭФ-4,5	5 %	59 %	34 %	2 %	0 %

Яратилган технология асосида тайёрланган ФЭларнинг қисқа туташув токининг қийматлари 2 – жадвалда келтирилган.

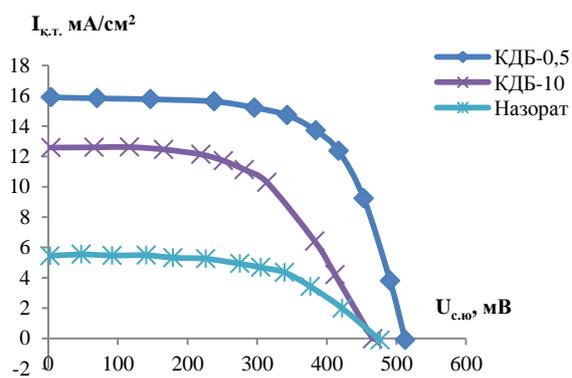
2-жадвал.

	Материал маркаси	5-14 мА	14-16 мА	16-18 мА	18-20 мА
	$J_{к.т.}$				
1.	КДБ-0,5	1 %	7 %	87 %	5 %
2.	КДБ-10	30 %	63 %	7 %	0 %
3.	КЭФ-40	1 %	88 %	9 %	2 %
4.	КЭФ-4,5	41 %	54 %	5 %	0 %

Яратилган технология асосида тайёрланган ФЭларнинг салт юриш кучланиши бўйича маълумотлар 1-жадвалда, қисқа туташув токи зичлиги бўйича маълумотлар 2-жадвалда келтирилган. Бунда ВАТни тўлдириш коэффициенти $FF=50-65\%$ оралиғида бўлди. ФЭларнинг параметрларини ўлчашда лаборатория шароитида яратилган қуёш нурланишининг иммитаторидан фойдаланилди.



10-расм. КЭФ-40 ва КЭФ-4,5 маркали кремний намуналари асосида тайёрланган ФЭларни зонд усулида $AM1,5 (700 \text{ Вт/м}^2)$ ёруғликда олинган ВАТ, $T=300\text{К}$.



11-расм. КДБ-0,5 ва КДБ-10 маркали кремний асосида тайёрланган ФЭларни зонд усулида $AM1,5 (700 \text{ Вт/м}^2)$ ёруғликда олинган ВАТ, $T=300\text{К}$.

Бунда атроф муҳит ҳарорати $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ ни ташкил этди. Ўлчаш вақтида фотоэлементларнинг мувозанат ҳарорати махсус совутиш қурилмаларидан фойдаланиб, $T=15-30\text{ }^\circ\text{C}$ ҳарорат оралиғида ушлаб турилди.

10 ва 11-расмларда яратилган технология асосида тайёрланган ФЭларнинг зонд усулида АМ1,5 (700 Вт/м²) ёруғликда бўлган спектр шароитида ВАТни ўлчаш натижалари келтирилди. Бунда бошланғич кремний пластиналари сифатида саноатда фойдаланиладиган 1) КДБ-0,5; 2) КЭФ-40; 3) КЭФ-4,5; 4) КДБ-10 маркалари ишлатилди.

Зонд усулида олинган ВАТ шуни кўрсатдики, кремний асосидаги ФЭлар 600, 700, 800, 900, 1000 ва 1100 °С ҳароратларда ишлов берилгандан сўнг тажрибалар таҳлили асосида, КДБ-0,5 маркали кремний асосидаги ФЭларга T=900 °С ҳароратда қўшимча ишлов берилганда никел киришма атомлари кластерларини тартибланиши ва электрофизик параметрларининг турғунлиги, бошқа маркали дастлабки кремний асосида тайёрланган ва қўшимча ҳароратларда ишлов берилган ФЭларниқидан юқори эканлиги аниқланди.

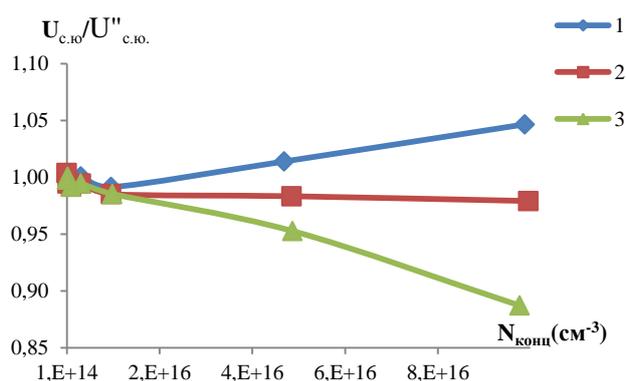
Диссертацияда ФЭларнинг сиртида ёруғликни қайтарувчи оксид қатлам SiO₂ шакллантирилди³. Бунда, ҳарорат ва вақтни бошқариб керакли қалинликдаги оксид қатламлар олинди. Сиртига яқин (0,5 мкм ораликда) p-n ўтишга эга бўлган ФЭларда мустақил равишда сиртни фронтал томонига бор атомлари лигерланган. ФЭлар сиртида қанча кам вақтда кремний оксид SiO₂ қатлами шакллантирилса, салт юриш кучланишининг U_{с.ю} қийматини оширишга эришилган. ФЭларда p-n ўтиш чуқурлиги 1,5 мкм дан катта бўлганда, бу қиймат камайган. ФЭларнинг параметрларининг камайиши, сиртдаги киришма атомларининг концентрациясини камайиши билан ёки p-n ўтишни сиртга нисбатан чуқурлигини ошиб бориши ҳамда қўшимча лигерлаш ҳароратида p-n ўтиш профилини тез ўзгариши билан тушунтирилди. Диффузия жараёнидан кейин бир текис занжирсимон кластерларнинг ҳосил бўлиши, SiO₂ ни шаклланишида ва қўшимча T= 900 – 1100 °С ҳароратли ишлов бериш оралиқларида кузатилди.

Ёруғликни қайтарувчи қопламаларининг самарадорлиги, ФЭларнинг бошланғич электрофизик параметрлари ва p-n ўтишнинг сиртга нисбатан чуқурлигини бошқаришда фойдаланилди. p – турдаги тагликни фосфор атомлари билан лигерлаганда ҳамда n – турдаги тагликни бор атомлари билан лигерлагандан сўнг ёруғлик таъсирида токнинг (фототок) жуда катта ўсиши тажрибада кузатилди. p-n ўтишни сиртга нисбатан чуқурлиги ва фронтал томонни бир хиллиги бошланғич киришма атомларининг қийматига боғлиқ экан. Шуни эътиборга олиш керакки, n- турдаги таглик бор атомлари билан лигерланса ва турли вақт оралиқларида қўшимча ҳароратли ишлов берилса, дастлабки ФЭларга нисбатан, никел киришма атомларига эга ФЭларнинг салт юриш кучланиши ва ФИКни оширишга эришиш мумкин экан. Яратилган технология асосида олинган ФЭларни салт юриш кучланишининг нисбий ўзгаришини никел киришма атомлари концентрациясига боғлиқлиги 12-расмда келтирилди. АМ 1,5 спектр бўйича оптимал параметрларга эга ФЭларни T=25 °С хона ҳароратида

³Е.Ю. Каныков, С.Е. Демьянов. Особенности электропереноса в наноструктурах Si/SiO₂/Ni в сильных магнитных полях. г.Минск, Беларусь.

қуйидагича электрофизик параметлари аниқланди: салт юриш кучланиши 590-595 мВ, қисқа туташув токи 18-19 мА/см², ВАТни тўлдириш коэффициентини FF=0,7-0,73 ва ФИК 18,5 % ни ташкил этди.

Сиртга яқин бўлган p – n ўтиш чуқурлигида ёруғликни оптимал қайтарувчи SiO₂ оксид қатлам қалинлиги аниқланди. Оксид қатлам қалинлиги 0,5 мкм гача бўлганда, p – n ўтиш чуқурлиги 1000 – 1100 Å бўлди. Оксид қатлам қалинлиги 1 ÷ 1,5 мкм гача бўлганда, p – n ўтиш чуқурлиги 1150 ÷ 1200 Å ни ташкил этди. ФЭларнинг бошланғич ҳолатдаги p – n ўтиш чуқурлиги ва SiO₂ қатлам қалинлигига боғлиқ ҳолда фототокнинг қийматларини ~30% гача ошириш мумкинлиги кўрсатиб берилди.



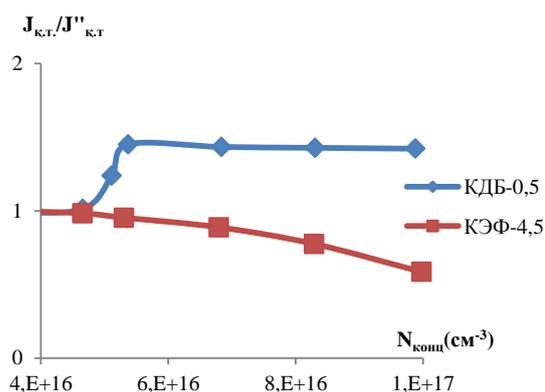
1) КДБ-10 маркали кремнийга фосфор атомлари диффузияси орқали p-n ўтиш ҳосил қилинган;

2) КЭФ-40 маркали кремнийга бор атомлари диффузияси орқали p – n ўтиш ҳосил қилинган;

3) КЭФ-4,5 маркали кремнийда бор атомлари диффузияси орқали p-n ўтиш ҳосил қилинган ФЭлар учун.

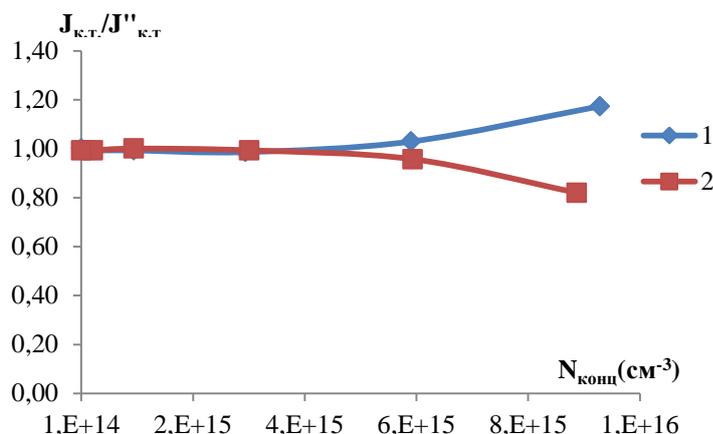
12 – расм. ФЭлар салт юриш кучланишининг нисбий ўзгаришини никел атомлари концентрациясига боғлиқлиги.

Никел киришма атомлари билан қўшимча легирланганда фотоэлементлар токининг қиймати киритилаётган киришма никел атомларининг концентрациясини ортиши билан камаяди. Никел киришма атомларининг $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ концентрациясида ФЭларнинг қисқа туташув токини камайиши 90 – 95 % бўлиб, дастлабки фотоэлементларнинг токидан кичик бўлди. Структураларни никел киришма атомлари билан легирланганда токнинг бошланғич қийматини камайиши 50 – 60% ни ташкил этди. Чегаравий ҳолатларда, кичик энергетик сатҳли донор киришмаларни никел атомлари билан компенсация қилинганда ФЭларнинг қисқа туташув токи нолгача камайди.



13 – расм. Никел киришма атомларининг концентрациясига боғлиқ ҳолда ФЭларни қисқа туташув токини нисбий ўзгариши.

13 ва 14-расмларда никел киришма атомлари билан қўшимча легирланган ФЭларнинг қисқа туташув токини киришма атомларининг концентрациясига боғлиқ нисбий ўзгариши келтирилган.



- 1) КДБ – 10 маркали кремнийга қўшимча фосфор атомлари ҳамда
- 2) КЭФ – 4,5 маркали кремнийга бор атомлари диффузия қилиб олинган ФЭларни қисқа туташув токини киришма атомларининг концентрациясига боғлиқ нисбий ўзгариши.

14 – расм. Никел киришма атомларининг концентрациясига боғлиқ ҳолда ФЭларни қисқа туташув токини нисбий ўзгариши.

Олинган натижалар таҳлили асосида, ФЭларнинг ФИКни ошишига сабабчи бўладиган қўшимча киришма атомлар билан лигерлашдаги концентрация миқдори қандай бўлиш кераклиги аниқланди. ФЭларни никел киришма атомлари билан қўшимча лигерлаганда концентрация миқдори $10^{15} \div 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ оралиғида бўлганда ФЭларни самарадорлиги ошди. Дастлабки кремний пластиналарини таглик сифатида фойдаланганда кичик энергетик сатҳ ҳосил қиладиган киришма атомларининг концентрацияси 10^{17} см^{-3} дан кам бўлса, ФЭларнинг самарадорлигини ошириш мумкин эмаслиги аниқланди.

Юқорида баён этилган технология асосида Ni киришма атомларининг диффузияси амалга оширилди.

3 – жадвалда, дастлабки кремнийга $T=1220 \text{ }^\circ\text{C}$ ҳароратда Ni киришма атомларининг диффузиясидан сўнг асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини ўзгариш натижалари берилган.

3-жадвал.

Si маркаси	КДБ-0,5	КДБ-10	КЭФ-40	КЭФ-4,5
Бошланғич τ (мкс)	5-9	5-12	10-13	12-17
Киришма	Ni	Ni	Ni	Ni
Ҳароратли ишлов беришдан сўнг τ (мкс)	6-10	8-12	12-14	16-18

4 – жадвалда $T=1220 \text{ }^\circ\text{C}$ ҳароратда никел киришма атомлари диффузия қилинган ва сўнгра $T=900 \text{ }^\circ\text{C}$ ҳароратда қўшимча ҳароратли ишлов берилган кремнийда асосий бўлмаган заряд ташувчиларининг яшаш вақтини ўзгариш натижалари келтирилган.

Si маркаси	КДБ-0,5	КДБ-10	КЭФ-40	КЭФ-4,5
Бошланғич τ (мкс)	5-9	5-12	10-13	12-17
Никел киришма атомларини диффузиясидан сўнг τ (мкс)	6-10	8-12	12-14	16-18
Киришма	Ni	Ni	Ni	Ni
Ҳароратли ишлов беришдан сўнг τ (мкс)	24-26	28-32	10-12	10-12

Олинган натижаларнинг таҳлилидан келиб чиқадики, p ва – n турдаги кремнийга никел киришма атомларини киритиш ҳисобига асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини ошириш мумкин экан. Бу ўз навбатида фотоэлементларнинг самарадорлигини ошишига олиб келади.

Диссертациянинг «**Никел атомлари кластерларига эга фотоэлемент параметрларининг деградацияси**» деб номланган тўртинчи бобида, никел атомлари кластерларига эга кремний асосидаги фотоэлементларнинг параметрларини фотонлар оқимида барқарорлиги ва гамма квантлари радиациясига чидамлилик имкониятлари ўрганилган.

Ишлаб чиқилган, фотоэлементларнинг параметрларини деградациясини тадқиқ этиш, 300 соат давомида бир каррали қуёш нурланишининг оқим зинчилигида, шунингдек 150 соат давомида 50 каррали қуёш концентраторида зичлаштирилган қуёш нурланишида олиб борилди.

Концентратор ёрдамида зинчлаштирилган қуёш нурланишининг юзаси ФЭлар сиртининг чегарасидан чиқмаслиги зарур. Бунда қуёшга нисбатан модулнинг аниқ ориентациясини таъминлаш зарурияти туғилмайди. Шунингдек, бир каррали ва зинчлаштирилган қуёш нурланишида ФЭларнинг фотодеградациясини тадқиқ этишда самарали иссиқлик узатиш, яъни ҳароратини 30-35 °С гача оралиқларда сақлаб туриш керак бўлди. Бу масала ФЭларни мажбурий совутиш йўли билан ўз ечимини топди. ФЭлардаги ортиқча иссиқликни узатиш учун мажбурий сувли совутиш тизимига эга ускунага ФЭ пластиналари маҳкамланди. Совутиш қурилмасида сув оқимини бошқариш асосида зарур иссиқлик узатиш тезлиги таъминланди.

ФЭлар параметрларининг деградациясини ўрганиш бўйича олиб борилган тадқиқотлар махсус ишлаб чиқилган қурилмадан фойдаланиб амалга оширилди. Ишлаб чиқилган қурилманинг конструкцияси қуйидагиларидан иборат: ёруғлик нурланишини параболик концентратори, ФЭларни концентратор фокусига аниқ ўрнатиш қурилмаси, ФЭларни совутиш қурилмаси, Қуёш ҳаракатига концентраторни мослаш тизими.

Никел киришма атомлари билан қўшимча лигерланган ФЭларни электрофизик параметрига ҳароратнинг таъсири, никел киришма атомлари билан лигерланмаган ФЭларники билан, ўзаро таққосланди. ФЭларнинг параметрларини ҳарорат таъсиридаги барқарорлигини, аниқлашда

конструкцияси ва электрофизик параметрлари бир хил бўлган ФЭлардан фойдаланилди.

Никел киришма атомлари кластерларига эга ФЭларнинг параметрлари $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ва $T=650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ҳароратда, 30 соат давомида ҳароратга барқарорлиги ўрганилди. Олиб борилган тадқиқотлар шуни кўрсатдики, ФЭларнинг бошланғич параметрларига нисбатан ҳеч қандай ўзгаришлар кузатилмади. Аммо, дастлабки назорат ФЭлар $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ҳароратда қиздирилгандан сўнг қисқа туташув токининг 3–6 % га камайиши кузатилди.

Никел киришма атомлари билан лигерланган ФЭлар $T=600 - 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ҳарорат оралиғида қиздирилганда, уларнинг электрофизик параметрлари яъни, $I_{к.т.}$ ва $U_{с.ю.}$ қийматлари ўзгармаслиги кузатилди. Яратилган технология асосида олинган фотоэлементларнинг электрофизик параметрлари $U_{с.ю.}$ ва $I_{к.т.}$ ни баъзи ҳолларда ошиши кузатилди. Тадқиқот натижалари шуни кўрсатдики, кичик энергетик сатҳ ҳосил қиладиган киришма атомлари билан лигерланган ФЭларга нисбатан қарама қарши тур ўтказувчанликга эга бўлган ва никел киришма атомлари билан лигерланган ФЭларнинг параметрларини ҳароратга барқарорлиги кучли эканлиги аниқланди.

Яратилган технология асосида олинган ФЭларнинг электрофизик параметрлари дастлабки ФЭларнинг параметрлари билан ўзаро таққослаганда ҳароратга етарли даражада кучли боғлиқ эканлиги аниқланди.

5 – жадвалда КЭФ – 4,5 маркали кремнийга яратилган технология асосида никел киришма атомлари киритилган ФЭларнинг электрофизик параметрлари келтирилди. Ҳароратли ишлов бериш вақти $t=1$ соат.

5-жадвал.

(КЭФ-4,5) Қўшимча ишлов бериш ҳарорати, $^{\circ}\text{C}$	Кластерларнинг ўртача ўлчамлари, мкм	$U_{с.ю.}$ (мВ)	$I_{к.т.}$ (мА/см ²)
1200	1-2	514	13,5
1100	1,5-2	534	14,1
1000	2,5-3	552	14,8
900	1,5-2	568	15,6
Назорат намунаси	-	588	17,3

6 – жадвалда КЭФ – 40 маркали кремнийга яратилган технология асосида никел киришма атомлари киритилган ФЭларнинг электрофизик параметрлари келтирилди. Ҳароратли ишлов бериш вақти $t=1$ соат.

6-жадвал.

(КЭФ-40) Қўшимча ишлов бериш ҳарорати, $^{\circ}\text{C}$	Кластерларнинг ўртача ўлчамлари, мкм	$U_{с.ю.}$ (мВ)	$I_{к.т.}$ (мА/см ²)
1200	1 – 2	374	10,7
1100	2 – 5	402	11,6

1000	2 – 7	439	12,8
900	2 – 8	491	14,2
Назорат намунаси		527	16,8

7– жадвалда КДБ – 10 маркали кремнийга яратилган технология асосида никел киришма атомлари киритилган ФЭларнинг электрофизик параметрлари келтирилди. Ҳароратли ишлов бериш вақти $t=1$ соат.

7-жадвал.

(КДБ-10) Кўшимча ишлов бериш ҳарорати, °С	Кластерларнинг ўртача ўлчамлари, мкм	$U_{с.ю.}$ (мВ)	$I_{к.т}$ (мА/см ²)
1200	1 – 2	497	15,8
1100	2 – 5	514	16,6
1000	2 – 5	546	17,5
900	2 – 20	572	18,5
Назорат намунаси	–	595	20,5

8 – жадвалда КДБ – 0,5 маркали кремнийга яратилган, технология асосида никел киришма атомлари киритилган ФЭларнинг кенг электрофизик параметрлари келтирилди. Ҳароратли ишлов бериш вақти $t=1$ соат.

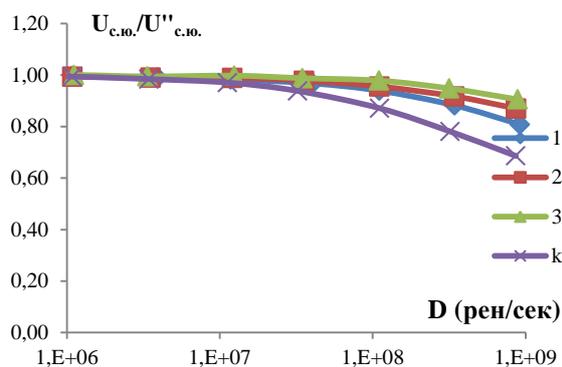
8-жадвал.

(КДБ-0,5) Кўшимча ишлов бериш ҳарорати, °С	Кластерларнинг ўртача ўлчамлари, мкм	$U_{с.ю.}$ (мВ)	$I_{к.т}$ (мА/см ²)
1100	0,5 – 1	480	20,9
1000	1 – 1,5	482	21,4
900	1,5 – 2	498	45,7
800	2,5 – 3	506	28,1
Назорат намуна	–	507	20,5

Бугунги кунда космонавтикада, ҳарбий соҳаларда фан-технологиянинг юксак натижалари асосида яратилган ФЭлардан фойдаланилмоқда. Ракета ва суний йўлдошларда электр энергия таъминоти учун таннархи қиммат ташқи таъсирларга (ҳарорат, радиация) чидамли кўп каскадли фотоэлементлар асосида амалга оширилмоқда. Диссертация ишини бажаришда яратилган технология асосида олинган ФЭларни юқорида кўрсатилган соҳаларда фойдаланиш, таннархи каскадли ФЭларга нисбатан арзонлиги ҳамда ҳарорат ва радиацион нурланиш таъсирига электрофизик параметрлари барқарорлиги билан ажралиб турди. Шунинг учун никел киришма атомларига эга ФЭларнинг, параметрларини ҳарорат радиацияси ва гамма квантлар таъсирига барқарорлигини аниқлаш долзарб вазифалардан ҳисобланади.

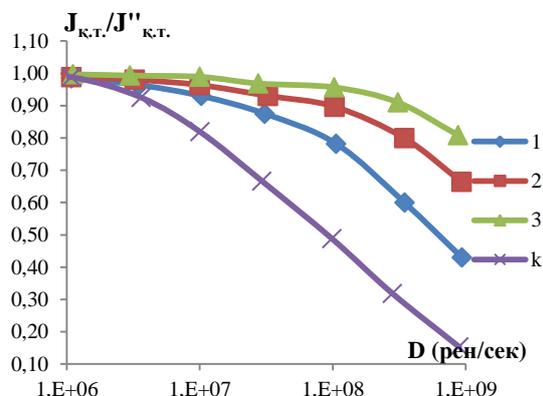
Никел киришма атомлари кластерларига эга ФЭларнинг параметрларига 10^6 дан 10^9 гача бўлган миқдорда гамма нурланиш таъсирида параметрларининг барқарорлиги ўрганилди. 14 ва 15-расмларда

ФЭларнинг қисқа туташув токи ва салт юриш кучланишининг гамма нурланиш миқдорига боғлиқлиги яъни, олинган фотоэлементлар параметрларининг гамма нурлари таъсиридаги деградациясини ўрганиш натижалари келтирилди.



1,2,3 мос равишда 10^{15} см^{-3} , 10^{16} см^{-3} , $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ Ni атомларининг дастлабки концентрациясини миқдори, k–киришма атомларисиз назорат ФЭ, T=300 К.

14–расм. Ni киришма атомлари билан лигерланган ФЭларни қўшимча ҳароратли ишлов берилгандан сўнг салт юриш кучланишини гамма квантлари таъсирида ўзгариши.



1,2,3 мос равишда никел атомларининг концентрацияси 10^{15} см^{-3} , 10^{16} см^{-3} , $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ бўлганда ҳамда k–киришма атомларисиз назорат ФЭ, T=300 К.

15– расм. Ni киришма атомлари билан қўшимча ҳароратли ишлов берилган ФЭларнинг қисқа туташув токини гамма квантлари таъсирида ўзгариши.

Никел киришма атомларини оптимал концентрация қийматига мос қўшимча лигерланган фотоэлементлар учун гамма нурланишни 10^9 қийматигача таъсирдан сўнг салт юриш кучланишининг камайиши нурлантирилмаган ФЭларнинг, қийматларини камайишига нисбатан 8 – 10% кам бўлди. Бу ФЭларда қисқа туташув токи 15 – 18 % га камайди. Худди шундай шароитларда нурланиш таъсир этган назорат ФЭларнинг параметрларини деградацияси салт юриш кучланиши бўйича 25 – 30 % гача, қисқа туташув токи бўйича 70 – 80 % гача камайгани аниқланди. Гамма – квантларининг 10^8 миқдори билан никел атомлари киритилган, ФЭлар нурлантирилганда салт юриш кучланиши ва қисқа туташув токини ўзгариши мос равишда 5% ва 10% дан ошмади.

Гамма нурларини 10^7 P миқдорида нурлантирилган ФЭларнинг салт юриш кучланиши ва қисқа туташув токини ўзгариш қиймати 1 – 2 % дан ортиқ бўлмади.

Тажриба маълумотларини таҳлили асосида, γ – нурланишни ФЭларнинг параметрларига таъсири бўйича қуйидагича хулоса қилиш мумкин. Монокристалл кремнийни никел киришма атомларининг оптимал концентрацияси билан қўшимча лигерланган ФЭлар радиацион гамма нурларини 10^9 P миқдоригача таъсир қилганда параметрларининг ўзгаришини монокристалл кремний асосида тайёрланган дастлабки

ФЭларнинг параметрлари билан таққослаганда радиацион барқарорлик 5 – 8 % гача юқори эканлиги аниқланди.

Диссертация ишини бажаришда кўрсатилган ҳар тарафлама ёрдам учун илмий маслаҳатчи ф.-м.ф.д. академик М.К.Баҳодирхоновга ва илмий раҳбарим, ф.-м.ф.д. профессор Н.Ф.Зикриллаевга, ТДТУнинг «Рақамли электроника ва микроэлектроника» ҳамда «Альтернатив энергия манбалари» кафедрасининг барча жамоасига ўз миннатдорчилигимни билдираман ва раҳмат айтаман.

ХУЛОСА

1. Кремний асосидаги ФЭларга $T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ва $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ да, $t=3$ соат давомида қўшимча никел атомлари диффузия қилинганда, уларнинг сирти ва ҳажмида турли ўлчамлардаги микро ва нанокластерлар ҳосил бўлиши аниқланди.

2. ФЭлар қўшимча никел атомлари билан диффузия қилингандан сўнг, уларни $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ва $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ҳароратларда қўшимча ҳароратли ишлов берилганда никел киришма атомларининг занжирсимон тартибланиши кузатилди.

3. Никел киришма атомлари билан лигерланган ФЭларнинг сирти Oxford Instruments ZEISS EVOMA10 маркали микроэлементларни таҳлил қилувчи растерли электрон микроскоп (РЭМ), Solver-Pro маркали атом кучлари микроскопи (АКМ), X'Pert Powder маркали дифрактометр ҳамда МИК-5 маркали инфрақизил микроскоп ёрдамида ўрганилди, никел киришма атомлари асосида микро ва нанокластерларини ташкил топиш технологияси ишлаб чиқилди.

4. Кремний пластиналарида $p - n$ ўтиш шакллантирилгандан сўнг қўшимча равишда юқори ҳароратли ишлов бериш жараёни олиб борилди ва дастлабки ФЭларнинг параметрларини деградацияси ҳарорат таъсирида кучли бўлиши аниқланди. Қўшимча никел киришма атомларини лигерлаш вақти катта ва ҳарорати юқори бўлса, дастлабки $U_{с.ю}$ ва $I_{к.т}$ қийматларини камайиши кўпроқ бўлиши кузатилди. Бунда $p - n$ ўтиш чегара чуқурлиги 1 мкм атрофида бўлганда деградация жараёни ўта кучли бўлиши аниқланди.

5. Ўтказилган тадқиқот натижалари асосида никел киришма атомлари киритилган ФЭларга концентрацияланган каррали куёш нурлари таъсир этганда параметрларининг деградацияси деярли кузатилмади ва ҳароратга барқарорлиги аниқланди.

6. Оптимал концентрацияга эга никел атомлари билан қўшимча лигерланган ФЭларнинг параметрларининг радиацияга чидамлилиги ўрганилганда гамма нурларининг миқдори 10^9 гача бўлганидаги натижалар дастлабки никел киришма атомларисиз ФЭларнинг параметрлари билан таққослаганда радиацион барқарорлиги 5 – 8 % га юқори эканлиги аниқланди.

7. Никел киришма атомларини КДБ-0,5; КДБ-10; КЭФ-4,5; КЭФ-40 маркали кремний материалларига диффузияси юкори $T=1220$ °C хароратда амалга оширилган бўлиб, никел кластерларига эга материалларни қўшимча 1100, 1000, 900, 800, 700 ва 600 °C хароратларда ишлов берилишда олинган натижалар «FOTON» акциядорлик жамиятида киришмалар билан лигерланган кремнийга қайта ишлов беришда фойдаланилди («Ўзэлтехсаноат» акциянерлик компаниясининг 2018 йил 9 июлдаги №02-1517 сон маълумотномаси).

8. Илмий натижаларни технологик жараёнларда қўлланилиши кремнийда нафақат никел кластерларининг ҳосил бўлишини, балки тартибланиш ҳолатлари мавжудлигини кўрсатди.

9. Кремний материалларининг ҳажми бўйича тенг тақсимланган ва электрофизик параметрлари бошқариладиган никел киришма атомларининг тартибланишига имкон берадиган икки босқичли диффузия жараёнининг технологияси мукаммаллаштирилган бўлиб, «FOTON» акциядорлик жамиятида киришма атомлари нанокластерларини тартибли шакллантиришда қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акциянерлик компаниясининг 2018 йил 9 июлдаги №02-1517 сон синовдан ўтганлиги бўйича маълумотнома мавжуд).

10. Илмий натижалар асосида никел киришма атомлари билан лигерланган ФЭларнинг параметрларини хароратга ва гамма нурланишига барқарорлигини ошириш имкони мавжудлиги кўрсатиб берилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.28.02.2018.FM/Т.03.05 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ,
НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

САИТОВ ЭЛЁР БАХРИДДИНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ПОЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ
КРЕМНИЯ С ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ НИКЕЛЯ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

ТАШКЕНТ–2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.2.PhD/FM85.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

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

Научный руководитель: **Зикриллаев Нурулло Фатхуллаевич**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Абдукодиров Мухиддин Абдурашидович**
доктор технических наук, профессор

Тагаев Марат Баймуратович
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: **Ферганский политехнический институт**

Защита диссертации состоится «___» _____ 2018 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.28.02.2018.FM./T.03.05 при Ташкентском государственном техническом университете, Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, дом 2. Здание факультета «Электроника и автоматика» ТашГТУ, аудитория № 232. Тел. (+99871) 246-46-00, факс (+99871) 227-10-32, e-mail: tstu_info@edu.uz).

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

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 года.

(реестр протокола рассылки № ____ от «___» _____ 2018 г.).

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

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

А.Рахматов,
зам. председателя научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.т.н., старший научный сотрудник

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день источники альтернативной энергии привлекают большое внимание во всём мире. Высокая заинтересованность в этой области с одной стороны связана с получением экологически чистой и дешевой энергии, а с другой стороны – с ограниченными исходными запасами источников традиционной углеводородной энергии на Земле. В этом плане использование источников альтернативной энергии, изготовление фотоэлементов для преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию и проведение научных исследований для повышения их эффективности считаются одной из актуальных задач.

На сегодняшний день в мире придается большое значение развитию использования альтернативной энергии и совершенствованию технологии получения фотоэлементов. Важными задачами целевых научных изысканий считаются следующие: получение новых видов полупроводниковых материалов путём легирования примесными атомами; формирование микро- и нанокластеров под воздействием примесных атомов, образующих глубокие энергетические уровни; на основе полученных материалов совершенствование технологии получения фотоэлементов, имеющих высокую эффективность; определение стабильности параметров фотоэлементов при воздействии температуры и радиации.

Особое внимание уделяется задачам, обозначенным и имеющим историческое значение в области создания и использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в Республике Узбекистан, принятых в Стратегии действий на 2017–2021 годы для еще большего развития республики, создания эффективных механизмов для широкого внедрения научных и инновационных достижений в практическое применение. В год поддержки активного предпринимательства, инновационных идей и технологий особого внимания заслуживает вывод научных результатов на уровень, отвечающий требованиям настоящего времени. Создание кластеров примесных атомов в объеме кремниевых материалов, улучшение их электрофизических параметров считаются одной из важнейших задач. В этом отношении большое значение имеет открытие новых свойств кремниевых материалов и создание на их основе совершенно новых эффективных фотоэлементов.

Настоящее диссертационное исследование в определённой степени служит решению задач, обозначенных в Указах Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № УП 49-47 «О Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017–2021 годах», от 13 февраля 2017 года ПП-2772 «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и производству электротехнической продукции на 2017-2021 годы», а также

от 17 февраля 2017 года №ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» и в других нормативно-правовых документах, относящихся к настоящей деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологии Республики Узбекистан – III. «Энергетика, сбережение энергетических ресурсов, транспорт, машины и приборостроение».

Степень изученности проблемы. Известные ученые В. П. Афанасьев, Ж. И. Алфёров, М. В. Андреев (Россия) проводили научные изыскания по получению тонких пленок посредством введения в полупроводник различных примесей и определению их фотоэлектрических параметров. Такую технологию и свойства фоточувствительных материалов, полученных на их основе, с теоретической и практической точек зрения всесторонне исследовали известные ученые Н. L. Durand, R. E. Balzhiser, K. G. Ross (США). Ими была создана технология изготовления фотоэлементов, не только объяснены механизм фотопроводимости и его кинетика, но и научно обоснованы новые конструкции фотоэлементов, эффект фоточувствительности, снижение фотопроводимости под действием температуры и инфракрасных лучей и тому подобных явлений и механизм их совершения.

В настоящее время ведущими учеными Узбекистана академиками М. К. Бахадырхановым, С. Зайнобидиновым, Р. А. Муминовым, а также их учениками научно обосновано расширение зоны спектрального поглощения фотоэлементов посредством введения атомов примесей в кремний. Вместе с этим в лаборатории профессора М. Н. Турсунова проведены научные исследования по адаптации конструкций модулей фотоэлементов для климатических условий Узбекистана.

Опыты и научные исследования по анализу физических явлений, связанных с упорядочением кластеров при получении в объеме кремния, имеющих наноразмерную структуру, показывают еще более широкие возможности в данной области. Несмотря на это до настоящего времени не изучено воздействие радиации и других различных деградиционных свойств параметров на фотоэлектрическую выносливость кремния с микро- и нанокластерами, образованными в кристаллической структуре.

Связанность темы диссертации с научными исследованиями высшего учебного заведения, в котором выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в рамках фундаментальных проектов, Узбекско-Туркменского международного научно-исследовательского проекта № МТ-83/2013 «Производство и подготовка фотоэлементов нового типа с широкой спектральной чувствительной зоной (0,1÷3 мкм) на основе кремния с нановаризоновой структурой» (2014–2015 гг.), №Ф2-44 «Отработка управления параметрами и

механизмом самоорганизации примесных атомов в полупроводниках» (2012–2016 гг.).

Цель исследования состоит в производстве высокоэффективных фотоэлементов на базе технологии получения материалов, имеющих упорядоченные микро- и наноструктуры на основе кремния с примесными атомами никеля.

Задачи исследования:

провести температурные обработки после диффузии фотоэлементов на кремниевой основе с дополнительно легированными примесными атомами никеля, определить формы, распределение состава, расположение в кремниевом материале примесных атомов с применением современных технологий;

исследовать формирование микро- и нанокластеров примесных атомов в кремниевых пластинках при проведении дополнительной высокотемпературной обработки, определить деградации электрофизических параметров фотоэлементов под действием температуры;

повысить стабильность электрофизических параметров фотоэлементов с кластерами атомов никеля при воздействии радиационного γ -излучения.

Объект исследования. В качестве исходного материала были выбраны пластинки монокристаллов кремния марок КЭФ-4,5; КЭФ-40; КДБ-0,5; КДБ-10, используемых в электронной промышленности. В качестве примеси был выбран никелевый элемент: атомы Ni со степенью чистоты 99,99999 для процесса диффузии в электронную структуру $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8 4s^2$.

Предмет исследования. Формирование в решетке кремния равномерно распределенных цепочек нанокластеров атомов никеля, обладающих свойствами фоточувствительности.

Методы исследования. Использованы методы дополнительного нагрева пластинок при температуре 600, 700, 800, 900, 1000 и 1100 °С после диффузии примесных атомов никеля в кремний. Формирование p–n-перехода при высокотемпературной диффузии. При определении положения примесных атомов никеля в кремнии были использованы растровый электронный микроскоп марки (РЭМ) Oxford Instruments ZEISS EVOMA-10, атомно-силовой микроскоп (АСМ) «Solver-Pro», инфракрасный микроскоп марки МИК-5, а также дифрактометр X'Pert Powder рентгеновских лучей.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

усовершенствован технологический процесс двухэтапной диффузии, обеспечивающий упорядочение примесных атомов никеля и их равномерное распределение по объему кремниевой пластинки, а также управление электрофизическими параметрами исходного материала;

создана технология, обеспечивающая равное распределение по объему на одинаковом расстоянии нанокластеров атомов никеля для

обеспечения образования микробарьеров Шоттки и перехода зарядов от металла в полупроводник, которые приводят к появлению фотопроводимости в фотоэлементах;

изготовлены фотоэлементы и определены их электрофизические параметры после дополнительной температурной обработки с различной концентрацией кластеров;

повышена эффективность фотоэлементов, созданных на кремниевой основе с кластерами примесей атомов никеля;

повышена стабильность стойкости фотоэлементов, созданных на кремниевой основе с кластерами примесей атомов никеля к различным деградиационным факторам, в частности к радиационному излучению.

Практические результаты исследования состоят в следующем:

разработана технология образования микро- и нанокластеров, связанных с упорядочением примесных атомов никеля в кристаллической решетке монокристалла кремния;

разработан способ повышения спектральной чувствительности кремния с образованием микро- и нанокристаллов примесных атомов никеля, что в свою очередь позволяет изготовить высокоэффективные фотоэлементы на кремниевой основе;

показана возможность увеличения эффективности фотоэлементов на основе кластеров примесных атомов никеля по сравнению с ФЭ без примесных атомов никеля.

Достоверность результатов исследования. При измерении и обработке результатов был использован комплекс установок и современные способы, не связанные друг с другом, обеспечивающие соответствие полученных результатов современным направлениям физики и техники полупроводников.

Научное и практическое значение результатов исследования.

Научное значение результатов исследования состоит в переходе кластеров примесей атомов никеля в упорядоченное состояние на основании дополнительной температурной обработки.

Практическое значение исследования состоит в повышении спектральной чувствительности и возможности улучшения стабильности параметров к деградации в фотоэлементах с кластерами примесных атомов никеля.

Внедрение результатов исследования: на основе результатов разработки высокоэффективных фотоэлементов по получению технологии материалов примесных атомов никеля с упорядоченными микро- и наноструктурами в кремнии примесные атомы никеля посредством диффузии при температуре $T=1220$ °С были введены в кремниевые материалы КДБ-0,5; КДБ-10; КЭФ-4,5; КЭФ-40, при этом научные результаты, полученные в процессе дальнейшей обработки материалов с кластерами никеля в условиях температур 1100, 1000, 900, 800, 700 и 600 °С были использованы при отжиге легированного примесями никеля в кремнии в акционерном обществе «ФОТОН» (справка за №02-1517

от 9 июля 2018 года дана акционерной компанией «Узэлтехсаноат»). Применение научных результатов позволит образовывать кластеры никеля, а также упорядочить их состояния.

Двухэтапная диффузионная технология получения кремния, легированного примесными атомами никеля в кремнии, позволяет распределять их равномерно по объёму, упорядочить управляемые электрофизические параметры, использованные для формирования кластеров примесных атомов никеля, была испытана в акционерном обществе «ФОТОН» (справка за №02-1517 от 9 июля 2018 года дана акционерной компанией «Узэлтехсаноат»). Использование результатов исследования даёт возможность повысить стабильность к температуре, радиации и гамма-излучению фотоэлементов, легированных примесными атомами никеля.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 16 научно-практических конференциях, в том числе на 9 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 28 научных работ, из них 12 входят в перечень научных изданий, предложенных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для защиты докторских диссертаций, в том числе из них 3 опубликованы в зарубежных журналах и 9 в республиканских научных изданиях.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы. Объём диссертации составляет 125 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и необходимость проведенных исследований, цели и задачи исследования, описаны объект и предмет исследования, показано соответствие темы приоритетным направлениям развития науки и технологии республики, изложены научная новизна и научные результаты, раскрыто научное и практическое значение полученных результатов, приведены сведения по внедрению результатов исследования на практике, список опубликованных работ и содержание диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ литературы»** на основании приведенных в ней источников выполнен анализ проблем воздействия примесных атомов на фотоэлектрические свойства полупроводниковых материалов и структур на их основе.

Сформулированы задачи исследования на основании анализа существующих научных сведений и проведенных опытов.

В задачах выполнения работы и проводимых исследований намечено осуществление следующих научных изысканий: определение основных проблем и современного состояния производства фотоэлементов; исследование электрофизических параметров фотоэлементов, созданных на основе наноструктурных полупроводников; изучение факторов, препятствующих повышению эффективности современных солнечных элементов.

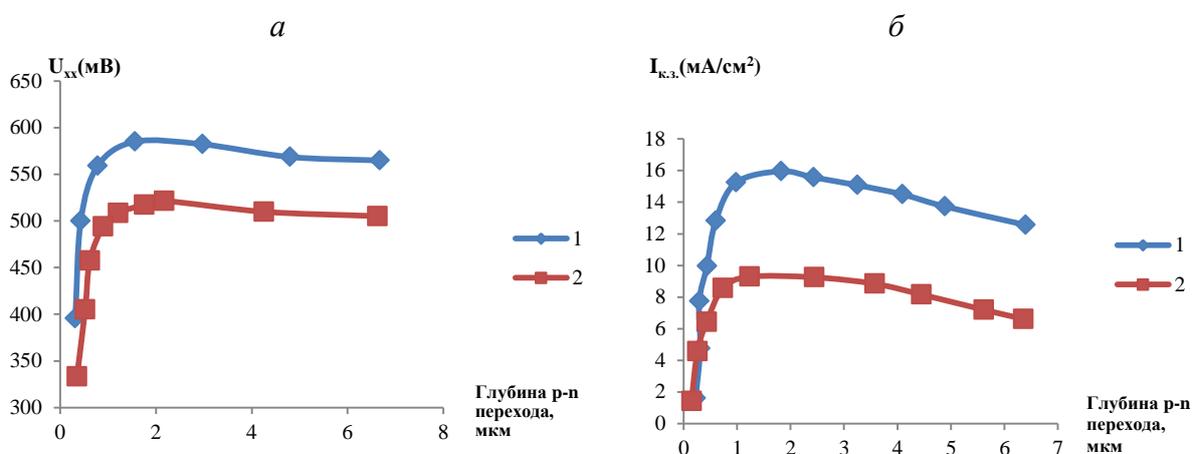
Вторая глава диссертации **«Технология изготовления солнечных элементов с кластерами атомов никеля»** посвящена созданию технологии получения никелевых кластеров в решетке кремния, определению распределения наноструктур по объему кремния, изучению с помощью современных способов распределения состава, структуры и концентрации кластеров атома никеля в кремнии, а также определение возможности управления ими для получения фотоэлементов с требуемыми электрофизическими параметрами.

Основные электрофизические параметры ФЭ были определены методом эффекта Холла. При определении фундаментальных электрофизических параметров полученных ФЭ были использованы современные методы инфракрасного микроскопического анализа МИК-5, Oxford Instruments ZEISS EVOMA 10 РЭМ анализ, XIA-200 атомно-силовой микроскоп и установка, работающая на основе рентгеновских лучей типа дифрактометр X'Pert Powder.

Появление микро- и нанокластеров объяснено влиянием концентрации кластеров атомов никеля на электрофизические параметры фотоэлементов. Показана возможность определения оптимальных параметров и технологии для получения высокоэффективных фотоэлементов.

Определено, что процесс без эрозийной диффузии атомов никеля должен проводиться при их поверхностной концентрации не выше $N=10^{18}$ см⁻³ и температуре не выше $T=1280$ °С.

При помощи разработанной технологии посредством диффузии фосфора в лабораторных условиях созданы опытные образцы ФЭ. С помощью этой технологии были также сформированы изотопный и р–n-переходы. Изменение величины поверхностного сопротивления диффузионного слоя в кремниевых образцах составило $\pm 5\div 10\%$. Для проведения экспериментов в диссертационной работе были использованы фотоэлементы, изготовленные на основе монокристаллических кремниевых пластинок, имеющих концентрацию носителей заряда n- и р-типа от $N=10^{15}$ см⁻³ до 2×10^{18} см⁻³.



a – зависимость $U_{x,x}$ -напряжения холостого хода ФЭ от глубины р–n-перехода;
б – зависимость тока короткого замыкания $I_{к.з}$ ФЭ от глубины р–n-перехода:
 1 – КДБ-0,5; 2 – КЭФ-4,5.

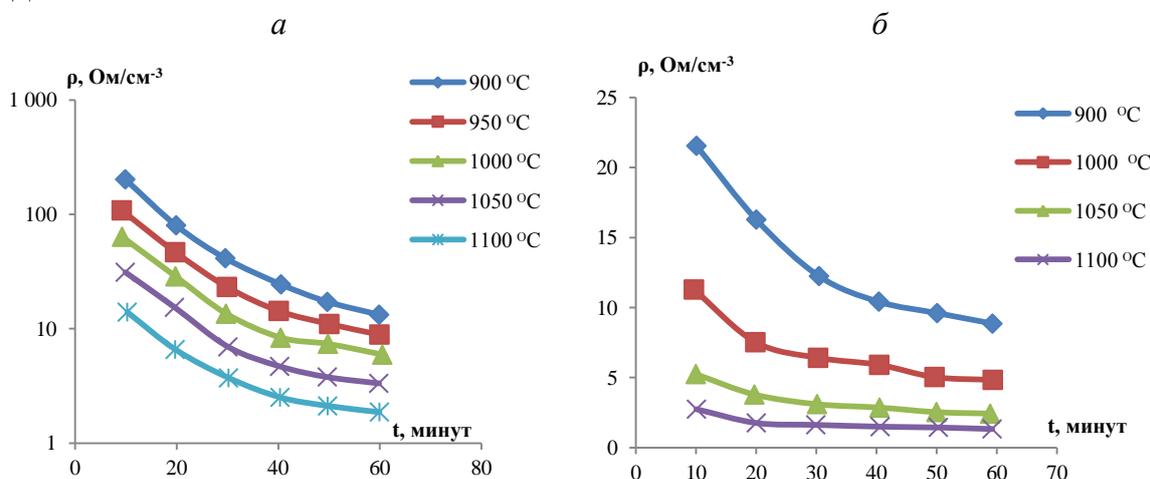
Рис. 1. Зависимость напряжения холостого хода и тока короткого замыкания от глубины р–n-перехода

Проведенные эксперименты показали, что величина тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФЭ (рис. 1) зависят от глубины залегания р–n-перехода, а при глубине р–n-перехода 0,8–1 мкм ток короткого замыкания $I_{к.з}$ ФЭ достигает максимального значения. При увеличении глубины залегания р–n-перехода до 6 мкм изменение тока короткого замыкания было незначительным. Полученные результаты позволяют заранее определить резкое падение тока короткого замыкания $I_{к.з}$. В первоначальных образцах с низким удельным сопротивлением степень снижения $I_{к.з}$ было выше, чем в образцах с высоким значением $I_{к.з}$. Для достижения высоких значений U_{xx} и $I_{к.з}$ должны получать р–n-переходы с глубиной не менее 0,5 мкм, что объясняется влиянием при малых глубинах р–n-перехода поверхностной структурой. При этом дефекты на поверхности ФЭ возникают в процессе химической обработки и диффузии, температурной обработки образцов, получении оксидов разной толщины или за счет пыли и других подобных дефектов.

При изготовлении ФЭ был использован материал КДБ-0,5 и КЭФ-4,5, где $U_{x.x.}$ и $I_{к.з.}$ достигают наиболее высоких значений. Определено, что ВАХ и FF-коэффициент заполнения ФЭ на основе полупроводниковых материалов марок КДБ-10; КЭФ-40 оказывается невысоким.

При использовании полупроводниковых материалов марок КЭФ-4,5 и КДБ-10 внутренние сопротивления равны как при последовательно соединенных, получается большое сопротивление (R_s), в результате наблюдается снижение $I_{к.з.}$ при введении в образцы в малом количестве концентраций примесных атомов путем легирования. Это в свою очередь в несколько раз снижает напряжение $U_{x.x.}$ У ФЭ, изготовленных на кремниевом материале марки КЭФ-40, наблюдаются малые токи $I_{к.з.}$.

На рис. 2 дана зависимость сопротивления кремния с p–n-переходом от температуры и времени диффузии, при этом на рис. 2, а, показана диффузия фосфора на подложке p-типа, а на рис. 2, б, – диффузия бора на подложке n-типа.



а – диффузия фосфора проведена на подложке p-типа;
б – диффузия бора проведена на подложке n-типа.

Рис. 2. Зависимость поверхностного сопротивления от температуры и времени диффузии

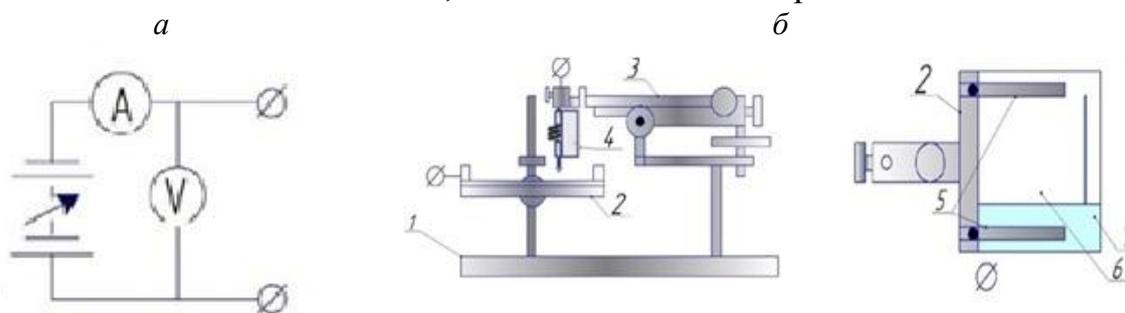
При легировании образцов кремния в определенном диапазоне температуры изучено упорядочение кластерных структур, изучены их электрофизические величины, получены ВАХ с подобной характеристикой типа диода Шоттки. Определено, что тонкий металлический слой атомов никеля на поверхности образцов кремния образуется при температурной обработке. ФЭ, имеющие примеси Ni, обрабатывались при разных температурах, затем измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ). На основании анализа полученных экспериментов при разных температурах определены распределение и взаимная разница кластерных атомов никеля в кремнии.

При определении ВАХ тонкого слоя металла на всей поверхности образца кремния были взяты два вида контактов: в первом использовали

зонд (W-зонд), изготовленный из вольфрамовой проволоки, во втором использовали гладкую алюминиевую поверхность (Al-слой).

На поверхности изучаемого образца по осям x - y - z зонд может свободно перемещаться. Один конец вольфрамового проволочного зонда в микронном измерении имеет вид тригональной пирамиды, кончик второго конца прикреплен к пружинному контакту.

На рис. 3 представлены электрическая схема и конструкция установки для измерения ВАХ полупроводников зондовым способом. Основные части установки: 1 – подложка; 2 – держатель; 3 – приспособление для удержания зонда; 4 – приспособление для двустороннего направления зонда; 5 – опора для сжатого удержания рабочей поверхности; 6 – пластинка (полированная), прикрепленная к поверхности опоры; 7 – тонкий алюминиевый слой, наложенный на поверхность пластинки.



a – электрическая схема;

б – конструкция.

Рис. 3. Электрическая и конструкционная схемы установки для измерения ВАХ зондовым способом

При измерении ВАХ проверяемый ФЭ закрепили между вольфрамовым зондом и тонкой алюминиевой пластинкой, расположенной на установке. ФЭ закреплялись между двумя контактами измерения ВАХ. На первом закреплялась тонкая алюминиевая плоская пластинка, к которой по меньшей мере на поверхности $S=10^{-2}$ см² требуется прилегание ФЭ. Второй контакт изготовлен из вольфрамовой проволоки, поверхность конечной части зонда составляет $S=6\div 7$ мкм.

С помощью разработанной установки измерялась ВАХ ФЭ на основе кремния с кластерами примесных атомов никеля по крайней мере в трех точках и бралось среднее значение, которое записывалось в качестве результата для построения графика. Чувствительная к освещению поверхность определялась с помощью зонда на поверхности образца⁴.

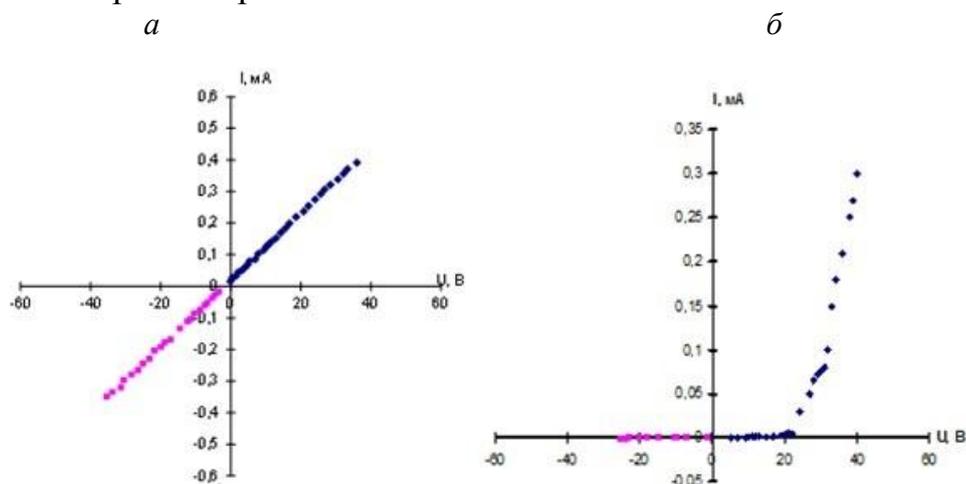
В качестве исходных образцов были выбраны подложки кремниевых пластин с ориентацией кристалла (111) марок КЭФ-4,5; КЭФ-40; КДБ-0,5 и КДБ-10. ФЭ с двух сторон был отполирован до толщины 340 ± 20 мкм, шероховатость полированного образца кремния составляла 10 нм.

⁴ Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники / Учеб. пособие. – М.: Высшее образование; Юрайт-Издат, 2009. – С. 32.

Для снятия слоя оксида пластинки ФЭ обрабатывали во фтористоводородной кислоте (HF). В условиях высокого вакуума под давлением $8 \pm 0.5 \times 10^{-5}$ Торр напылением на образцы нанесли металлический слой никеля (Ni). Слой металлического никеля в вакууме был получен с помощью спирально свитой вольфрамовой проволоки. Для контроля толщины полученного слоя была выбрана одна точка ФЭ. Методом испарения получен слой, равномерно распределенный по всей поверхности, толщина в выбранной точке принята равной толщине слоя на всей поверхности пластинки. Для очистки пластинки от невидимых засорений ее перед напылением атомов Ni на поверхность ФЭ нагревали в диапазоне температур $T = 50 \div 300$ °C.

При измерении ВАХ фотоэлементов вольфрамовый зонд был подключен к отрицательному, а полированный алюминиевый диск к положительному напряжению. При получении ВАХ фотоэлементов подавалось напряжение от -3 до +3 Вольт. Показатели ВАХ вольфрамового зонда и алюминиевого диска вместе с кремниевой подложкой приведены на рис. 4.

В ФЭ кластеры Ni после дополнительной обработки при высоких температурах $600 \div 1100$ °C образовывали структуры типа микробарьера Шоттки и на поверхности, и в объёме. После дополнительной температурной обработки на их поверхности наблюдается увеличение размеров кластерных строений Ni и значения тока.

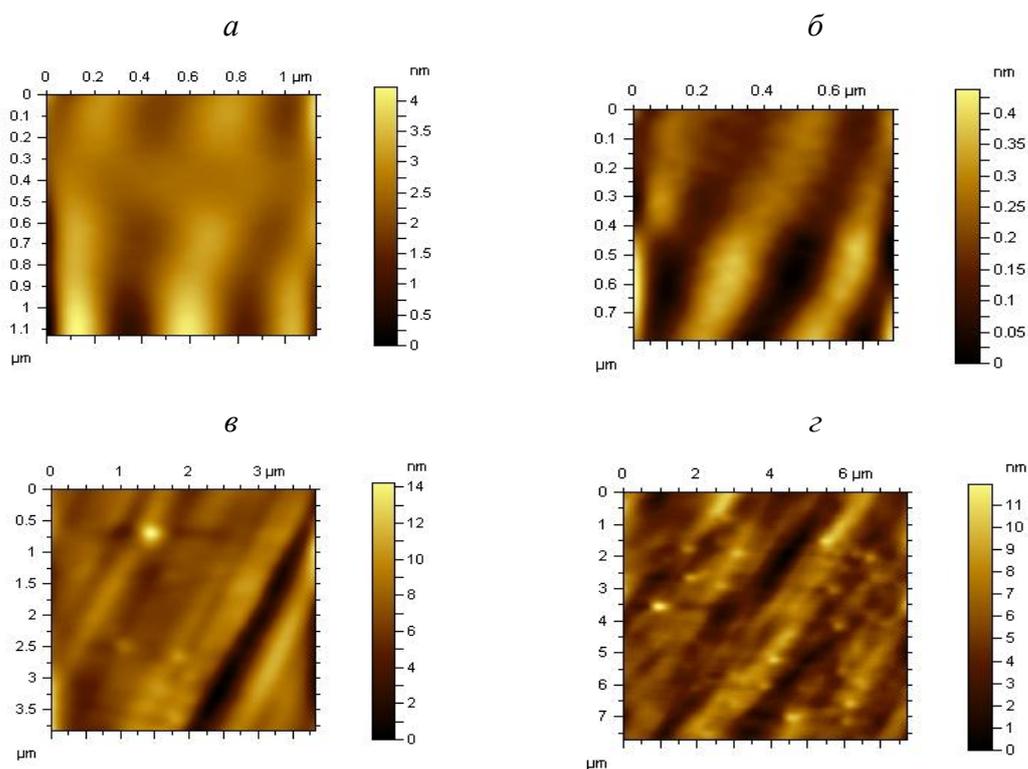


a – ВАХ ФЭ без кластеров; *б* – ВАХ ФЭ с никелевыми микро- и нанокластерами.

Рис. 4. ВАХ ФЭ с микро- и нанокластерными микробарьерами Шоттки, определенными методом микрозонда ($T = 300$ К)

При экспериментальном изучении ВАХ ФЭ в некоторых точках обнаружено внезапное увеличение тока и снижение его в некоторых точках, что объясняется привязкой к распределению микро- и нанокластерных структур Ni в виде микробарьеров Шоттки по поверхностному объёму ФЭ. При дополнительной температурной обработке в течение 2 и 3 часов наблюдалось различие ВАХ.

В эксперименте с ФЭ при температурной обработке в течение 3 часов наблюдалось резкое увеличение тока ВАХ по сравнению с ФЭ после температурной обработки в течение 2 часов. При этом количество наноструктур на основе атомов никеля от объема в поверхности составило 0,5 %. После температурной обработки ФЭ определено, что чем больше температура, тем больше будут высота микробарьера Шоттки и ток. После дополнительной температурной обработки наблюдалось образование системных строений кластеров атомов никеля на поверхности и в объеме ФЭ.



а – температурно необработанный слой поверхности;
б – после температурной обработки $t=1$ час;
в – после температурной обработки $t=2$;
г – после температурной обработки $t=3$ часа.

Рис. 5. Картины микроструктуры поверхности ФЭ под АСМ с кластерами примесных атомов Ni при $T=300$ К

На рис. 5 приведено изображение поверхности ФЭ с кластерами Ni, полученное при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ).

Распределение кластерных примесей на поверхности и в объёме ФЭ было изучено с помощью инфракрасного микроскопа марки МИК-5, что также подтвердило действительное существование кластеров на поверхности и в объеме ФЭ. На рис. 6 приведено распределение кластеров атомов никеля на поверхности образцов кремния.

Одно из своеобразных свойств полупроводников – изменение структуры элементарных решёток посредством введения атомов примесей в объем. Следующие образцы ФЭ были изучены с помощью установки дифрактометра марки X'Pert Powder.

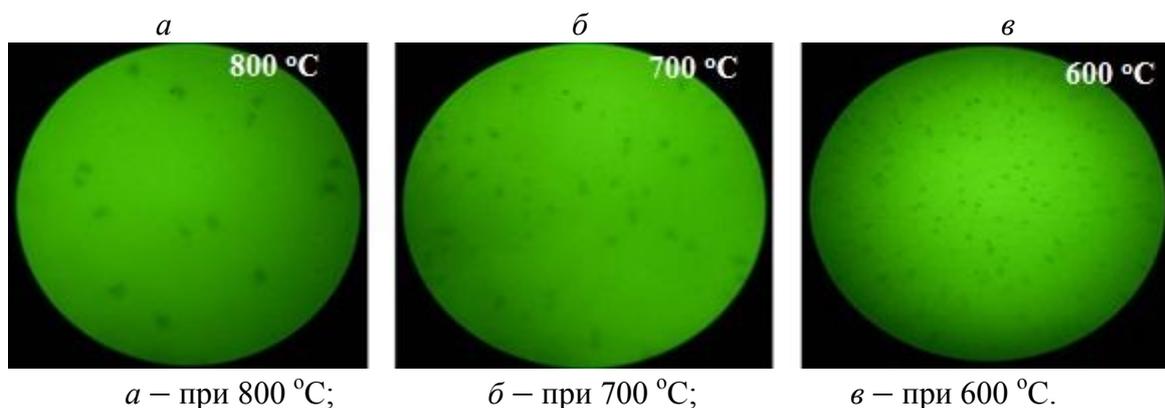


Рис. 6. Картины микроструктуры расположения примесных атомов Ni по объему кремния после диффузии при разной температурной обработке (МИК-5)

Перед изучением образцов на установке дифрактометра X'Pert Powder, работающего на основе рентгеновских лучей, сначала проводилось измельчение образца до состояния порошка, а затем выполнялись эксперименты. При этом на образцы можно воздействовать рентгеновскими лучами под любым углом. Дифрактометр, на котором изучались опытные образцы, работает с высокой точностью, наблюдательная оптическая система (DOPS) позволяет проводить измерения под определенно заданным углом. Это высококачественная установка имеет оптическую модульную и калибровочную системы, в ней установлены уникальные рентгеновские трубки очень высокого качества⁵.

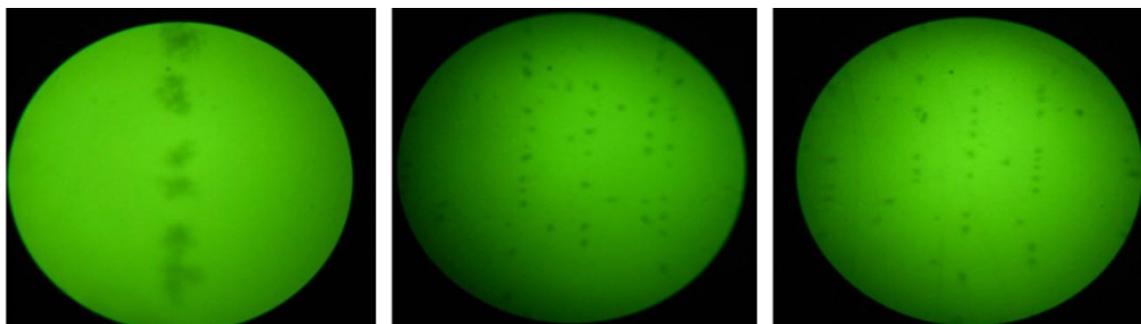


Рис. 7. Картины микроструктуры упорядоченного расположения примесных атомов Ni по объему кремния после диффузии при температурной обработке 900 °C (МИК-5)

На рис. 8 приведены спектральные изображения, полученные в ФЭ, обработанных при температурах 600, 800, 900, 1100, 1220 °C и имеющих в своем составе кластеры атомов никеля. Также приведены результаты проведенных экспериментов для исходных первоначальных ФЭ, полученных в одинаковых условиях, но в составе которых отсутствуют примесные атомы никеля.

⁵ Стрельчук В.В. и др. Рентгеновская дифрактометрия и сканирующая микрорамановская спектроскопия неоднородностей структуры и деформаций по глубине многослойной гетероструктуры InGaN/GaN // Физика и техника полупроводников, 2010, т. 44, вып. 9.

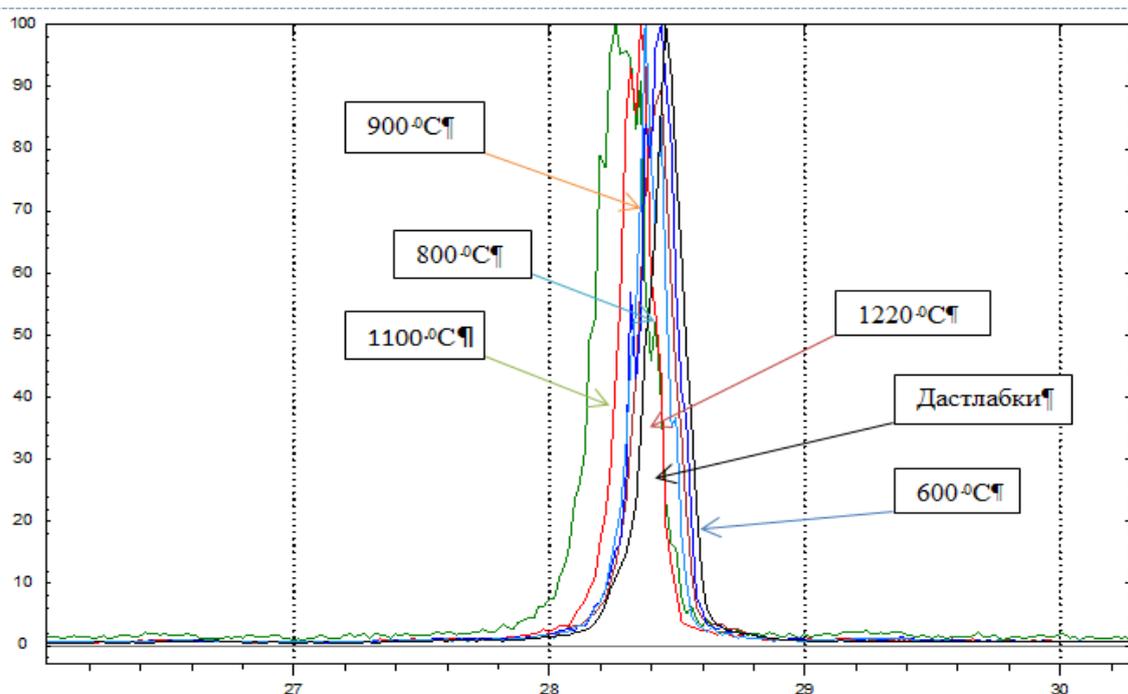


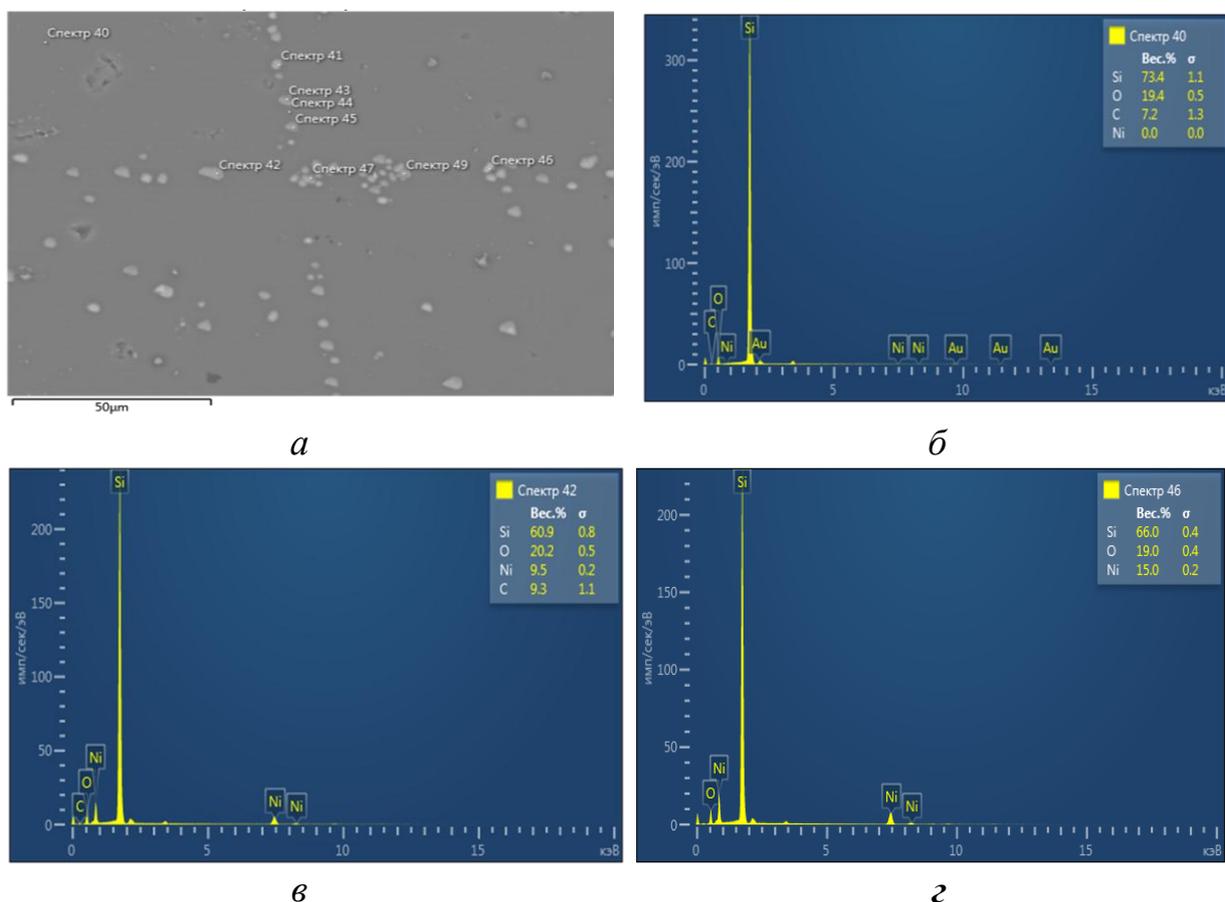
Рис. 8. Спектральные изображения, полученные в ФЭ под углами 26–30°

При направлении рентгеновских лучей под одинаковыми углами сравнивались между собой спектральные пики различных образцов кремния, имеющих кластеры атомов никеля. Для сравнения спектральных пиков вышеуказанные образцы ФЭ при углах от 20 до 80° представлены наложением. На рис. 8 приведены сравнения спектральных пиков образцов ФЭ, полученных под углами 26–30°.

Структуру кластер–кремний, полученную на основе результатов анализа экспериментальных данных, можно рассматривать как структуру металл–полупроводник. Спектральные пики, полученные на дифрактометре, по сравнению с контрольными образцами ФЭ, в составе которых отсутствуют кластеры атомов никеля, и спектры образцов фотоэлементов, нагретых при температуре 900 и 1100 °С, оказываются сдвинутыми на определенный угол, что свидетельствует о появлении диодов Шоттки в ФЭ с образованием микро- и нанокластеров примесных атомов никеля.

При помощи электронного микроскопа марки EVOMA-10 в условиях определенной температуры исследовалась поверхность полированного ФЭ. На рис. 9 приведен структурный анализ пластин ФЭ с примесными атомами никеля, которые были получены при помощи электронного микроскопа марки Oxford Instruments ZEISS EVOMA-10.

Полученные результаты доказывают, что в ФЭ существуют кластеры примесных атомов никеля 9÷15 %, при этом ошибка эксперимента находилась в пределах погрешности $\sigma=0,1\div0,2\%$.



а – распределение зон кластерных точек; *б* – без кластерных зон;
в – с кластерными зонами при Ni=9,5 %; *г* – с кластерными зонами при Ni=15 %.

Рис. 9. Картины микроструктуры составов поверхности ФЭ, имеющих кластеры никеля (РЭМ)

В разработанной установке были измерены ВАХ полученных структур. При этом направление тока можно было изменять, что позволяет изучать ВАХ фотоэлементов в темноте или при освещении, а также в прямом и обратном смещении. Для упрощения получения ВАХ был использован 2-координатный самопишущий прибор. В его входную часть было подано напряжение ФЭ, а также напряжение, пропорциональное току ФЭ, получаемое от повторителя. Самописец автоматически рисует график обратной и прямой ветви ВАХ ФЭ в течение 8 секунд с током до $J=1$ А. В установке имеется функция подключения с границей измерения тока от 50 мА до 1 А при измерении параметров небольших фотоэлементов. Изменение направления тока проводится повторным подключением.

В третьей главе «**Определение параметров фотоэлементов на кремниевой основе, имеющих кластеры атомов никеля**» приведены результаты изучения изменений основных параметров фотоэлементов на основе кремния с кластерами примесей атомов никеля в зависимости от различных воздействий.

При ручном режиме измерение тока меняется в указанном диапазоне, управление его величиной осуществляется переменным сопротивлением путем ручного регулированием. Ток и напряжение регистрируются

самописцем. Показания внешнего вольтметра и амперметра записываются вручную. Пределы измерения амперметра и вольтметра при обратном токе подключения от 10 мкА до 1 А, обратное напряжение до 10 В, измерять и записывать ВАХ можно в темноте.

В табл. 1 приведено напряжение холостого хода ФЭ, изготовленных на основе созданной технологии.

Таблица 1.

№	Марка материала	U _{хх} , мВ				
		500–525	525–550	550–575	575–600	более 600
1	КДБ-0,5	1 %	5 %	7 %	78 %	9 %
2	КДБ-10	10 %	85 %	5 %	0 %	0 %
3	КЭФ-40	1 %	2 %	18 %	74 %	5 %
4	КЭФ-4,5	5 %	59 %	34 %	2 %	0 %

В табл. 2 приведены токи короткого замыкания ФЭ, изготовленных на основе созданной технологии.

Таблица 2.

№	Марка материала	J _{к.з.} , мА			
		5-14	14-16	16-18	18-20
1	КДБ-0,5	1 %	7 %	87 %	5 %
2	КДБ-10	30 %	63 %	7 %	0 %
3	КЭФ-40	1 %	88 %	9 %	1 %
4	КЭФ-4,5	41 %	54 %	5 %	0 %

Для анализа влияния различных внешних факторов на параметры ФЭ разработана базовая технология получения ФЭ с р–n-переходом. Такие ФЭ не имеют изотопных переходов, прозрачного покрытия и тянущего поля. Предложено создание экспериментальных образцов ФЭ на основе кремния различных марок в соответствии с разработанной технологией.

Параметры изготовленных на основании разработанной технологии ФЭ приведены в табл. 5, 6. Напряжение холостого хода приведено в табл. 5, плотность тока короткого замыкания в табл. 6, при этом коэффициент заполнения ВАХ находится в пределах 50–65 %. При измерении параметров ФЭ в лабораторных условиях был использован разработанный имитатор солнечного излучения, при этом температура окружающей среды составила T=25 °С. Во время измерений равновесная температура ФЭ поддерживалась специальными охлаждающими устройствами в пределах T=15 ÷ 30 °С.

На рис. 10 и 11 показаны ВАХ при AM 1,5 (850 Вт/м²). ВАХ ФЭ, изготовленных по разработанной технологии, получены методом зондового измерения. Здесь в качестве первоначальных кремниевых пластинок использовались применяемые в промышленности КДБ-0,5; КЭФ-40; КЭФ-4,5; КДБ-10.

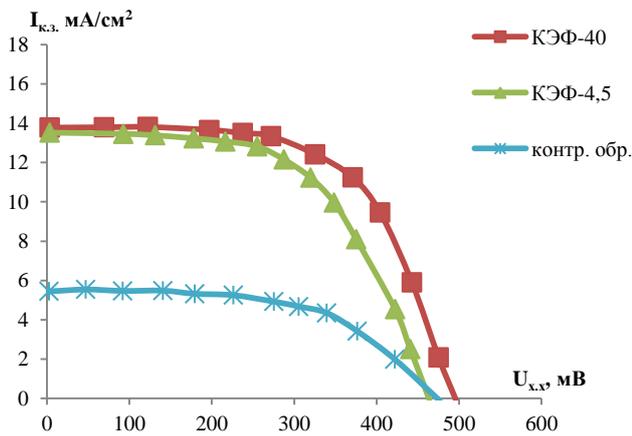


Рис. 10. ВАХ ФЭ, изготовленные на основе созданной технологии и исходных образцов кремния марок КЭФ-40 и КЭФ-4,5 при освещении, полученные методом зондового измерения, $T=300$ К

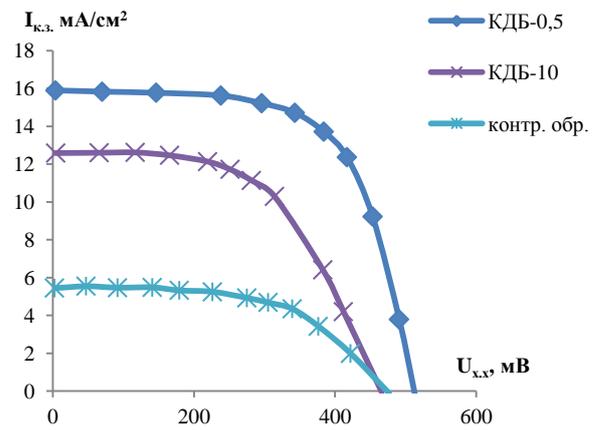


Рис. 11. ВАХ, полученная методом зондового измерения при освещении образцов ФЭ на основе кремния марки КДБ-0,5 и КДБ-10, созданных по разработанной технологии, $T=300$ К

Полученные выше ВАХ показывают, что образцы на основе КДБ-0,5, подверженные температурной обработке при 600, 700, 800, 900, 1000 и 1100 °С, имеют более высокие значения тока и напряжения после дополнительной обработки при температуре $T=900$ °С. Электрофизические параметры и упорядочение кластеров в ФЭ с примесными атомами никеля выше, чем у не подверженных температурной обработке.

На поверхности ФЭ был сформирован антиотражающий просветляющий слой оксида SiO_2 ⁶. При этом, регулируя температуру и время, получили слои оксида нужной толщины. Ближе к поверхности (в пределах 0,5 мкм) на фронтальной поверхности ФЭ формировался р–n-переход на основе легирования атомами бора. При формировании за короткое время слоя кремниевого оксида SiO_2 на поверхности ФЭ увеличились значения U_{xx} и I_{kz} . В ФЭ при глубине залегания р–n-перехода более чем 1,5 мкм эта величина немного снижалась. Снижение величины параметров ФЭ связано с уменьшением концентрации атомов примеси на поверхности и увеличением глубины залегания р–n-перехода относительно поверхности, а также с изменением профиля распределения р–n-перехода при легировании. Образование равномерных цепных кластеров после процесса диффузии наблюдалось при дополнительной термообработке в пределах $T=900$ – 1100 °С.

Эффективность светоотражающих покрытий, первоначальные электрофизические параметры образца и регулировка глубины залегания р–n-перехода относительно поверхности связаны со свойствами примесных атомов.

На подложке р-типа, легированной фосфором, под действием освещения экспериментально наблюдалось большее увеличение фототока, чем на подложке n-типа при легировании атомами бора. Также

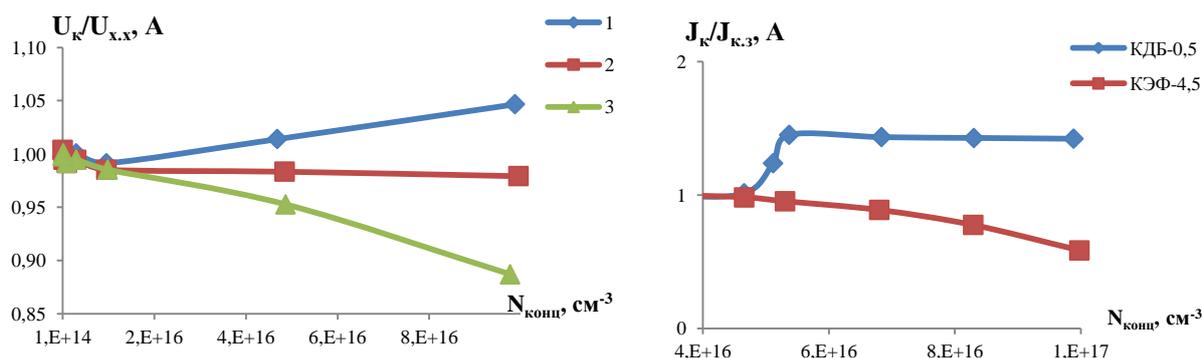
⁶ Каныков Е.Ю., Демьянов С.Е. Особенности электропереноса в наноструктурах $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Ni}$ в сильных магнитных полях. Минск, Беларусь.

наблюдалась связь глубины залегания р–n-перехода относительно поверхности и уровня легирования фронтальной стороны с первоначальными величинами атомов примеси.

Следует учитывать тот факт, что образование светоотражающего покрытия SiO₂ при легировании подложки n-типа атомами бора в различные периоды времени при дополнительной термообработке относительно первоначальных образцов увеличивало напряжение холостого хода и КПД. Относительное увеличение напряжения холостого хода на ФЭ связано с концентрацией примесных атомов никеля (рис. 12).

ФЭ с оптимальными параметрами имеют в спектре АМ 1,5, T=25 °С напряжение холостого хода 590–595 мВ, ток короткого замыкания 18-19 мА/см², коэффициент заполнения ВАХ FF=0,6-0,63 и КПД 18,5 %.

Определено, что при глубине залегания р–n-перехода, близкого к поверхности до 0,5 мкм, оптимальная толщина светоотражающего покрытия оксида SiO₂ составила 1000–1100 Å, при глубине залегания р–n-перехода до 1÷1,5 мкм оптимальная толщина покрытия оксида кремния составила 1150÷1200 Å. Относительно первоначальных значений ФЭ при оптимальной глубине залегания р–n-перехода и толщине покрытия SiO₂ величина фототока увеличилась примерно на 30%.



1 – кремний марки КДБ-10, где р–n-переход был образован посредством диффузии атомов фосфора;

2 – кремний марки КЭФ-40, где р–n-переход был образован посредством диффузии атомов бора;

3 – ФЭ на основе КЭФ-4.5, где р–n-переход был образован диффузией атомов бора.

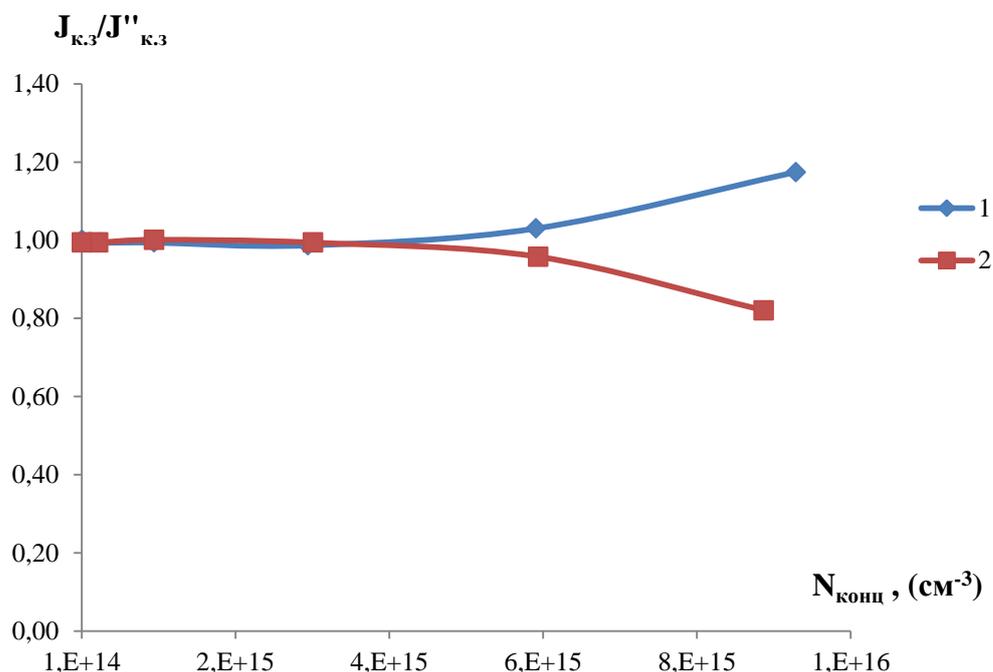
Рис. 13. Относительное изменение тока короткого замыкания ФЭ, связанное с концентрацией кластеров примесных атомов никеля

Рис. 12. Зависимость относительного изменения напряжения холостого хода ФЭ от концентрации кластеров примесных атомов никеля

При увеличении концентрации кластеров атомов никеля величина тока фотоэлементов снижается. При концентрации атомов никеля 2×10^{16} см⁻³ для данных структур величина тока составляет 90–95 %, что ниже тока первоначальных фотоэлементов. При легировании структур примесными атомами никеля снижение первичного значения тока составило 50–60%.

При компенсации атомами никеля донорных примесей нижнего энергетического уровня ток короткого замыкания ФЭ снижался до нуля.

На рис. 13 и 14 приведено относительное изменение тока короткого замыкания ФЭ при дополнительном легировании атомами никеля.



1 – дополнительная диффузия атомов фосфора для КДБ-10;
2 – диффузия атомов бора в КЭФ-4,5.

Рис. 14. Относительное изменение тока короткого замыкания при формировании р-п перехода ФЭ

Анализ полученных результатов показал, что дополнительное легирование примесями атомов никеля увеличивает КПД ФЭ. Определена величина концентрации легирующей примеси. При легировании ФЭ р-типа эффективность ФЭ увеличилась в пределах концентрации $10^{15} \div 6 \times 10^{16}$ $см^{-3}$. На подложках первоначальных пластинок кремния при величине концентрации атомов исходной примеси выше 10^{17} $см^{-3}$, образующих малые энергетические уровни, определить увеличение КПД на практике невозможно.

На основании изложенной выше технологии была осуществлена диффузия атомов Ni в исходные образцы кремния. Результаты экспериментов приведены в табл. 3, 4. В табл. 3 показаны результаты изменения времени жизни неосновных носителей заряда после диффузии атомов Ni в исходный кремний при $T=1220$ °С.

Таблица 3

Показатель	Марка Si			
	КДБ-0,5	КДБ-10	КЭФ-40	КЭФ-4,5
Первичное τ , мкс	18-21	24-26	21-23	29-32
После диффузии Ni $T=1220$ °С τ , мкс	6-10	8-12	12-14	16-18

В табл. 4 приведены результаты изменения времени жизни неосновных носителей заряда после предварительно проведенной при $T=1220$ °С диффузии атомов никеля и последующего дополнительного термоотжига ФЭ с кластерами примесных атомов никеля при $T=900$ °С.

Таблица 4

Показатель	Марка Si			
	КДБ-0,5	КДБ-10	КЭФ-40	КЭФ-4,5
Первичное τ , мкс	18-21	24-26	21-23	29-32
После температурной обработки $T=900$ °С τ , мкс	24-26	28-32	10-12	10-12

Анализ полученных результатов показывает, что ввод в кремний р-типа примесных атомов никеля увеличивает время жизни неосновных носителей заряда.

В образцах кремния n-типа при легировании атомами никеля наблюдается обратная связь, т.е. снижение времени жизни неосновных носителей заряда. При дополнительной обработке образцов τ становится стабильным. Дополнительное легирование исходных ФЭ КДБ атомами никеля снизило время жизни неосновных носителей заряда.

В четвертой главе диссертации «**Деградация параметров фотоэлементов с кластерами атомов никеля**» приводятся результаты стабильности фотоэлементов на кремниевой основе с кластерами атомов никеля потоку фотонов и облучению гамма-квантами.

Исследование фотонной деградации параметров изготовленных фотоэлементов проводилось в течение 300 часов при плотности потока однократного солнечного излучения АМ 1,5, а также при 50-кратном солнечном излучении с использованием солнечного концентратора в течение 150 часов.

При исследовании фотодеградации ФЭ при освещении с помощью концентратора, а также при однократном солнечном излучении нужно решать задачу эффективной передачи тепла. Эта проблема нашла решение путем принудительного охлаждения ФЭ. Для отвода лишнего тепла от ФЭ к принудительной водяной охлаждающей системе были прикреплены пластинки. В охлаждающей установке на основе регулирования потока воды обеспечивалась необходимая скорость передачи тепла.

Эксперименты по изучению степени деградации ФЭ велись с использованием специальной установки. Изготовленная установка содержит следующие составные части: параболический концентратор, устройство для точной установки ФЭ в фокусе концентратора, охлаждающее устройство ФЭ, система слежения концентратора за движением Солнца.

Для сравнения параметров дополнительно легированных ФЭ с атомами никеля, подвергнутых воздействию температурной обработки, с беспримесными атомами никеля ФЭ был проведен температурный отжиг

ФЭ при соответствующем значении времени и температуры. При температурной обработке были использованы ФЭ одинаковой конструкции и с аналогичными электрофизическими параметрами.

Изучение влияния дополнительной термообработки на параметры ФЭ с кластерами примесных атомов никеля при $T=600$ и 650 °С в течение 3 часов показало, что в первоначальных параметрах образцов никаких изменений не наблюдалось. В контрольных образцах после нагрева при $T=600$ °С наблюдалось снижение тока короткого замыкания на 3–6 %. При термообработке ФЭ, легированных атомами никеля, наблюдалось снижение первоначальных величин $I_{к.з.}$ и $U_{х.х.}$. После термообработки некоторых фотоэлементов наблюдалось увеличение электрофизических величин $U_{х.х.}$ и $I_{к.з.}$. Эта связь сильнее проявлялась у ФЭ, имеющих малую концентрацию легирующей примеси с образованием малых энергетических уровней в противоположных типах проводников. Например, на термообработанном ФЭ примеси, образующие мелкие энергетические уровни, переходят в положение компенсации. В результате взаимодействия с примесями, образующими глубокие энергетические уровни, величины $U_{х.х.}$ и $I_{к.з.}$ ФЭ опускаются до нуля.

После формирования р–n-перехода наблюдалось снижение параметров дополнительно термообработанных ФЭ. Если время термообработки было больше, то это резко снижало первоначальные значения $U_{х.х.}$, $I_{к.з.}$.

Таблица 5

Данные, полученные для ФЭ, созданных на кремнии марки КЭФ-4,5

Температура дополнительной термообработки, °С	Средние размеры кластеров, мкм	$U_{х.х.}$, мВ	$I_{к.з.}$, мА/см ²
1200	1-2	514	13,5
1100	1,5-2	534	14,1
1000	2,5-3	552	14,8
900	1,5-2	568	15,6
Контрольный образец	-	588	17,3

В табл. 5 и 6 приведены сведения по изменению напряжения холостого хода и тока короткого замыкания в зависимости от термообработки в течение 1 часа. В табл. 5 приведены данные по первоначальному исходному материалу КЭФ-4,5. В табл. 6 приведены электрофизические параметры ФЭ, изготовленных на кремнии марки КЭФ-40. Время дополнительной термообработки 1 час.

Таблица 6

Электрофизические параметры ФЭ, изготовленных на основе кремния марки КЭФ-40

Температура дополнительной термообработки, °С	Средние размеры кластеров, мкм	$U_{x,x}$, мВ	$I_{к,з}$, мА/см ²
1200	1 – 2	374	10,7
1100	2 – 5	402	11,6
1000	2 – 7	439	12,8
900	2 – 8	491	14,2
Контрольный образец	-	527	16,8

В табл. 7 приведены электрофизические параметры ФЭ, изготовленных на кремнии марки КДБ-10. Время дополнительной термообработки 1 час.

Таблица 7

Электрофизические параметры ФЭ, изготовленных на основе кремния марки КДБ-10

Температура дополнительной термообработки, °С	Средние значения кластеров, мкм	$U_{x,x}$, мВ	$I_{к,з}$, мА/см ²
1200	1 – 2	497	15,8
1100	2 – 5	514	16,6
1000	2 – 5	546	17,5
900	2 – 20	572	18,5
Контрольный образец	-	595	20,5

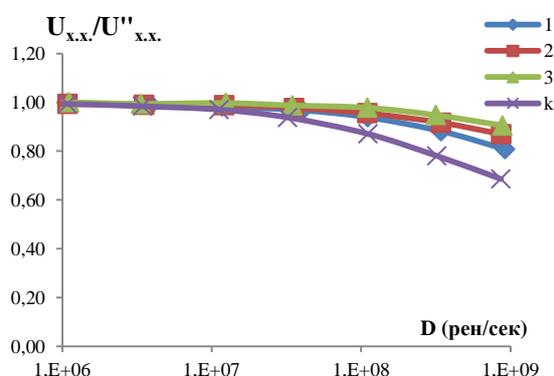
В табл. 8 приведены электрофизические параметры ФЭ, изготовленных на основе кремния марки КДБ-0,5. Время дополнительной термообработки 1 час.

Таблица 8

Электрофизические параметры ФЭ, изготовленных на основе кремния марки КДБ-0,5

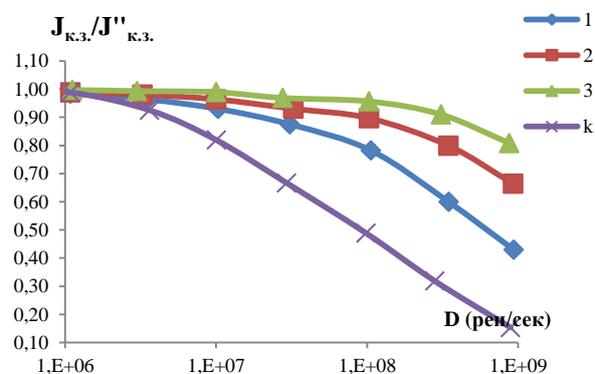
Температура дополнительной термообработки, °С	Средние размеры кластеров, мкм	$U_{x,x}$, мВ	$I_{к,з}$, мА/см ²
1100	0,5 – 1	480	20,9
1000	1 – 1,5	482	21,4
900	1,5 – 2,5	498	45,7
800	2,5 – 3	506	28,1
Контрольный образец	0,5 – 1	507	20,5

Изучено влияние γ -излучения при дозе от 10^5 до 10^9 Р на параметры ФЭ с кластерами атомов никеля. На рис. 15 и 16 приведены результаты изучения зависимостей тока короткого замыкания и напряжения холостого хода от дозы γ -излучения и деградации при его влиянии.



1, 2, 3 – концентрация атомов соответственно Ni 10^{15} см $^{-3}$, 10^{16} см $^{-3}$, 6×10^{16} см $^{-3}$, k – контрольный ФЭ.

Рис. 15. Изменение напряжения холостого хода ФЭ, подверженного дополнительной термообработке, от дозы γ -излучения



1, 2, 3 – концентрация атомов соответственно Ni 10^{15} см $^{-3}$, 10^{16} см $^{-3}$, 6×10^{16} см $^{-3}$, k – контрольный ФЭ.

Рис. 16. Изменение тока короткого замыкания ФЭ, подверженного дополнительной термообработке, от дозы γ -излучения

Зависимость напряжения холостого хода ФЭ от дозы γ -излучения приведена на рис. 15. Здесь концентрация примесей Ni: 1 – 1×10^{15} см $^{-3}$, 2 – 1×10^{16} см $^{-3}$; 3 – 6×10^{16} см $^{-3}$, k – для контрольного образца с без атомарной примесью никеля. Такие зависимости были получены при исследовании изменения тока короткого замыкания от дозы γ -излучения (рис. 16).

После облучения фотоэлементов, дополнительно легированных атомами никеля с оптимальной концентрацией γ -излучения дозой 10^9 Р, напряжение холостого хода относительно необлученных образцов падает на 8–10%. В этих же образцах ток короткого замыкания снизился на 15–18%. В тех же условиях параметры деградации подверженных облучению контрольных ФЭ составили по напряжению 25–30%, по току 70–80%. При облучении гамма-квантами дозой 10^9 Р для ФЭ с введенными атомами никеля изменение напряжения и тока не превышало соответственно 5 и 10%.

При облучении дозой 10^7 Р изменение значений напряжения и тока составило не выше 1–2%.

По результатам экспериментов можно сделать следующий важный вывод – радиационная стабильность ФЭ, дополнительно легированных атомами никеля, улучшается от двух до четырех раз по сравнению с контрольными ФЭ, изготовленных без примесных атомов никеля. Это показывает, что внедрение примесных атомов никеля в кремний приводит к термостойкости, радиационной стойкости и к эффективности ФЭ.

В заключение хочу выразить благодарность моему научному консультанту академику М.К.Бахадирханову, научному руководителю профессору Н.Ф.Зикриллаеву и всему коллективу кафедры «Цифровая электроника и микроэлектроника» и «Альтернативные источники энергии» ТГТУ за помощь и поддержку, оказанные при выполнении моей диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При диффузии атомов никеля, когда температура была равна $T=1200$ и $T=1220$ °С в течение 3 часов, определено появление на поверхности и в объеме микро- и нанокластеров разных размеров.

2. После диффузии атомов никеля и их дополнительной термообработки при $T=1100$ и 900 °С наблюдалось цепное упорядочение примесных атомов.

3. Разработана технология образования микро- и нанокластеров примесных атомов никеля на поверхности и в объеме ФЭ, полученные кластеры изучены современными методами с применением растрового электронного микроскопа марки (РЭМ) Oxford Instruments ZEISS EVOMA-10, атомно-силового микроскопа (АСМ) «Solver-Pro», инфракрасного микроскопа марки МИК-5, а также дифрактометра X'Pert Powder рентгеновских лучей.

4. После формирования р–n-перехода проводился процесс дополнительной термообработки и были определены деградационные свойства первоначальных параметров ФЭ. Чем больше время дополнительного легирования и температуры, тем больше снижались первоначальные значения $U_{х.х.}$ и $I_{к.з.}$, при глубине р–n-перехода менее 1 мкм процесс деградации параметров был очень высоким.

5. На основании результатов проведенных экспериментов определена термостойкость электрофизических параметров ФЭ, имеющих примесные атомы никеля и освещенных концентрированными лучами Солнца. Определена радиационная стойкость ФЭ, созданных на основе разработанной технологии, под действием γ -излучения.

6. Параметры ФЭ после воздействия радиационного излучения были сравнены с параметрами контрольных ФЭ, т.е. изготовленных без примесных атомов никеля в монокристаллическом кремнии. Установлено, что радиационная стойкость параметров ФЭ, дополнительно легированных атомами никеля при оптимальной концентрации в дозе γ -излучения до 10^9 Р, оказалась на 5–8 % выше.

7. Примесные атомы никеля методом диффузии при температуре $T=1220$ °С были введены в кремниевые материалы КДБ-0,5; КДБ-10; КЭФ-4,5; КЭФ-40, результаты полученных после термообработки ФЭ с кластерами никеля при дополнительных температурах 1100, 1000, 900, 800, 700 и 600 °С использованы при отжиге легированного примесями никеля кремния в акционерном обществе «ФОТОН» (справка за №02-1517 от 9 июля 2018 года дана акционерной компанией «Узэлтехсаноат»).

8. Применение научных результатов позволит образовывать кластеры никеля и упорядочить их состояние в кремнии.

9. Усовершенствованная технология двухэтапного диффузионного процесса позволит упорядочить управляемые электрофизические параметры примесных атомов никеля, которые были использованы для формирования нанокластеров примесными атомами никеля в акционерном обществе «ФОТОН» (справка за №02-1517 от 9 июля 2018 года дана акционерной компанией «Узэлтехсаноат»).

10. Использование результатов исследования даёт возможность повысить стабильность параметров ФЭ, легированных примесными атомами никеля, к температуре и γ -излучению.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.28.02.2018.FM/T.03.05 UNDER TASHKENT STATE TECHNICAL
UNIVERSITY, NATIONAL UNIVERSITY UZBEKISTAN**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SAITOV ELYOR BAKHRIDDINOVICH

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND PRODUCTION OF
HIGHLY EFFECTIVE SILICON-BASED PHOTOCELLS WITH
IMPURITY ATOMS OF NICKEL**

01.04.10- Physics of semiconductors

**ABSTRACT OF DISSERTATION
OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON TECHNICAL SCIENCES**

TASHKENT-2018

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.2. PhD/FM85.

Dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University.

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

Scientific supervisor: **Zikrillaev Nurullo Fatkhullayevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents: **Abducadirov Mukhiddin Abdurashidovich**
Doctor of Technical Sciences, professor

Tagaev Marat Boymuratovich
Doctor of Technical Sciences, professor

Leading organization: **Ferghana Polytechnic Institute**

Dissertation defense will be held on «____» _____2018 at _____ at the meeting of Scientific Council number DSc.28.02.2018.FM/T.03.05 at the Tashkent State Technical University, National University Uzbekistan (address: 100095, Uzbekistan, Tashkent,2 University street. Phone/fax: (+99871) 246-46-00, e-mail: tsu_info@edu.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Tashkent State Tekchnical University (registered under №____). (Address: 100095, Uzbekistan, Tashkent,2 University street.Phone/fax: (+99871) 246-03-41).

Abstract of dissertation sent out on «____» _____2018.

(Registry record №____ on «____» _____2018).

M.K. Bakhadir Khanov

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

B.E. Egamberdiyev

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

A.Z. Rakhmatov

Deputy Chairman of Scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, DSc of Technical Sciences, Senior scientific resercher

INTRODUCTION (abstract of thesis of Doctor of Philosophy (PhD))

The aim of the study is to produce high - performance solar cells based on the technology of obtaining materials with ordered micro-and nanostructures on the basis of silicon with impurity atoms of Nickel.

Research tasks:

to conduct thermal annealing after diffusion of silicon-based solar cells with additional impurity atoms of Nickel, to determine the shape, distribution, composition, location of impurity atoms in the silicon material by using advanced investigative instrumentation and techniques;

to study the formation of micro-and nanoclusters of impurity atoms in silicon wafers following additional high-temperature thermal annealing, to determine the degree of degradation of electro-physical parameters of solar cells under the influence of temperature;

to increase the stability of the electro-physical parameters of photocells with clusters of Nickel atoms under the influence of γ - radiation.

The object of the study are samples of single crystalline silicon with type KEF-4,5; KEF-40; KDB-0,5; KDB-10, used in the electronics industry. Nickel was chosen as an impurity element. Ni atoms with a purity of 99.99999 for the diffusion process and an electronic structure of $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8 4s^2$.

The subject of the study is the formation of uniformly distributed chains of nanoclusters of Nickel atoms in the silicon lattice, having photosensitivity properties.

The scientific novelty of the research is as follows:

the technological process and technique of low-temperature diffusion was improved, which ensures the ordering of impurity atoms of Nickel and their uniform distribution in the volume of silicon material, as well as the control of the electrical parameters of the ingot;

the technology has been developed that ensure equidistance and evenly distribution across the entire bulk of nanoclusters of Nickel atoms to ensure the formation of Schottky micro-barriers and the transition of charges from metal to semiconductor, which lead to the appearance of photoconductivity in solar cells;

photovoltaic cells were manufactured and their electro-physical parameters were determined after additional thermal annealing on the basis of samples with different cluster concentrations;

the efficiency of solar cells created on the basis silicon with clusters of Nickel atoms has been increased;

the stability of silicon-based solar cells with clusters of impurities of Nickel atoms against various degradation factors and, in particular, to radiation was increased.

Implementation of the research results. Based on the results of the development of high - performance solar cells in the framework of the technology of obtaining materials with ordered micro-and nanostructures of impurity atoms of Nickel in silicon:

impurity atoms of Nickel were introduced into silicon materials type KDB-0.5; KDB-10; KEF-4.5; KEF-40 by diffusion technique at temperature of $T=1220^{\circ}\text{C}$, further the technique of thermal annealing of materials with Nickel clusters at additional temperatures of 1100, 1000, 900, 800, 700 and 600°C was implemented during thermal annealing of doped samples in the Joint-Stock Company «FOTON» (Ref. № 02-1517 from July 9, 2018. The Reference letter was granted by Joint-Stock Company «Uzeltekh sanoat»). The application of scientific results makes it possible to form Nickel clusters, and also leads to the ordering of their locations;

silicon materials with evenly distributed cluster across the bulk and improved technique of low-temperature diffusion process allowed to control electro-physical parameters of orderly distributed impurity atoms of Nickel atoms that have been applied for the formation of nanoclusters of impurity atoms of Nickel by the Joint-Stock Company «FOTON» (Ref. № 02-1517 of 9 July, 2018 The Reference letter was granted by Joint-Stock Company «Uzeltekh sanoat»). Application of the results of the research makes it possible to increase the stability of solar cells doped with impurity atoms of Nickel against temperature, radiation and γ - radiation.

Approbation of research results. The results of this study were discussed at 16 scientific and practical conferences, including 9 international and 7 republican scientific and practical conferences.

Publication of the research results. 28 scientific works have been published on the subject of the thesis, 12 of them are included in the list of scientific publications proposed by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the protection of doctoral dissertations, including 3 of them published in foreign journals and 9 in national scientific journals.

The structure and scope of the thesis. The dissertation consists of introduction, 4 chapters, conclusion, list of references. The text of the thesis is presented on 125 pages.

ЭЪЛОНҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Зикриллаев Н.Ф., Саитов Э.Б. Разработка технологии диффузионного легирования для производства нового поколения кремниевых фотоэлементов, легированных никелем // Вестник ТашГТУ, 2018; №1. С. 51-56. [05.00.00., №16].

2. Saitov E. Study of Quantitative and Qualitative Characteristics of Nickel Clusters and Semiconductor Structures. Journal of Materials Science and Chemical Engineering. №4 у. 2016, pp. 30-35. IF:0,6.

3. Саитов Э.Б. Кремнийга метал киришмалар киритишда ҳосил бўлган микро наноструктурали силитцидларнинг вольт-ампер таснифини ўрганиш. ТДТУ Хабарномаси №1, 2016 й, б. 31-37. [05.00.00., №16].

4. Saitov E. Study of Quantitative and Qualitative Characteristics of Nickel Clusters and Semiconductor Structures. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 3, Issue 5, May 2016. pp. 1952-1956. IF=4,346 [05.00.00; №8].

5. Abdurakhmanov B.A., Bakhadir Khanov M.K., Ayupov K.S., Iliyev H.M., Saitov E.B., Mavlyanov A., Kamalov H.U. Formation of Clusters of Impurity Atoms of Nickel in Silicon and Controlling Their Parameters. Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 4, No. 2, 2014. PP. 23-26. IF:0,4 [№12 Index Copernicus, №35 cross ref].

6. Зикриллаев Н.Ф., Саитов Э.Б. Фотоэлементы на основе кремния с микробарьерами Шоттки // Вестник Туринского политехнического университета; 2014. С. 31-33. [05.00.00., №25].

7. Саитов Э.Б. Таркибида микро ва нанокластерлари бўлган кремнийнинг вольтам пертаснифини хусусиятлари. ТошДТУ Хабарлари №3-сон, 2014 й. Б.56-61. [05.00.00., №16].

8. Саитов Э.Б. Исследование кремниевых фотоэлементов с Si-Ge микрогетероструктурами. Спец выпуск // Вестник ТашГТУ, 2015.С.66-71. [05.00.00., №16].

9. Зикриллаев Н.Ф., Саитов Э.Б. Азизов М.К. Кремнийдаги киришма атомлари асосида самарадорлиги юқори куёш элементлари. Энергия ва ресурс тежаш муаммолари ТДТУ №4-сон. 2014 й. б. 133-137. [05.00.00., №16].

10. Илиев Х.М., Саитов Э.Б., Сайдалиев С.Х., Тачилин С.А. Переносная автономная солнечная электростанция индивидуального использования // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. ТашГТУ, 2014, №1-2. с. 183-185. [05.00.00., №21].

11. Зикриллаев Н.Ф., Саитов Э.Б. Куёш совутиш қурилмасининг янги конструкциясини ишлаб чиқиш // Проблемы энерго- и ресурсосбережения ТашГТУ г. 2017, №3-4. с. 202-207. [05.00.00., №21].

12. Зикриллаев Н.Ф., Саитов Э.Б., Тухтасинов М.М. Низкотемпературная диффузия примесей Ge, S, Ni и Mn в кремнии для получения фотоэлементов // Вестник Туринского политехнического университета, 2014. с. 34-39.[05.00.00., №25].

II бўлим (II часть; II part)

13. Саитов Э.Б. Технология получения кремния с нанокластерами // XIII Международная научная конференция «Физика твердого тела», посвященная 20-летию евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, 26-28 апреля, 2016, С. 208-209.

14. Зикриллаев Н.Ф., Саитов Э.Б. Состав и распределение кластеров атомов никеля в кремнии // International Scientific and Practical Conference «Innovation-2016» Proceedings of the Conference. PP. 110-111.

15. Боходирханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Абдурахмонов Б.А., Саитов Э.Б. Қуёш элементларини ишлаб чиқаришда нанотехнологиянинг ўрни. //International Theoretical and Practical Conference Education and Science for Sustainable Development April 6-8, 2016, Tashkent, Uzbekistan. PP. 59-60.

16. Саитов Э.Б. Низкотемпературная диффузия примесей Ge, S, Ni и Mn в кремнии для получения фотоэлементов // VIII Международная научно-техническая конференция «Управление, качество и эффективность использования энергоресурсов». «Прикладные аспекты энергетики». Благовещенск, 27-29 мая 2015. С. 532-536.

17. Зикриллаев Н.Ф., Саитов Э.Б. Технология получения микрогетеропереходов в кремниевых пластинах на основе диффузионных методов // Международная научная конференция «Инновации в материаловедении». Ташкент, 2015, С. 130-131.

18. Зикриллаев Н.Ф., Тачилин С.А., Саитов Э.Б. Эффективные инверторы для альтернативных источников энергии // Международная научно-практическая конференция «Проблемы современного машиностроения». Андижан 16-17 мая 2013 года. С.16-18.

19. Бахадырханов М.К. Абдурахмонов Б.А, Саитов Э.Б. Исследование вольт-амперной характеристики микроструктуры кластеров атомов никель–кремний // Материалы международной конференции, посвященной 70-летию физико-технического института. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 14-15 ноября 2013 года. С. 107-108.

20. Зикриллаев Н.Ф., Абдурахмонов Б.А., Саитов Э.Б. Возможность создания интегральных фотоэлементов // Международная научная конференция «Innovation-2014» ТашГТУ (Ташкент 23-24 октября). С. 78-79.

21. Зикриллаев Н.Ф., Абдурахмонов Б.А., Аюпов К.С., Мавлянов А.Ш., Саитов Э.Б. Самоорганизация кластеров примесных атомов в кремнии // Международная научная конференция «Innovation-2014» ТашГТУ (Ташкент 23-24 октября). С. 95-97.

22. Саитов Э.Б. Замоनावий ИҚ ва АК микроскоплари ёрдамида Ni сиртида никел атомлари кластерларининг холатини ўрганиш. Республика илмий амалий анжумани, «Яримўтказгичлар физикасининг долзарб муаммолари» ЎзМУ Тошкент 2014 йил, 22 ноябр. б. 71-73.

23. Зикриллаев Н.Ф., Абдурахмонов Б.А., Саитов Э.Б., Аюпов К.С., Ковешников С.А. Самоорганизация упорядоченных наноструктур на поверхности кремния // Возобновляемый источник энергии: технологии и установки. Материалы конференции. Ташкент, 2016. С. 184-188.

24. Саитов Э.Б. Возможность создания высокоэффективных солнечных фотоэлементов на основе кремния. «Физика фанининг ривожиди истедодли ёшларнинг ўрни» «Илмий амалий конференция мақолалар тўплами» 2015 й. Б. 381-385.

25. Зикриллаев Н.Ф., Саитов Э.Б. Кремний кристаллидаги никель атомлари кластерларининг тартибини ўрганиш. Республика илмий амалий анжумани, «Яримўтказгичлар физикасининг долзарб муаммолари» ЎзМУ Тошкент 2014 йил, 22 ноябр. б. 73-76.

26. Зикриллаев Н.Ф., Саитов Э.Б. Микро ва нано герероўтишли фотоэлементларни тайёрлашда диффузия жараёнининг ўрни// «Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари» Республика илмий амалий анжумани материаллар тўплами Андижон 4-5 декабрь 2015 й, Б.186-189.

27. Зикриллаев Н.Ф., Тачилин С.А., Саитов Э.Б., Мухтаров Н.Ш. Интегральный фотоэлемент с аномально большим напряжением. Нанотехнология ва қайта тикланадиган энергия манбалари; муаммолари ва ечимлари Республика илмий амалий анжумани. Қарши 2012 йил, б. 80-82.

28. Бохадирханов М.К., Абдурахмонов Б.А., Саитов Э.Б. Микро кластерлар-кремний структура асосида ташкил топган Шоттки диод хусусиятлари.//Бухоро давлат Университетида «Замоनावий физиканинг долзарб муаммолари» мавзусида республика илмий-амалий анжумани. 2012 йил 30 ноябрь. Б. 55-57.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«Тил ва адабиёт таълими» таъририятида таърирдан ўтказилди.
(26.07.2018 йил)

Босишга рухсат этилди: 26.07.2018 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 3,9. Адади: 100. Буюртма: № 274

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.