

**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

ИСАМОВ СОБИРЖОН БОЛТАЕВИЧ

**КЎП ЗАРЯДЛИ НАНОКЛАСТЕРЛАРГА ЭГА БЎЛГАН
КРЕМНИЙДА ФОТОЭЛЕКТРИК ҲОДИСАЛАРНИНГ ЎЗИГА ХОС
ЖИҲАТЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

ТОШКЕНТ–2018

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

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

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

Исамов Собиржон Болтаевич

Кўп зарядли нанокластерларга эга бўлган кремнийда фотоэлектрик
ҳодисаларнинг ўзига хос жиҳатлари 3

Исамов Собиржон Болтаевич

Особенности фотоэлектрических явлений в кремнии с
многозарядными нанокластерами 21

Isamov Sobirjon Boltayevich

Particularities of photoelectric phenomena in silicon with multiple
charged nanoclusters 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 43

**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

ИСАМОВ СОБИРЖОН БОЛТАЕВИЧ

**КЎП ЗАРЯДЛИ НАНОКЛАСТЕРЛАРГА ЭГА БЎЛГАН
КРЕМНИЙДА ФОТОЭЛЕКТРИК ҲОДИСАЛАРНИНГ ЎЗИГА ХОС
ЖИҲАТЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

ТОШКЕНТ–2018

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (DhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.2.PhD/FM81 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: **Баходирхонов Муҳаммад Кабир**
физика-математика фанлари доктори, профессор, академик

Расмий оппонентлар: **Расулов Рустам Явкочович**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Арипов Хайрулла Кабулович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: **«Физика-Қуёш» илмий ишлаб чиқариш бирлашмаси**

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).

А.Т.Мамадолимов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси
ўринбосари ф.-м.ф.д., профессор, академик

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

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда бугунги кунда жадал ривожланаётган яримўтказгичлар физикаси соҳасида долзарб йўналишлардан бири кремний кристалл панжарасида ҳажмий наноўлчамли кластерларни ҳосил қилиб, унинг фундаментал параметрларини ўзгартирган ҳолда янги материаллар олишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Шу жумладан, кўп каррали зарядланган нанокластерларни кремний кристалли ҳажмида шакллантириш ва унинг истиқболли функционал имкониятларини очишга ҳамда бу материални микроэлектроникада ва материалшунослиқда ва бошқа соҳаларда ишлатишга қаратилган тадқиқотларни олиб бориш муҳим вазифалардан бири бўлиб ҳисобланади.

Бугунги кунда дунёда кремнийнинг фотоэлектрик ва фундаментал хоссаларини тубдан ўзгаришига олиб келувчи зарядлар қиймати учдан юқори бўлган нанокластерларни ҳосил қилишга катта эътибор қаратилмоқда. Бу борада, мақсадли илмий изланишларни қуйидаги йўналишларда олиб бориш муҳим вазифалардан ҳисобланади: кремний кристалл панжарасида кўп каррали зарядланган нанокластерларни ҳосил қилиш; кремнийда зарядлар кўчиш жараёнига кўп каррали зарядланган нанокластерларнинг таъсирини аниқлаш; кремнийнинг фотоэлектрик ва фундаментал хоссаларини, унда марганец атомларининг кўп зарядли нанокластерларини ҳосил қилиш билан бошқариш; кўп каррали зарядланган нанокластерлари мавжуд кремний асосида янги турдаги яримўтказгич асбоблар ишлаб чиқиш имкониятларини кўрсатиб бериш.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясида белгиланган вазифаларни амалга оширишда илмий ва инновация ютуқларини амалиётга кенг жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда¹. Фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб қувватлаш йилида олинган илмий натижаларни ҳозирги замон талабларига жавоб берадиган даражага олиб чиқиш алоҳида эътиборга сазовор. Жумладан, микроэлектроника ва яримўтказгичли асбоблар учун асосий материал ҳисобланган кремнийнинг кристалл панжарасида нанокластерлар ҳосил қилиб, унинг асосида янги турдаги материаллар олиш технологиясини ривожлантириш масалалари муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Бу борада, нанокластерли кремнийнинг янги хоссаларини кашф қилиш ва унинг хусусиятлари асосида тубдан янги бўлган фотоқабулқилгичлар ва «фотонлар санагичи» туридаги яримўтказгич асбобларни яратиш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февридаги «Ўзбекистон республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ПФ–4947-сон Фармони, 2017 йил 13 февралдаги

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

ПҚ–2772-сон «2017–2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ҳамда 2017 йил 17 февралдаги ПҚ–2789-сон «Фанлар академиясининг фаолиятини, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ва мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. 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 Ж.И.Альферов (Россия) яримўтказгичли гетероструктураларни, Исаму Акасаки (Япония), Хироси Аmano (Япония) ва Сюдзи Накамурелар (США) кўк ёруғлик диодларини яратишганликлари учун Нобель мукофоти билан тақдирланишган. Яримўтказгичларнинг фотоэлектрик параметрлари асосан турли хил киришма атомларини кристалл панжарага киритиш билан бошқарилади. Бундай технологиялар ва улар асосида олинган фотосезгир материалларнинг хусусиятлари назарий ва амалий жиҳатдан С.М.Рывкин, А.Роуз, Р.Бьюп, С.Г.Калашников сингари таниқли олимлар томонидан яхши ўрганилган. Улар томонидан фотоўтказувчанликнинг назарияси нафақат фотоўтказувчанлик механизми ва кинетикаси асосида тушунтириб берилмасдан, балки янги манфий фотоўтказувчанлик, қолдиқ фотоўтказувчанлик, фотоўтказувчанлик релаксациясини узоқ вақт давом этиши, фотосезгирлик эффекти, фотоўтказувчанликнинг инфрақизил нур ва ҳарорат таъсирида сўниши, люкс-ампер тавсифнинг суперчизиқлилиги каби фотоэлектрик ҳодисалар кузатилган ва рўй бериш механизмлари назарий асослаб берилган.

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

Сирт қисмида наноўлчамли структураларга эга бўлган яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг кўчиши билан боғлиқ физик ҳодисаларнинг таҳлилига бағишланган тажриба ва назарий тадқиқотлар бу соҳанинг имкониятлари янада кенглигини кўрсатмоқда. Бироқ шу даврга қадар кристалл панжарасида учдан ортиқ зарядли нанокластерлари мавжуд бўлган кремнийнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссалари ўрганилмаган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасидаги илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.

Диссертация иши Тошкент давлат техника университети «Рақамли электроника ва микроэлектроника» кафедраси илмий тадқиқот режасига мос бўлиб, МТ-83/2013 рақамли «Нановаризон структурали кремний асо-сида спектрал сезиш соҳаси кенг бўлган (0,1÷3 мкм) янги турдаги фотоэлементларни ишлаб чиқиш ва тайёрлаш» (2014–2015 йй.) номли Ўзбекистон-Туркманистон халқаро илмий-тадқиқот лойиҳаси, Ф2-44 рақамли «Ярим-ўтказгичларда киришма атомларининг ўз-ўзини ташкиллаштириш механизмини ва уларнинг параметрларини бошқаришни тадқиқ қилиш» (2012–2016 йй.), ОТ-Ф2-55 «Янги функционал имкониятларга эга наноматериалларнинг янги синфи сифатидаги киришма атомларининг нанокластерларини шаклланиши негизда ҳажмий структуралашган кремний олишининг илмий асосларини ишлаб чиқиш» (2017–2020 йй.) мавзусидаги фундаментал лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади кремний кристалл панжарасида ҳосил қилинган заряди учдан катта бўлган нанокластерларни материалнинг фото-электрик ва фундаментал хоссаларига таъсирларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

кремнийда нанокластерларнинг зарядланиш қарралигини бошқариш имконини берувчи диффузион легирлашнинг термодинамик шароитларининг оптимал параметрларини аниқлаш;

кўп қаррали зарядланган нанокластерлар мавжуд кремнийда ток ташувчилар кўчишининг ўзига хос жиҳатларидан зарядларнинг ҳаракатчанлиги ҳамда ўтказувчанлигининг ҳароратга боғлиқлигини аниқлаш;

кўп қаррали зарядланган нанокластерлар мавжуд кремнийнинг фото-электрик хоссаларини тадқиқ қилиш;

ҳажмида кўп қаррали зарядланган нанокластерлар мавжуд кремнийнинг энергетик соҳа моделини яратиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида ҳажмида марганец атомларининг кўп қаррали зарядланган нанокластерлари мавжуд монокристалл кремний олинган.

Тадқиқотнинг предмети зарядланганлик қиймати учдан катта бўлган марганец атомлари нанокластерларини кремнийнинг электрик ва фотоэлектрик хоссаларига ўзига хос таъсиридан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Ишни бажаришда ва қўйилган масалани ўрганишда атом кучли микроскопи, электрон парамагнит резонанс спектрометрияси, рентгенструктурали таҳлил каби замонавий усуллардан фойдаланилди. Намуналарнинг асосий электрофизик катталиклари Холл эффекти усули ёрдамида аниқланди. Заряд ташувчиларнинг яшаш вақти «фотоўтказувчанликнинг модуляцияланган ёруғлик оқимини частотасига боғлиқлиги» усулидан фойдаланиб аниқланди. Намуналарнинг фотоэлектрик хоссаларини тадқиқ этишда ҳароратни суяқ азот ҳароратидан (77 К) хона ҳароратигача бошқариш имконини берадиган

махсус криостат билан жиҳозланган ИКС-21 русумли спектрометрдан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

диффузион легирлаш ёрдамида зарядланиш карралигини учдан катта бўлган нанокластерли кремний олиш имконини берувчи технологиянинг термодинамик шароитлари аниқланган;

нанокластерлар зарядининг қийматини ёруғлик таъсирида камайиши ва электр майдон таъсирида заряд ташувчиларнинг кўп каррали зарядланган марказларда сочилишини сусайиши сабабли ўрганилаётган намуналарда заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги ёритилганлик интенсивлиги таъсирида 3÷5 мартага ва электр майдон кучланганлиги таъсирида 2,5 мартагача ошиши аниқланган;

кўп каррали зарядланган нанокластерлар атрофида электронларнинг энергетик ҳолатларини қайта тақсимланиши туфайли нанокластерли кремний 100 К ҳароратда 10 микрометрли инфрақизил нурланишни қайд эта олиши аниқланган;

кўп каррали зарядланган кластер атрофида кучли электр майдон ҳосил бўлиши ҳисобига Франц-Келдыш назариясига асосан кремнийнинг локал соҳаларида ўзгарувчан зонали структура пайдо бўлиши туфайли 0,12÷0,75 эВ спеткр оралиғида катта фотосезгирлик аниқланган;

кўпзарядли нанокластерлар орасидаги потенциал чуқурликда жойлашган ковакларнинг энергетик сатҳларига электронларни туннелланиши натижасида намуналарни қўшимча оқ ёруғлик фонисиз инфрақизил нур билан ёритилганда фотоўтказувчанликнинг максимум камайиши кузатиладиган энергияни 0,43 эВ дан 0,55 эВ гача силжиши аниқланган;

потенциал чуқурликда жойлашган коваклар билан кластерлар ютиб олган электронлар орасида рекомбинация бўлмаслиги туфайли 0,15÷0,4 эВ спектрал ораликда релаксация вақти 10^3 с га тенг бўлган катта қийматдаги киришмали қолдиқ фотоўтказувчанлик аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

кремний кристалл панжарасида зарядлар карралиги учдан катта бўлган нанокластерларни ҳосил қилиш технологияси ишлаб чиқилган;

кўп каррали зарядга эга марганец атомларининг нанокластерлари таъсирида кремнийнинг спектрал сезгирлик соҳасини ошириш усули ишлаб чиқилган. Бу ўз навбатида кремний асосида инфрақизил нур спектрнинг $\lambda=10$ мкм соҳасигача сезувчи фотоприёмникларни ишлаб чиқишга имкон берган;

кўп каррали зарядга эга марганец атомларининг нанокластерлари таъсирида заряд ташувчилар релаксация вақтини ошиши ҳисобига «фотонлар санагичи» туркумидаги датчикларни яратиш имкони борлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги бир бирига боғлиқ бўлмаган маълумотларни ўлчаш ва ишлов бериш усулларининг мажмуасидан фойдаланилганлиги, шунингдек, уларни яримўтказгичлар физикаси ва техникасини замонавий тушунчаларига мослиги билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кўп каррали зарядга эга марганец атомларининг нанокластерлари таъсирида кремнийда кузатиладиган фотоэлектрик ҳодисаларнинг ўзига хос жиҳатлари аниқланганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти кўп каррали зарядга эга марганец атомларининг нанокластерларини кремний кристалл панжарасида ҳосил қилиш билан унинг асосида инфрақизил нурларни 10 мкм гача сезувчи фотоқабулқилгичлар, «фотонлар санагичи» каби асбобларни яратиш мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Кремний кристалл панжарасида ҳосил қилинган заряди учдан катта бўлган нанокластерларни материалнинг фотоэлектрик ва фундаментал хоссаларига таъсирларини аниқлаш асосида:

марганец атомларининг кўп каррали зарядланган кластерлари мавжуд кремнийнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини тадқиқ натижалари «FOTON» акциядорлик жамиятида яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқишда қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2017 йил 6 октябрдаги 02-2073-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши детекторлар тайёрлаш технологиясини такомиллаштириш имконини берган;

кремнийнинг фотоўтказувчанлигини кўп каррали зарядланган нанокластерлар таъсирида бошқариш «Наноўзгарувчан соҳали кенг спектрал сезгирликка эга (0,1–3 мкм) янги фотоэлементларни тайёрлаш ва ишлаб чиқиш» (2012–2015) грант лойиҳада тажриба натижаларини қайта ишлашда қўлланилган (Туркменистон Фанлар академияси Куёш энергияси институтининг 2017 йил 9 ноябрдаги 161/170-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш наноструктурали Шоттки тўсиқларининг фотосезгирлигини ошириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 6 та халқаро ва 8 та республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 25 та илмий иш чоп этилган, булардан 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 10 та мақола нашр этилган.

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

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг **«Нанокластерли яримўтказгичларнинг оптик ва фотоэлектрик хоссаларининг таҳлили»** деб номланган биринчи бобида илмий адабиётларда келтирилган маълумотлар асосида квант ўлчамли структураларнинг яримўтказгичли материалларнинг фотоэлектрик хоссаларига таъсирини ўрганишдаги муаммолар таҳлил этилган.

Мавжуд назарий ва тажрибавий маълумотлар таҳлили асосида тадқиқотнинг вазифалари шакллантирилган.

Ишни бажаришда ва тадқиқот вазифаларида белгиланган асосий амалга оширилиши режалаштирилган илмий изланишлар қуйидагилардан иборат: нанокластерларнинг зарядланиш карралигини бошқариш имконини берувчи диффузион легирлашнинг термодинамик шароитларини ва тадқиқотлар учун зарур бўлган кремний материалининг оптимал параметрларини аниқлаш; кўп каррали зарядланган нанокластерлари мавжуд кремнийда зарядлар кўчишининг ўзига хос жиҳатларини ҳаракатчанлик ва ўтказувчанликнинг ҳароратга боғлиқлиги асосида тадқиқ қилиш; кўп каррали зарядланган нанокластерлар мавжуд кремнийда кузатиладиган фотоэлектрик ҳодисаларни тадқиқ қилиш ва унинг энергетик соҳа моделини яратиш.

Диссертациянинг **«Кремнийда кўп каррали зарядга эга нанокластерларни ҳосил қилишнинг диффузион технологияси ва уни тадқиқ этиш усуллари»** деб номланган иккинчи боби диффузион легирлашнинг технологик хусусиятларини ўрганишга, дастлабки кремний материалининг параметрларини танлашга ҳамда кремний кристали ҳажмида кўп каррали зарядланган нанокластерларни ҳосил қилиб, талаб этилган электрофизик параметрга эга кремний олишга бағишланган.

Намуналарнинг асосий электрофизик параметрлари Холл усули ёрдамида аниқланган. Олинган намуналарнинг фундаментал электрофизик параметрларини аниқлашда рентген структурали таҳлил, ЭПР спектрометр, ХИА-200 атом кучли микроскоп сингари замонавий усуллар ва қурилмалардан фойдаланилди.

Учинчи боб **«Марганец атомлари нанокластерлари ҳосил қилинган кремнийда зарядлар кўчишини тадқиқ этиш»**га бағишланиб, унда кремнийнинг электрофизик параметрларини марганец киришма атомлари кўп каррали зарядланган нанокластерлари таъсирида ўзгаришларини ўрганиш натижалари келтирилган.

Марганец атомлари кўп каррали зарядланган нанокластерларининг энергетик тавсифлари кремний намунасига қўйилган электр токи таъсирида заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлигининг камайиши марказларнинг ҳажмий заряди таъсирида тўсиб қолиниши эффекти орқали тушунтирилди. Намунага қўйиладиган электр майдон қийматини ўзгартириш билан фотосезгирликнинг спектрал сезгирлик соҳаси ва чегаравий сезгирлик қийматини бошқариш мумкинлиги кўрсатилган.

Фотоўтказувчанликнинг ҳароратга боғлиқлигини ўрганишда олинган натижалар паст ҳароратларда тадқиқ этилаётган намуналарда $E_1=E_V+0,2$ эВ, $E_2=E_V+0,15$ эВ, $E_3=E_V+0,17$ эВ, ва $E_4=E_V+0,22$ эВ ионлашиш энергиялари мавжудлигини кўрсатди.

1-жадвал.

Нанокластерли кремний намуналарининг асосий электрофизик параметрлари

ρ , Ом·см	Заряд ташувчиларнинг тури ва концентрацияси, $p, n, \text{см}^{-3}$	Ток ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги $\mu, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	E_F , эВ	Зарядланганлик даражаси	Марганец атомларининг зарядланганлик ҳолати
$1,5 \div 2 \cdot 10^2$	$p=1,69 \cdot 10^{14}$	$189 \div 197$	0,297	+7	Mn^{++}
$2,5 \div 3 \cdot 10^2$	$p=1,26 \cdot 10^{14}$	$164 \div 167$	0,303	+7	Mn^{++}
$8 \div 9 \cdot 10^2$	$p=7,98 \cdot 10^{13}$	$86 \div 90$	0,315	+7	Mn^{++}
$7 \div 8 \cdot 10^3$	$p=1,22 \cdot 10^{13}$	$63 \div 64$	0,363	+7	Mn^{++}
$1 \div 1,2 \cdot 10^4$	$p=6,85 \cdot 10^{12}$	$75 \div 78$	0,378	+6	$\text{Mn}^{++} > \text{Mn}^+$
$1,5 \div 2 \cdot 10^4$	$p=3,86 \cdot 10^{12}$	$81 \div 83$	0,393	+5	$\text{Mn}^{++} \sim \text{Mn}^+$
$3 \div 4 \cdot 10^4$	$p=1,59 \cdot 10^{12}$	$93 \div 97$	0,415	+4	$\text{Mn}^{++} \sim \text{Mn}^+$
$1 \div 1,2 \cdot 10^5$	$p=3,28 \cdot 10^{11}$	$158 \div 164$	0,457	+4	$\text{Mn}^{++} \leq \text{Mn}^+$
$1 \div 1,2 \cdot 10^5$	$n=6,76 \cdot 10^{10}$	$958 \div 965$	0,508	+3	$\text{Mn}^{++} < \text{Mn}^+$
$4 \div 5 \cdot 10^4$	$n=1,44 \cdot 10^{11}$	$1198 \div 1210$	0,491	+3	$\text{Mn}^{++} < \text{Mn}^+$
$2 \div 3 \cdot 10^3$	$n=2,08 \cdot 10^{12}$	$1098 \div 1110$	0,416	+3	Mn^+

Худди шу намуналарда фотоўтказувчанлик нисбатан юқори ҳароратларда ($T=200 \div 300$ К) ўрганилганда $E_1=E_V+0,35$ эВ, $E_2=E_V+0,41$ эВ, $E_3=E_V+0,43$ эВ ларга тенг энергетик сатҳлар кузатилди. Бунда акцептор хусусиятга эга $E_{A1}=E_V+(0,15 \div 0,2)$ эВ ва $E_{A2}=E_V+(0,35 \div 0,43)$ эВ га тенг икки гуруҳдаги энергетик сатҳлар аниқланди. Кремнийга марганец атомлари оддий диффузион усул билан легирланганда, бундай акцептор энергетик сатҳлар ҳосил бўлмайди.

Яратилган паст ҳароратли диффузия усули билан олинган намуналарда нанокластерларнинг заряд ҳолати ва кремнийнинг солиштирма қаршилигига мос ҳолда электронлар ва ковакларнинг Холл ҳаракатчанликларини хона ҳароратидаги ўртача қийматлари ҳақидаги маълумот 1-жадвалда келтирилган.

Юқори ҳароратли диффузия усули асосида олинган марганец атомлари билан легирланган нанокластерларсиз намуналарда электронлар ва ковакларнинг ҳаракатчанлиги ҳақидаги маълумот 2-жадвалда берилган.

Кластерларнинг зарядланганлик ҳолати, дастлабки намуналардаги бор (В) атомларининг концентрацияси билан намунанинг Ферми сатҳига мос келувчи зарядга эга (Mn , Mn^+ , Mn^{++}) киришма марганец атомларининг концентрацияси ўртасидаги боғлиқлик асосида аниқланди.

2-жадвал.

Нанокластерсиз кремний намуналарининг асосий электрофизик параметрлари

ρ , Ом·см	Тур	μ , см ² /В·с	E_F , эВ	Марганец атомларини заряд ҳолати
$3 \div 4 \cdot 10^2$	p	345	0,322	Mn^{++}
$5,5 \div 6 \cdot 10^3$	p	268	0,391	$Mn^{++} > Mn^+$
$7 \div 7,5 \cdot 10^4$	p	220	0,451	$Mn^{++} < Mn^+$
$6 \div 7 \cdot 10^3$	n	1220	0,436	$Mn^+ > Mn^{++}, Mn^0$
$6 \div 7 \cdot 10^4$	n	1248	0,496	$Mn^{++} < Mn^+$

Жадваллардан кўришиб турибдики, нанокластерли кремнийдаги заряд ташувчиларининг ҳаракатчанлиги оддий кремнийникидан анча кичик. Бу асосан Ферми сатҳи $E_F=(E_V+0,3 \div E_V+0,41)$ эВ бўлган намуналарда кузатилди. Солиштирма қаршиликлари ўзаро мос келадиган нанокластерли намуналарнинг ҳаракатчанлиги қиймати нанокластерсиз намуналарникига нисбатан 2,5÷3 марта кичиклиги тажриба натижалари асосида аниқланди.

Тадқиқот жараёнида ўрганилаётган намуналарда заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги кластерларни заряд ҳолатига кучли боғлиқ бўлиши билан тушунтирилди.

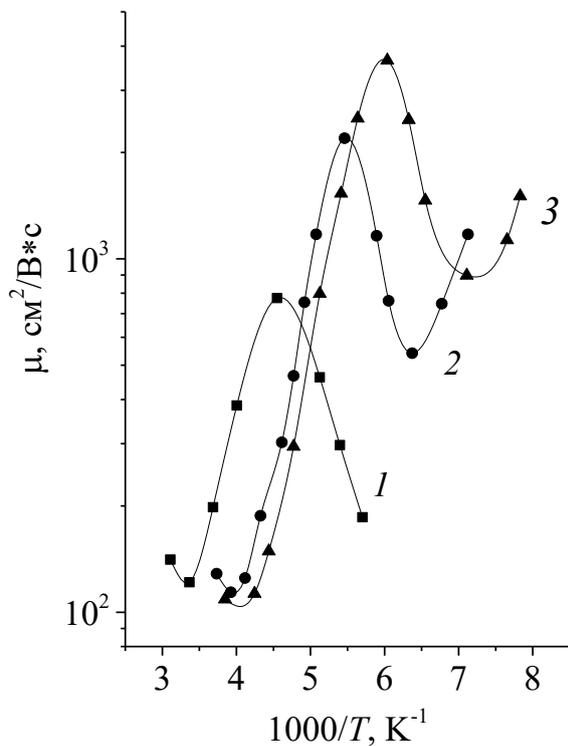
Кластерларнинг зарядланганлик қиймати катта бўлган намуналарда коваклар ҳаракатчанлигининг ҳароратга боғлиқлиги ғайриоддий ва номонотон тавсифга эга бўлиши кузатилди. Олинган тажриба натижаларини тадқиқ этилаётган ҳарорат оралиғида яримўтказгичлардаги мавжуд сочилиш механизмлари билан тушунтириб бўлмайди.

Кўп каррали зарядланган нанокластерлар мавжуд намуналарда ковакларнинг ҳаракатчанлигини ёритилганлик ва электр майдон таъсирида стимулланиш ҳодисаси аниқланди.

Интенсивлиги кичик интеграл ёруғлик билан ёритилган марганец нанокластерларига эга p -турдаги кремнийдаги ковакларнинг ҳаракатчанлигини ҳароратга боғлиқлиги 1-расмда келтирилган.

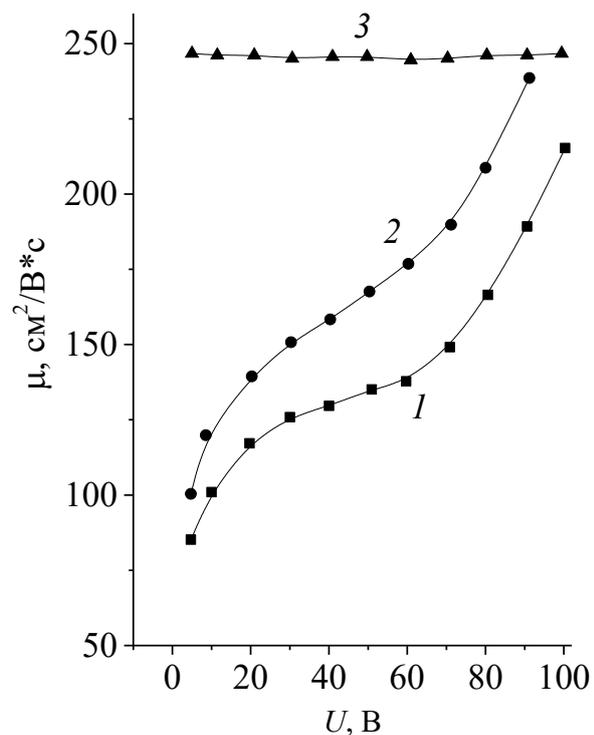
Ёруғлик $\mu=f(T)$ боғланишининг шаклига амалда кам таъсир этади, бироқ ёруғлик интенсивлиги ошиши билан $T_{мин}$ ва T_{max} ларнинг қийматлари паст ҳарорат томонга силжийди, бундан ташқари T_{max} да коваклар ҳаракатчанлигининг қиймати ёритилмаган вақтдагига қараганда 3÷5 марта катта бўлди, яъни ёруғлик таъсирида коваклар ҳаракатчанлигининг «стимулланиш» эффекти кузатилди. Ҳароратнинг камайиб бориши билан иккинчи минимум $T_{мин2}$ ҳосил бўлди, янада паст ҳароратларда ҳаракатчанликнинг қиймати кўтарила бошлади. Агар ёруғлик интенсивлиги юқори бўлса ($I>50$ люкс), аниқланган эффектлар кескин сусайди ва ҳароратга боғлиқлик хусусиятини йўқотди.

Намуналарда коваклар ҳаракатчанлигининг ўзгариш механизмини тушунтириш мақсадида ҳаракатчанлик қийматига ташқи электр майдон таъсири ўрганилди (2-расм).



1 – қоронғуликда, 2 – $L = 2$ люкс,
3 – $L = 5$ люкс.

1-расм. Қўп зарядли марказларга эга кремнийда коваклар ҳаракатчанлигининг ҳароратга боғлиқлиги, $E=5$ В/см



1 – нанокластерли p -Si, $\rho \sim 10^4$ Ом·см,
2 – нанокластерли p -Si, $\rho \sim 10^3$ Ом·см,
3 – нанокластерсиз p -Si, $\rho \sim 10^3$ Ом·см.

2-расм. Марганец киришма атомли кремний намуналарида заряд ташувчилар ҳаракатчанлигининг электр майдонга боғлиқлиги, $T=100$ К

Солиштирма қаршиликлари ўзаро мос келувчи марганец атомлари нанокластерлари мавжуд бўлмаган намуналарда ҳаракатчанлик ўрганилган

электр майдон оралиғида, электр майдон заряд ташувчиларининг ҳаракатчанлигига деярли таъсир этмади. Бу электр майдон қиймати кичик бўлганда яримўтказгичларда ток ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги қўйилган электр майдон катталигига боғлиқ эмас деган илмий маълумотга мос келади.²

Диссертациянинг «Марганецнинг кўп зарядли нанокластерлари мавжуд кремнийда янги турдаги фотоэлектрик ҳодисалар» деб номланган тўртинчи бобида марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремнийда кузатиладиган янги фотоэлектрик ҳодисаларни ўрганишдаги натижалар келтирилган.

Диссертацияда фотоэлектрик хоссаларни аниқлаш учун махсус криостат билан жиҳозланган ИКС-21 спектрометр қурилмасидан фойдаланилди. Қурилмада электр майдон қийматини ҳамда ИҚ-нурланишнинг қувватини кенг оралиқда бошқариш имконияти мавжуд. Интеграл нур тушишини олдини олиш ва ИҚ нурланиш фотонларининг энергиясини $h\nu \leq E_g$ бўлишини таъминлаш учун криостат дарчаси олдида ва монохроматорни киришига сайқалланган кремний пластинкалари ўрнатилди. Намуналарнинг ўлчами $8 \times 3 \times 0,7$ мм³ ва қўйилган электр майдон кучланганлиги $E=5$ В/см га тенг қилиб танлаб олинди. Тажриба жараёнида намунанинг юзасини тўлиқ ёритилиши таъминланди. ИҚ нурнинг қуввати махсус металл тўрли фильтрлар билан бошқарилди ва унинг қиймати лазер нурларининг қувватини ўлчовчи ИМО-2Н русумдаги асбоб билан аниқланди.

Кўп зарядли марказга эга кремний намуналарининг киришмали фотосезгирлиги спектрал соҳасининг 10 мкм гача ($T > 100$ К) кенгайиши аниқланди. Чуқур сатҳ ҳосил қилувчи киришмалар билан легирланган нанокластерларсиз намуналарда бу ҳодиса кузатилмади.

Тадқиқот натижаларининг таҳлили фотоэлектрик ҳодисалари ўрганилаётган намуналарда қуйидаги ўзига хос жиҳатлар мавжудлигини кўрсатди:

фотожавоб $h\nu=0,12$ эВ ($\lambda=10$ мкм) да бошланди;

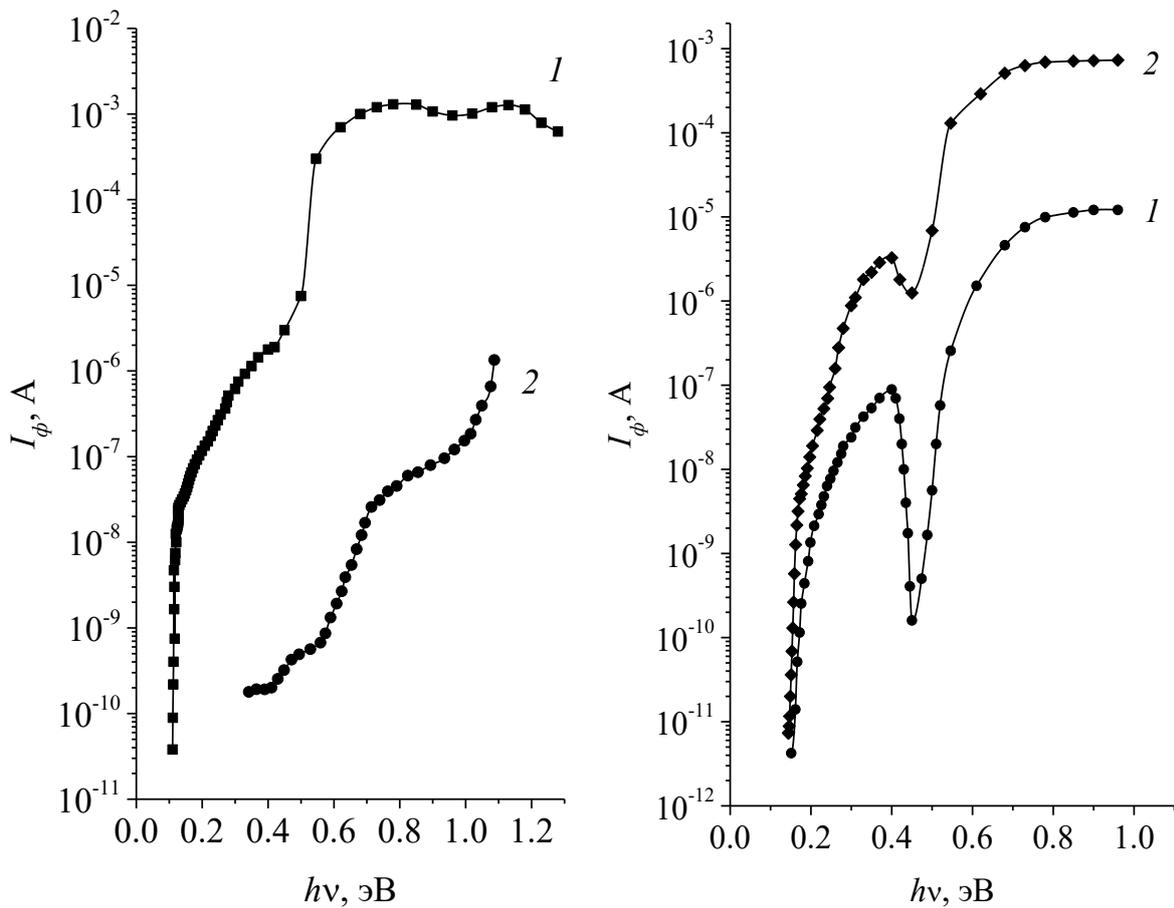
тушаётган ИҚ нур фотонларининг энергиясини ошиши билан фототок $h\nu=0,4$ эВ (3 мкм) гача узлуксиз ошиб борди, фотонлар энергиясининг янада ошишида ($h\nu > 0,4$ эВ) квантлар энергиясининг $h\nu=0,4 \div 0,65$ эВ соҳасида фототокнинг қиймати (1,5 ÷ 3 тартибга) сакраш йўли билан ошди. Фототок ўзининг максимал қийматига $h\nu=0,75 \div 0,8$ эВ да эришди. Натижада киришмали фототокнинг жуда катта қийматда ошиши кузатилди, унинг карралиги $10^8 \div 10^9$ ни ташкил этди (3-расм);

марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремнийда фототокнинг қиймати $h\nu=0,75 \div 0,8$ эВ бўлганда хусусий фотоўтказувчанлик қийматига яқин даражага эришди.

² Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. пособие. – М.: Высшее образование; Юрайт-Издат, 2009. С. 32.

Шундай қилиб, ўрганилаётган намуналарда киришмали фотоўтказувчанлик ИҚ нурнинг $\lambda=1,5\div 10$ мкм оралиғида жуда катта қийматга ошди, айниқса, $\lambda=1,5\div 1,6$ мкм соҳада фотосезгирликнинг қиймати кремнийни хусусий ўтказувчанлигидан амалда фарқ қилмайди (3-расм).

Тадқиқ этилаётган намуналар ИҚ нурни $h\nu=0,43$ эВ энергияси билан ёритилганда киришмали инфрақизил сўниш ҳодисаси кузатилди. Солиштирма қаршилиқлари $\rho=2\cdot 10^3$ ва $\rho=10^4$ Ом·см бўлган марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд p -турдаги кремнийнинг фотоўтказувчанлигини спектрал боғлиқлиги 4-расмда тасвирланган. Расмдан кўришиб турибдики, фотосезгирлик $h\nu=0,12$ эВ дан бошланади ва тушувчи нур энергиясининг ошиши билан фототок $h\nu=0,4$ эВ гача узлуксиз ошиб боради. Фотонлар энергиясини янада ошиши фототокнинг камайишига олиб келди, яъни фотоўтказувчанликни инфрақизил нур таъсирида сўниши (ИҚС) фақатгина киришмали ($h\nu \leq E_g$) ёруғлик таъсирида кузатилди. ИҚС эффеќти ўзининг максимум қийматига $h\nu=0,43$ эВ да эришди.

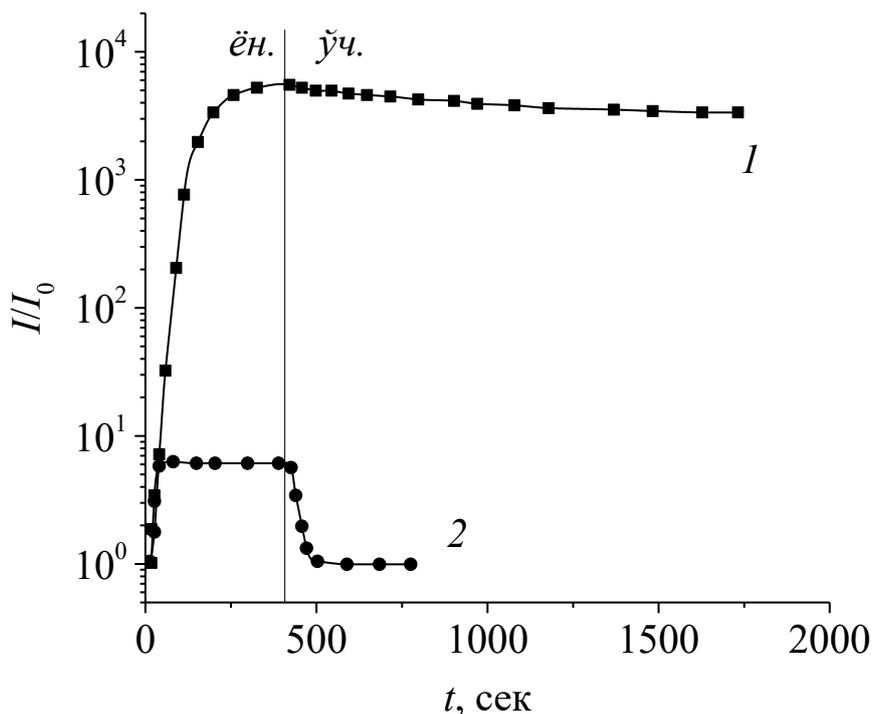


1 – марганец нанокластерлари мавжуд кремний, 2 – нанокластерсиз кремний.

1 – $\rho \sim 10^4$ Ом·см; 2 – $\rho \sim 2 \cdot 10^3$ Ом·см.

3-расм. Фотоўтказувчанликнинг спектрал боғлиқлиги, $E=5$ В/см, $T=100$ К

4-расм. Марганец нанокластерлари мавжуд кремний фотоўтказувчанлигининг спектрал боғлиқлиги (ИҚС), $E=5$ В/см, $T=100$ К



1 – *p*-тур, 2 – *n*-тур намуна; $h\nu=0,2$ эВ, $E=5$ В/см.

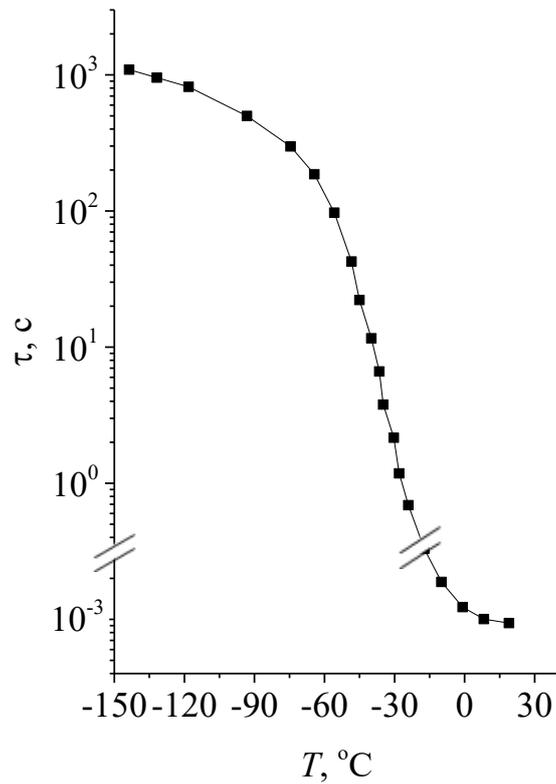
5-расм. Кластерли кремний фототокининг $h\nu \leq E_g$ ИҚ нур энергияси импульси таъсирида ошиши ва камайиши (қолдиқ фотоўтказувчанлик), $T=100$ К.

ИҚ нур энергиясининг $h\nu=0,2 \div 0,4$ эВ соҳасида аномал киришмали қолдиқ ўтказувчанлик аниқланди ҳамда вақт доимийси $\tau \sim 10^3$ с бўлган қолдиқ фотоўтказувчанликни узоқ вақт давом этувчи релаксацияси кузатилди.

Марганец атомлари билан легирланган *n*-турдаги кремнийда фотоўтказувчанлигининг релаксацияси 5-расмда (2-эгри чизиқ) тасвирланган. Бу ҳолатда марганец атомларининг кластерлари ҳосил бўлмасдан, киришма марганец атомлари алоҳида «атом» ҳолатлари Mn^0 , Mn^+ , Mn^{++} да бўлади. Ўрганиш натижалари шуни кўрсатдики, бундай намуналарда $h\nu=0,16 \div 0,4$ эВ соҳада фотосезгирлик кузатилмайди.

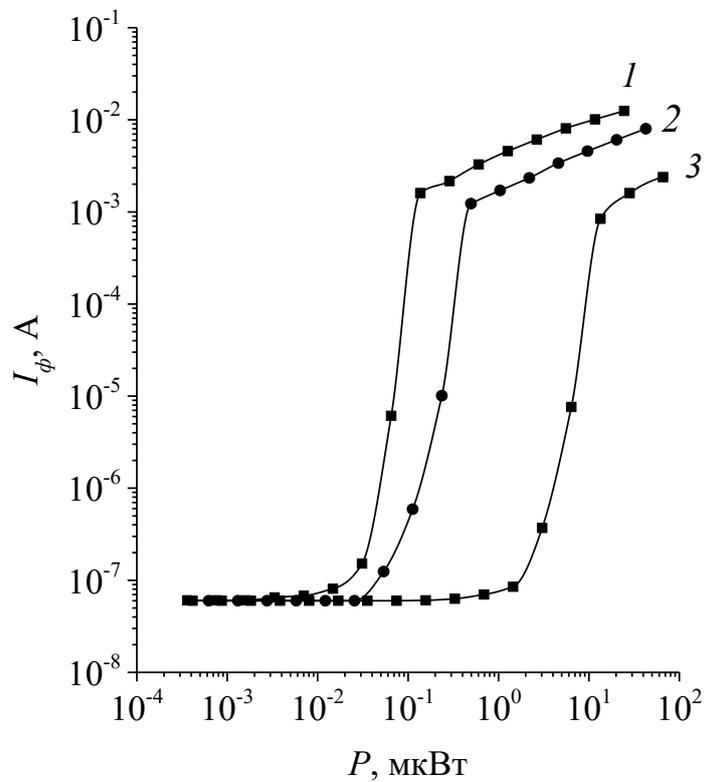
Таржибалар импульс кўринишида модуляцияланган $h\nu=0,5 \div 1,1$ эВ энергияли ИҚ-нур билан ёритилиб амалга оширилди. Расмдан кўриниб турибдики, бундай ҳолатда фотоўтказувчанликнинг релаксация вақти қисқа вақтда рўй берди. Олинган натижалар таҳлили асосида фотосезгирликнинг фотонлар энергияси $h\nu=0,12$ эВ қийматидан бошланиши ва фотоўтказувчанликнинг релаксациясини узоқ вақт давом этиши марганец атомларининг кўп қаррали зарядланган нанокластерлари билан боғлиқ деб хулоса қилиш имконини беради.

Тажриба натижалари асосида ток ташувчи ковакларнинг яшаш вақтининг қийматини ҳароратга ($T=77 \div 300$ К) боғлиқлиги аниқланди (6-расм).



$E=5$ В/см, $h\nu=0,73$ эВ.

6-расм. Кўп қаррали зарядланган марказлар мавжуд кремнийда заряд ташувчиларнинг яшаш вақтининг ҳароратга боғлиқлиги



1 – $h\nu=0,33$ эВ, 2 – $h\nu=0,55$ эВ, 3 – $h\nu=0,73$ эВ;
 $T=100$ К, $E=5$ В/см.

7-расм. Марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний намуналарининг ватт-ампер тавсифи

7-расмда нанокластерли намуналарга фотонларнинг турли энергиялари 0,33, 0,55, 0,73 эВ таъсиридаги ватт-ампер тавсифининг кўриниши тасвирланган. Расмдан кўриниб турибдики, энергияси $h\nu=0,33$ эВ бўлган кичик қувватли ИҚ нурланиш таъсирида фототок жуда секин ошиб боради, яъни $I_{\phi}(P)=6 \cdot 10^{-8} \cdot P^{0,0124}$ қонуниятга бўйсунувчи субчизикли тавсифга эга бўлади. Нурланишнинг қуввати $P=10^{-6}$ Вт бўлгандан бошлаб, фототокнинг қиймати кескин ошиб, супер чизикли $I_{\phi}(P)=3 \cdot 10^6 \cdot P^{4,13}$ қонуният асосида ўзгаради. Нурланишнинг қуввати $P=1,3 \cdot 10^{-5}$ Вт га етиши билан ватт-ампер тавсиф чизикли ўзгара бошлайди. Тушаётган фотонларнинг энергияси ошиши билан ($h\nu=0,55$ ва $0,73$ эВ) фототокнинг кескин ошиши (суперчизикли қисм) бошланадиган нурланиш қувватининг қиймати чегараси камроқ энергияли нурланиш томонга силжийди ва фототокнинг ўсиши тик бўлади (2- ва 3- эгри чизиклар).

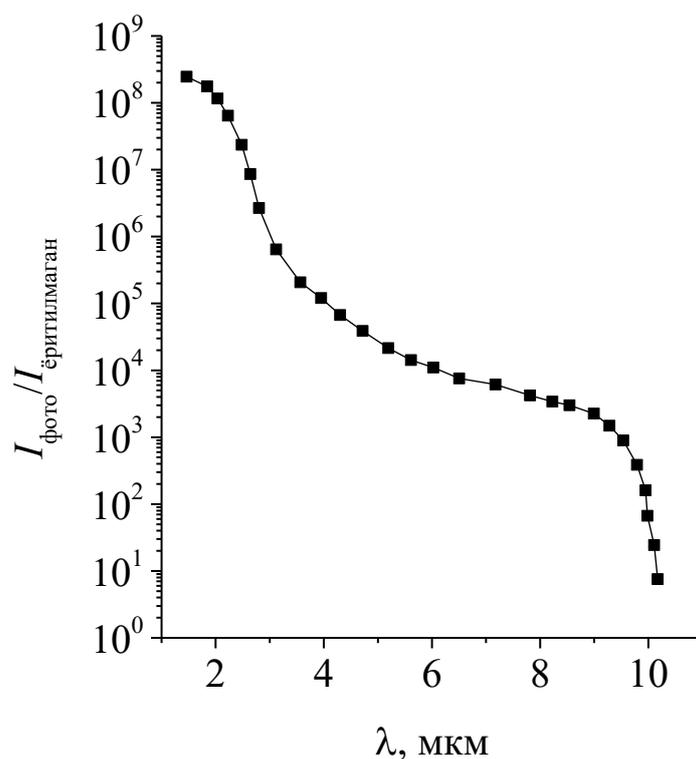
Олинган натижаларнинг таҳлили асосида кўп каррали зарядланган нанокластерлар мавжуд кремнийнинг энергетик соҳа тузилишининг модели таклиф этилди. Тажрибаларда кузатилган электрофизик ва фотоэлектрик ҳодисаларнинг физик моҳиятини таклиф этилган модел асосида яхши тушунтириш мумкин бўлди.

Диссертациянинг «**Кўп каррали зарядланган нанокластерлари мавжуд кремний асосида асбоблар ишлаб чиқиш**» деб номланган бешинчи бобида бошқа материаллар ёрдамида яратиб бўлмайдиган янги турдаги асбобларни ишлаб чиқишда кўп каррали зарядланган нанокластерлар мавжуд кремнийдан электроника саноатида фойдаланиш имкониятлари очиб берилган.

Кўп каррали зарядланган марказлари бор кремнийда аниқланган физик ҳодисалар асосида янги функционал имкониятларга эга бўлган ИҚ нурланишнинг кенг спектри ($\lambda=1,55 \div 10$ мкм) соҳасида ишлайдиган фотоқабулқилгичларни яратиш мумкинлиги кўрсатиб берилган бўлиб, бунга кремнийни чуқур энергетик сатҳ ҳосил қилувчи киришма атомлар билан оддий легирлаш орқали эришиб бўлмайди.

Турли хил ҳароратларда нанокластерли намуналарнинг фотоўтказувчанлигининг спектрга боғлиқлигини ўрганишда, ҳароратнинг $T=77 \div 200$ К оралиғида фотосезгирликнинг спектрал соҳасини кескин ўзгариб кетмаслиги аниқланди. Юқори ҳароратлар ($T > 200$ К) да эса, ўрганилаётган намуналарнинг фотосезгирлигининг камайиши ва спектрал соҳасининг торайиши кузатилди. Бу тажриба натижалари электроника саноатида амалий қўлланилишда катта аҳамиятга эга (8-расм).

Кўп каррали зарядланган нанокластерлар мавжуд кремний асосида $h\nu=0,12 \div 0,8$ эВ энергияли фотонларни қайд эта оладиган, яъни $\lambda=1,5 \div 10$ мкм соҳада ишлайдиган $S=0,5$ см² юзали фотоқабулқилгичнинг лаборатория намуналари тайёрланди.



$T=100$ К, $E=5$ В/см.

8-расм. Марганец атомларининг кўп каррали зарядга эга нанокластерлари мавжуд кремний фотоўтказувчанлигининг спектрга боғлиқлиги.

Тажрибалар асосида олинган натижалар таркибида кўп каррали зарядланган кластерлар мавжуд кремний намуналари асосида ИҚ нурланишнинг тўлқин узунлигини 10 мкм гача сезадиган фотоқабулқилгичларни яратиш имконияти мавжудлиги кўрсатиб берилди. Бундай фотоқабулқилгичлар ток ташувчи ковакларнинг яшаш вақти жуда катта бўлганлиги учун юқори сезувчанликка эга бўлади.

Кўп каррали зарядга эга кластерлар мавжуд кремнийнинг интенсивлиги турли хил бўлган «хусусий» ташқи интеграл нурланиш таъсирида ҳам $h\nu=0,4 - 0,8$ эВ соҳада ИҚ нурланишни сеза оладиган фотоқабулқилгич сифатида ишлаши мумкинлиги кўрсатиб берилди.

Диссертация ишимни бажаришда кўрсатилган ҳар тарафлама ёрдам учун илмий раҳбаримга ва ТДТУ «Рақамли электроника ва микроэлектроника» кафедраси барча жамоасига раҳмат айтаман.

ХУЛОСА

1. Паст ҳароратли икки босқичли диффузия усулидан фойдаланиб кўп каррали зарядга эга нанокластерлар мавжуд кремний намуналари олинди ва уларнинг мавжудлиги ЭПР қурилмасида ўрганилиб тасдиқланди.

2. Кўп каррали зарядга эга нанокластерлари мавжуд кремнийда ковакларнинг ҳаракатчанлиги оддий кремнийникидан $2.5 \div 3$ марта кичиклиги аниқланди ва унинг ҳароратга боғлиқлиги монотон бўлмаган тавсифга эга бўлиб, қиймати ёруғлик интенсивлигига кучли боғлиқлиги аниқланди.

3. Тадқиқот натижасида электр майдон қийматининг ўзгариши билан ўрганилаётган намуналарнинг фотосезгирлигини $I \sim U^{l+1}$ қонуният бўйича ўзгариши аниқланди, бу ерда ҳарорат ошиши билан даражанинг қиймати $2 \div 3$ оралиқда камайиб борди.

4. Киришмали фотоўтказувчанлик қиймати $0,75 \div 1,12$ эВ спектр оралиғида хусусий фотоўтказувчанлик қийматига яқинлиги аниқланди, бу кремнийнинг тақиқланган соҳаси валент соҳасига яқинида энергетик кенглик (полоса, подзона) ҳосил бўлиши билан тушунтирилди.

5. «Хусусий» интеграл ёруғлик билан нурлантирилмаганда ҳам фотоўтказувчанликнинг камайиш ҳодисаси аниқланди ва камайишнинг максимал чуқурлиги ИҚ нурланиш спектрининг $0,43$ эВ энергиясида кузатилди.

6. Кўп каррали зарядга эга марганец атомларининг кластерлари кучли электр майдон таъсирида ковакларнинг ютиб олиниши туфайли электронлардан фазовий ажралиши билан боғлиқ киришмали сезувчанлик эффекти аниқланди.

7. Аниқланган электрофизик ва фотоэлектрик ҳодисалар таҳлили асосида кўп каррали зарядга эга нанокластерлар мавжуд кремнийнинг энергетик соҳа тузилиш модели ишлаб чиқилди. Ишлаб чиқилган физик модел асосида тажриба натижаларининг физик моҳияти тушунтириб берилди.

8. Инфрақизил нурланишнинг $3 \div 10$ мкм тўлқин узунлиги соҳасида ишловчи сезгир фотоқабулқилгичларни яратиш имконияти кўрсатилди. Материалда кўп каррали зарядга эга марказларнинг мавжудлиги ток ташувчи зарядларнинг узоқ муддат сақланишига шароит яратиб, бу ўз навбатида «фотонлар санагичи» каби асбобларни яратиш имкониятларини очиб берди.

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

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ИСАМОВ СОБИРЖОН БОЛТАЕВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
В КРЕМНИИ С МНОГОЗАРЯДНЫМИ НАНОКЛАСТЕРАМИ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

ТАШКЕНТ–2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2017.2.PhD/FM81.

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: **Бахадирханов Мухамед Кабир**
доктор физико-математических наук, профессор, академик

Официальные оппоненты: **Расулов Рустам Явкочович**
доктор физико-математических наук, профессор

Арипов Хайрулла Кабулович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **НПО «Физика-Солнца» ФТИ АН РУз**

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» ТГТУ, аудитория № 232. Тел. (+99871) 246-46-00, факс (+99871) 227-10-32, e-mail: tstu_info@edu.uz).

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

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 года.
(реестр протокола рассылки № ____ от «__» _____ 2018 г.).

А.Т. Мамадалимов
зам. председателя Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор, академик

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

Н.Ф. Зикриллаев
председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время, в мире активно развивается физика полупроводников, где пристальное внимание уделяется получению нового типа материала на основе кремния, путем создания в его кристаллической решетке наноразмерных кластеров изменяющих его фундаментальные свойства. В этом аспекте важными задачами являются формирование многократно заряженных нанокластеров в кристаллической матрице кремния и открытие его перспективных функциональных возможностей, а также применение этого материала в микроэлектронике, материаловедении и других областях.

В мире на сегодняшний день уделяется большое внимание формированию нанокластеров в решетке кремния кратность заряда которых больше трех, приводящее к существенному изменению его фотоэлектрических и фундаментальных свойств. При этом одной из важных задач является проведение целевых научных исследований по следующим направлениям: формирование многократно заряженных кластеров в кристаллической решетке кремния; определение влияния многократно заряженных нанокластеров на перенос заряда в кремнии; изменение фотоэлектрических и фундаментальных свойств кремния путем формирования в нем многократно заряженных нанокластеров атомов марганца; демонстрация возможности создания нового типа полупроводниковых приборов на основе кремния с многократно заряженными нанокластерами.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан, особое внимание уделяется вопросам стимулирования научно-исследовательской и инновационной деятельности, создания эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений в практику¹. Особо следует отметить, что данная деятельность осуществляется в рамках объявленного Года поддержки активного предпринимательства, инновационных идей и технологий, нацеленного на получение научных результатов, отвечающих современным требованиям научного развития. В этом плане особое внимание уделяется вопросам формирования нанокластеров в кристаллической решетке кремния и развитию технологии получения новых материалов. В этом аспекте актуальной задачей является открытие новых функциональных возможностей кремния с нанокластерами и создание на их основе нового типа фотоприемников и полупроводниковых приборов типа «счетчик фотонов».

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по

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

дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.» от 7 февраля 2017 года, в Постановлениях Президента № ПП-2772 «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017–2021 гг.» от 13 февраля 2017 года, № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

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

Степень изученности проблемы. Выдающиеся ученые такие как: создатель полупроводниковых гетероструктур Ж.И.Алфёров (Россия), создатели синих светодиодов Исаму Акасаки (Япония), Хироси Аmano (Япония) и Сюдзи Накамуре (США) награждены Нобелевскими премиями. Управление фотоэлектрическими свойствами полупроводников осуществляется, в основном, введением различных примесных атомов в решетку полупроводника. Эта технология хорошо теоретически и экспериментально изучена выдающимися учеными – С.М.Рывкином, А.Роузом, Р.Бьюпом, С.Г.Калашниковым. Теория фотопроводимости не только объяснила механизм и кинетику фотопроводимости, но и позволила открыть ряд новых фотоэлектрических явлений, таких как отрицательная фотопроводимость, остаточная фотопроводимость, долговременная релаксация фотопроводимости, эффект очувствления, инфракрасное и температурное гашение фотопроводимости, суперлинейность ЛАХ и т.д.

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

Анализ экспериментальных и теоретических работ последних лет, касающихся исследования явления переноса в полупроводниках с поверхностными наноразмерными структурами, свидетельствует о достижении значительных теоретических и практических результатов в этой области. Но остаются неизученными фотоэлектрические свойства полупроводников с многозарядными центрами, кратность заряда которых больше чем три, созданных в объеме кристаллической решетки кремния.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено на кафедре «Цифровая электроника и микроэлектроника» ТГТУ в рамках международных и республиканских грантов: МТ-83/2013 «Разработка и изготовление принципиально новых фотоэлементов с широкой спектральной чувствительностью ($0,1 \div 3$ мкм) на основе кремния с нановаризонными структурами» (2014–2015), Ф2-44 «Исследование механизма самоорганизации примесных атомов в полупроводниках и управление их параметрами» (2012–2016), ОТ-Ф2-55 «Разработка научных основ получения объемнонаноструктурированного кремния на основе формирования нанокластеров примесных атомов как нового класса наноматериалов с уникальными функциональными возможностями» (2017–2020).

Целью исследования является определение влияния сформированных многозарядных нанокластеров, кратность заряда которых больше трех в кристаллической решетке кремния на фотоэлектрические и фундаментальные свойства материала.

Задачи исследования:

определение оптимальных термодинамических условий легирования и параметров исходного материала, обеспечивающих формирование многократно заряженных нанокластеров с управляемой кратностью заряда;

исследование особенности переноса заряда на основе температурного хода подвижности и проводимости в кремнии с многократно заряженными нанокластерами;

исследование фотоэлектрических явлений в кремнии с многократно заряженными нанокластерами;

разработка энергетической зонной модели с многократно заряженными нанокластерами атомов марганца в объеме кремния.

Объектом исследования являются образцы монокристаллического объемнонаноструктурированного кремния с многократно заряженными нанокластерами атомов марганца.

Предметом исследования являются особенности влияния многозарядных нанокластеров на фотоэлектрические свойства кремния с нанокластерами атомов марганца с различной кратностью заряда.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были применены следующие методы: атомно-силовая микроскопия, рентгено-структурный анализ, ЭПР спектрометрия. Основные электрофизические параметры образцов определялись с помощью эффекта Холла. Время жизни носителей заряда определялось методом «частотной зависимости фотопроводимости», т.е. зависимости амплитуды переменной составляющей фотопроводимости от частоты прерывания освещения. Фотопроводимость образцов измерялась методом постоянного поля с помощью ИКС-21, снабженного специальным криостатом, позволяющим

получить температуру от температуры жидкого азота (77 К) до комнатной температуры.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определены оптимальные термодинамические условия легирования и параметры исходного материала, обеспечивающие формирование многократно заряженных нанокластеров с управляемой кратностью заряда;

установлено, что в кремнии с многократно заряженными центрами подвижность носителей заряда увеличивается в зависимости от интенсивности освещения в $3\div 5$ раза и электрического поля в 2,5 раза, обусловленное уменьшением кратности заряда многозарядных центров при освещении и ослабление эффекта рассеяния носителей заряда на многозарядных центрах;

обнаружен эффект расширения спектральной области фоточувствительности кремния до 10 мкм при температуре 100 К, что объясняется перестройкой энергетического состояния электронов в многократно заряженных нанокластерах;

обнаружен эффект высокой фоточувствительности в области $0,12\div 0,75$ эВ обусловленный формированием локальных нановаризонных структур вокруг многозарядного центра согласно теории Франца-Келдыша из-за появления сильной напряженности электрического поля на краях кремний-кластер;

определено уменьшение фотопроводимости с максимальной величиной при $0,43\div 0,55$ эВ без освещения «собственным» светом, объясняющегося туннелированием электронов из кластера на уровни потенциальных ям дырок;

установлена аномально высокая примесная остаточная фотопроводимость в области спектра $0,15\div 0,4$ эВ, обладающая большим временем релаксации 10^3 сек, которая обусловлена отсутствием рекомбинации между захваченными электронами в кластерах и дырок находящихся в потенциальных ямах.

Практические результаты исследования:

разработана технология получения многозарядных нанокластеров в решетке кремния, кратность заряда которых больше трех;

разработан метод расширения спектральной области фоточувствительности кремния до 10 мкм при температуре 100 К. Благодаря, чему появилась возможность создания фотоприемников регистрирующих инфракрасное излучение до 10 мкм;

показана возможность создания датчика типа «счетчик фотонов» на основе кремния обусловленного увеличением времени релаксации носителей заряда за счет влияния многократно заряженных нанокластеров атомов марганца.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием комплексных независимых методик измерения и обработки данных, а также их соответствием современным понятиям физики и техники полупроводников.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов заключается в объяснении особенностей, наблюдаемых фотоэлектрических явлений в кремнии с многозарядными нанокластерами.

Практическая значимость работы заключается в формировании многозарядных нанокластеров в решетке кремния, разработке инфракрасных фотоприемников работающих до 10 мкм и полупроводниковых приборов типа «счетчик фотонов».

Внедрение результатов исследования. На основе исследования особенностей фотоэлектрических явлений в кремнии с многозарядными нанокластерами были внедрены следующие результаты:

результаты исследования электрофизических и фотоэлектрических свойств кремния с многократно заряженными кластерами атомов марганца применены акционерным обществом «FOTON» при изготовлении полупроводниковых приборов (Справка № 02-2073 Акционерной компании «ЎЗЭЛТЕХСАНОАТ» от 6 октября 2017 года). Использование научных результатов позволило улучшить технологию изготовления детекторов;

результаты управления фотоэлектрических свойств кремния с многозарядными нанокластерами были использованы в институте солнечной энергии Академии наук Туркменистана в рамках проекта «Разработка и изготовление принципиально новых фотоэлементов с широкой спектральной чувствительностью (0,1-3 мкм) на основе кремния с нановаризонными структурами» при обработке экспериментальных данных (Справка № 161/170 Института солнечной энергии АНТ от 9 ноября 2017 года). Использование научных результатов позволило увеличить фоточувствительность наноструктурированных барьеров Шоттки.

Апробация результатов исследования. Основные научные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 6 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 25 научных трудов из них 1 монография, 10 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Анализ оптических и фотоэлектрических свойств полупроводников с нанокластерами»** анализируется состояние проблемы по исследованию влияния квантоворазмерных структур на фотоэлектрические явления в полупроводниках на основе литературных данных.

На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулированы задачи диссертационной работы.

Основным выводом для постановки задач исследований и проведения настоящей работы являются: разработка технологии получения кластеров атомов марганца с управляемым зарядовым состоянием, т.е. многозарядными нанокластерами; исследование особенности электрофизических свойств кремния с многозарядными кластерами; исследование фотоэлектрических свойств кремния с многозарядными нанокластерами атомов марганца в зависимости от их зарядного состояния; выявление новых фотоэлектрических явлений в кремнии с многозарядными нанокластерами; определение возможности использования кремния с многозарядными нанокластерами при разработке новых фотоэлектрических приборов.

Вторая глава **«Диффузионная технология формирования многозарядных нанокластеров в кремнии и методы её исследования»** посвящена описанию термодинамических условий легирования и выбору параметров исходного материала для получения образцов кремния с многозарядными кластерами марганца с необходимыми параметрами.

Основные электрофизические параметры образцов определялись с помощью эффекта Холла. Для более точного определения параметров полученных нанокластеров были использованы стандартные методики и установки: рентгеноструктурный анализ, ЭПР спектрометрия, атомно-силовая микроскопия ХИА-200.

В третьей главе **«Исследование переноса заряда в кремнии с нанокластерами атомов марганца»** представлены экспериментальные результаты по исследованию электрических параметров кремния с многократно заряженными нанокластерами примесных атомов марганца.

Определены энергетические характеристики многократно заряженных нанокластеров марганца методом токов ограниченных пространственным зарядом. Показано, что меняя значение электрического поля, можно управлять спектральной областью фоточувствительности и пороговой чувствительностью.

Исследование температурного хода сопротивления образцов показывает, что в исследуемых образцах наблюдаются энергетические уровни с энергией ионизации $E_1=E_V+0,2$ эВ, $E_2=E_V+0,15$ эВ, $E_3=E_V+0,17$ эВ, а также $E_4=E_V+0,22$ эВ в области низких температур.

Таблица 1.

Основные параметры образцов кремния с нанокластерами

ρ , Ом·см	Тип и концентрация носителей заряда, p, n , см ⁻³	Подвижность носителей заряда μ , см ² /В·с	E_F , эВ	Зарядовое состояние	Зарядовое состояние атомов марганца
$1,5 \div 2 \cdot 10^2$	$p=1,69 \cdot 10^{14}$	$189 \div 197$	0,297	+7	Mn ⁺⁺
$2,5 \div 3 \cdot 10^2$	$p=1,26 \cdot 10^{14}$	$164 \div 167$	0,303	+7	Mn ⁺⁺
$8 \div 9 \cdot 10^2$	$p=7,98 \cdot 10^{13}$	$86 \div 90$	0,315	+7	Mn ⁺⁺
$7 \div 8 \cdot 10^3$	$p=1,22 \cdot 10^{13}$	$63 \div 64$	0,363	+7	Mn ⁺⁺
$1 \div 1,2 \cdot 10^4$	$p=6,85 \cdot 10^{12}$	$75 \div 78$	0,378	+6	Mn ⁺⁺ > Mn ⁺
$1,5 \div 2 \cdot 10^4$	$p=3,86 \cdot 10^{12}$	$81 \div 83$	0,393	+5	Mn ⁺⁺ ~ Mn ⁺
$3 \div 4 \cdot 10^4$	$p=1,59 \cdot 10^{12}$	$93 \div 97$	0,415	+4	Mn ⁺⁺ ~ Mn ⁺
$1 \div 1,2 \cdot 10^5$	$p=3,28 \cdot 10^{11}$	$158 \div 164$	0,457	+4	Mn ⁺⁺ ≤ Mn ⁺
$1 \div 1,2 \cdot 10^5$	$n=6,76 \cdot 10^{10}$	$958 \div 965$	0,508	+3	Mn ⁺⁺ < Mn ⁺
$4 \div 5 \cdot 10^4$	$n=1,44 \cdot 10^{11}$	$1198 \div 1210$	0,491	+3	Mn ⁺⁺ < Mn ⁺
$2 \div 3 \cdot 10^3$	$n=2,08 \cdot 10^{12}$	$1098 \div 1110$	0,416	+3	Mn ⁺

В области относительно высоких температур ($T=200 \div 300$ К) наблюдаются энергетические уровни $E_1=E_V+0,35$ эВ, $E_2=E_V+0,41$ эВ, $E_3=E_V+0,43$ эВ. Таким образом, наблюдаются две группы энергетических уровней с $E_1=E_V+(0,15 \div 0,2)$ эВ, и $E_2=E_V+(0,35 \div 0,43)$ эВ акцепторного характера. Атомарные примеси марганца в кремнии не создают такие акцепторные уровни.

В таблице 1 представлены средние значения холловской подвижности электронов и дырок в образцах кремния с нанокластерами, различающиеся зарядовыми состояниями и положением уровня Ферми при комнатной температуре (с различными удельными сопротивлениями).

В таблице 2 показаны подвижности электронов и дырок образцов (полученных с помощью высокотемпературной диффузии) легированных

марганцем, с аналогичным удельным сопротивлением, но без нанокластеров.

Возможное зарядовое состояние кластеров определялось из соотношений концентрации атомов бора и концентрации атомов марганца с определенными зарядовыми состояниями (Mn , Mn^+ , Mn^{++}) при данном положении уровни Ферми в образцах.

Таблица 2.

Основные параметры образцов кремния без нанокластеров

ρ , Ом·см	Тип	μ , см ² /В·с	E_F , эВ	Зарядовое состояние атомов марганца
$3 \div 4 \cdot 10^2$	p	345	0,322	Mn^{++}
$5,5 \div 6 \cdot 10^3$	p	268	0,391	$Mn^{++} > Mn^+$
$7 \div 7,5 \cdot 10^4$	p	220	0,451	$Mn^{++} < Mn^+$
$6 \div 7 \cdot 10^3$	n	1220	0,436	$Mn^+ > Mn^{++}, Mn^0$
$6 \div 7 \cdot 10^4$	n	1248	0,496	$Mn^{++} < Mn^+$

Как видно из таблиц, подвижность носителей заряда в кремнии с нанокластерами существенно меньше, чем подвижность электронов и дырок в обычном кремнии. Это особенно заметно для образцов с положением уровня Ферми $E_F=(E_V+0,3 \div E_V+0,41)$ эВ. В этих образцах значение подвижности почти в 2,5÷3 раза меньше, чем подвижность дырок в обычном кремнии с тем же удельным сопротивлением.

Экспериментально определено, что подвижность дырок в исследуемых образцах существенно зависит от зарядового состояния кластеров.

Установлено, что температурная зависимость подвижности дырок в образцах с максимальным зарядом кластеров имеет аномальный и немонотонный характер, который не объясняется существующими механизмами рассеяния в полупроводниках в исследуемой области температур.

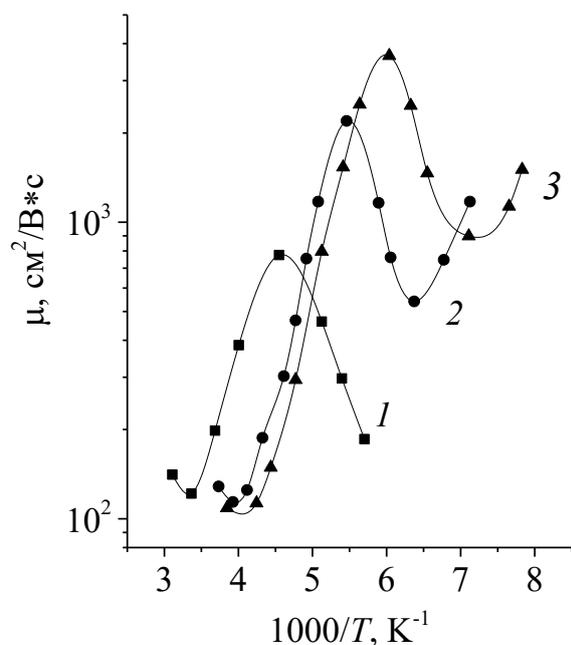
Обнаружен эффект стимулирования подвижности дырок в образцах с многозарядными нанокластерами с помощью освещения и электрического поля.

Влияние малой интенсивности интегрального света на температурную зависимость подвижности дырок в p -кремнии с нанокластерами марганца, показано на рисунке 1.

Освещение практически не влияет на характер (форму) зависимости $\mu(T)$ образцов, но с увеличением интенсивности освещения значения T_{min} и T_{max} смещаются в сторону низких температур, кроме того значения подвижности дырок при T_{max} стали больше почти в 3 и 5 раз, по сравнению с величиной подвижности в темноте, т.е. происходит эффект «стимулирования» подвижности дырок освещением. Кроме того, при

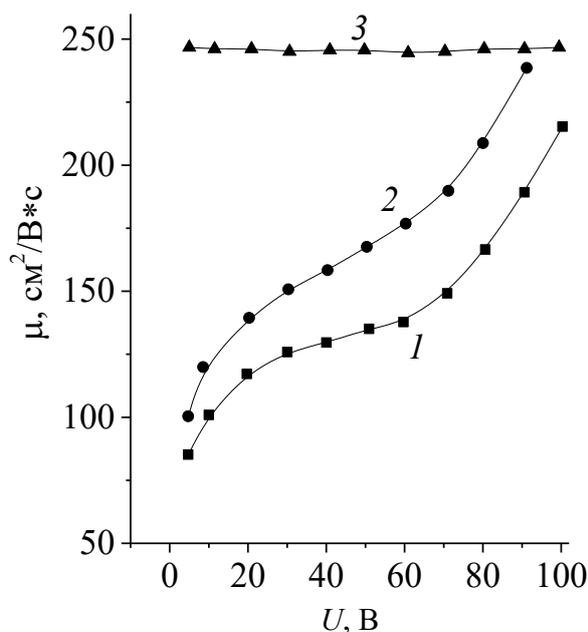
более низких температурах появляется второй температурный минимум T_{min2} , после которого подвижность опять начинает увеличиваться. Также установлено, что при более высоких интенсивностях освещения ($I > 50$ люкс) наблюдаемый эффект существенно ослабляется и температурная зависимость теряет особенности.

Для выяснения механизма изменения подвижности дырок в тех же образцах, было исследовано влияние внешнего электрического поля на величину подвижности (рис. 2).



1 – в темноте, 2 – $L=2$ люкс,
3 – $L=5$ люкс.

Рис. 1. Температурная зависимость подвижности дырок в кремнии с многократно заряженными центрами, $E=5$ В/см



1 – p -Si с нанокластерами, $\rho \sim 10^4$ Ом·см,
2 – p -Si с нанокластерами, $\rho \sim 10^3$ Ом·см,
3 – p -Si без нанокластеров, $\rho \sim 10^3$ Ом·см.

Рис. 2. Зависимость подвижности носителей в образцах кремния с марганцем от напряжения, приложенного к образцу, $T=100$ К

Установлено, что в образцах без нанокластеров атомов марганца (с аналогичным удельным сопротивлением) в исследуемой области электрического поля подвижность дырок не меняется (кривая 3), т.е. электрическое поле не оказывает влияния на подвижность. Это соответствует известным данным о том, что в области низких электрических полей подвижность носителей тока в полупроводниках не зависит от значения приложенного поля².

В четвёртой главе «**Новые фотоэлектрические явления в кремнии с многозарядными нанокластерами марганца**» приводятся исследования ряда новых фотоэлектрических явлений, обнаруженных нами в кремнии с нанокластерами атомов марганца.

² Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. пособие. – М.: Высшее образование; Юрайт-Издат, 2009. С. 32.

Для измерения фотоэлектрических свойств был использован монохроматор на основе установки ИКС-21, снабженный специальным криостатом. Установка позволяла управлять мощностью ИК-излучения и электрическим полем в образце с широким интервалом значений. Чтобы исключить попадание фонового света был установлен двойной фильтр из полированного кремния перед монохроматором и в окошке криостата. При этом размеры образцов были $8 \times 3 \times 0,7$ мм³, приложенное напряжение соответствовало полю $E=5$ В/см. Условия эксперимента были подобраны таким образом, что при проведении измерений поверхность образца освещалась полностью. Мощность ИК света изменялась специальными сетчатыми фильтрами, а её значение определялось с помощью измерителя средней мощности лазерного излучения типа ИМО-2Н.

Обнаружен эффект существенного расширения спектральной области примесной фоточувствительности в образцах с многозарядными центрами до 10 мкм ($T > 100$ К), который невозможно получить легированием другими примесями с глубокими уровнями.

Как показали результаты исследования, при этом наблюдаются следующие особенности:

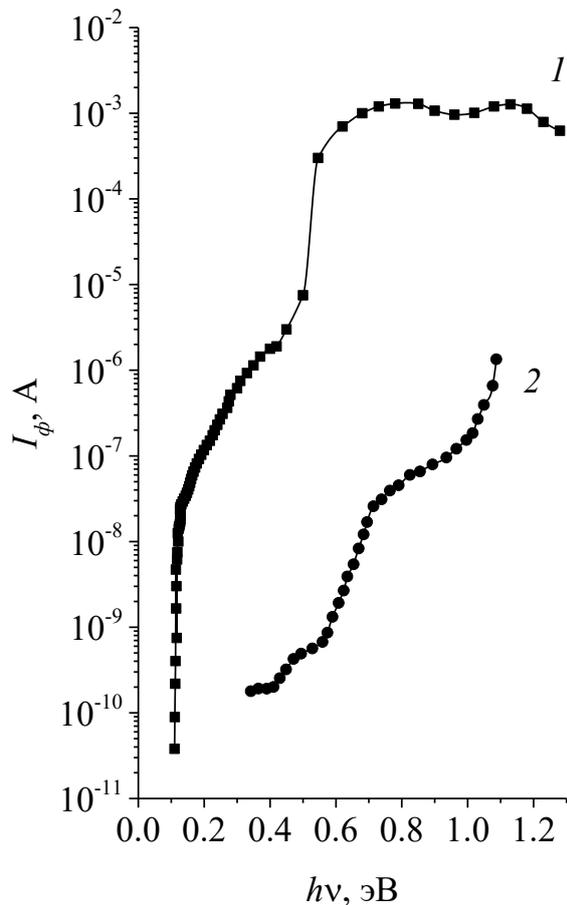
фотоответ начинается при $h\nu=0,12$ эВ ($\lambda=10$ мкм);

с увеличением энергии падающих фотонов ИК-излучения фототок непрерывно увеличивается до $h\nu=0,4$ эВ (3 мкм), при дальнейшем увеличении энергии фотонов $h\nu > 0,4$ эВ фототок увеличивается скачкообразно (на $1,5 \div 3$ порядка) в диапазоне энергий квантов $h\nu=0,4 \div 0,65$ эВ. Фототок достигает своего максимума при $h\nu=0,75 \div 0,8$ эВ. При этом имеет место аномально большой примесный фототок, а кратность его увеличения составляет $10^8 \div 10^9$ (рис. 3);

при $h\nu=0,75 \div 0,8$ эВ величина фототока в кремнии с нанокластерами марганца приобретает значение близкое к величине фототока, характерного для собственной фотопроводимости (рис. 3).

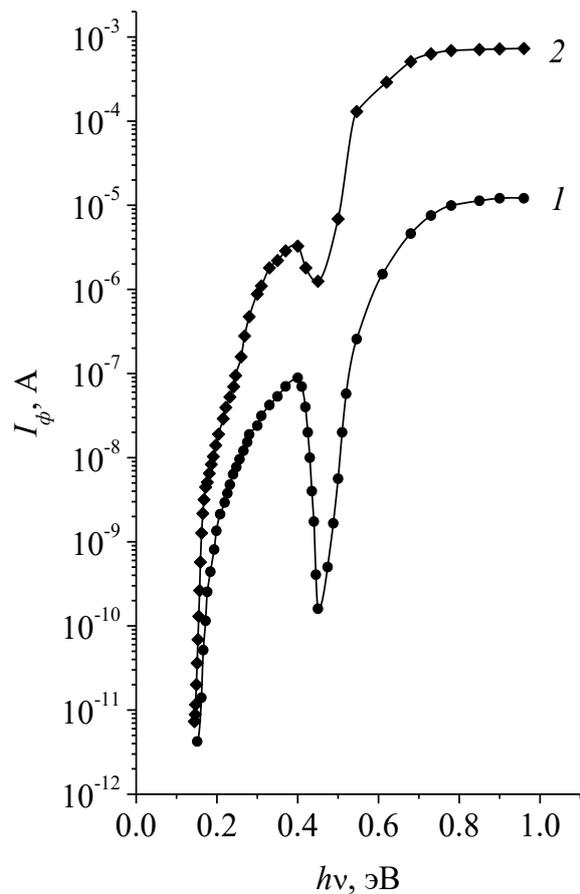
Таким образом, обнаружена аномально высокая примесная фотопроводимость в исследуемых образцах при $\lambda=1,5 \div 10$ мкм, особенно в областях $\lambda=1,5 \div 1,6$ мкм, где значение фоточувствительности практически не отличается от значения собственной фотопроводимости кремния (рис. 3).

Показано, что в исследуемых образцах наблюдается новый вид примесного инфракрасного гашения без «собственного» освещения при $h\nu=0,43$ эВ. На рисунке 4 представлены результаты экспериментов по исследованию спектральной зависимости ФП образцов кремния с нанокластерами марганца с удельным сопротивлением $\rho=2 \cdot 10^3$ и $\rho=1 \cdot 10^4$ Ом·см p -типа проводимости. Как видно из рисунка, фотоответ начинается при энергии фотонов от $h\nu=0,15$ эВ, с ростом энергии падающих фотонов на образец фототок непрерывно растет до $h\nu=0,4$ эВ. Дальнейшее увеличение энергии фотонов приводит к уменьшению фототока, т.е. наблюдается ИКГ ФП примесным светом. Эффект ИКГ достигает своего максимального значения при $h\nu=0,43$ эВ.



1 – кремний с нанокластерами атомов марганца, 2 – кремний без нанокластеров.

Рис. 3. Спектральная зависимость фотопроводимости кремния, $E=5$ В/см, $T=100$ К



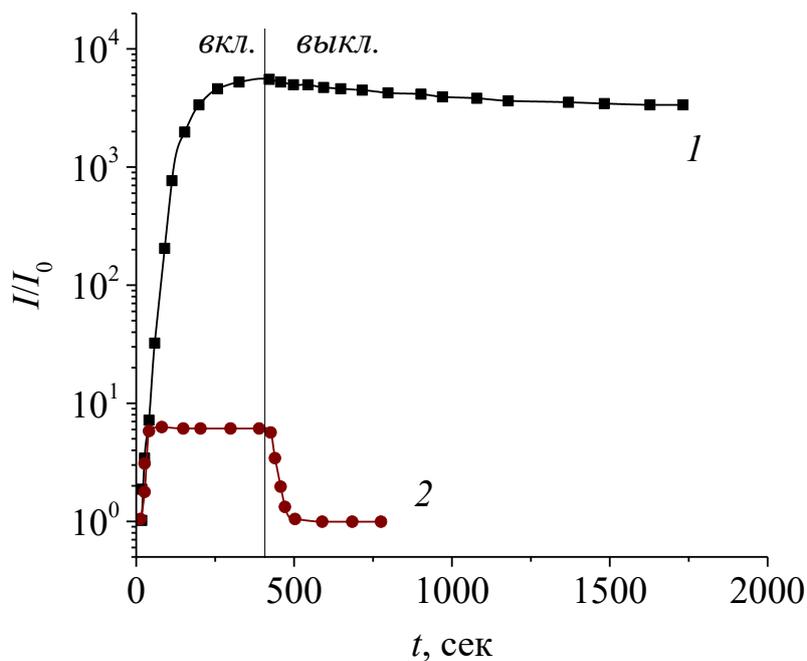
1 – $\rho \sim 10^4$ Ом·см, 2 – $\rho \sim 2 \cdot 10^3$ Ом·см.

Рис. 4. Спектральная зависимость фотопроводимости кремния с нанокластерами марганца (ИКГ), $E=5$ В/см, $T=100$ К

Впервые обнаружена anomalно большая примесная остаточная фотопроводимость в области $h\nu=0,2 \div 0,4$ эВ, а также долговременная релаксация остаточной фотопроводимости с очень большой постоянной времени $\tau \sim 10^3$ с.

На рисунке 5 представлена кривая (2) релаксации ФП в перекомпенсированных образцах кремния n -типа, легированного марганцем $\text{Si}\langle\text{V}, \text{Mn}\rangle$, в которых атомы марганца не образуют кластеры и находятся в «атомарном» состоянии Mn^0 , Mn^+ , Mn^{++} . Результаты эксперимента показали, что в таких образцах в области $h\nu=0,16 \div 0,4$ эВ фотоответ не наблюдается.

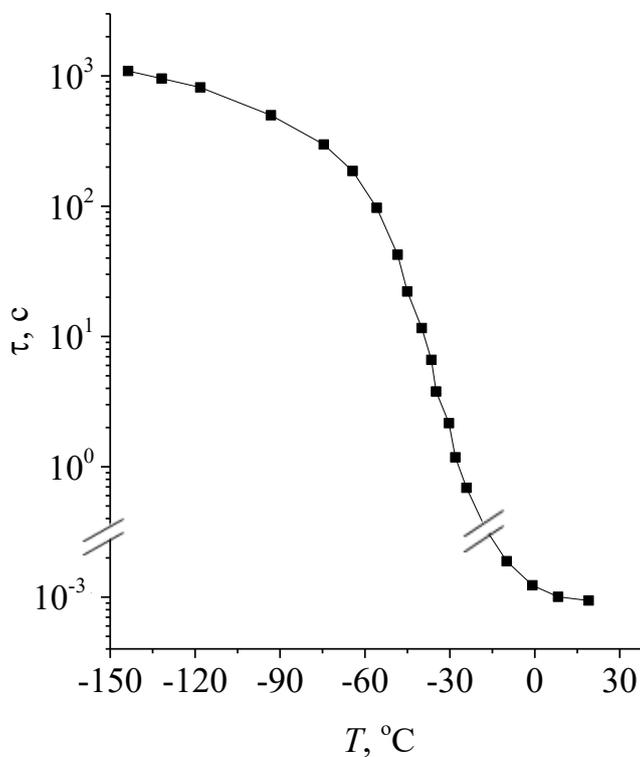
Как видно из рисунка в этом случае релаксация ФП имеет быстрый характер. Полученные данные позволяют предположить, что начало фотоответа в $h\nu=0,12$ эВ и долговременный характер релаксации ФП в основном связаны с многозарядными нанокластерами марганца.



1 – *p*-тип, 2 – *n*-тип образец; $h\nu=0,2$ эВ, $T=100$ К.

Рис. 5. Нарастание и спад (остаточная фотопроводимость) фототока при освещении образцов импульсами примесного света, $E=5$ В/см, $T=100$ К

На основе полученных данных нами рассчитано время жизни дырок (рис. 6) в зависимости от температуры ($T=77\div 300$ К).

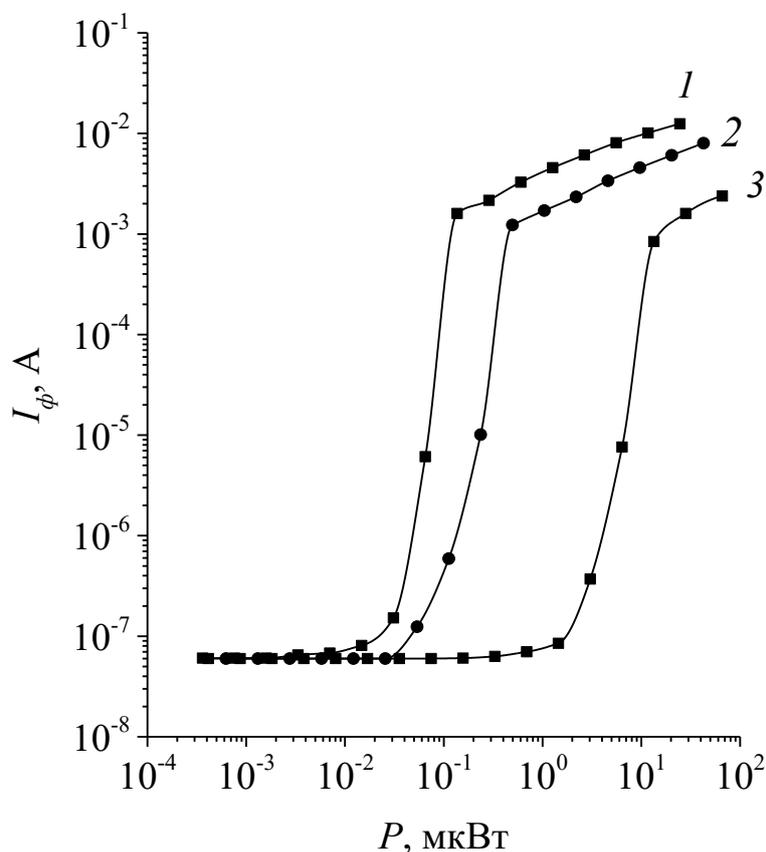


$h\nu=0,73$ эВ, $E=5$ В/см.

Рис. 6. Зависимость времени жизни носителей от температуры в образцах кремния с многократно заряженными центрами

Обнаружен эффект стимулирования примесной фоточувствительности электрическим полем.

На рисунке 7 представлена ватт-амперная характеристика (ВтАХ) исследуемых образцов при различных значениях энергии квантов: $h\nu=0,33$; $0,55$; $0,73$ эВ. Как видно из рисунка в области достаточно низких мощностей излучения ИК света с $h\nu=0,33$ эВ фототок с ростом мощности излучения увеличивается очень слабо, т.е. имеет сублинейный характер, описываемый выражением $I_{\phi}(P)=6 \cdot 10^{-8} \cdot P^{0,0124}$. Начиная с $P=10^{-6}$ Вт фототок увеличивается очень резко, т.е. имеет место суперлинейная зависимость ($I_{\phi}(P)=3 \cdot 10^6 \cdot P^{4,13}$) и только начиная с мощности $P=1,3 \cdot 10^{-5}$ Вт ВтАХ меняется линейно. С увеличением энергии падающих фотонов ($h\nu=0,55$ и $0,73$ эВ) пороговое значение начала резкого увеличения фототока (суперлинейный участок), сдвигается в сторону более низких мощностей излучения, а сам рост тока при этом становится более резким (кривая 2 и 3).



1 – $h\nu=0,33$ эВ, 2 – $h\nu=0,55$ эВ, 3 – $h\nu=0,73$ эВ.

Рис. 7. Ватт-амперная характеристика образцов кремния с нанокластерами атомов марганца

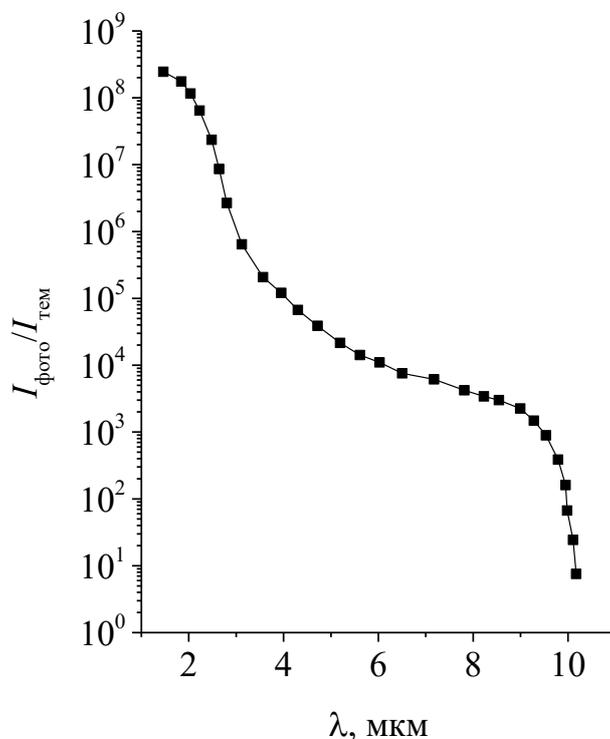
Предложена модель зонной структуры кремния с многократно заряженными нанокластерами. Все обнаруженные электрофизические и фотоэлектрические явления хорошо объясняются представленной моделью.

В пятой главе «Разработка приборов на основе кремния с многозарядными нанокластерами» приведены возможности использования кремния с нанокластерами атомов марганца при разработке и создании принципиально новых приборов, которые невозможно создать на основе других материалов.

Кремний с многократно заряженными центрами, т.е. нанокластерами, демонстрирует новые функциональные возможности, например, на его основе можно создать: высокочувствительные фотоприемники, работающие в широкой спектральной области ИК-излучения ($\lambda=1,55\div 10$ мкм), что невозможно получить путем обычного легирования примесными атомами, создающими глубокие уровни в кремнии.

Исследование спектральной зависимости ФП образцов с нанокластерами при различных температурах показало, что в интервале температур $T=77\div 200$ К фоточувствительность и спектральная область фотоэффекта существенно не изменяются, а при более высоких температурах ($T>200$ К) наблюдается уменьшение фоточувствительности и сужение спектральной области. Однако эти параметры имеют достаточно большие значения (рис. 8) для практического применения.

На основе кремния с многозарядными кластерами были изготовлены лабораторные образцы фотоприёмников площадью $S=0,5$ см², которые позволяют регистрировать фотоны с энергией $h\nu=0,12\div 0,8$ эВ, т.е. в области длины волн $\lambda=1,5\div 10$ мкм.



$T=100$ К, $E=5$ В/см.

Рис. 8. Спектральная зависимость ФП образца кремния с многозарядными центрами атомов марганца

Полученные экспериментальные результаты позволяют рекомендовать кремний, содержащий многозарядные нанокластеры атомов марганца для создания фотоприемников, работающих в области спектра до 10 мкм. Такие фотоприемники должны иметь достаточно высокую чувствительность, из-за аномально большого времени жизни дырок.

Установлено, что кремний с многозарядными кластерами обладает уникальной особенностью ИКГ ФП, что позволяет разработать на их основе ИК фотоприемники для области $h\nu=0,4\div 0,8$ эВ, работающие при наличии собственного фонового освещения в достаточно широком диапазоне интенсивности света.

В заключении хочу выразить благодарность моему научному руководителю и всему коллективу кафедры «Цифровая электроника и микроэлектроника» ТГТУ за помощь и поддержку оказанные при выполнении моей диссертационной работы.

ВЫВОДЫ

1. Получены образцы кремния с многозарядными нанокластерами атомов марганца, наличие которых подтверждено с помощью метода ЭПР.

2. Обнаружено, что в кремнии с многозарядными нанокластерами, подвижность дырок в $2,5 \div 3$ раза меньше чем в обычном кремнии и ее температурная зависимость имеет немонотонный характер, а значение существенно зависит от интенсивности освещения.

3. Экспериментально определено, что при изменении значения электрического поля, фоточувствительность образцов меняется как $I \sim U^{l+1}$, где значение l с ростом температуры, постепенно уменьшается в интервале $2 \div 3$.

4. Обнаружена примесная фотопроводимость в области спектра $0,75 \div 1,12$ эВ, величина которой близка к собственной фотопроводимости, это связано с появлением энергетической полосы (подзоны) вблизи валентной зоны кремния.

5. Обнаружено уменьшение фотопроводимости с максимальной глубиной при энергии падающего ИК-излучения $h\nu = 0,43$ эВ без фонового света.

6. Обнаружен эффект примесного очувствления обусловленный пространственным разделением электронов и дырок за счет захвата электронов сильным положительным электрическим полем многозарядных кластеров атомов марганца.

7. На основе анализа обнаруженных электрофизических и фотоэлектрических явлений разработана модель зонной структуры кремния с многократно заряженными нанокластерами.

8. Показана возможность создания чувствительного фотоприемника инфракрасного излучения работающего в диапазоне $3 \div 10$ мкм. Присутствие в материале многозарядных центров позволяет существенно увеличить эффективность хранения зарядов и получить приборы типа «счетчик фотонов».

**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

ISAMOV SOBIRJON BOLTAYEVICH

**PARTICULARITIES OF PHOTOELECTRIC PHENOMENA IN
SILICON WITH MULTIPLE CHARGED NANOCCLUSERS**

01.04.10- Physics of semiconductors

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

TASHKENT–2018

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.2. PhD/FM81.

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: **Bakhadirkhanov Mukhamed Kabir**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
professor, academician

Official opponents: **Rasulov Rustam Yavkochoovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Aripov Xayrulla Kabulovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Leading organization: **Physical-Technical Institute of Scientific Production
Association «Physics-Sun»**

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 Technical 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).

A.T. Mamadalimov
Deputy Chairman of Scientific Council on
award of scientific degrees, DSc in physics
and mathematics, professor, academician

B.E. Egamberdiyev
Scientific secretary of Scientific Council
on award of scientific degrees, DSc in
physics and mathematics, professor

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

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of research work is to determine the influence of the multicharged nanoclusters with triple-charge state in the silicon lattice on photoelectric and fundamental properties of silicon.

The object of the research is single crystalline nanostructured silicon samples with multicharged nanoclusters of manganese atoms.

Scientific novelty of the research does consist in the following:

optimal thermodynamic conditions of doping and parameters of the ingot that would ensure shaping of multicharged nanoclusters with manageable charge multiplicity were determined;

it was determined that in silicon with multiply charged centers mobility of charge carriers essentially increases 3÷5 times as a function of intensity of illumination and 2, times as a function of the magnitude of the electric field that is explained by reduction of charge states of multiply charged centers under illumination and reduction of scattering of charge carriers on multiply charged centers;

the effect of extension of spectral range of photosensitivity of silicon up to 10 microns in the temperature 100K has been found, that is explained by reorganization of energy states of electrons in multiply charged nanoclusters;

the effect of high photosensitivity in the spectral range of energies 0.12÷0.75 eV caused by formation of local nanovariband structures in the vicinity of multicharged center (the theory of Frans-Keldish) due to occurrence strong electric field intensity across silicon-cluster periphery has been determined;

reduction of photoconductivity with peak quantity at 0.43÷0.55eV interval while the sample was not exposed to illumination by the «background» light was determined that is explained due to tunneling of electrons from cluster to band levels of potential wells of holes;

anomalous high impurity residual photoconductivity at spectral range of 0.15÷0.4 eV characterized by huge relaxation time of 10^3 sec was established that is explained by the absence of recombination between captured electrons in cluster and holes located in potential wells.

Implementation of the research results. On the basis of the results of the study of the photoelectric phenomena of silicon with multiply charged nanoclusters of manganese atoms:

The results of study of electrophysical and photoelectric properties of the silicon with multicharged nanoclusters of manganese atoms were used by JSC «FOTON» while performing semiconductor devices (Reference №. 02-2073 of the JSC «UZELTEHSANOAT» of 6th October of 2017). The implementation of the scientific results allowed to boost the technology of manufacturing of detectors;

The results of study of photoelectric properties of the silicon with multicharged nanoclusters were used while performing the project of the Institute of Solar Energy of the Academy of Sciences of Turkmenistan titled

«Design and development of principally new photocells with extended spectral range of sensitivity (0,1÷3 micron) on the basis of silicon with nanovariband structures» in the course of processing of experimental results. The implementation of the scientific results allowed to boost the sensitivity of photodetectors with Shottky barriers.

The structure and volume of the thesis. The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of references and an appendix. The text of the thesis is outlined on 120 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Бахадирханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Исамов С.Б., Ковешников С.В. Фотоэлектрические явления в кремнии с многозарядными нанокластерами. Ташкент, ТашГТУ, 2017. – 279 с.

II бўлим (II часть; II part)

2. Бахадирханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Исамов С.Б., Камалов Х.У., Ковешников С.В. Фотоприемники для спектральной области $3\div 10$ мкм с частотным выходом на основе кремния с нанокластерами атомов марганца. Приборы. 2017 №6. С. 12-15. [05.00.00; № 63].

3. Исамов С.Б. Инфракрасное и температурное гашение фотопроводимости в кремнии с нанокластерами атомов марганца. Журнал «Доклады Академии наук Республики Узбекистана», 2016, №1, С. 23-26. [01.00.00; № 7].

4. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B. IR Photodetectors Operating under Background Illumination. Technical Physics, 2016, Vol. 61, №. 3, pp. 458–460. [№11; Springer, IF=0,632].

5. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Iliev Kh.M., and Kamalov Kh.U. Anomalous Long Lifetime of Holes in Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms. Semiconductors, 2015, Vol. 49, №. 10, pp. 1332-1334. [№11; Springer, IF=0,602].

6. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Iliev Kh.M., Tachilin S.A., and Kamalov K.U. Silicon-Based Photocells of Enhanced Spectral Sensitivity with Nano-Sized Graded Band Gap Structures. Applied Solar Energy, 2014, Vol. 50, №. 2, pp. 61-63. [01.00.00; № 3]. [№40; RG, IF=0,21].

7. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., and Zikrillaev N.F. Current -Voltage Behavior of Silicon Containing Nanoclusters of Manganese Atoms. Inorganic Materials, 2014, Vol. 50, №. 4, pp. 325–329. [№40; Research Gate, IF=0,59].

8. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Zikrillaev N.F. IR Photodetectors in the Range of $\lambda=1.5\text{--}8$ μm , Based on Silicon with Multicharged Nanoclusters of Manganese Atoms. Russian Microelectronics, 2012, Vol. 41, №. 6, pp. 354–356. [№40; Research Gate, IF=0,26].

9. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Zikrillaev N.F., and Tachilin S.A. Quantometers of Solar IR Radiation Based on Silicon with Multicharged Nanoclusters of Magnesium Atoms. Applied Solar Energy, 2012, Vol. 48, No. 1, pp. 55-57. [01.00.00; № 3], [№40; Research Gate, IF=0,21].

10. Bakhadyrkhanov M.K. and Isamov S.B. Spectra of the Energy Levels of Multicharged Nanoclusters of Manganese Atoms in Silicon. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2011, Vol. 47, №. 6, pp. 484–487. [01.00.00; №14], [№40; Research Gate, IF=0,22].

11. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Зикриллаев Н.Ф. Счетчики фотонов для области $\lambda=1,5\div 8$ мкм на основе кремния с многозарядными нанокластерами атомов марганца. Узбекский физический журнал, 2011, том 13, № 5, С. 345-348. [01.00.00; № 5].

III бўлим (III часть; III part)

12. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Зикриллаев Н.Ф., Уралбоев Х. Тепловые детекторы на основе кремния с многозарядными нанокластерами. Республиканская конференция «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах». Ташкент, 1-2 февраль, 2017, С. 85-86.

13. Исамов С.Б., Камалов Х.У., Аюпов К.С., Уралбоев Х., Роззакова Н., Боликулов Ж. Возможности измерения высоких температур с помощью полупроводниковых датчиков. VII илмий-назарий анжуман «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» Термиз, 19-20 май 2017 й. С. 50-51.

14. Bahadirkhanov M.K., Isamov S.B., Koveshnikov S.V., Zikrillaev N.F. Novel photoelectric phenomena in silicon with multiply-charged nanoclusters. The International Symposium «New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, Prospectives». Tashkent, November 10-11, 2016. P. 376-378.

15. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б. Эффект очувствления кремнии с многозарядными кластерами атомов марганца. V международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». Самарканд, 22-24 сентября 2016 г. С. 70.

16. Bahadirkhanov M.K., Isamov S., Azizov M., Khamalov Kh, Mirkomilova M., Khanbabayev A. Novel class of infrared photo-detectors for the range $\lambda=1\div 10$ micron on the basis of silicon with self-organized quantum dots. XIII International Scientific Conference «Solid State Physics». Astana, 26-28 April 2016. P. 240-241.

17. Исамов С.Б., Мавлонов Г.Х., Сатторов О.Э., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Азизов М.К., Камалов Х.У. Расширение спектральной области чувствительности фотоэлементов до $\lambda=8$ мкм на основе кремния с нанокластерами атомов марганца. Республиканская конференция «Возобновляемые источники энергии: технологии и установки» Ташкент, 28-29 июня 2016 г. С. 135-136.

18. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б. Некоторые особенности фотоэлектрических свойств кремния с нанокластерами примесных атомов марганца. Респуб. Конф. «Современные проблемы физики полупроводников». Нукус, 26-27 октября, 2015, С. 59-60.

19. Исамов С.Б. Особенности гашения фотопроводимости кремния с квантовыми точками. Илмий-амалий конференция. «Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни». Тошкент, 24-25 апреля, 2015 г. С. 404-406.

20. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Исамов С.Б., Азизов М.К., Йўлдошев С.М. Фотоэлектрические явления в кремнии с многозарядными квантовыми точками. Республика илмий-техникавий анжумани. Конденсатланган мухитлар физикаси ва материалшуносликнинг долзарб масалалари. 14-15 май 2014 й. Фарғона. С. 159-160.

21. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Аюпов К.С., Хасанов А., Миркамилова М. Подвижности носителей заряда в кремнии с многозарядными нанокластерами. Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Ташкент. 14-15 ноября 2013 г. С. 108-109.

22. Исамов С.Б., Илиев Х.М., Бахадырханов М.К., Тачилин С.А., Мелебаев Д., Муродов Б.Х. Принципиально новые фотоэлементы с широкой спектральной чувствительностью (0,1÷3 мкм) на основе кремния с нановаризонными структурами. VI международная конференция по физической электронике IPES-6. Ташкент. 23-25 октября 2013 г. С. 165-166.

23. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Илиев Х.М., Зикриллаев Н.Ф., Дусмухамедов Х.М., Аюпов К.С., Тачилин С.А. Кремний с магнитными нанокластерами атомов марганца. Конференция выпускников Высших курсов стран СНГ «Синхротронные и нейтронные исследования наносистем». Москва – Дубна, Россия. 17-21 июня 2012 г. С.61-62.

24. Зикриллаев Н.Ф., Исамов С.Б. Особенности фотоэлектрических свойств кремния с многозарядными примесными атомами. Республика илмий-амалий конференция «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари». Бухоро, 30 ноябрь – 1 декабрь 2012 й. С. 38-39.

25. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Зикриллаев Н.Ф., Тачилин С.А. Электронная структура многозарядного кластера атомов марганца в кремнии. Республиканская конференция (с участием ученых стран СНГ) «Современные проблемы физики полупроводников» посвященная 20-летию независимости Республики Узбекистан. Нукус 23-25 ноября 2011 г. С. 9-10.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«Тил ва адабиёт таълими» таҳририясида таҳрирдан ўтказилди.
(26.03.2018 йил)

Босишга рухсат этилди: 27.03.2018 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 2,9. Адади: 70. Буюртма: № 87.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.