**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

КАМАЛОВ ХАЙРАТДИН УСНАТДИНОВИЧ

КИРИШМАЛИ АТОМДАН ТАШКИЛ ТОПГАН НАНОКЛАСТЕРЛИ КРЕМНИЙДАГИ АВТОТЕБРАНИШЛИ ТОК ВА УНИНГ ЭЛЕКТРОНИКАДА ҚЎЛЛАНИЛИШИ

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

ТОШКЕНТ–2018

УДК: 621.315.592

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

Камалов Хайратдин Уснатдинович
Киришмали атомдан ташкил топган нанокластерли кремнийдаги автотебранишли ток ва унинг электроникада қўлланилиши 3

Камалов Хайратдин Уснатдинович
Автоколебание тока в кремнии с нанокластерами примесных атомов и её использование в электронике 21

Kamalov Khayratdin Usnatdinovich
Current Self-oscillations in Silicon with Nanoclusters of Impurity Atoms and its use in the electronics……...…….. 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

КАМАЛОВ ХАЙРАТДИН УСНАТДИНОВИЧ

КИРИШМАЛИ АТОМДАН ТАШКИЛ ТОПГАН НАНОКЛАСТЕРЛИ КРЕМНИЙДАГИ АВТОТЕБРАНИШЛИ ТОК ВА УНИНГ ЭЛЕКТРОНИКАДА ҚЎЛЛАНИЛИШИ

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

ТОШКЕНТ–2018

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.4.PhD/FM160 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ислом 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.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: **Исмайлов Қанатбай Абдреймович**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Мавлонов Ғиёсиддин Ҳайдарович**
физика-математика фанлари доктори

Сапаев Байрамдурди
физика-математика фанлари доктори

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, ___-уй. Тел. (99871) 246-46-00, факс (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@edu.uz, ТДТУ «Электроника ва автоматика» факультети _____хона).

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

Диссертация автореферати 2018 йил «___»_____ да тарқатилди.

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

М.К.Бахадирхонов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., академик

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

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясини 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 функционал имкониятларини очиш ҳамда бу материални микроэлектроникада, материалшуносликда ва бошқа соҳаларда ишлатишга қаратилган тадқиқотлар олиб бориш долзарб масалаларидан бири бўлиб ҳисобланади.

Кичик ўлчамли ток тебранишлар генераторларини яратиш бугунги кунда дунё бўйича олимлар ва мутахассисларнинг катта эътиборни жалб этмоқда. Бу соҳага бўлган асосий қизиқиш бир томондан кам қувват талаб этувчи қаттиқ жисмли генераторларни яратиш бўлса, иккинчи томондан бир вақтнинг ўзида бир неча функцияларни бажарадиган датчикларни олиш билан боғлик. Кристалл панжарада кластерлар ҳосил қилиб, кремний хоссаларининг ўзгариши ҳисобига ток тебранишларини кузатиш ва унинг янги функционал имкониятларини кўрсатиш бўйича илмий тадқиқотлар олиб бориш назарий ва амалий жиҳатдан мухим вазифалардан.

Бугунги кунда дунёда электроника соҳасини ривожлантиришга, янги турдаги датчиклар яратиш ва амалдаги датчикларни янада такомиллаштиришга катта эътибор қаратилмоқда. Бу борада, мақсадли илмий изланишларни қуйидаги йўналишларда олиб бориш долзарб вазифалардан ҳисобланади: яримўтказгич материалларини киришма атомлари билан легирлаб янги турдаги яримўтказгич материалларни олиш; киришма атомлардан шаклланган нанокластерли ёруғликка сезгир бўлган материаллар олиш; олинган материаллар асосида қаттиқ жисмли генераторлар яратиш; автотебранишлар асосида кам қувватли энергия билан ишлайдиган бир неча функцияни бажарадиган датчикларни яратиш.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясида белгиланган вазифаларни амалга оширишда илмий ва инновация ютуқларини амалиётга кенг жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда[1]. «Фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб қувватлаш йили»да олинган илмий натижаларни ҳозирги замон талабларига жавоб берадиган даражага олиб чиқишга алоҳида эътибор қаратилган. Жумладан, микроэлектрон ва яримўтказгичли асбоблар учун асосий материал ҳисобланган кремнийнинг кристалл панжарасида нанокластерларни ҳосил қилиб, унинг асосида янги турдаги материаллар олиш технологиясини ри-

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

вожлантириш ҳозирги куннинг долзарб вазифаларидан ҳисобланади. Бу борада, нанокластерли кремнийнинг янги хоссаларини кашф қилиш ва унинг хусусиятлари асосида тубдан янги бўлган фотоқабулқилгичлар, кўп функцияли датчиклар ва қаттиқ жисмли датчикларни яратиш бўйича кўплаб илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралидаги «Ўзбекистон республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ПФ–4947-сон Фармони, 2017 йил 13 февралдаги «2017–2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ПҚ–2772-сон 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 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 В.А.Доросинец, Н.А.Поклонский, В.А.Самуйлов, В.Ф.Стельмах (Беларусия) поликристалл кремнийда инфракичик частотали ток тебранишларининг параметрларини аниқлаш бўйича илмий изланишлар олиб боришган. Шу билан бирга бир гуруҳ россиялик олимлар Н.Н.Агеева, И.Л.Броневой, А.Н.Кривоносовлар арсенидгаллий намуналардаги ток тебранишларини ҳар томонлама ўрганганлар.

Ҳозирги вақтда Ўзбекистон олимларидан А.Т.Мамадалимов, Х.Х.Джулиев ва А.Ю.Лейдерманлар томонидан хром атомлари киритилган кремний намуналарда $h\nu$>Eg ва T=4,2 К да инфрапаст частотали ток тебранишлари тадқиқ қилган.

Шу билан бирга, М.К.Бахадирханов, Н.Ф.Зикириллаев ва унинг шогирдлари марганец киришма атомлари билан компенсацияланган кремнийда ток тебранишларининг хусусиятларини тадқиқ этган. Марганец киришма атмлари киритилган кремнийдаги ток тебраниши T=77÷180К ҳарорати ораликда ва тушаётган ёруғлик энергияси $h\nu>E_g/2$ эВ қийматларида кузатилган.

Яримўтказгичларда ток нотурғунликларининг ҳосил бўлиши, унинг катталикларини бошқариш имкониятлари яхши тадқиқ қилинган. Бироқ шу даврга қадар, нанокластерли кремнийда 3÷10 микрометрли тўлқин узунлигига мос келувчи ИҚ-нурланиш таъсирида инфрапаст частотали ток автотебранишларини кўпзарядли марказлар мавжуд нанокластерли кремнийда у 98 фоизгача модуляция коэффициентига эга турғун ва мунтазам ток автотебранишлари ўрганилмаган.

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

Диссертация иши Тошкент давлат техника университетининг «Рақамли электроника ва микроэлектроника» кафедрасининг илмий тадқиқотлар режасига мос бўлиб, Ф2-44 рақамли «Яримўтказгичларда 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 негизида ҳажмий структурали кремний олишнинг илмий асосларини ишлаб чиқиш» (2017–2020 йй.) мавзусидаги фундаментал лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади Кремний кристалл панжарасида нанокластерлар ҳосил қилиш билан ток автотебранишларининг шаклланиши ва параметрларини ташқи омиллар ёрдамида бошқаришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

ток тебранишлари ҳосил бўладиган нанокластерли кремний намуналарини олиш;

нанокластерли кремний намуналарида ток тебранишлар ҳосил бўлиш шартларини аниқлаш;

нанокластерли кремнийда ток тебранишларининг табиатига ташқи омиллар таъсирларини ўрганиш;

нанокластерли кремнийдаги ток автотебранишларининг электроникада қўлланилиш имкониятларини кўрсатиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида электроника саноатида фойдаланилган КЭФ-100; КДБ-3; КДБ-5; КДБ-10 маркали кремний монокристаллари пластиналари танлаб олинди. Киришма атоми сифатида марганец элементи олинган.

Тадқиқотнинг предмети монокристалл кремний панжарасида мавжуд марганец атомларининг нанокластерлари таъсирида ток автотебранишларини шакллантиришдан 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. Кремнийдаги автотебранишларни кузатишда ҳароратни суюқ азот ҳароратидан (77 К) хона ҳароратигача бошқариш имконини берадиган махсус криостат билан жиҳозланган ИКС-21 русумли спектрометрдан ва UT81 рақамли электрон осциллографдан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

нанокластерли кремнийда кузатилган ток автотебранишининг амплитудаси, частотаси ва модуляция коэффициентини ташқи омиллар

(ҳарорат, электр майдони, ёруғлик энергияси ва қуввати) таъсирида бошқариш мумкинлиги аниқланган;

нанокластерли кремнийда 3÷10 микрометрли киришмали соҳага мос келувчи инфрақизил нурланиш таъсирида 0.1÷100 мГц инфрапаст частотали ток автотебранишлари олинган;

кўп зарядли марказлар мавжуд нанокластерли кремнийда 98 фоизгача модуляция коэффициентига эга турғун ва мунтазам тебранувчи ток автотебранишлари олинган;

кўпзарядли марказлар атрофида кучли электр майдон мавжудлиги ҳисобига юқори 150 К ҳароратда чегаравий электр майдон кучланганлиги 120 В/см бўлган фотоўтказувчангликнинг тебраниши аниқланган;

марганец киришма атомлари кластерларига эга кремний намуналари асосида фотоўтказувчанликнинг тебраниш частотасининг ўзгариши ҳисобига маълумот берувчи янги турдаги фотоқабулқилгич яратиш имконияти кўрсатилган;

марганец киришма атомлари кластерларига эга кремний намуналари асосида қаттиқ жисмли генераторлар яратиш имконияти очиб берилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

монокристалл кремний панжарасида марганец киришма атомларининг кўпзарядли нанокластерлари билан боғлиқ мунтазам ток автотебранишлари олинган;

марганец киришма атомлари кластерларига эга кремний намуналар асосида автотебраниш частотасининг ўзгариши ҳисобига маълумот берувчи янги турдаги фотоқабулқилгич яратилган;

марганец киришма атомлари кластерларига эга кремний намуналар асосида қаттиқ жисмли генератор тайёрланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги маълумотларни ўлчаш ва ишлов беришда бир бирига боғлиқ бўлмаган усулларининг мажмуасидан фойдаланилган, шунингдек, олинган натижалар яримўтказгичлар физикаси ва техникасининг замонавий тушунчаларга мослиги билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти, марганец киришма атомлари кластерларининг кўп зарядга эга эканлиги ва атрофида кучли электростатик майдон ҳосил бўлиши туфайли локал соҳаларда электронлар энергетик структурасининг қайта тақсимланиши билан изоҳланган.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти, марганец киришма атомларининг кластерлари асосида мунтазам, турғун, инфрапаст частотали, юқори 150 К ҳароратда ишловчи ток автотебранишларини олиш мумкинлиги билан изоҳланган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Кремний кристалл панжарасида нанокластерлар ҳосил қилиш билан ток автотебранишларининг шаклланиши ва параметрларини ташқи омиллар ёрдамида бошқариш асосида:

нанокластерли кремнийда 3÷10 микрометрли киришмали соҳага мос келувчи инфрақизил нурланиш таъсирида олинган инфрапаст частотали

ток автотебранишлари «FOTON» акциядорлик жамиятида қаттиқ жисмли генератор ишлаб чиқаришда қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 9-июлдаги 02-1518-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш 0.1÷100 мГц оралиғида ишлайдиган инфрапаст частотали қаттиқ жисм генераторларини ишлаб чиқариш имкониятини берган;

марганец киришма атомлари кластерларига эга кремний намуналари асосида фотоўтказувчанликнинг тебраниш частотаси ўзгариши ҳисобига маълумот берувчи янги турдаги фотоқабулқилгич яратиш технологияси «FOTON» акциядорлик жамиятида фотоқабулқилгичлар ишлаб чиқаришда фойдаланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 9-июлдаги 02-1518-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш кремний материали асосида фотоўтказувчанликнинг тебраниш частотаси ўзгариши ҳисобига ишлайдиган фотоқабулқилгич яратишга имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 3 та халқаро ва 5 та республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 3 та илмий иш чоп этилган, улардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа докторлик диссертацияларининг асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 3 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўрт боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 105 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 очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «Яримўтказгичларда ток тебранишлари» деб номланган биринчи бобида илмий адабиётларда келтирилган маълумотлар асосида яримўтказгич материалларда токнинг тебранишлари, уларнинг ҳосил бўлиш шартлари ва асосий параметрларининг ташқи омилларга боғлиқлиги бўйича муаммолар таҳлил этилган.

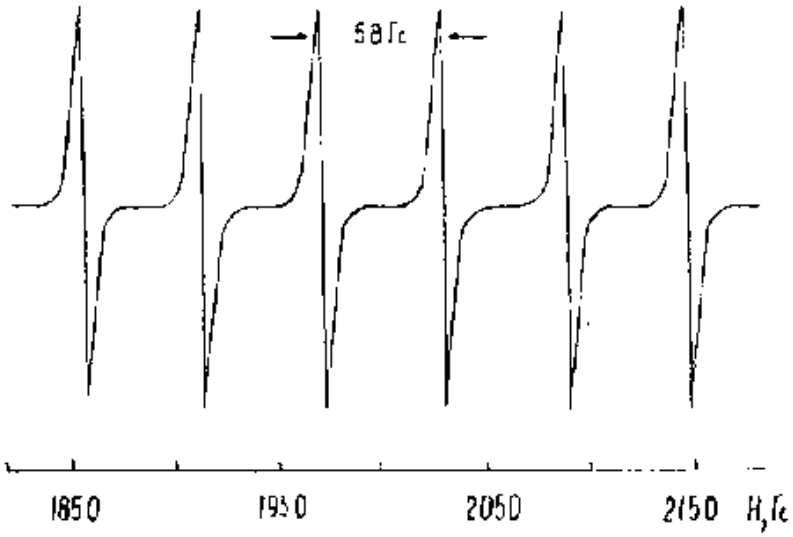
Мавжуд назарий ва тажрибавий маълумотлар таҳлили асосида тадқиқотнинг вазифалари шакллантирилган.

Ишни бажаришда ва тадқиқот вазифаларида белгиланган асосий амалга оширилиши режалаштирилган илмий изланишлар қуйидагилардан иборат: нанокластерли кремний намуналарини олишнинг технологик шарт шароитларин аниқлаш ва тадқиқотлар учун зарур бўлган кремний материалининг оптимал параметрларини аниқлаш; кўп каррали зарядланган нанокластерлар мавжуд кремнийда ҳосил бўлган ток автотебранишларининг ҳароратга, электр майдонига, намунанинг параметрларига, ИҚ нурланишнинг энергияси ва қувватига боғлиқлигини тадқиқ қилиш.

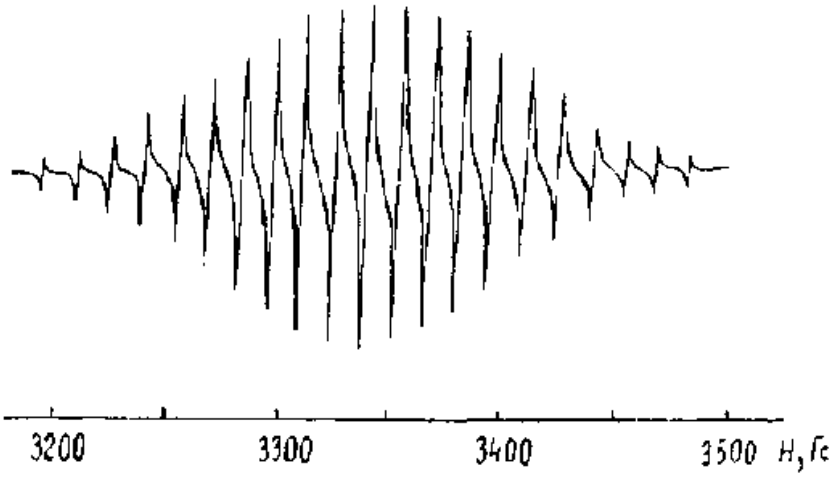
Диссертациянинг **«Ток тебранишлари ҳосил бўладиган кремний намуналарини олиш технологияси»** деб номланган иккинчи боби диффузион легирлашнинг технологик хусусиятларини ўрганишга, дастлабки кремний материалининг параметрларини танлашга ҳамда кремний кристалли ҳажмида кўп каррали зарядланган нанокластерларни ҳосил қилиб, талаб этилган электрофизик параметрга эга кремний олиш технологиясига бағишланган.

Намуналарнинг асосий электрофизик параметрлари Холл усули ёрдамида аниқланган. Олинган намуналарнинг фундаментал электрофизик параметрларини аниқлашда рентген структурали таҳлил, ЭПР спектрометр, XIA-200 атом кучли микроскопи сингари замонавий усуллар ва қурилмалардан фойдаланилган (1-,2-расм).

Учинчи боб **«Нанокластерли кремнийда киришмали фотоўтказувчанликнинг тебранишини тадқиқ этиш»**га бағишланиб, унда кўп зарядли нанокластерли кремнийдаги ток автотебранишларининг ҳосил бўлиш шартлари ва ташқи омиллар таъсирида параметрларининг ўзгаришларини ўрганиш натижалари келтирилган.



1-расм. Алоҳида марганец атомига боғлик ЭПР спектри



2-расм. Тўрт атомли марганецдан ташкил топган кластер учун ЭПР спектри

Ўрганилаётган намуналарда токнинг автотебраниши фақат ИҚ ёруғлик билан ёритилганда ҳосил бўлди ва тебраниш частотаси, амплитудаси ёруғлик параметрларига боғлиқ бўлиши аниқланди.

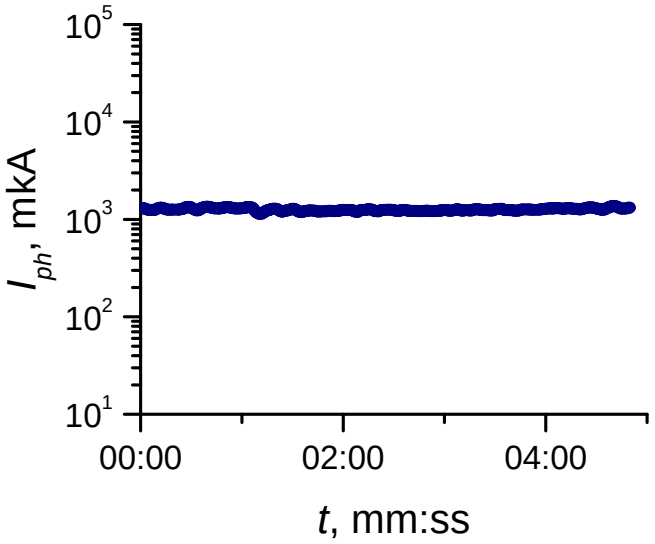
Ёруғликнинг $h\nu$=0,12÷0,43 эВ ёки 3-10 мкм ораликдаги квантланган энергиясида ток автотебранишининг вужудга келиши аниқланган. $h\nu$=0,45÷1 эВ ораликдаги ИҚ нурлар билан ёритилган намуналарнинг ВАХ ни тадқиқ этишда фототокнинг сезиларли ошишига қарамасдан ўрганилаётган электр майдонида токнинг тебраниши кузатилмади.

3-расмда солиштирма қаршилиги $\rho=5\cdot10^3$ Ом·см бўлган марганец атомлари нанокластерлари мавжуд намунада ҳосил бўлган автотебраниш параметрларининг T=100 К да, электр майдон кучланганлиги E=200 В/см да, $h\nu$=0,12÷0,43 эВ ораликда инфрақизил нурлар таъсир этгандаги ўзгариш қонунияти кўрсатилган.

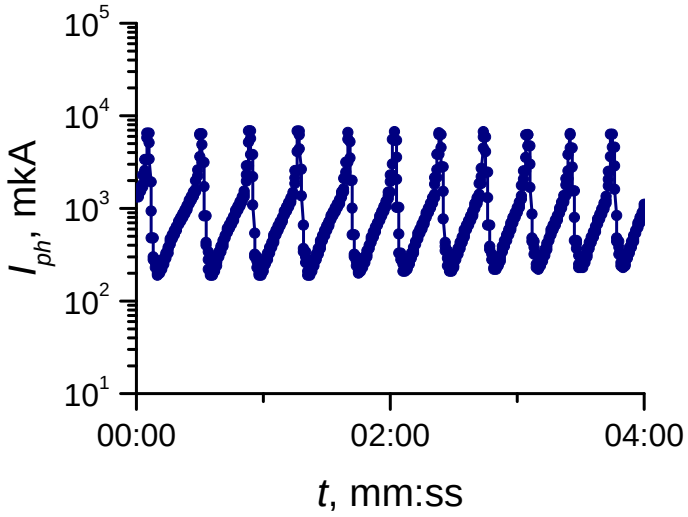
Ушбу ҳолатдаги тебранишлар релаксацион автотебранишлар шаклига эга бўлиб токнинг қиймати аста секинлик билан орта борди ва кейин ток кескин 1÷1,5 даражага ошди. Сўнгра қисқа вақт ичида токнинг қиймати 1,5÷2 даражада кескин камайди.

Кузатилаётган тебранишнинг амплитудаси деярли 25-30 мА, модуляция коэффициенти M~96 % ва частотаси ўзгармас бўлиб, қиймати f_{oc}=4,32·10^{-2} Гц бўлди.

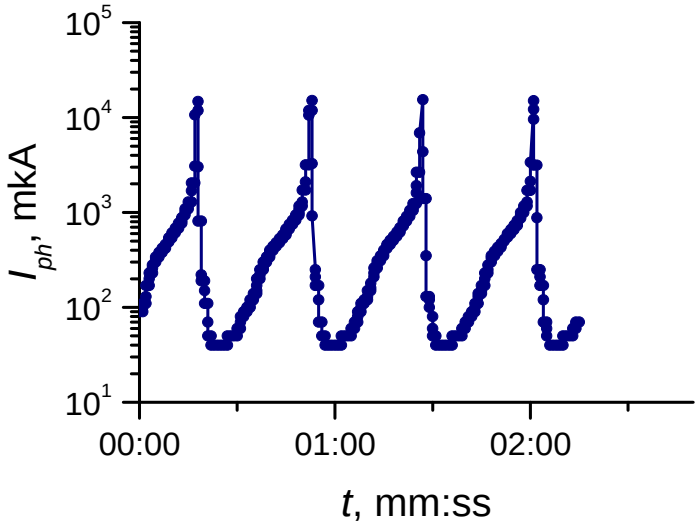
4-расмда автотебраниш частотасининг ўзгармас қувватли нурланиш фотон энергиясига боғлиқлиги келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики, нанокластерли кремний намуналарида ҳосил бўлган ток автотебранишларининг частотаси намунага тушаётган ИҚ нурланиш энергиясига боғлиқлиги $f_{oc}=1,18\cdot10^{-3}$ Гц/эВ қонуният бўйича чизиқли ўзгариши аниқланди. Лекин ток автотебранишининг шакли ва амплитудаси деярли ўзгармади.



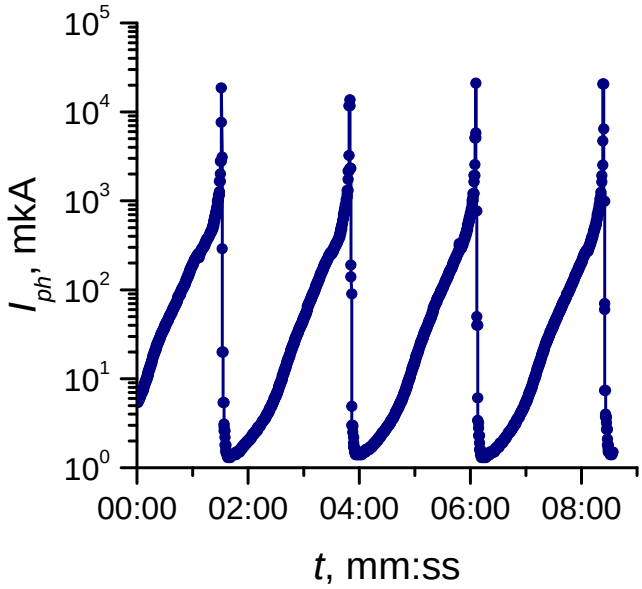
а) $h\nu$=0,45 эВ



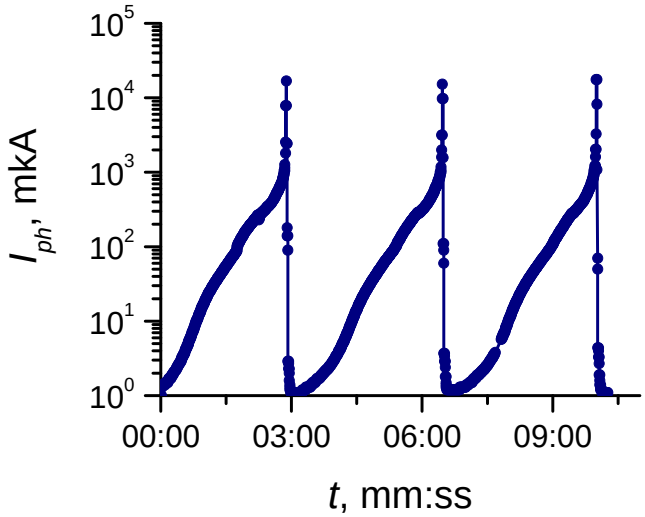
б) $h\nu$=0,43 эВ; Δt = 23сек



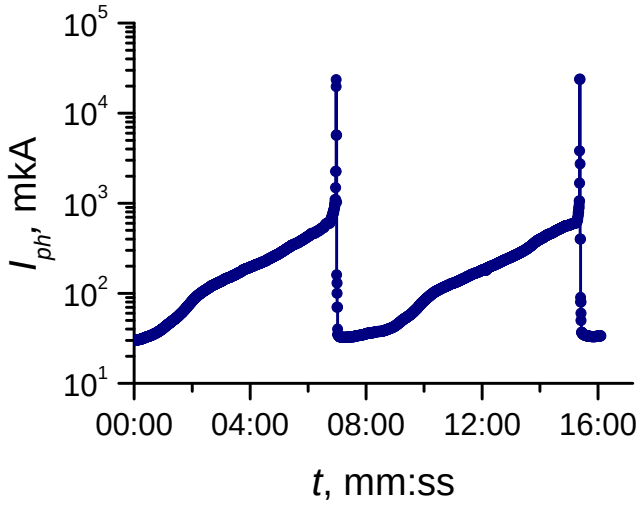
в) $h\nu$=0,3 эВ; Δt= 35 сек



г) $h\nu$=0,16 эВ; Δt =138 сек

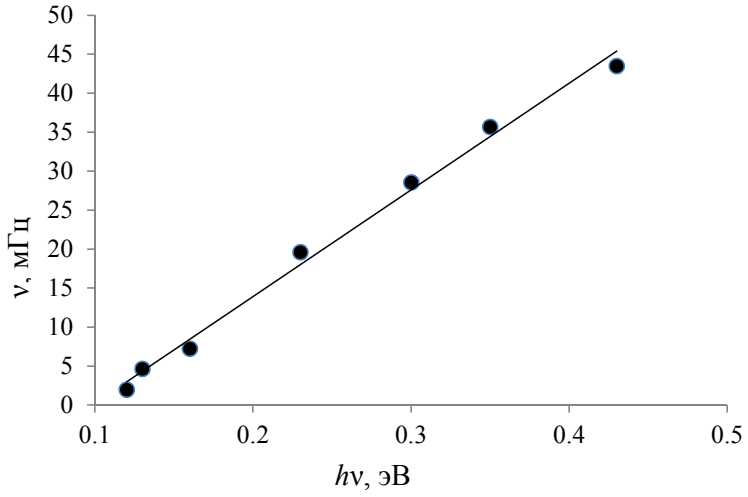


д) $h\nu$=0,13 эВ; Δt =215 сек



е) hν =0,12 эВ; Δ *t* =505 сек

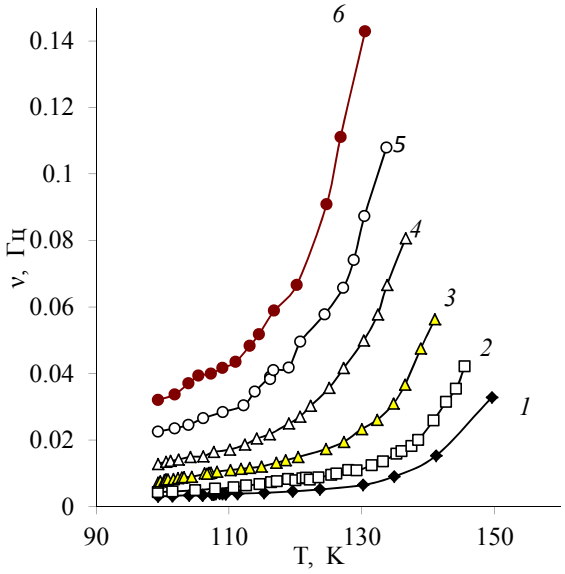
3-расм. *T*=100 К ҳароратда ток автотебраниши параметрларини тушаётган фотон энергиясига боғлиқлиги.



4-расм. Инфрапаст частотали ток автотебранишларининг частотасини ИҚ нурланиш энергияси таъсирида f_{oc}=1,18·10^{-3} Гц/эВ қонуният бўйича ўзгариши.

Электр майдони, нурланиш қуввати ва фотон энергиялари ўзгармас шароитда автотебранишнинг вужудга келиши ва тебраниш параметрларининг (амплитуда, частота) ўзгаришига ҳароратнинг таъсири ўрганилди.

Ҳароратнинг кўтарилиши билан тебраниш частотаси чизиқли ошди, тебраниш шакли ва амплитудаси жуда кам ўзгаради деб хулоса чиқарсак бунда, G~2,4·10^{-4} Гц/К коэффициент бўйича автотебраниш частотаси ҳароратга боғлиқ ўзгариши тажриба натижалари асосида аниқланди. *T*=150 К гача намунадаги токнинг автотебраниши кузатилди, *T*=150 К дан юқори ҳароратларда ташқи шартлардан қатъи назар автотебраниш мавжуд эмаслиги аниқланган. 5-расмда намунага 0,12 эВ-0,33 эВ оралиғида ИҚ нур билан ёритилган вазиятдаги автотебранишнинг ҳароратга боғлиқлиги кўрсатилган. Расмда кўриниб турибдики, барча ҳолларда тебранишлар 100 К да вужудга келган.

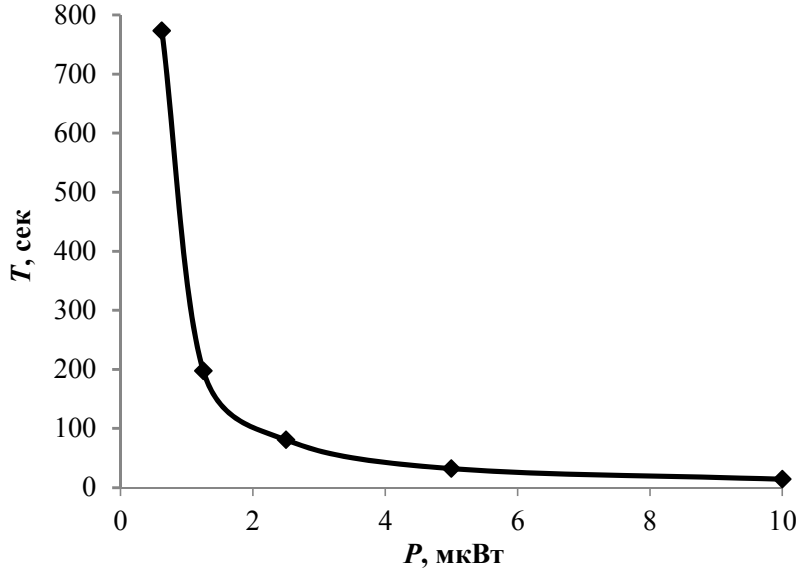


1)*hν*=0,12 эВ, 2) *hν*=0,127 эВ, 3) *hν*=0,161 эВ,
4) *hν*=0,226 эВ, 5) *hν*=0,3 эВ, 6) *hν*=0,33 эВ,

5-расм. *U* = 250 В да ва ёруғликнинг турли энергияларида автотебраниш частотасининг ҳароратга боғлиқлиги.

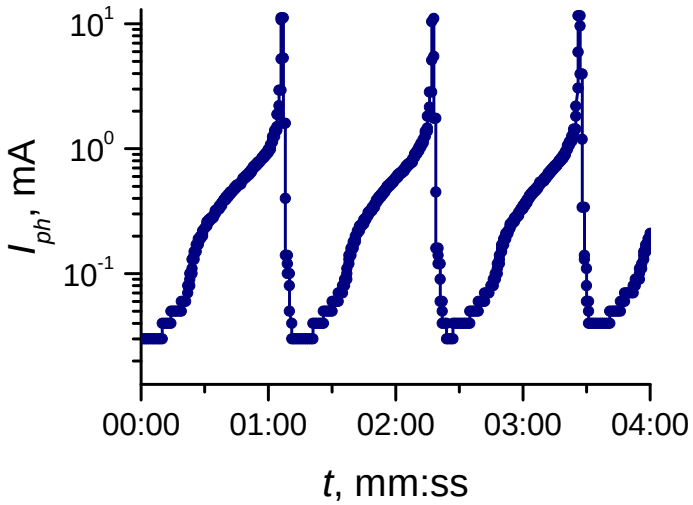
ИҚ нурланиш қувватининг автотебранишга таъсирини ўрганиш учун фотонларнинг ўзгармас энергиясида доимий электр майдон ва ҳароратда токнинг автотебранишлари тадқиқ қилинди. Намунага тушаётган ИҚ нурларнинг қуввати 0,5÷10 мкВт оралиқда ўзгартирилди.

Тадқиқот натижалари шуни кўрсатадики, нурланиш қуввати қийматининг камайиши билан тебраниш шакли ва амплитудаси бутунлай ўзгармасдан қолди. Асосан, ток тебранишинг частотаси ўзгарди. Токнинг автотебранишини кузатишдаги нурланиш қувватининг қуйи чегараси *W*~0,5 мкВт эканлиги аниқланди. Агар нурланиш қуввати *W*<0,5 мкВт бўлса, автотебраниш ҳосил бўлмайди. 6-расмда *hν*=0,3 эВ инфрақизил нурлар билан ёритилган намунада ҳосил бўлган токнинг автотебраниш даврининг нурланиш қувватига боғлиқлиги кўрсатилган.

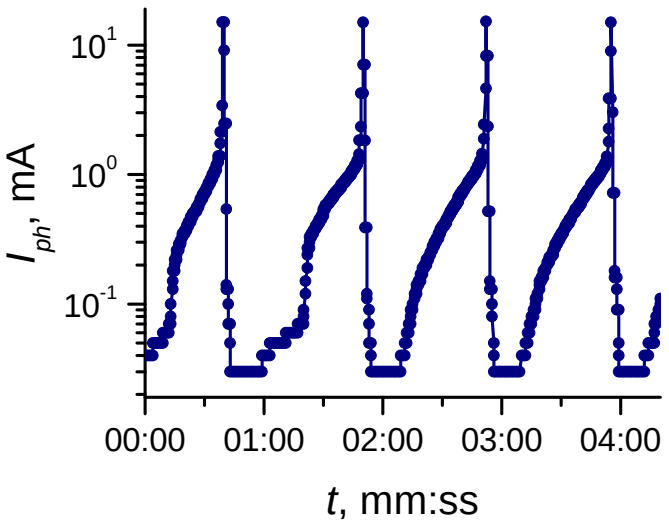


6-расм. Автотебраниш даврини намунага тушаётган ИҚ нурланиш қувватига боғлиқлиги, *T*=100 К, *E*=250 В/см.

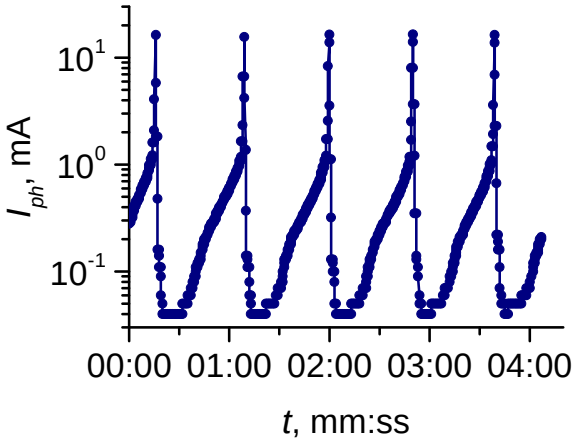
Электр майдонининг автотебраниш параметрларига таъсирини ўрганишда қолган ташқи омиллар: ҳарорат, тушаётган фотонларнинг энергияси ва нурланиш қувватининг қийматлари ўзгармас сақланди.
7-расмда ток автотебранишларининг турли электр майдон қийматларидаги шакли кўрсатилган.



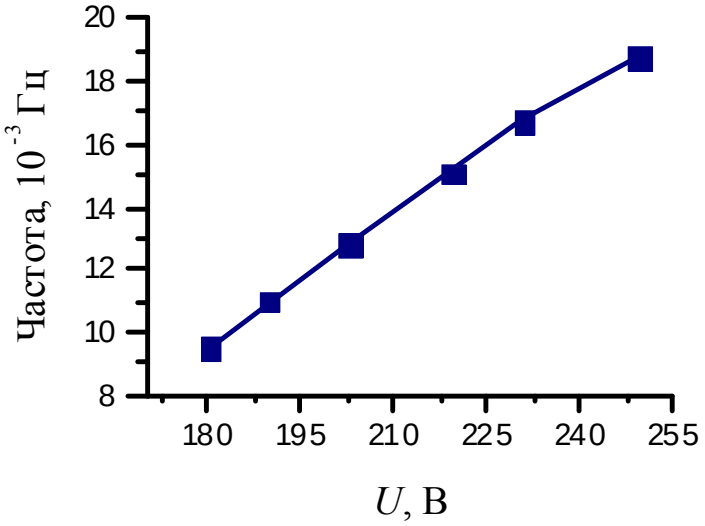
а) U=180 В; *T*=105 с, f_{oc} =9,52 мГц



б) U=225 В; T=63 с, f_{oc} =15,87 мГц



в) U=250 В; T=53 с, f_{oc}=18,86 мГц

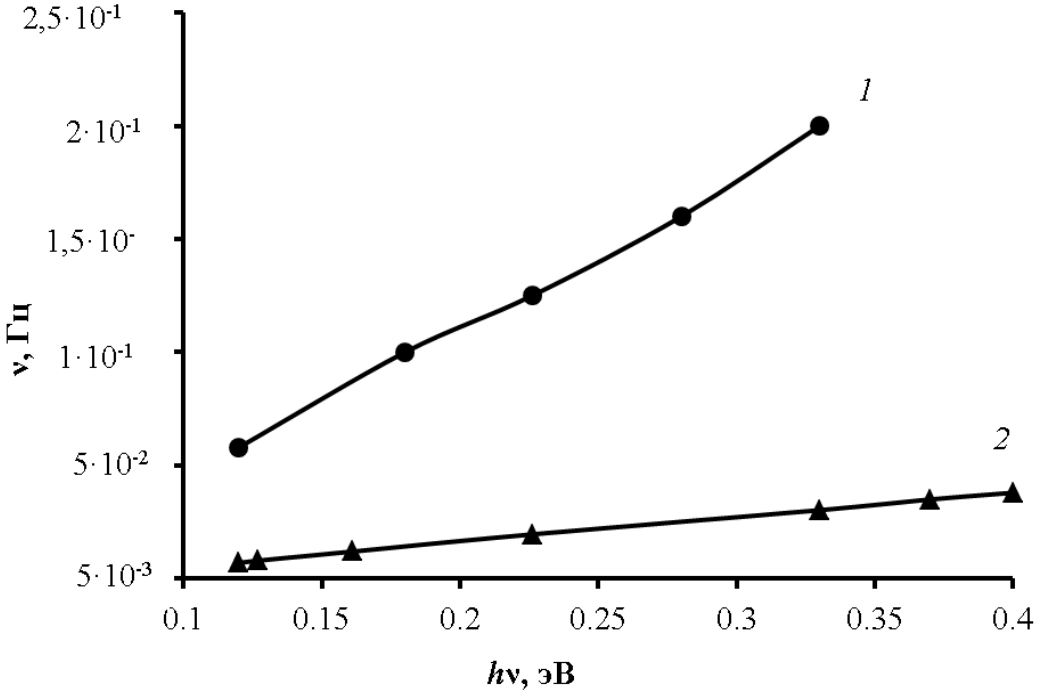


7-расм. $h\nu$=0,226 эВ, T=100 К даги ток автотебранишларининг параметрларини турли электр майдон қийматларида ўзгариши.

Тебраниш частотасининг электр майдонига боғлиқлиги қуйидаги қонуниятга буйсиниши $\frac{f_{os}}{U} \propto 1.3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Hz}}{\text{V}}$ аниқланди.

Нанокластерли кремний намуналардаги ток автотебранишларининг параметрлари ва шакли фақат ташқи омилларга боғлиқ бўлмасдан намунанинг ўз электрофизик параметрларига, яъни дастлабки солиштирма қаршилигига ва диффузиядан кейинги намуналарнинг солиштирма қаршилигига ҳам боғлиқ экан. Солиштирма қаршилиги $10^3 \div 10^4$ Ом·см бўлган намуналарда ҳосил бўлган ток автотебранишларининг частоталари $10^4 \div 10^5$ Ом·см намуналардагига нисбатан катта бўлиши кузатилди (8-расм).

Бунга сабаб, нисбатан солиштирма қаршилиги каттароқ бўлган намуналарда кўп зарядли марказларнинг зарядланиш карралиги кам бўлди.



1) ρ=5,0·10^3 Ом·см ли намунадаги ток автотебраниш частотасининг тушаётган ёруғлик энергиясига боғлиқлиги.
2) ρ=2,2·10^4 Ом·см намунадаги ток автотебраниш частотасининг тушаётган ёруғлик энергиясига боғлиқлиги.

8-расм. Турли солиштирма қаршиликга эга намуналардаги ток автотебранишининг частотасини ИҚ нурланиш энергиясига боғлиқлиги.

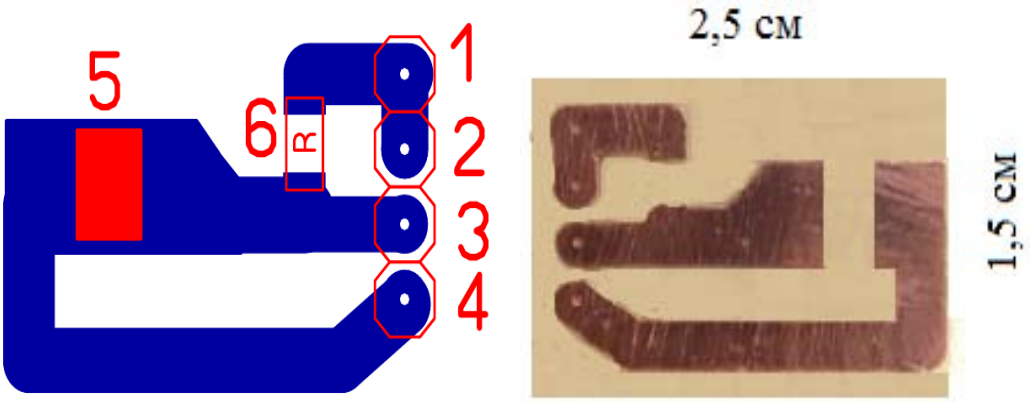
Диссертациянинг **«Нанокластерли кремнийдаги ток автотебранишларининг электроникада қўлланилиши»** деб номланган тўртинчи бобида бошқа материаллар ёрдамида яратиб бўлмайдиган янги турдаги асбобларни ишлаб чиқишда кўп каррали зарядланган нанокластерлар мавжуд кремнийдан электроника саноатида фойдаланиш имкониятлари очиб берилган.

Яримўтказгич материаллар асосида генераторлар, частотали чиқишга эга фотоқабулқилгичлар ишлаб чиқиш ва яратиш илм-фан, технологияда

муҳим аҳамиятга эга. Кўпчилик яримўтказгичларда ток автотебраниши аниқланган, аммо уларнинг такрорланувчанлиги етарли даражада эмаслиги бундай автотебранишларни ҳосил қилиш ва муайян ҳолатда ушлаб туриш учун жуда қийин бўлган ташқи омилларни талаб этади. Масалан, нисбатан паст ҳарорат, катта электр, магнит майдон. в.ҳ. Шунинг учун бундай материаллар асосида тайёрланадиган қаттиқ жисмли генераторлардан амалда фойдаланиш деярли мумкин эмас.

Бу бобда кўп зарядли нанокластерли кремний асосида бу мавжуд муаммонинг ечимини ҳал қилиш мумкинлиги очиб берилган.

Электроника саноатида амалий қўлланилишида олинган илмий натижалар катта аҳамиятга эга бўлиб, бобда тўлиқ ёзилган (9-расм).



1,4-кучланиш учун контактлар;
2,3-осциллограф учун контактлар;
5-қаттиқ жисмли генератор;(кремний намунаси)
6-токни чекловчи қаршилик

9-расм Қаттиқ жисмли генераторнинг платадаги ташқи кўрниши.

Диссеертация ишимни бажаришда кўрсатилган ҳар тарафлама ёрдам учун устозимиз академик М.К.Бахадирхановга, илмий раҳбарим профессор Қ.А.Исмайловга ва ТДТУ «Рақамли электроника ва микроэлектроника» кафедрасининг барча жамоасига рахмат айтаман.

ХУЛОСА

1.Нанокластерли кремний намуналарининг электрофизик ва фотоэлектрик хоссалари тадқиқ этилди ва биринчи марта ИҚ нураланишнинг λ=3÷10 мкм тўлқин узунлиги ораликда инфрапаст частотали ток автотебранишлари аниқланди.

2.Инфрапаст частотали ток автотебранишларининг параметрларини ҳароратга боғлиқлиги G~2,4·10^{-4} Гц/К қонуният бўйича ўзгариши аниқланди.

3.Инфрапаст частотали ток автотебранишларининг параметрлари ИҚ нурланиш энергиясини таъсирида $f_a=1,18\cdot10^{-3}$ *Гц/эВ* қонуният бўйича ўзгариши ва унинг вужудга келиш соҳаси 0,12÷0,43 эВ эканлиги аниқланди.

4.Инфрапаст частотали ток автотебранишларининг параметрларини қўйилган ташқи электр майдон қийматига $A=10^{-4}$ *Гц/В* қонуният бўйича ўзгариши аниқланди.

5.Инфрапаст частотали ток автотебранишлар таъсир этаётган ИҚ нур қувват 0,5÷10 мкВт ораликда бўлганда кузатилиши кўрсатиб берилди.

6.Инфрапаст частотали ток автотебранишлари параметрлари бошланғич намунанинг солиштирма қаршилигига боғлиқ ҳолда ўзгариши аниқланди.

7.Марганец киришма атомлари кластерларига эга кремний намуналарда фотоўтказувчанликнинг тебраниш частотаси ўзгариши асосида λ=3÷10 мкм оралиғида ишлайдиган янги турдаги амплитуда ва частотали чиқишга эга фотоқабулқилгичларни яратиш имконияти кўрсатиб берилди.

8.Марганец киришма атомлари кластерларига эга кремний намуналари асосида қаттиқ жисмли генераторларни яратиш имкониятлари таклиф етилди.

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

КАМАЛОВ ХАЙРАТДИН УСНАТДИНОВИЧ

АВТОКОЛЕБАНИЕ ТОКА В КРЕМНИИ С НАНОКЛАСТЕРАМИ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ И ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

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 № B2017.4.PhD/FM160.

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.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	**Исмайлов Канатбай Абдреймович** доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Мавлонов Гиёсиддин Хайдарович** доктор физико-математических наук
	Сапаев Байрамдурди доктор физико-математических наук
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 ___. Здание факультета «Электроника и автоматика» ТГТУ, аудитория № _____. 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 ___. Тел. (+99871) 246-03-41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 года.

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

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

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. Одним из важнейших направлений в области современной физики полупроводников в мире является изменение основных фундаментальных параметров кремния, создание объемных наноразмерных кластеров в его кристаллической решетке и получение на их основе новых материалов. В этом плане важными задачами являются формирование многозарядных нанокластеров в решетке кремния и показ его функциональных возможностей, а также исследование таких материалов для использования в микроэлектронике, материаловедение и других отраслях.

В настоящее время в мире большое внимание научных сотрудников и специалистов уделяется созданию генераторов тока малых размеров. Интерес к этой области обусловлен с одной стороны созданием маломощных генераторов, с другой стороны возможностью получения датчиков, выполняющих несколько функций одновременно. Проведение научных исследований по наблюдению колебаний тока за счет формирования кластеров в решетке кремния является важнейшей задачей с точки зрения теоретических и практических аспектов.

На сегодняшний день в мире особое внимание уделяется созданию новых типов датчиков и усовершенствованию параметров существующих. В этом отношении проведение целевых исследований является актуальной задачей по следующим направлениям: получение полупроводниковых материалов нового типа легированием примесных атомов; получение фоточувствительных материалов с нанокластерами примесных атомов; создание твердотельных генераторов на основе полученных материалов; показ возможности создания многофункциональных датчиков, работающих на основе автоколебаний.

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 практику[1].. 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 усовершенствования способов получения нового типа материалов путем создания нанокластеров в кристаллической решетке кремния, являющимся основным материалом для микроэлектронных и полупроводниковых приборов.

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

В этом аспекте актуальной задачей является открытие новых свойств кремния с нанокластерами и создание на их основе принципиально новых фотоприёмников, многофункциональных датчиков и твердотельных генераторов.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по 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: ППИ-3 – «Энергетика, энергоресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения» и имеет важную значимость для развития современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения.

Степень изученности проблемы. Известные ученые А.Доросинец, Н.А.Поклонский, В.А.Самуилов, В.Ф.Стельмакс (Беларусь) провели научные исследования по определению колебаний инфранизких частот в поликристаллическом кремнии. В то же время группа российских ученых Н.Н.Агеева, И.Б.Броневой, А.Н.Кривоносов подробно изучали автоколебания тока в образцах арсенида галлия.

В настоящее время учеными из Узбекистана академиком А.Мамадалимовым, А.Ю.Лейдерманой, Х.Х.Джулиевой были исследованы инфранизкочастотные колебания тока в кремнии, легированного атомами хрома, при температуре $T = 4{,}2$ К.

Академик М.К.Бахадирханов, Н.Ф.Зикириллаев и его ученики изучали свойства колебаний тока в компенсированном кремнии, легированного атомами марганца. Температура наблюдения колебаний в кремнии с примесными атомами марганца происходила в области $T = 77 \div 180$ К под действием падающей энергии света больше чем E_g / 2 эВ.

Хорошо изучены механизмы генерирования неустойчивости тока и управление их параметрами в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Однако остаются неизученными свойства колебаний тока с коэффициентом модуляцией 98 процентов на основе кремния с

многозарядными центрами, генерируемыми под действием примесного ИК-излучения 3-10 мкм.

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 фундаментальных грантов: Ф2-44 «Исследование механизма самоорганизации примесных атомов в полупроводниках и управление их параметрами» (2012–2016), ОТ-Ф2-55 «Разработка научных основ получения объемнонаноструктурированого кремния на основе формирования нанокластеров примесных атомов как нового класса наноматериалов с уникальными функциональными возможностями» (2017–2020).

Целью исследования является управление параметрами и формой автоколебания тока с помощью воздействия внешних факторов путем формирования нанокластеров в кристаллической решетке кремния.

Задачи исследования:

получение образцов кремния с нанокластерами, дающими автоколебания тока;

определение условий формирования колебаний тока в кремнии с нанокластерами;

показ влияния внешних факторов на природу колебаний тока в кремнии с нанокластерами;

показ возможности использования в электронике автоколебаний тока в кремнии с нанокластерами.

Объектом исследования являются образцы монокристаллического кремния с маркой КЭФ-100, КДБ-3, КДБ-5; КДБ-10, используемые в электронной промышленности. В качестве примесного элемента был выбран марганец.

Предметом исследования являются особенности формирования автоколебаний тока в монокристаллическом кремнии под действием нанокластеров атомов марганца, образованных его кристаллической решеткой.

Методы исследования. Для выполнения данной диссертационной работы и для решения поставленных задач были использованы современные методы, такие как атомно-силовая микроскопия, электронная парамагнитная резонансная спектроскопия и рентгеновский анализ. Основные электрофизические параметры образцов определялись методом Холла. При определении параметров автоколебаний тока были применены спектрометр ИКС-21, оснащенный специальным криостатом для контроля температуры (от температуры жидкого азота (77 K) до комнатной температуры), и цифровой осциллограф UT81.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлено, что амплитуда, частота и коэффициент модуляции автоколебания тока, наблюдаемые в кремнии с нанокластерами, могут

управлять внешними факторами (температурой, электрическим полем, энергией света и прочностью);

обнаружено автоколебание тока с инфранизкой частотой 0,1÷100 мГц в кремнии с нанокластерами, формирующимися под действием примесного ИК-изучения в области 3÷10 мкм;

обнаружены стабильные и регулярные автоколебания тока с коэффициентом модуляции до 98 процентов в кремнии с многозарядными центрами;

обнаружены осцилляции фотопроводимости с пороговым электрическим полем 120 В/см при температуре 150 К за счет влияния сильного электрического поля вокруг многозарядных центров;

показано создание нового типа фотоприемника на основе кремния с кластерами примесных атомов марганца, выдающих информацию при изменении частоты колебания фотопроводимости;

раскрыта возможность получения твердотельного генератора на основе образцов кремния с кластерами примесных атомов марганца.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

были получены регулярные автоколебания тока, связанные многозарядными нанокластерами атомов марганца в решетке монокристаллического кремния;

разработан новый тип фотоприемника на основе кремния с примесными атомами марганца, который выдает информацию при изменении частоты осцилляции фотопроводимости;

разработан твердотельный генератор на основе кремния с кластерами примесных атомов марганца.

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием комплексных несвязанных методик измерения и обработки данных, а также их соответствием современным концепциям физики и техники полупроводников.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования объясняется перераспределением энергетической структуры электронов в локальных областях из-за большой кратности заряда кластеров примесных атомов марганца и сильного электростатического поля вокруг них.

Практическая значимость результатов исследования объясняется тем, что из кластеров примесных атомов марганца можно получать регулярные, постоянные, инфранизкочастотные, высокотемпературные (150 К) автоколебания тока.

Внедрение результатов исследования. На основании результатов управление параметрами и формой автоколебаний тока с помощью воздействия внешних факторов посредством формирования нанокластеров в кристаллической решетке кремния:

обнаружено автоколебание тока с инфранизкой частотой 0,1÷100 мГц в кремнии с нанокластерами, формирующимися под действием

примесного ИК-излучения в области 3÷10 мкм. Применено Акционерным обществом «FOTON» при изготовлении твердотельных генераторов (Справка № 02-1518 Акционерной компании «ЎЗЭЛТЕХСАНОАТ» от 9 июля 2018 года). Использование научных результатов позволило разработать инфранизкий частотный твердотельный генератор, работающий в области 0,1÷100 мГц.

разработан новый тип фотоприемника на основе кремния с примесными атомами марганца, принцип работы которого основан на регистрации сигнала, формирующегося при изменении частоты колебаний фотопроводимости. Применено Акционерным обществом «FOTON» при изготовлении твердотельных генераторов (Справка № 02-1518 Акционерной компании «ЎЗЭЛТЕХСАНОАТ» от 9 июля 2018 года). Использование научных результатов позволило разработать фотоприемники.

Апробация результатов исследования. Основные научные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 3 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 3 научных трудов, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 105 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, показана связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Автоколебания тока в полупроводниках»** анализируются состояние проблемы по автоколебанию тока в полупроводниковом материале, условия их возникновения и зависимость основных параметров от внешних факторов на основе литературных данных.

На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулированы задачи исследования.

Основными выполняемыми в научном исследовании целями являются определение условия получения кремниевых образцов с нанокластерами, оптимального параметра необходимого кремниевого материала для исследования; изучение зависимости автоколебания тока, возникшего в кремнии с многозарядными нанокластерами, от температуры, электрического поля, параметров образцов, энергии и мощности ИК-излучения.

Вторая глава «**Технология получения кремниевых образцов, в которых возникает автоколебание тока**» посвящена изучению особенности технологии диффузионного легирования, выбору параметров исходного материала и получению многозарядных нанокластеров в объеме кристалла кремния, технологии получения кремния с необходимыми электрофизическими параметрами.

Основные электрофизические параметры образцов определялись с помощью эффекта Холла. Для определения фундаментальных электрофизических параметров полученных образцов были использованы современные методики и установки: рентгеноструктурный анализ, ЭПР спектрометрия, атомно-силовая микроскопия XIA-200 (Рис.-1,-2).

В третьей главе **«Исследование колебания примесной фотопроводимости кремния с нанокластерами»** представлены результаты исследования условий возникновения автоколебаний тока в кремнии многозарядными нанокластерами и изменение их параметров из-за воздействия внешних факторов.

В исследованных образцах автоколебания тока возникают только при их освещении ИК-излучением, а частота, амплитуда колебания зависит от параметров освещения.

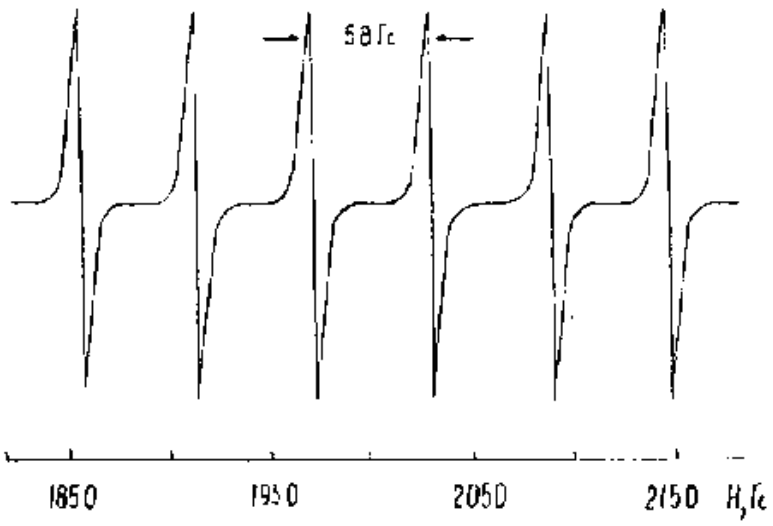


Рис. 1. Спектр ЭПР отдельного атома марганца

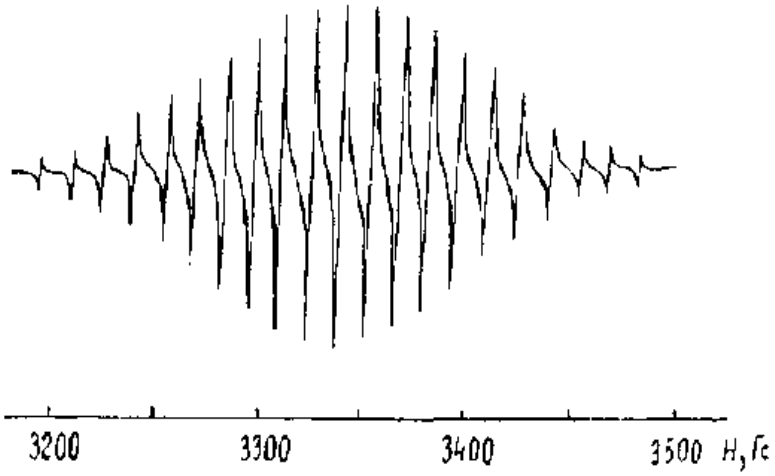


Рис. 2. Спектр ЭПР кластера, состоящий из четырех атомов марганца

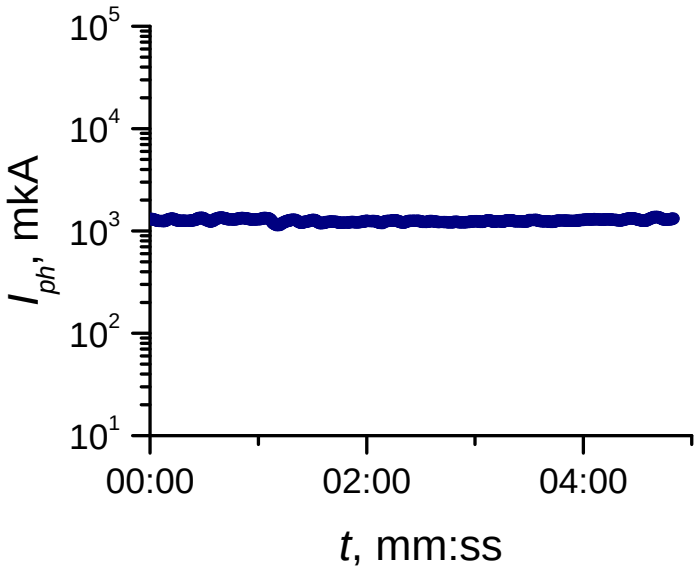
Определено возбуждение автоколебания тока квантовой энергией освещения в диапазоне $h\nu$=0,12÷0,43 эВ или 3-10 мкм. При исследовании ВАТ образцов, освещенных ИК-излучением в диапазоне $h\nu$=0,45÷1 эВ, не наблюдались колебания тока в исследуемом электрическом поле не зависимо от существенного увеличения фототока.

На рис. 3 показана закономерность изменения параметров колебания, возникших в образцах с нанокластерами атомов марганца с удельным сопротивлении $\rho=5\cdot10^3$ Ом·см при T=100 К, напряженности электрического поля E=200 В/см от воздействия инфракрасного излучения в диапазоне $h\nu$=0,12÷0,43 эВ.

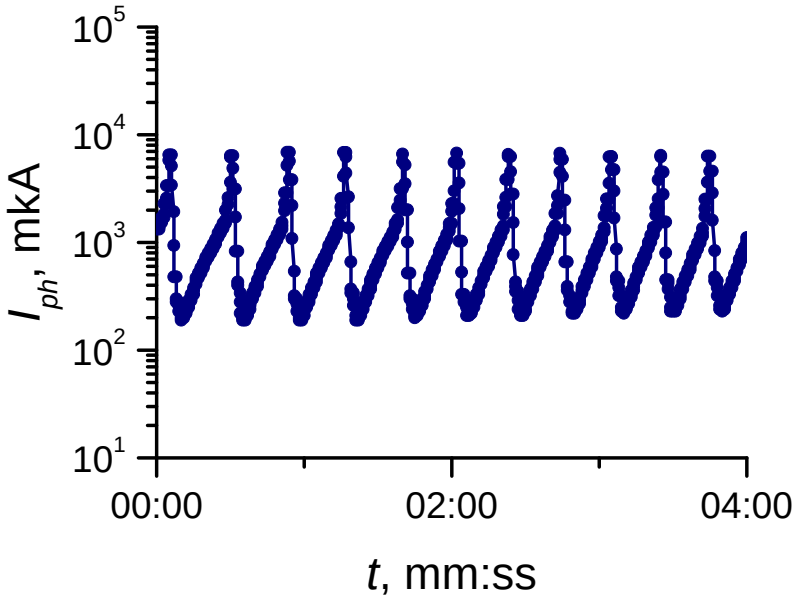
В этом случае колебания имеют вид релаксационного колебания, значение тока постепенно повышается, и следующий ток резко увеличивается на порядок 1÷1,5. После этого за короткое время значение тока резко уменьшится на порядок 1,5÷2.

Амплитуда наблюдаемых колебаний почти 25-30 мА, коэффициент модуляции M~96% и частота являются постоянными, имеют значение равное $f_{ос}$=4,32·10^{-2} Гц.

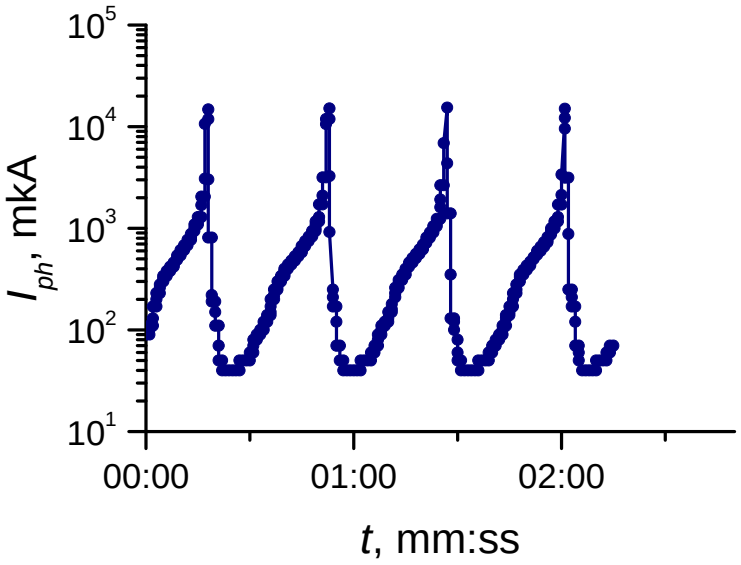
На рис. 4 показана зависимость частоты колебания от энергии фотона освещения постоянной мощности. Как видно из рисунка, зависимость частоты автоколебательных токов, возникающих в образцах кремния с нанокластерами, от энергии ИК-излучения, падающего на образец, линейно изменяется по закону $f_{ос}$=1,18·10^{-3} Гц/эВ.



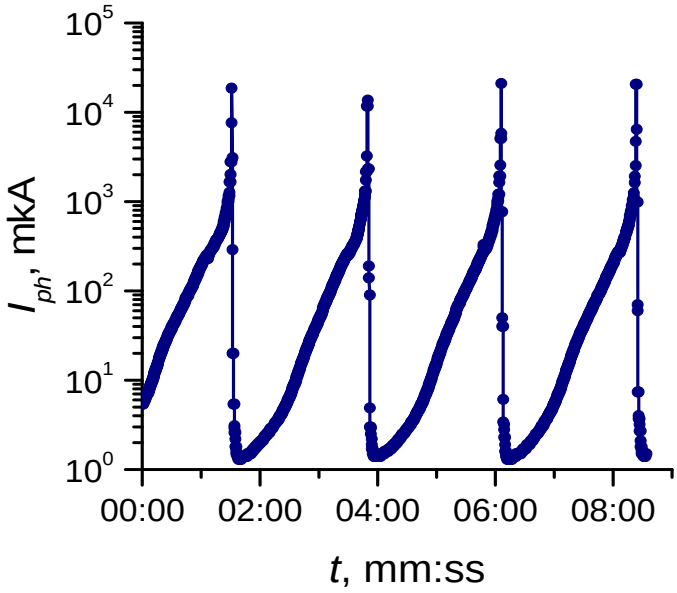
а) hν=0,45 эВ



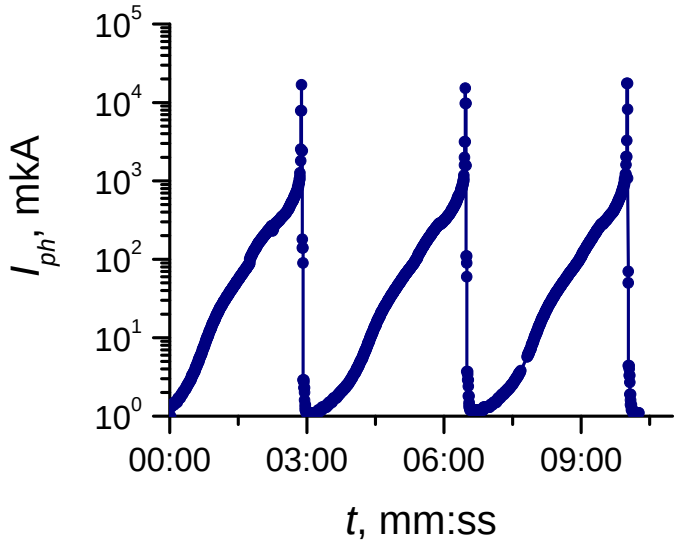
б) hν=0,43 эВ; Δ *t*= 23сек



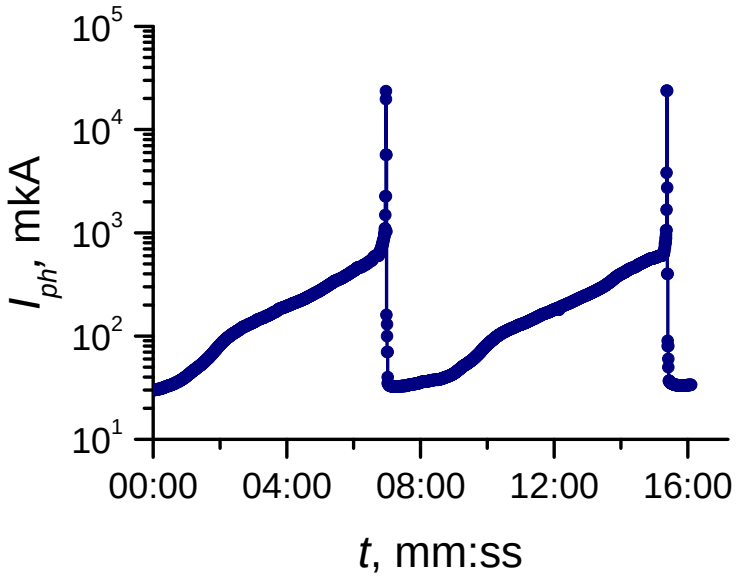
c) $h\nu$=0,3 эВ; Δt= 35 сек



д) $h\nu$=0,16 эВ; Δt =138 сек



е) $h\nu$=0,13 эВ; Δt =215 сек



ф) $h\nu$ =0,12 эВ; Δ t =505 сек

Рис. 3. Зависимость величины колебания тока от энергии фотона при *T*=100 K

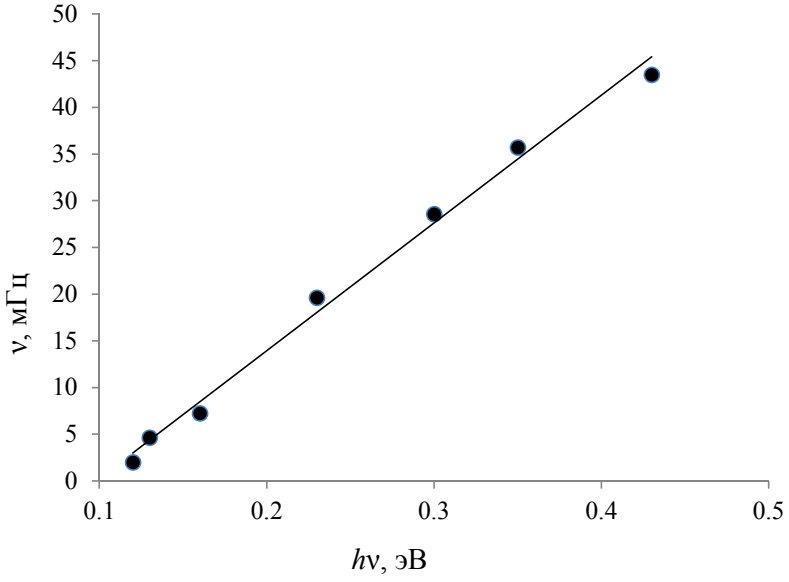
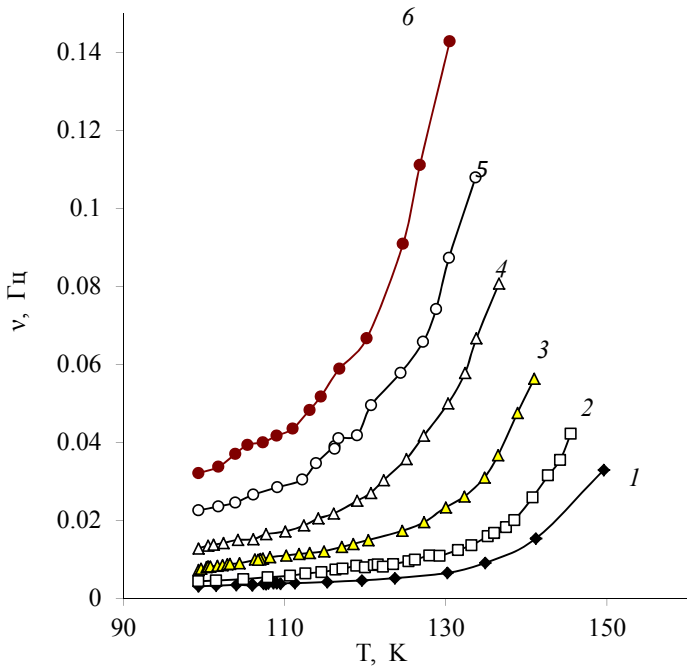


Рис. 4. Изменение частоты автоколебательных ток инфранизких частот от энергии ИК-излучения по закону f_{oc}=1,18·10^{-3} Гц/эВ

Исследованы влияние температуры на возникновение колебания и изменение параметров колебания (амплитуда, частота) при постоянном электрическом поле, мощности излучения и энергии фотона. Можно сделать вывод, что с повышением температуры частота колебания линейно увеличивается, вид колебания и амплитуда мало изменяются. На основе

результатов экспериментов определена зависимость частоты колебания от температуры по коэффициенту G~2,4·10^{-4} Гц/К. Обнаружено, что автоколебания тока в образцах наблюдаются до T=150 К, свыше температуры T=150 К независимо от внешних условий автоколебаний не существуют. На рис. 5 показана зависимость автоколебания от температуры при облучении образцов ИК-излучением в диапазоне 0,12 эВ-0,33 эВ. Как видно из рис. 5, во всех случаях колебания возникают при 100 К.



1)hν=0,12 эВ, 2) hν=0,127 эВ, 3) hν=0,161 эВ,
4) hν=0,226 эВ, 5) hν=0,3 эВ, 6) hν=0,33 эВ,

Рис. 5. Зависимость частоты колебания от температуры при различной энергии освещения при U=250 В

Как показывают результаты исследования, с уменьшением значения мощности излучения форма колебания и амплитуды полностью не изменяется. В основном изменилась частота колебания тока. Была определена нижняя граница мощности излучения W~0,5 мкВт при наблюдении автоколебания тока. Если мощность излучения W<0,5 мкВт, то тогда автоколебание не образуется. На рис. 6 показана зависимость образующегося тока на образце, освещенного инфракрасным излучением $h\nu$=0,3 эВ, от мощности излучения периода автоколебания.

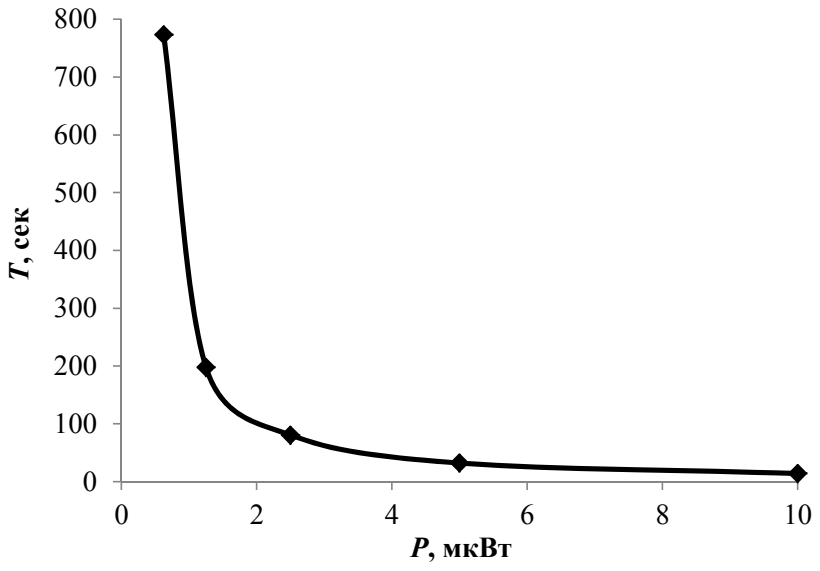
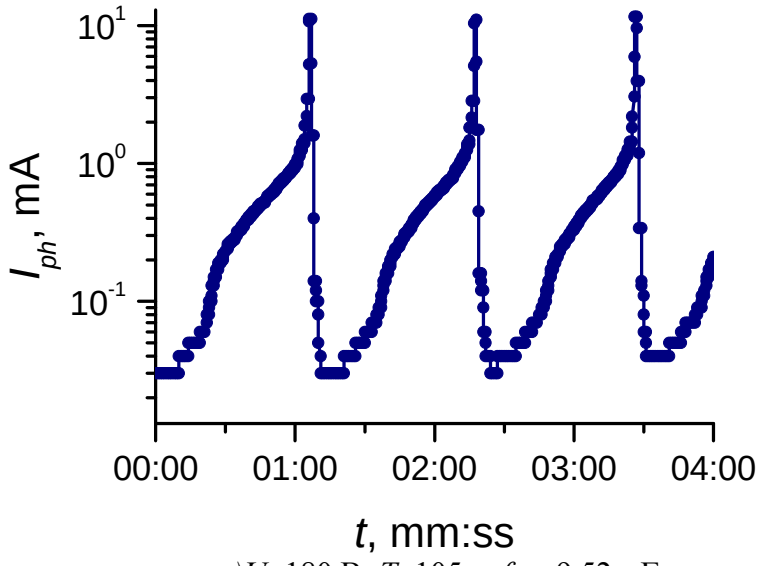


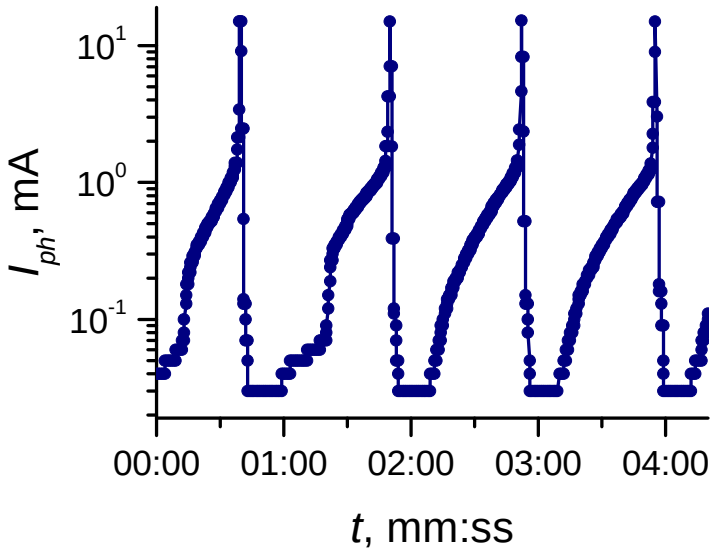
Рис. 6. Зависимости периода автоколебаний тока от мощности падающего ИК излучения, *T*=100 К, *E*=250 В/см

При изучении воздействия электрического поля на параметры автоколебания остальные внешние факторы: температура, энергия падающих фотонов и значение мощности излучения остаются неизменными.

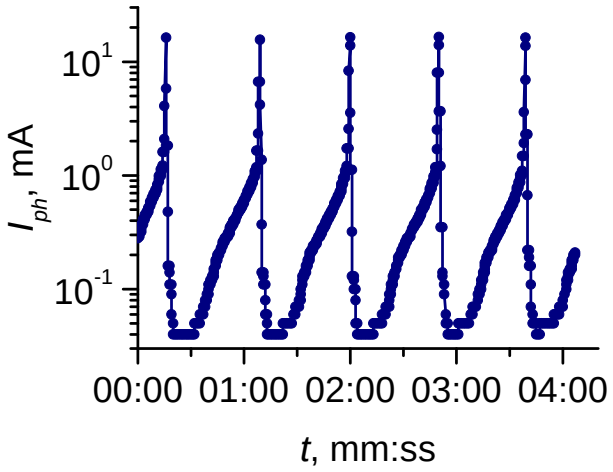
На рис. 7 показана форма автоколебания тока при различных значениях электрического поля.



a)U=180 В; *T*=105 с, f_{oc} =9,52 мГц



б) U=225 В; T=63 с, f_{oc} =15,87 мГц



с) U=250 В; T=53 с, f_{oc}=18,86 мГц

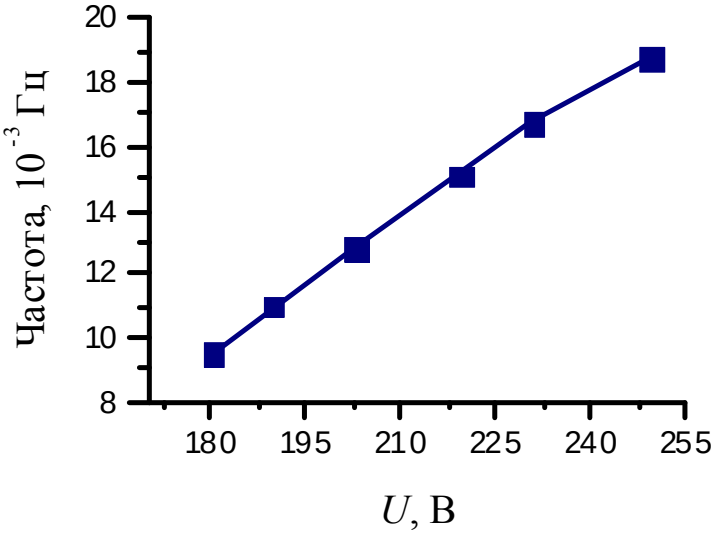


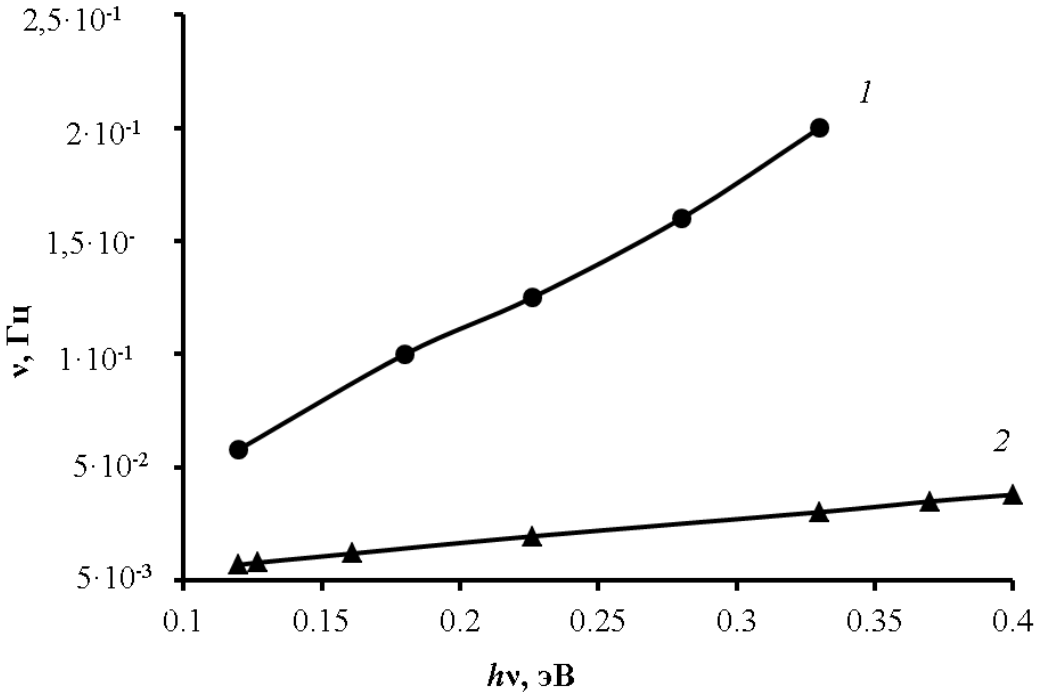
Рис.7. Изменения автоколебаний тока при $h\nu$=0,226 эВ, T=100 К при различных значениях электрического поля

Определено начало колебания тока со значения E~100 В/см напряженности электрического поля. На рис. 7 приведены изменения параметров автоколебаний для различных значений напряженности электрического поля. С повышением значения напряженности электрического поля форма автоколебания осталась устойчивой, а частота колебания почти линейно увеличилась.

Определена зависимость частоты колебания от напряженности электрического поля, подчиняющаяся следующему ниже закону $\frac{f_{os}}{U} \propto 1,3 \cdot 10^{-4} \frac{\mathrm{Hz}}{\mathrm{V}}$

Определена зависимость параметров и формы автоколебания тока в образцах кремния с нанокластерами не только от внешних факторов, но и от электрофизических параметров самого образца, т.е. начального удельного сопротивления и после диффузионного удельного сопротивления образцов.

На рис. 8 показаны автоколебания тока, имеющие большие значения частоты, образующиеся в образцах с удельным сопротивлением $10^3 \div 10^4$ Ом·см по сравнению с образцами с удельным сопротивлением $10^4 \div 10^5$ Ом·см. Причиной этому служит, что в образцах с большим удельным сопротивлением кратность заряжения многозарядных центров будет малой.



1) Зависимость частоты автоколебания тока в образце с удельным сопротивлением $\rho=5,0 \cdot 10^3$ Ом·см от энергии падающего света.

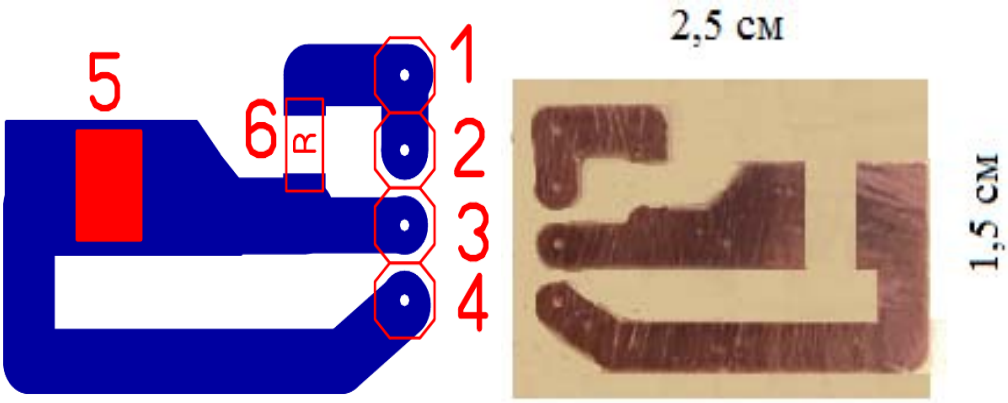
2) Зависимость частоты автоколебания тока в образце с удельным сопротивлением $\rho=2,2 \cdot 10^4$ Ом·см от энергии падающего света.

Рис. 8. Зависимость частоты автоколебания тока в образцах с различными удельными сопротивлениями от энергии ИК-излучения

В четвертой главе диссертации «**Применение в электронике автоколебания тока в кремнии с нанокластерами**» раскрыты возможности использования в электронной промышленности разработанных новых типов приборов на основе кремния с многократными заряженными нанокластерами, которые невозможно создать на основе других материалов.

Разработка и создание генераторов и фотоприемников с выходными частотами на основе полупроводниковых материалов имеет важное значение в науке и технологии.

Во многих полупроводниках определены автоколебания тока, но недостачность их повторяемости требовала очень сложных внешних факторов для образования таких автоколебаний и сохранения их в определенном состоянии. Например, при относительно низкой температуре, большого электрического и магнитного поля и т.д. Поэтому почти невозможно использование на практике твердотельных генераторов, создаваемых на основе таких материалов. В этой главе приведена возможность решения существующей проблемы на основе использования кремния с многозарядными кластерами. На рис. 9 показана важность значения полученных экспериментальных результатов для практического применения в электронной промышленности.



1,4-контакты для напряжении;
2,3- контакты для осциллографа;
5- твердотельный генератор (образец кремнии);
6-сопротивление, ограничивающее ток.

Рис. 9. Внешний вид твердотельного генератора в плате

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1.Исследованы электрофизические и фотоэлектрические свойства образцов кремния с нанокластерами в кремний, и впервые определено автоколебание тока с инфранизкой частотой в диапазоне λ=3÷10 мкм длины волны ИК-излучения.

2.Определена зависимость параметров автоколебания тока с инфранизкой частотой от температуры, изменяющаяся по закону $G \sim 2{,}4 \cdot 10^{-4}$ Гц/К.

3.Определена зависимость автоколебания тока с инфранизкой частотой от энергии ИК-излучения, изменяющаяся по закону $f_{oc}=1{,}18 \cdot 10^{-3}$ Гц/эВ, и установлен диапазон его образования в области 0,12÷0,43 эВ.

4.Определена зависимость параметров автоколебания тока с инфранизкой частотой от приложенного внешнего электрического поля, изменяющаяся по закону $A=10^{-4}$ *Гц/В*.

5.Показано что автоколебания тока с инфранизкой частотой наблюдается его от мощности воздействуюшего ИК-излучения в интервале 0,5÷10 мкВт.

6.Определено изменение параметров автоколебания тока с инфранизкой частотой в зависимости от удельного сопротивления исходного образца.

7.Показана возможность создания новых типов фотоприемников, работающих в диапазоне λ=3÷10 мкм, на основе кремниевых образцов с нанокластерами примесных атомов марганца при изменяющейся частоте и амплитуды автоколебаний тока.

8.Предложена возможности создания твердотельных генераторов на основе кремниевых образцов с нанокластерами примесных атомов марганца.

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

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

KAMALOV KHAYRATDIN USNATDINOVICH

CURRENT SELF-OSCILLATIONS IN SILICON WITH NANOCLUSTERS OF IMPURITY ATOMS AND ITS USE IN THE ELECTRONICS

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 B2017.4.PhD/FM160.

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:	**Ismaylov Kanatbay Abdriymovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor,
Official opponents:	**Mavlonov Giyosiddin Haydarovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor
	Sapaev Bayramdurdi Doctor of Physical and Mathematical Sciences
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,___ University street. Phone/fax: (+99871) 246-46-00, e-mail:tstu_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.

(Regestry record №_____on «_____» _____2018).

M.K. Bakhadirkhanov
Chairman of Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, academician

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

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

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

The aim of the study is to manage the parameters and shape of current self-oscillation by external factors through the formation of nanoclusters in the crystal lattice of silicon.

Research tasks:

obtaining samples of silicon with nanoclusters giving a self-oscillation current;

determination of conditions for the formation of current oscillations in silicon with nanoclusters;

showing the influence of external factors on the nature of current oscillations in silicon with nanoclusters;

showing the possibilities of application in the electronics of auto-oscillations of the current in the silicon with nanoclusters.

The object of the study are samples of single crystalline silicon with type KEF-100, KDB-3, KDB-5; KDB-10 used in the electronics industry. Manganese was chosen as an impurity element.

The subject of the study are pecularities of formation of self-oscillations of the current in single crystalline silicon in the presence of nanoclusters of manganese atoms formed by its crystal lattice.

The scientific novelty of the research is as follows:

it was found that the amplitude, frequency and modulation coefficient of the current self-oscillation observed in silicon with nanoclusters can be controlled by external factors (temperature, electric field, light energy and strength);

self-oscillation of the current with infra-low frequencies of 0.1÷100 MHz was found in silicon with nanoclusters forming under the influence of IR-radiation in the region of 3÷10 μm;

stable and regular self-oscillation of the current with a modulation coefficient of up to 98 percent in silicon with multicharged centers was found;

it was found that the photoconductivity oscillations with a threshold electric field 120 V / cm at a temperature 150 K were due to the influence of a strong electric field around multicharged centers;

the creation of a new type of photodetector based on silicon with clusters of manganese impurity atoms providing information on the change in the frequency of photoconductivity oscillation is shown;

the possibility of producing solid generators on the basis of samples of silicon with clusters of impurity atoms of manganese was revealed.

Application of research results.

Based on the results of varying parameters and the form of current self-oscillations by means of influence of external factors through the formation of nanoclusters in the crystal lattice of silicon:

self-oscillation of the current with an infra-low frequency of 0.1 ÷ 100 MHz in silicon with nanoclusters was revealed that is formed under the influence of impurity IR-irradiation in the investigated area of 3 ÷ 10 μm. The

invention was applied by Joint Stock Company «FOTON» in the production of solid-state generators (Reference No. 02-1518 of the Joint-Stock Company «UZELTEKHSANOAT» dated July 9, 2018). Application of scientific results allowed to develop an infra-low frequency solid-state generator operating in the area of 0.1 ÷ 100 MHz.

A new type of photodetector based on silicon with impurity atoms of manganese was developed that operates based on the principle recording a signal that is formed in times of photoconductivity frequency change. Applied by Joint Stock Company «FOTON» in the production of solid-state generators (Reference No. 02-1518 of the Joint-Stock Company «UZELTEKHSANOAT» dated July 9, 2018). Application of scientific results allowed developing photodetectors.

Approbation of research results. The main scientific results of the dissertation were reported and discussed at 3 international and 5 national scientific conferences.

Publication of the research results. On the subject of the thesis 3 scientific papers, 3 articles in journals recommended by the Higher attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertations were published.

The structure and scope of the thesis. The dissertation consists of introduction, four chapters, conclusion, list of references and Appendix. The text of the thesis is presented on 105 pages.

ЭЪЛОНҚИЛИНГАНИШЛАРРЎЙХАТИ
СПИСОКОПУБЛИКОВАННЫХРАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Исамов С.Б., Камалов Х.У., Ковешников С.В., Ходжанепесов К.А. Твердотельный генератор инфранизких частот с управляемыми параметрами. // Приборы. 2018. № 3 (213). С 1-5. [05.00.00; № 63].

2. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Илиев Х.М., Камалов Х.У. Новые фотоэлектрические явления в кремнии с многозарядными нанокластерами // Научный Вестник АДУ. 2017, №3, С.10-13.[01.00.00; №13]

3. Bahadirkhanov M.K, Isamov S.B, Mavlyanov A, Kamalov H Sheina N.E., Abnormal impurity photoconductivity in silicon with multiple charged manganese atoms // International Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences2016, Sep., Vol. 7 (3) [Impact factor1,24. International scientific indexing impact factor]

II бўлим (II часть; II part)

4. Зикириллаев Н.Ф., Исмайлов К.А., Исамов С.Б., Камалов Х.У., Ковешников В., Исмайлов Б.К. Осцилляции примесного фототока в области λ=3-8 мкм в кремнии с многозарядными центрами / Материалы IV Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и нано структурах, 25-26 мая 2018 г. Фергана. С. 60-61.

5. Камалов Х.У., Исамов С.Б., Исмайлов К.А. Управление параметрами автоколебаний тока в кремнии / Муҳандислик физикасининг илмий-услубий муаммолари, 8-9 сентябрь 2017 й. Тошкент. Б. 72-75.

6. Камалов Х.У., Исамов С.Б., Миркомилова М., Фотоприёмный прибор на основе автоколебаний фототока в кремнии с нанокластерами / Муҳандислик физикасининг илмий-услубий муаммолари, 8-9 сентябрь 2017 й. Тошкент. Б. 282-283.

7. Bakhadirkhanov M.K., Isamov S.B., Azizov M.K., Kamalov Kh., Mirkomilova M., Khanbabayev A. Novel class of infrared photo-detectors for the range λ=1-10 micron on the basis of silicon with self-organized quantum dots / Материалы XIII международной научной конференции «Физика твердого тела», посвященной 20-летию Евразийского национального университета имени Л.Н.Гумилева, 26-28 апреля 2016 г. С. 240-241.

8. Исамов С.Б., Камалов Х.У., Ковешников С.В., Сайдумаров О. Осцилляция фотопроводимости в кремнии с многозарядными нанокластерами**.** «Неравновесные процессы в полупроводниковых структурах» к 70-летию академика АН РУз А.Т. Мамадалимова / Материалы республиканской научной конференции, 1-2 февраля 2017 г. Ташкент С. 37-39.

9. Исамов С.Б., Камалов Х.У., Ковешников С.В., Зикириллаев Н.Ф., Сайдумаров О. Особенности автоколебаний тока в образцах кремния с нанокластерами атомов марганца / «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» VII-илмий-назарий анжуман материаллари, 19-20 май 2017 й. Термиз. Б. 54-55.

10. Азизов М.К., Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Камалов Х.У., Кучкаров Б.Х. Создание многофункциональных датчиков физических величин на основе кремния с нанокластерами / «Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари» Республика илмий-амалий анжумани материаллари, 4-5 декабрь 2015 й. Андижан. Б.153-154.

11. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Камалов Х.У., Азизов М.К., Мелебаев Д. Регулярное и стабильное автоколебание тока в кремнии с квантовыми точками / Материалы V международной научной конференции «Физика и физическое образование: Достижения и перспективы развития», 21-22 сентября 2015 г. Бишкек. С. 7-8.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек ва рус тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди. (26.07.2018 йил).

Босишга рухсат этилди: 30.07.2018 йил.
Бичими 60x84 $^{1}/_{16}$, «Times New Roman» гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 2,9. Адади: 100. Буюртма: № 263.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.