

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.30.05.2018.FM/T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**  

---

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ**

**ХАШАЕВ МУСЛИМ МУСАГИТОВИЧ**

**A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> КЕНГ ЗОНАЛИ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА БЎШ ЖОЙ ВА  
КИРИТМАЛАРНИНГ ЎЗ ҲОЛИЧА ШАКЛЛАНИШ  
ЖАРАЁНЛАРИНИНГ РИВОЖЛАНИШ МЕХАНИЗМИ**

**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)  
on physical-mathematical sciences**

**Хашаев Муслим Мусагитович**

$A^{III}B^V$  кенг зонали яримўтказгичларда бўш жой ва киритмаларнинг ўз  
ҳолича шаклланиш жараёнларининг ривожланиш механизми ..... 3

**Хашаев Муслим Мусагитович**

Механизм развития процессов самоорганизации вакансий и примесей  
в широкозонных полупроводниках типа  $A^{III}B^V$  ..... 21

**Khashaev Muslim Musagitovich**

Mechanism of development of self-organization processes of vacancies  
and impurities in wide-band semiconductors of type  $A^{III}B^V$  ..... 39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ

List of published works ..... 43

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.30.05.2018.FM/T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ**

**ХАШАЕВ МУСЛИМ МУСАГИТОВИЧ**

**A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> КЕНГ ЗОНАЛИ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА БЎШ ЖОЙ ВА  
КИРИТМАЛАРНИНГ ЎЗ ҲОЛИЧА ШАКЛЛАНИШ  
ЖАРАЁНЛАРИНИНГ РИВОЖЛАНИШ МЕХАНИЗМИ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**Тошкент – 2018**

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.1.PhD/FM41 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида ([www.fti.uz](http://www.fti.uz)) ва «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:** **Лейдерман Ада Юльевна**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** **Арипов Хайрулла Кабулович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расулов Рустам Явқачович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:** **Ўзбекистон Миллий университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти ҳузуридаги DSc.30.05.2018.FM/Т.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 2Б-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91; e-mail: [ftikans@uzsci.net](mailto:ftikans@uzsci.net), Физика-техника институти мажлислар зали).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин ( \_\_\_ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 2Б-уй. Физика-техника институти. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2018 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ куни тарқатилди.

(2018 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_ рақамли реестр баённомаси)

**Н. Р. Авезова**

Илмий даражалар берувчи  
Илмий кенгаш раиси т.ф.д.

**О.А. Абдулхаев**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш  
илмий котиби ф.-м.ф. фалсафа доктори

**А. Абдурахманов**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш  
қошидаги илмий семинар раиси т.ф.д.,  
профессор

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда яримўтказгичлар физикасининг жадал ривожланаётган соҳасида оддий яримўтказгичлар ўрнини тобора  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$  турдаги яримўтказгичлар ва янги кўп компонентли материаллар эгаллаб бормоқда. Шу жиҳатдан қараганда бундай моддаларда рўй берадиган киришма атомлари ва нуқсонларнинг ташқи таъсирлар (харорат, радиация, ёруғлик ва ҳоказо) шароитидаги ўзаро таъсирларини ва уларда ўз ҳолича шаклланиш ҳодисаси жараёнлари ривожланишини ўрганиш асосий масалалардан бири ҳисобланади.

Ҳозирги кунда жаҳон миқёсида бундай моддаларни турли усуллар – диффузия, газ фазалик ва суюқ фазалик усуллар билан олиш жараёнида юзага келадиган эркин вакансия ва киришмаларнинг тақсимот қонуниятларини очиб беришга қаратилмоқда. Бу соҳада мақсадли илмий тадқиқотларни қуйидаги йўналишларда комплекс илмий тадқиқ қилиш муҳим масалалардан ҳисобланади, жумладан, бундай моддалардан асбоб тузилмалари, айниқса диод ва фотоэлементлар яратиш жараёнида ҳосил бўладиган ва бу асбобларнинг сифатига таъсир қилувчи якка, содда изоляцияланган нуқсонлар (тугунлараро атомлар бўш жойлари ва бошқалар)нинг ҳамда, жамлашган нуқсонлар (киришма-нуқсон ва киришма-киришма комплекслари, дивакансиялар ва бошқалар)нинг содир бўлиш жараёнларини ўрганиш; бундай моддаларда ташқи таъсирлар шароитида киришма ва бўш жойларнинг ўз ҳолича шаклланиш ҳодисасини ўрганиш; ташқи таъсирларга сезгирлиги юқори бўлган янги турдаги яримўтказгичли асбобларни башорат қилиш кабилардир.

Республикамызда яримўтказгичлар физикаси соҳасининг ривожланишига, айниқса  $A^{III}B^V$  турдаги яримўтказгичлар асосида асбоблар тайёрлашга жуда катта эътибор қаратилмоқда. Бундай яримўтказгичлардаги чуқур сатҳли киришмалар спектрини ва улардаги нуқсонларни, шунингдек улар асосида тайёрланган тузилмаларнинг физик хусусиятларини ўрганишда муҳим аҳамиятга эга бўлган натижалар олинган. Ўзбекистон Республикасини 2017-2021 йилларда ривожлантириш стратегиясига асосан қуйидаги вазифалар белгилаб берилган «принципиал жиҳатдан янги маҳсулот ва технология турларини ўзлаштириш, шу асосда ички ва ташқи бозорларда миллий товарларнинг рақобатбардошлигини таъминлаш». Бу борада ташқи таъсирларга ўта сезгир бўлган яримўтказгичли моддаларни топиш ва улар асосида яримўтказгичли асбоблар яратиш долзарб масалалардан биридир. Бу ишларни амалга оширишда  $A^{III}B^V$  турдаги кенг соҳали яримўтказгичларда нуқсонларнинг ҳосил бўлиши ва ўз ҳолича шаклланиш жараёнларини ўрганиш жуда муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги

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

**Тадқиқотнинг республиканинг фан ва технологияларни ривожлантириш устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Яримўтказгичлардаги чуқур сатҳли киришмалар ва нуқсонларни ўрганиш бўйича тадқиқотлар кўпгина жаҳон илмий марказларида олиб борилмоқда. Биринчи навбатда бу борада Массачусетс университетида (АҚШ) профессор Госсман бошчилигида кремний ва галлий арсенидини чуқур сатҳли киришмалар билан имкон қадар юқори концентрацияда легирлаш бўйича олиб борилаётган ва намуна бўйлаб вакансияларнинг даврий тақсимланиши кузатилган тажрибаларни кўрсатиш лозим. А.Ф. Иоффе номидаги ФТИнинг (Санкт-Петербург) бир гуруҳ олимлари томонидан бажарилган иш<sup>1</sup> самарий сульфидидаги термовольтаик эффектни тадқиқ қилишга бағишланганлигини таъкидлаб ўтиш лозим. Баъзи бир назарий башоратлар ЎзР ФА Физика-техника институтининг Қуёш печида<sup>2</sup> кўп марта қайта эритиб олинган поликристалл кремнийдаги экспериментал натижаларда ҳам ўз тасдиқини топган.

ЎзР ФА Физика-техника институтининг олимлари П.М.Карагеоргий-Алкалаев ва А.Ю. Лейдерманлар томонидан чуқур сатҳли киришмалар хусусиятларининг рекомбинация ва ҳарорат туфайли ўзгариши ғоясига асосланган заряд силжишининг диффузиявий механизми билан кечадиган ўз ҳолича шаклланиш жараёнларини ўрганиш бўйича илк бор илмий изланишлар<sup>3</sup> олиб берилган. Улар томонидан рекомбинация канали сифатида ва ўз навбатида рекомбинация тезлигининг пасайишига сабаб бўлувчи, чуқур сатҳли киришмалар марказлари эффектив зичлигининг ўзгариш концепцияси илгари сурилган эди. Натижада ўз ҳолича шаклланиш жараёнининг бошланганлиги тўғрисида маълумот берувчи нотурғун ток ташувчиларнинг даврий тақсимланиши содир бўлади. Кейинчалик экстремал легирлаш шароитида олинган яримўтказгичларда содир бўладиган фотоқўзғатиш (хусусан фотоэлементларда) ва инжекция шароитида ўз ҳолича шаклланиш ривожланиши мумкинлиги қараб чиқилган.

<sup>1</sup>Каминский В.В. Казанин М.М., Клишин А.Н., Соловьев С.М., Голубков А.В. Наблюдение термовольтаического эффекта в структурах на основе сульфида самария // Журнал технической физики. – Санкт-Петербург. 2011. –Т.81, вып.6. – С.150-152.

<sup>2</sup>Саидов А.С. Термоэлектрические свойства технического кремния полученного восьмикратной переплавкой на солнечной печи // Альтернативная энергетика и экология. – Россия, 2010. – №3(83). - С.22-25.

<sup>3</sup> Karageorgy-Alkalaev P.M., Leiderman A.Yu. The synergetic phenomena in photoexcited semiconductors // Physica Status Solidi (a). –1987. - Vol.100, No.1. - P.221-231.

Бугунги кунда таркибида киришмалар комплекслари ва бўш жойлар мавжуд бўлган, хусусан Чохральский усули билан ўстирилган, аввалдан донор ва бўш жой типдаги саёз сатҳли комплексларга ва  $n$ -тип ўтказувчанликка эга бўлган  $A^{III}B^V$  турдаги яримўтказгичларида ўз ҳолича шаклланиш жараёнларининг ривожланиши мумкинлигини ўрганиш умуман муаммолигича қолмоқда.

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Физика-техника институти илмий тадқиқотлари режаси асосидаги Ф2-ФА-0-97004 рақамли «Солитонларнинг ультрасовуқ квант газлар ва оптик тизимлардаги динамикаси, ва кўп компонентлик яримўтказгичлардаги синергетик жараёнлар» (2012-2016 й.й.) фундаментал лойиҳаси доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади**  $A^{III}B^V$  турдаги яримўтказгичларда эркин вакансия ва киритмаларнинг ўз ҳолича шаклланиш жараёнларининг ривожланиш механизми ҳамда улар асосида яратилган тузилмалардаги инжекция ҳодисаларини аниқлашдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

$A^{III}B^V$  турдаги  $n$ -яримўтказгичлардаги номувозанат ток ташувчилар рекомбинацияси статистикасининг янги вариантини ишлаб чиқиш;

Чохральский усули билан ўстирилган  $A^{III}B^V$  турдаги  $n$ -яримўтказгичларда вакансия ва киритмаларнинг ўз ҳолича шаклланиш жараёнларининг ривожланиш механизмларини очиб бериш;

бир жинсли яримўтказгичлар ва улар асосида тайёрланган тузилмаларда бўш жой ва киритмаларнинг ўз ҳолича шаклланиш шароитидаги ток ўтказиш механизмларини аниқлаш.

**Тадқиқотнинг объекти** Чохральский усули билан ўстирилган  $A^{III}B^V$  типдаги кенг зонали ва  $n$ -тип ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичлардан иборат.

**Тадқиқотнинг предмети**  $A^{III}B^V$  типдаги кенг зонали яримўтказгичлардаги ўз ҳолича шаклланиш жараёнлари ва термик стимулланган термо-вольтаик ҳодисалардан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Ночизикли дифференциал тенгламаларни ечиш ва таҳлил қилишнинг анъанавий усулларида, «Mathcad» дастурий муҳитида компьютер моделлаштириш усулларида, ҳамда вольтампер характеристикасини, шунингдек ток ва кучланишнинг ҳароратга боғлиқлигини аниқлашнинг ишончли усулларида фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

$n$ -тип ўтказувчанликка эга бўлган  $A^{III}B^V$  типдаги яримўтказгичлардаги номувозанат ток ташувчиларнинг саёз донор ва бўш жой типдаги икки сатҳли мураккаб рекомбинация комплекслари орқали содир бўладиган рекомбинацияси тезлиги ҳисоблаб топилган;

*n*-тип ўтказувчанликка эга бўлган  $A^{III}B^V$  типдаги яримўтказгичлардаги номувозанат ток ташувчиларнинг яшаш вақти оддий рекомбинация марказлари, эркин бўш жойлари, саёз донор ва бўш жой типдаги комплекслар орқали кечадиган рекомбинация жараёнларида қўзғатиш даражасига боғлиқ ҳолда ортиши аниқланган;

бир жинсли *n*-тип ўтказувчанликка эга бўлган  $A^{III}B^V$  типдаги яримўтказгичларда бир жинсли қиздириш таъсирида синергетик ток ва кучланиш юзага келишига олиб келувчи бўш жойларнинг ва саёз сатҳли донорларнинг ўз ҳолича шаклланиши назарий жиҳатдан башорат қилинган ҳамда GaAs<Te>, GaAs<Sn>, InP<Te>, InSb<Te> яримўтказгичларда тажрибада тасдиқланган;

рекомбинация марказлари даврий жойлашган яримўтказгичларда ток характеристикаларини ҳисоблашда диффузион-дрейфли ва инжекцияли-диффузия режимларида ҳосил бўлувчи даврий қўшимчаларни ҳисобга олиш кераклиги кўрсатилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

$A^{III}B^V$  яримўтказгичларда рекомбинациянинг уч канали: оддий рекомбинацион марказлар, саёз донор ва бўш жой, эркин бўш жойларни ҳисобга олиш орқали қўзғалиш даражасининг ортиши билан номувозанат ток ташувчилар яшаш вақтининг ортиши аниқланган;

ўз ҳолича шаклланиш жараёнларининг термик стимулланиши туфайли  $A^{III}B^V$  типдаги яримўтказгичлар асосида яратиладиган *p-n*-тузилмалар ишчи ҳароратлари оралиғининг кенгайиши аниқланган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** масалани ечишнинг асосланган ва ишонарли услубларидан фойдаланиш, назарий олинган натижаларни тажриба натижалари билан солиштириш ва ҳисоблаб топилган натижаларнинг тажрибадан олинган маълумотларга мос келиши билан таъминланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, яримўтказгичларда термик стимулланган вакансия ва киришмаларининг ўз ҳолича шаклланиш жараёнлари ҳақидаги тушунчаларни кенгайтириш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти олинган натижаларни кенг ҳароратлар оралиғида ишлайдиган яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқишда қўлланилиши мумкинлиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши.**  $A^{III}B^V$  кенг зонали яримўтказгичларда бўш жой ва киришмаларнинг ўз ҳолича шаклланиш жараёнларининг ривожланиш механизми асосида:

синергетик ток ва кучланишлар ҳосил бўлишига олиб келувчи саёз донор ва вакансия комплексларининг бир жинсли қиздириш таъсирида ажралиши ва кейинги ўз ҳолича тартибли тузилишининг ишлаб чиқилган модели Ф-2-37 рақамли «Яримўтказгичларда нуқсонлар ҳосил бўлишининг лазерли индуцирланган ночизикли жараёнларининг хусусиятлари» (2012-2016 йй)

фундаментал лойиҳасида инъекцияли фотокабуллагичлар ва фотодиодларни назорат қилишнинг ва эксплуатация вақтида ишончилигини башорат қилишнинг тезкор услубини ишлаб чиқишда фойдаланилган (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 22 декабрдаги ФТА-02-11/1345-сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичларда нуқсонларнинг содир бўлиш жараёнида иссиқлик ва лазерли индуцирлаш таъсирларининг бир хил эканлигини очиб беришга имкон берган;

p-n-тузилмаларда ток ўтиш жараёнларига рекомбинация марказлари концентрацияси ўзгаришининг таъсири «FOTON» акциядорлик жамиятида яримўтказгичли кристаллар ва яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқаришда қўлланилган. («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2018 йил 4 майдаги 02-1035-сон маълумотномаси). Илмий натижаларни қўллаш инъекцияли-диффузия ва диффузияли-дрейф режимларида ишловчи p-n-тузилмаларнинг ток характеристикаларини яхшилаш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация ишининг асосий натижалари 11 та халқаро ва 3 та республика илмий-амалий конференцияларида баён этилган ва муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича 28 та илмий иш чоп қилинган бўлиб, шулардан 14 таси илмий журналларда, жумладан 6 таси чет эллардаги халқаро журналларда.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. У 105 та матнли саҳифада баён этилган бўлиб, 21 расм, 2 та жадвални ўз ичига олган.

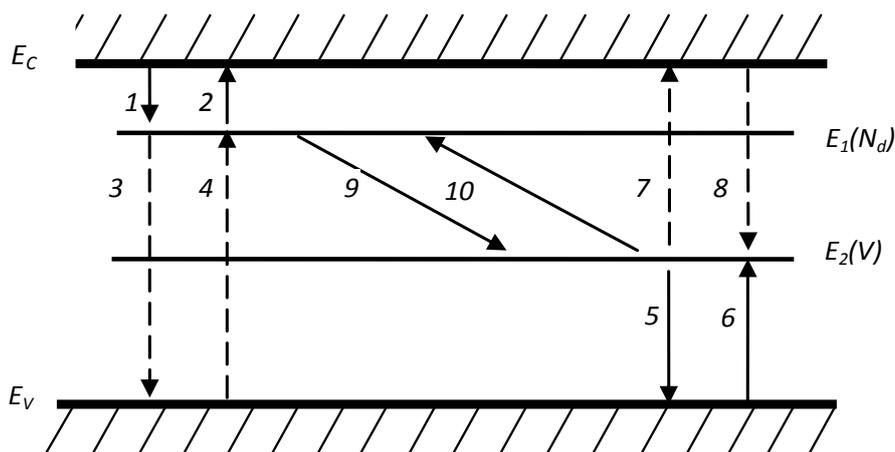
## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг **кириш қисмида** ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асослаб берилган. Тадқиқотларнинг республикадаги фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишлари билан боғлиқлиги кўрсатилган. Муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқотнинг объектлари, предметлари ва усуллари аниқланган. Илмий янгилик баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончилиги асослаб берилган. Натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган. Ишнинг апробацияси, диссертациянинг ҳажми ва тузилиши ҳақида қисқача маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> типдаги яримўтказгичларда киришмаларнинг ўз ҳолича тузилиши ва бўш жой ва киришма типдаги комплекслар мавжуд бўлишлигини термодинамик йўл билан асослаш бўйича шу пайтгача олиб борилган ишлар ҳақида қисқача маълумот**» деб номланган биринчи бобида, инсон билимларининг биология, кимё, социология ва бошқа турли соҳаларини қамраб олувчи синергетика фандаги янги йўналиш сифатида қараб чиқилган. Фотоқўзғатиш шароитида чуқур сатҳли киришмали бир жинсли яримўтказгичларда ўз ҳолича тузилишнинг ривожланишини тадқиқ қилишга бағишланган дастлабки ишлар бўйича қисқача

маълумот берилган. Шунингдек, турли нуқсонлар ва комплексларнинг ўз ҳолича тузилишини ва рекомбинация марказларининг рекомбинация ва ҳарорат туфайли содир бўладиган қайта тузилиши кузатишларга бағишланган тажрибалар бўйича қисқача маълумот берилган. Чохральский усули билан ўстирилган ва  $n$ -тип ўтказувчанликка эга бўлган  $A^{III}B^V$  типдаги ярим-ўтказгичларда саёз донор ва бўш жой кўринишидаги комплекслар мавжудлигини тасдиқловчи фактлар, ҳамда бундай комплекслар ҳосил бўлишининг термодинамикаси муҳокама қилинган. Мавжуд бўлган назарий ва экспериментал маълумотлар асосида вазифанинг қўйилиши шакллантирилган.

Диссертациянинг «Саёз донор ва бўш жой типдаги қайта тузилувчи мураккаб марказлар (комплекслар) рекомбинациясининг статистикасини тадқиқ қилиш» деб номланган иккинчи бобда номувозанат заряд ташувчилар рекомбинацияси саёз донор ва бўш жой кўринишидаги рекомбинацион комплекслар орқали содир бўладиган Чохральский усули билан ўстирилган  $A^{III}B^V$  типдаги  $n$ -тип ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичлар учун рекомбинация статистикаси ишлаб чиқилган. Бундай комплекс учун рекомбинация модели 1-расмда кўрсатилган. Бундай модел учун электронлар ва коваклар рекомбинацияси статистикасини келтириб чиқариш, комплекс ичида донор сатҳининг вакансия сатҳи билан алмашилишини ҳисобга олишга ва Шокли-Рид классик статистикаси асосида ётган осонлаштирувчи тахминлардан воз кечишга асосланган, яъни, айнан ушлаб олинган заряд ташувчининг ушлаб турилиш вақти «қопқон»га электронни чиқариш ёки ковакни ушлаб олиш учун зарур бўлган ўртача вақтга нисбатан аҳамиятсиз деган тахминга (яъни, «қопқон» электронни ушлаб олган захоти, шу пайтнинг ўзида инерциясиз ковакни ушлаб олиши ёки ковакни ушлаб олиши билан, шу пайтнинг ўзида инерциясиз электронни ушлаб олиши тахминидан воз кечишга) асосланган.



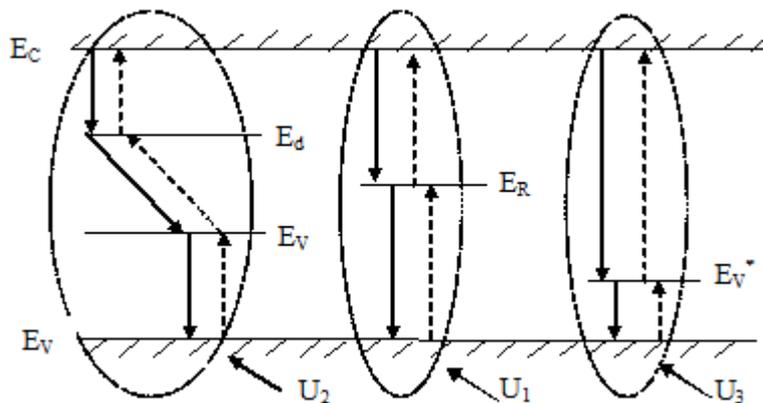
**1-расм. Саёз сатҳли донор ва бўш жой турдаги рекомбинация комплекси орқали содир бўлувчи рекомбинация чизмаси**

Бундай моделдаги номувозанат заряд ташувчилар рекомбинациясининг тезлигини ҳисоблашлар натижасида қуйидаги ифода олинди:

$$U = N_R \frac{c_{n1}c_{p2}(n(p + p_{12}) + p_{12}(n + n_{11}))}{c_{n1}(n + n_{11}) + c_{p2}(p + p_{12}) + \frac{c_{n1}c_{p2}}{c_{12}}(n + n_{11})(p + p_{12})}. \quad (1)$$

Ушбу (1) ифодадан аниқ кўринадикки, комплекс ичида электрон алмашинувининг мавжуд бўлишлиги махражда сатҳлараро алмашинув коэффиценти  $c_{12}$  га эга бўлган ҳаднинг пайдо бўлишига олиб келади. Яна шу нарса кўрсатилганки, етарли даражадаги қўзғатишларда асосий ролни комплекс ичидаги электрон алмашинуви бажара бошлайди, бу эса рекомбинация тезлигининг тўйинишига олиб келиши мумкин.

Бундан кейин Чохральский усули бўйича ўстирилган ва саёз сатҳли донор ва бўш жой турдаги рекомбинация комплексларига эга бўлган  $A^{III}B^V$  типдаги яримўтказгичлардаги номувозанат ток ташувчиланинг яшаш вақтини белгилловчи рекомбинация жараёнлари қараб чиқилган. Бу ҳолда материалда учта рекомбинация канали мавжуд бўлади: оддий рекомбинация марказлари, саёз сатҳли донор ва вакансия типдаги рекомбинация марказлари ва эркин бўш жойлар (2-расм). Бунда комплекслар ва эркин бўш жойларнинг концентрацияси материални фотоқўзғатиш жараёнида ўзгаради. Натижада яшаш вақтининг эркин ток ташувчилар концентрациясига боғлиқлиги пайдо бўлади, бу нарса эса фотоэлементнинг асосий характеристикаларига таъсир кўрсатади.



**Рис.2. Оддий  $N_R$  ( $E_R$  сатҳли) рекомбинация марказлари,  $N_{dV}$  ( $E_d$  ва  $E_v$  сатҳли) рекомбинация комплекслари ва  $V$  ( $E_v^*$  сатҳли) эркин бўш жойларга эга бўлган  $nGaAs$  да кечадиган рекомбинация жараёнларининг чизмаси**

Диссертациянинг «Чохральский усули бўйича ўстирилган  $n$ -типдаги ўтказувчанликка эга бўлган  $A^{III}B^V$  типдаги яримўтказгичлардаги термик стимулланган синергетик жараёнларни тадқиқ қилиш» деб номланган учинчи бобда Чохральский усули бўйича ўстирилган  $n$ -типдаги ўтказувчанликка эга бўлган  $A^{III}B^V$  типдаги яримўтказгичлардан тайёрланган содда омик қаршиликли бир жинсли намуналардаги термик стимулланган синергетик жараёнларни тадқиқ қилишдан олинган натижалар келтирилган. Бундай материалларда хона ҳароратида эркин бўш жойлар бўлмайди, чунки

улар ўстириш жараёнида саёз сатҳли киришмалар билан бирлашиб, саёз сатҳли донор ва бўш жой типдаги комплексларни ҳосил қилади.

Бундай яримўтказгичда ҳарорат таъсирида вакансиялар ўзгаришининг динамикасини ифодаловчи тенглама қуйидагича кўринишга эга бўлади:

$$\frac{\partial V_{vac}}{\partial t} = D_V \frac{\partial^2 V_{vac}}{\partial x^2} + V_{vac}(Q) - U_V + K(Q)N_{dV} - K_1(Q)N_{dV}. \quad (2)$$

Агар, яримўтказгични бир текис қиздирганда комплексларнинг бўлиниши уларнинг ҳосил бўлишига қараганда интенсивроқ содир бўлса, яъни  $K(Q) > K_1(Q)$ , у ҳолда (2) тенгламанинг стационар ҳолатдаги ечими гармоник осциллятор кўринишида ифодаланади:

$$V_{vac} = V_{vac0} + V_{vac}^* \sin(\omega x). \quad (3)$$

Бунда, ҳар бир комплекс битта саёз сатҳли донор ва битта бўш жойдан иборат эканлигини ҳисобга олсак, у ҳолда бу жараёнда бўш жойлар миқдорига тенг бўлган миқдорда саёз сатҳли донорлар ажралиб чиқади. Натижада саёз сатҳли донорларнинг концентрацияси муқим бўлмай қолади ва у ҳам даврий характерга эга бўлади:

$$N_d = N_{d0} + V_{vac}^* \sin(\omega x). \quad (4)$$

Бундай ҳолат бир текис қиздириш таъсирида содир бўладиган ўз холича шаклланиш жараёнлари билан тушунтирилади, яъни айнан: ҳароратнинг таъсири шундай материалларга ҳос бўлган саёз сатҳли донор ва бўш жой типдаги комплексларнинг бўлинишига, бўшаб қолган эркин бўш жойлар концентрациясининг (3) намуна бўйлаб даврий тақсимоти ва мос ҳолда эркин донорлар концентрациясининг (4) даврий тақсимоти содир бўлишига олиб келади, бу эса албатта диффузия потенциалига эга бўлган  $n-n^+$ -ўтиш кўринишидаги тўсиқларнинг пайдо бўлишига олиб келади:

$$V_{n-n^+} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d}{N_{d0}}. \quad (5)$$

Мадомики яримўтказгичда бир типли ( $n-n^+$ -ўтиш) потенциал тўсиқ мавжуд бўлар экан, албатта унда Дембер типдаги ички электр майдон  $E_D$  пайдо бўлади:

$$E_D = -\frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \left( \frac{dn}{dx} \right)^{-1} n. \quad (6)$$

Мос ҳолда намунанинг туташтирилмаган чегараларида, Дембер типдаги синергетик ҳарорат-э.ю.к. деб аташ мумкин бўлган динамик потенциаллар фарқи юзага келади:

$$V_Q = -\frac{kT}{q} \frac{(b-1)}{(b+1)} \ln \frac{n(w)}{n(0)}. \quad (7)$$

Бу э.ю.к. бир жинсли яримўтказгичда бир жинсли қиздириш таъсирида спонтан ҳолда содир бўладиган эркин ташувчилар концентрациясининг фарқи билан тушунтирилади. Бундай синергетик ҳарорат-э.ю.к. одатдаги, ташқи таъсир туфайли (масалан, инъекция туфайли) ташувчилар концентрациясининг ўзгариши туфайли содир бўладиган Дембер-э.ю.к.дан принципаал жиҳатдан фарқ қилади. Бу иккала э.ю.к.ларнинг умумий хусусияти, уларнинг электронлар ва коваклар ҳаракатчанликларига бир хилда боғлиқлигидир.

Легирловчи киришманинг концентрацияси намуна бўйлаб даврий бўлар экан, эркин электронлар концентрацияси ҳам худди шундай даврий бўлади, ҳар ҳолда унда қуйидаги даврий қўшимча пайдо бўлади:

$$n = n_n + \tau_n Q + V_{vac}^* \sin(\omega \cdot x). \quad (8)$$

Бунда намунадаги тўлиқ кучланиш тушиши қуйидагича аниқланади:

$$V = \frac{J}{q\mu_p(b+1)} \int_0^w \frac{dx}{n} - \frac{kT}{q} \frac{(b-1)}{(b+1)} \int_0^w \frac{dn}{n}. \quad (9)$$

Электронлар концентрациясини аниқловчи (8) ифодадан фойдаланган ҳолда, токнинг кучланишга боғлиқлигининг якуний ифодасини:

$$J = \frac{qD_p(b+1)(n_n + \tau_n Q(T))^2}{d \left( n_n + \tau_n Q(T) + \frac{V^*}{\omega} (\cos \omega d - 1) \right)} \frac{q}{kT} (V - V_{o.c.}) \quad (10)$$

ва эришиш мумкин бўлган синергетик Дембер ҳарорат-э.ю.к.ни:

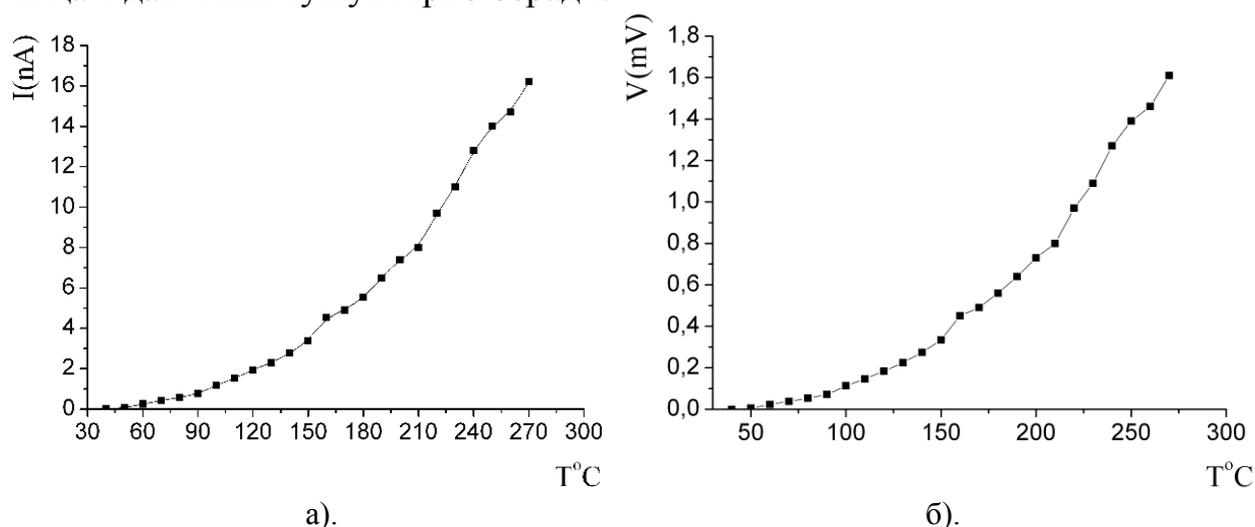
$$V_{o.c.} = V|_{J=0} = -\frac{kT}{q} \frac{(b-1)}{(b+1)} \ln \left( 1 + \frac{V^* \sin \omega d}{n_n + \tau_n Q(T)} \right), \quad (11)$$

осонгина олиш мумкин.

Юқорида ривожлантирилган назарий қарашларни тасдиқлаш учун Чохральский усули бўйича ўстирилган ва  $n$ -тип ўтказувчанликка эга бўлган  $A^{III}B^V$  типдаги тўртта: GaAs<Sn>, GaAs<Te>, InP<Te>, GaSb<Te> яримўтказгич материаллар тадқиқ қилинди. Ушбу тўртта материал асосида тайёрланган оддий омик контактли намуналарда бир текис қиздириш шароитида кучланиш ва ток пайдо бўлиш факти экспериментал тарзда ўрнатилди, яъни  $T > 50 \div 60^\circ\text{C}$  ҳароратда уларнинг барчаси ўзига хос кучланиш ва ток генераторларига айланишган. Ушбу материаллардан тайёрланган омик контактли бир жинсли намуналарни бир текис қиздиришда кузатилган кучланиш ва тоқларнинг ҳароратга боғлиқ ҳолда ўлчаш натижалари 3, 4, 5 ва 6-рамларда келтирилган.

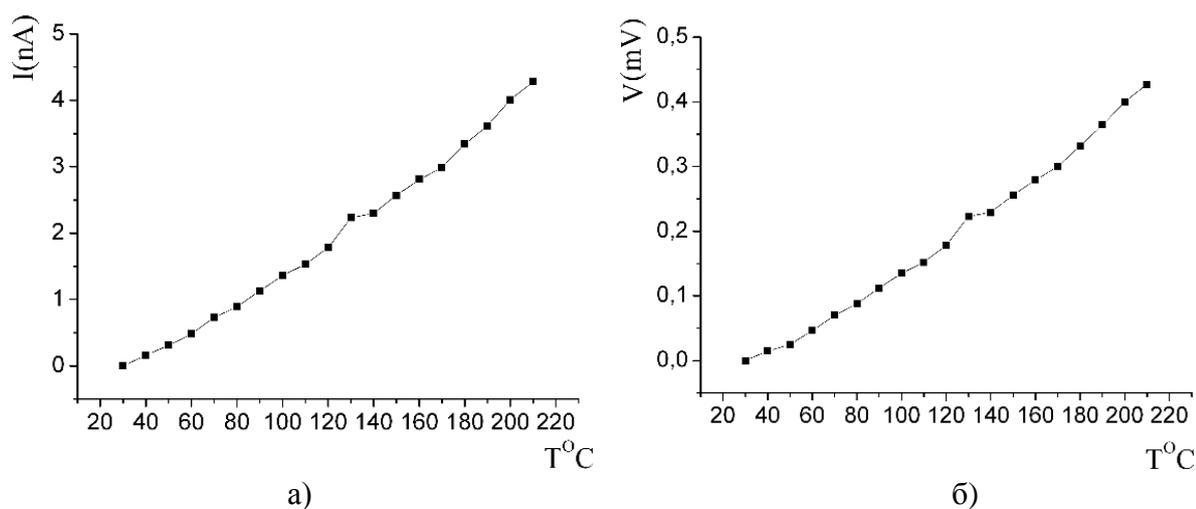
Юқорида ривожлантирилган тушунчалар GaAs<Sn> ва GaSb<Te>лардан тайёрланган бир жинсли намуналарни бир текис қиздирилганда уларда

кучланиш ва ток пайдо бўлишини (3 ва 4-расмларга қаралсин) сифат жиҳатидан яхши тушунтириб беради.



**3-расм. Омик контактли ва ўтказувчанлиги  $n$ -тип бўлган GaAs<Sn> намуналар учун ток (а) ва кучланишнинг (б) ҳароратга боғлиқликлари**

Фаразимишча, InP<Te> ва GaAs<Te> лар учун жараёнлар анча мураккаб характерга эга бўлиб,  $n-n^+$ -ўтишдаги кучланиш тушиши анчагин юқори ва хатто ҳал қилувчи бўлиши мумкин. Демак бу ҳолда ҳисоблашларда, ток фақатгина эркин ток ташувчилар ҳисобига бўладиган генерация-рекомбинация тоқлари назарияси тушунчасини қўллаш мумкин. Бироқ киришма, нуқсон ва саёз сатҳли донор ва киришма типидagi нуқсон-киришма комплекслари кўринишидаги мураккаб тизимли яримўтказгичларда рекомбинация одатий бўлмаган қонуниятлар бўйича кечади. Натижа эркин ток ташувчиларнинг комплекс ичидаги ўзаро таъсири бошланади ва рекомбинация марказлари (комплекс)ларининг концентрацияси яримўтказгични кўзғатиш жараёнида ўзгарувчан бўлиб қолади.

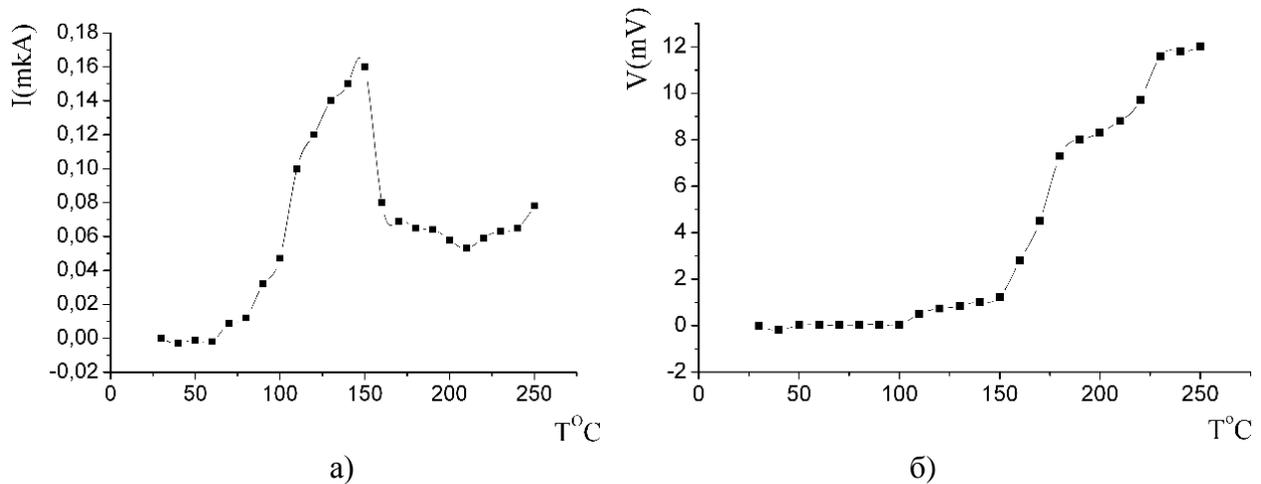


**4-расм. Омик контактли ва ўтказувчанлиги  $n$ -тип бўлган GaSb<Te> намуналар учун ток (а) ва кучланишнинг (б) ҳароратга боғлиқликлари**

Бунда эффектив ишлайдиган рекомбинация комплексларининг концентрацияси қуйидагича бўлади:

$$N_{Reff} = N_{dV} - V_{vac}(T), \quad (12)$$

бунинг устига,  $V_{vac}$  ҳароратга қараб ўсади деб оддийгина фараз қилсак, токнинг пасайиши ва кейинчалик унча катта бўлмаган кўтарилишини осонгина тушутириб беришга эришилади (5-расм).



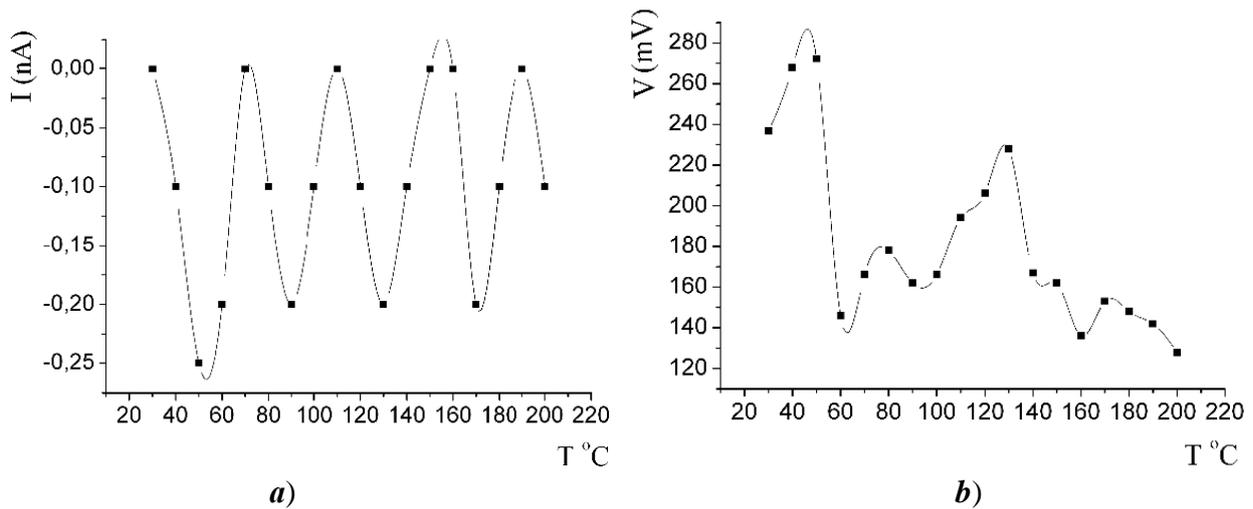
**5-расм. Омик контактли ва ўтказувчанлиги  $n$ -тип бўлган  $\text{InP}<\text{Te}>$  намуналар учун ток (а) ва кучланишнинг (б) ҳароратга боғлиқликлари**

Агарда бўш жойлар концентрацияси даврий бўлса (13), у ҳолда  $N_{Reff}$  ҳам куйидаги кўринишга эга бўлган даврий функция бўлади:

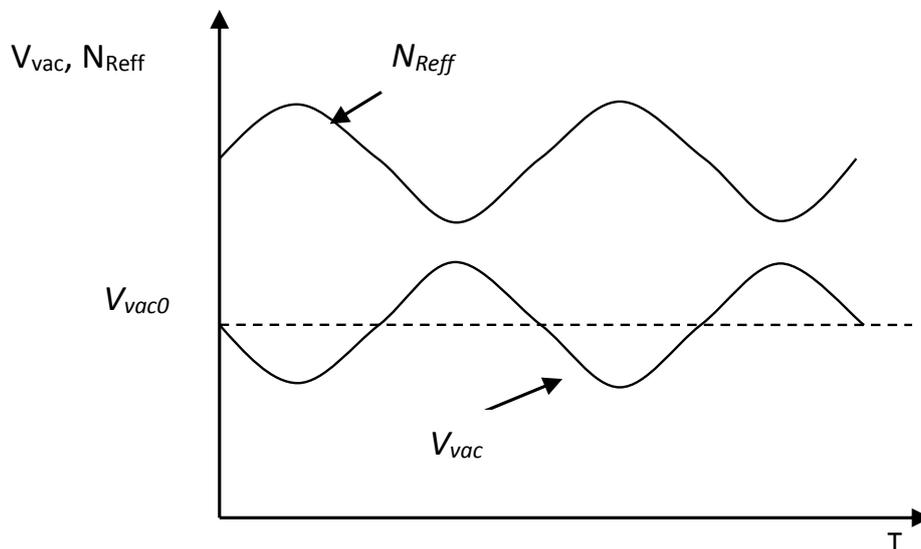
$$N_{Reff} = N_{dV} - V_0 - V_{vac}^* \sin(\omega \cdot d). \quad (13)$$

Бу нарса 7-расмда кўрсатилган бўлиб, ундан кўринадики,  $N_{Reff}(T)$  боғлиқлик сифат жиҳатидан  $I(T)$  боғлиқликнинг 6-расмда келтирилган кўринишига мос келади.

Аслида бу фаразлар осонгина мос келади. Агарда  $V = V_0 + V^* \sin(\omega \cdot x)$  бўлиб, бироқ изотип тўсиқ битта бўлиб, унинг узунлиги унча катта бўлмаса ва  $\sin(\omega \cdot x) \approx \omega \cdot x$  бўлса,  $V = V_0 + V^* \omega \cdot x$  бўлади, у ҳолда  $N_{Reff} = N_{dV} - V_0 - V^* \omega \cdot d$  бўлади ва бу ҳолда агар  $\omega = \alpha \cdot T$  эканлигини эътиборга олсак,  $N_{Reff} = N_{dV} - V_0 - V^* \cdot \alpha \cdot T \cdot d$  бўлади, яъни  $N_{Reff}$  ҳароратга боғлиқ ҳолда пасаяди. Шундай қилиб, таклиф қилинган модель Чохральский усули бўйича ўстирилган  $n$ -типидаги  $A^{III}B^V$  материаллар (аниқроғи  $\text{GaAs}<\text{Te}>$  ва  $\text{InP}<\text{Te}>$  лар)дан тайёрланган оддий омик контактли бир жинсли намуналарни бир текис қиздирганда термик стимулланган тоқлар пайдо бўлишини сифат жиҳатидан тушунтириб беришга имкон беради.

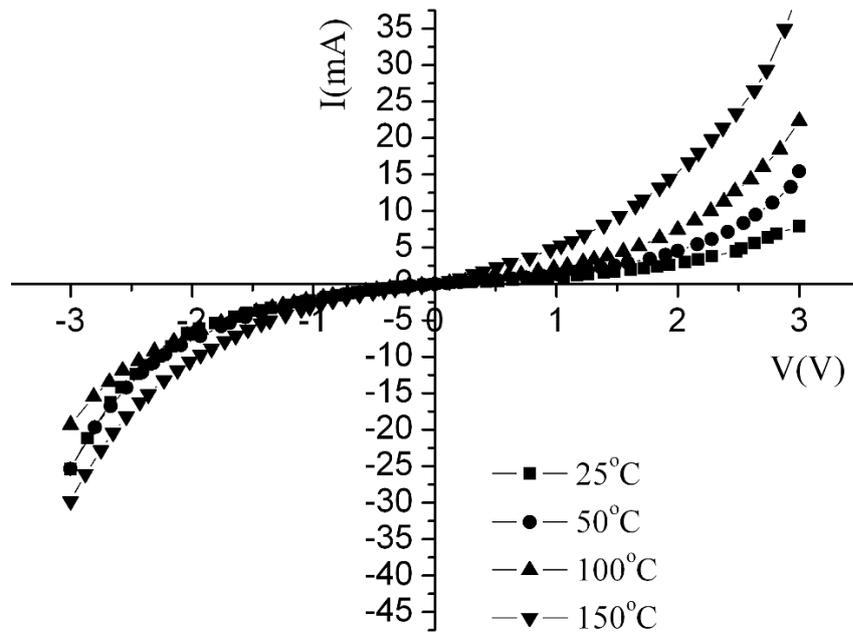


6-расм. Омик контактли ва ўтказувчанлиги  $n$ -тип бўлган GaAs<Te> намуналар учун ток (a) ва кучланишнинг (b) ҳароратга боғлиқликлари



7-расм. Бўш жойлар концентрацияси  $V_{vac}$  ва эффектив рекомбинация комплекслари концентрацияси  $N_{Reff}$  нинг ҳароратга боғлиқлигининг сифатий кўриниши

$J(T)$  боғлиқликлар характерларининг аниқ кўришиб турган фарқларига қарамасдан,  $A^{III}B^V$  гуруҳининг биз қараб чиққан тўртала материалларида ҳам ток ва кучланишнинг вужудга келиши кузатилади, у ёки бу ҳолда ҳам у изотип потенциал тўсиқларнинг ва ички электр майдонларнинг юзага келиши билан боғлиқ бўлади. У ҳолда ушбу ҳароратлар оралиғида ВАХ токнинг тўғриланишини кўрсатиши керак. Мисол тариқасида  $InP<Te>$  дан тайёрланган намуна учун ВАХнинг ҳароратга боғлиқликларининг тўплами 8-расмда келтирилган. Кўришиб турибдики, хона ҳароратида ( $25^{\circ}C$ ) ВАХ аниқ омик характерга эга бўлиб, ҳароратнинг ошиши билан тўғрилаш вужудга кела бошлайди ва ҳарорат қатча қатча бўлса, у шунча қатча бўлади. Бу тажриба  $T > 50^{\circ}\div 60^{\circ}C$  ҳароратларда тўсиқнинг тўғриловчи потенциали мавжудлигини кўрсатади.



8-расм. Оддий омик контактли  $R_{\text{ohm}} - n\text{InP} < \text{Te} > - R_{\text{ohm}}$  тузилма намунасининг вольтампер характеристикаси

Диссертациянинг «Инжекцияли диффузия режимларини тадқиқ қилиш» деб номланган тўртинчи бобда рекомбинация марказлари концентрациясининг ўзгариши шароитида  $p-n$ - ва  $p-n-n^+$ -диод тузилмалари ишлашининг инжекцияли диффузия режимлари қараб чиқилган. Худди шундай рекомбинация саёз сатҳли донор ва бўш жой типидagi комплекслар орқали кечадиган ҳолат учун иккиланган инжекциянинг диффузияли режими қараб чиқилган бўлиб, бунда эффектив ишлайдиган марказларнинг камайиши ҳисобига кейинги ингибирланиш билан бўладиган рекомбинация тезлигининг тўйиниши кузатилади. Натижада номувозанат ток ташувчилар концентрацияси тақсимоти ифодасида даврий аъзо пайдо бўлади:

$$p = \frac{N_R}{\alpha} + C_1 \cos(\sqrt{\omega} \cdot x) + C_2 \sin(\sqrt{\omega} \cdot x), \quad (14)$$

бу ерда  $\omega = \alpha \cdot c_{12}$ . Бу эса токнинг кучланишга боғлиқлиги ифодасида даврий қўшимчанинг пайдо бўлишига сабаб бўлади.

Амбиполяр дрейф тезлиги ёпишқоқлик маркази зарядининг модуляциясига боғлиқ бўладиган шароитдаги диффузия-дрейфли инжекция режими қараб чиқилган, бунда дрейф икки сатҳли рекомбинация комплекси орқали кечадиган номувозанат ток ташувчиларнинг рекомбинациясига қараганда сустроқ кечади. Бу ҳолда номувозанат ток ташувчилар концентрациясининг тақсимоти ҳам қуйидагича даврий характерга эга бўлиши:

$$p' = e^{-\frac{aJx}{2}} [C_1 \cos(\omega x) + C_2 \sin(\omega x)], \quad (15)$$

кўрсатилган бўлиб, бу ердаги  $\omega = \sqrt{\frac{\beta c_{12}}{D_p} - \left(\frac{aJ}{2}\right)^2}$  токка боғлиқ бўлади.

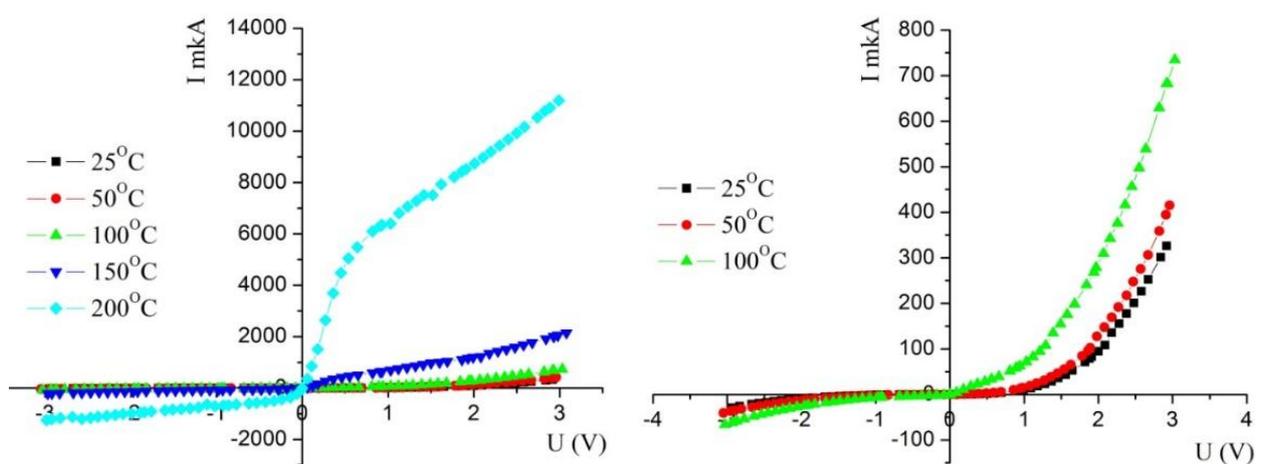
Натижада токнинг кучланишга оддий чизиқли боғлиқлиги таъсирида тебранишлар содир бўлиши мумкин.

Шунингдек, баъзан материални ўстириш технологик жараёнида, масалан, поликристалл кремнийни олишда КРЗ маркали техник кремнийни қуёш печида очик ҳавода кўп марталик қайта эритиш натижасида шаклланадиган рекомбинация марказлари концентрациясининг даврий ўзгаришлари шароитида  $p-n$ - ва  $p-i-n$ -тузилмалардаги инжекцияли диффузия режими қараб чиқилган. Бу ҳолда номувозанат ток ташувчилар концентрациясини аниқловчи ифодада рекомбинация марказлари концентрациясининг даврий боғлиқлиги ҳисобига қўшимча пайдо бўлади:

$$p = p(0)e^{-\frac{x}{L_p}} \left[ 1 - \frac{N_{R^{*}} C_{eff}}{D_p} \frac{\left(\frac{1}{L_p^2} - \omega^2\right) \sin(\omega \cdot x)}{\left(\frac{1}{L_p^2} + \omega^2\right)^2} \right], \quad (16)$$

бу ҳам токнинг кучланишга боғлиқлигига даврий қўшимчалар содир бўлишига олиб келади.

$n\text{GaAs}\langle\text{Sn}\rangle$  асосидаги  $p-n$ -ўтишга эга бўлган тузилмаларни  $25 \div 200^\circ\text{C}$  ҳароратлар оралиғида тадқиқ қилишдан олинган натижалар келтирилган. Бундай тузилма қиздирилганда (при  $T = 110^\circ\text{C}$  да  $0,45$  нА гача) ток ва ( $T = 50^\circ\text{C}$  да  $260$  мВ гача) кучланиш ишлаб чиқиши кўрсатилган. Шунингдек, бундай тузилмаларнинг  $200^\circ\text{C}$  гача бўлган ҳароратларда яхши тўғрилаш хусусиятига эга бўлган ВАХлари келтирилган (9-расм).



**9-расм.  $n\text{-GaAs}\langle\text{Sn}\rangle$  асосида тайёрланган оддий омик контактли  $p-n$  ўтиш тузилмалари учун ҳар хил температурадаги вольт – ампер тавсифлари.**

## ХУЛОСА

$A^{III}B^V$  турдаги яримўтказгичларда эркин вакансия ва киритмаларнинг ўз ҳолича шаклланиш жараёнларининг ривожланиш механизми ҳамда улар асосида яратилган тузилмалардаги инъекция ҳодисаларини аниқлаш натижасида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Саёз сатҳли донор ва эркин вакансия типигади рекомбинация комплексининг модели учун номувозанат ток ташувчилар рекомбинацияси статистикаси ишлаб чиқилган ва паст даражадаги кўзғатишда (комплекс ичидаги электрон алмашинуви аҳамиятга эга бўлмаганда) рекомбинация тезлигининг ифодаси Шокли-Рид статистикасидаги оддий ифодадан деярли фарқ қилмайди, бироқ юқори даражадаги кўзғатишда рекомбинация тезлиги секинлашади ва унинг тўлиқ тўйиниши содир бўлиши мумкин, бу эса ўз ҳолича тузилиш жараёнлар ривожлана бошлашига асос бўлиши кўрсатилган.

2.  $n$ -тип ўтказувчанликка эга бўлган  $A^{III}B^V$  яримўтказгичларда нотурғун заряд ташувчилар яшаш вақтининг ўзгариши мумкинлигини учта рекомбинацияли каналлар мавжуд бўлиши асосида ўтказилган тадқиқотлар натижасида, кўзғалишнинг катта оралиғида саёз сатҳли донор ва эркин вакансия типигади комплексларнинг икки босқичли жараёни асосий жараён бўлиб, асосий ток ташувчилар яшаш вақтининг чизиқли ошиши ва фотоэлемент қисқа туташув токиннинг ошишида ҳал қилувчи жараён икки сатҳли рекомбинация комплекси орқали амалга ошиши кўрсатилган.

3.  $n$ -тип ўтказувчанликка эга бўлган  $A^{III}B^V$  яримўтказгичларда олдиндан мавжуд бўладиган саёз сатҳли донор ва вакансия комплекслари бир жинсли қиздириш натижасида осонгина парчаланаяди ва вакансиялар ҳамда яримўтказгич хажмида  $n-n^+$  изотипли потенциал тўсиқларни ҳосил бўлишига олиб келувчи саёз сатҳли киритма донорларининг ўз ҳолича шаклланиш жараёнлари содир бўлиб ток ташувчиларнинг потенциал тўсиқларда ажралиши синергетик табиатга эга бўлган ток ва кучланишларнинг ҳосил бўлишига олиб келиши тасдиқланган.

4. Изотипли тўсиқларнинг ҳосил бўлиш жараёнида намунанинг катта қисми квазинейтрал ҳолатда қолиши ва кучланиш тушувининг асосий қисми айнан шу қисмга тўғри келиши кўрсатилган, демак ҳосил бўладиган синергетик кучланишнинг ҳароратга боғлиқлиги монотон кўринишга эга эканлиги кўрсатилган,  $n-n^+$ -ўтишдаги кучланиш тушиши асосий бўлиб, токнинг генерацион-рекомбинацион тасаввурини қўллаш зарур бўлган ҳолда эса, кучланишнинг ҳароратга боғлиқлиги даврий эканлиги кўрсатилган.

5. Эффе́ктив ишлайдиган рекомбинация марказлари концентрациясининг ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда  $p-n$ - ва  $p-i-n$ - тузилмаларидаги инъекцияли диффузия режими қараб чиқилган ва бундай ўзгаришлар эркин ток ташувчилар концентрацияси ва кучланишнинг токка боғлиқлиги ифодаларида даврий қўшимчалар пайдо бўлиши кўриб чиқилган.

6.  $GaAs<Sn>$ дан тайёрланган  $p-n$ -тузилмаларда бир жинсли қиздириш шароитида термовольтаик эффект, яъни кучланиш ва ток генерацияси юзага

келиши, бунда ушбу тузилмаларнинг вольтампер характеристикалари  $200^{\circ}\text{C}$  гача бўлган ҳароратларда тўғрилаш хусусиятларини сақлаб қолиши кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.05.2018.FM/T.34.01  
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ  
ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

---

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**ХАШАЕВ МУСЛИМ МУСАГИТОВИЧ**

**МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ САМООРГАНИЗАЦИИ  
ВАКАНСИЙ И ПРИМЕСЕЙ В ШИРОКОЗОННЫХ  
ПОЛУПРОВОДНИКАХ ТИПА  $A^{III}B^V$**

**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 номером B2017.1.PhD/FM41.**

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте.

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

**Научный руководитель:** **Лейдерман Ада Юльевна**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Арипов Хайрулла Кабулович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Расулов Рустам Явкачович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:** **Национальный университет Узбекистана**

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года в \_\_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM/T.34.01 при Физико-техническом институте. Адрес: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 2б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-42-91; e-mail [info.fti@uzsci.net](mailto:info.fti@uzsci.net).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № \_\_\_\_). Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 2б. Тел./Факс: (99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

(реестр протокола рассылки № \_\_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.)

**Н.Р. Авезова**  
председатель Научного совета по  
присуждению ученых степеней, д.т.н.

**О.А. Абдулхаев**  
ученый секретарь Научного совета по присуждению  
ученых степеней, доктор философии по ф.-м.н.

**А. Абдурахманов**  
председатель научного семинара при  
Научном совете по присуждению ученых  
степеней, д.т.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире в интенсивно развивающейся области физики полупроводников общая тенденция такова, что на смену простым полупроводникам неизбежно приходят широкозонные полупроводники типа  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$  и совсем новые многокомпонентные полупроводниковые материалы. В этом аспекте одной из основных задач является изучение взаимодействия примесей и дефектов в таких материалах в условиях внешних воздействий (температуры, радиации, освещения и т.п.) и возможности развития в них процессов самоорганизации.

На сегодняшний день в мире уделяется большое внимание изучению спектра глубоких примесей и дефектов, возникающих в процессе создания таких материалов различными методами – диффузией, газофазной и жидкофазной эпитаксией и др. В этой сфере реализации комплексных научных исследований важной задачей является проведение целевых исследований в следующих направлениях: изучение процессов дефектообразования как простых изолированных дефектов (вакансий, междоузельных атомов и т.п.), так и ассоциированных дефектов (дефект-примесных и примесь-примесных комплексов, дивакансий и т.п.), которые в значительной степени влияют на качество изготавливаемых из таких материалов приборных структур, в первую очередь, диодов и фотоэлементов; изучение процессов самоорганизации примесей и вакансий в таких материалах, развивающихся в условиях внешних воздействий; прогнозирование новых типов полупроводниковых устройств, обладающих большей чувствительностью к внешним воздействиям.

В нашей Республике уделяется особое внимание развитию области физики полупроводников, в частности, созданию приборов на основе широкозонных полупроводников типа  $A^{III}B^V$ . При этом в изучении спектра глубоких примесей и дефектов в таких материалах, а также физических механизмов работы структур, создаваемых на их основе, достигнуты весомые результаты. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы отмечены задачи «...освоение выпуска принципиально новых видов продукции и технологий, обеспечение на этой основе конкурентоспособности отечественных товаров на внешних и внутренних рынках». В этом аспекте поиск новых полупроводниковых материалов, обладающих большей чувствительностью к внешним воздействиям, и разработка на их основе полупроводниковых структур и приборов, обладающих большей энергоэффективностью, является важнейшей задачей. В этом плане изучение процессов дефектообразования и самоорганизации примесей и дефектов в широкозонных полупроводниках типа  $A^{III}B^V$  является весьма актуальным.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлениях

Президента Республики Узбекистан ПП-№2772 от 13 февраля 2017 года «О приоритетных направлениях развития электронной промышленности 2017-2021 годах» и ПП-№2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике.** Диссертация выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

**Степень изученности проблемы.** Научные исследования в области изучения глубоких примесей и дефектов в полупроводниках проводятся во многих мировых научных центрах. В первую очередь следует указать на проводимые в Массачусетском университете (США) под руководством профессора Госсмана<sup>1</sup> эксперименты по легированию кремния и арсенида галлия предельно возможными концентрациями глубоких примесей, в которых было выявлено периодическое распределение вакансий вдоль образца. Следует также назвать работы, посвященные исследованию термовольтаического эффекта в сульфиде самария<sup>2</sup>, выполненные группой ученых из ФТИ РАН имени А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург). Некоторые теоретические прогнозы нашли подтверждение также в экспериментальных результатах лаборатории Роста полупроводниковых кристаллов ФТИ АН РУз для поликристаллического кремния, полученного многократной переплавкой на солнечной печи<sup>3</sup>.

В ФТИ АН РУз Карагеоргий-Алкалаевым П.М. и Лейдерман А.Ю. были сделаны первые пионерские работы<sup>4</sup> в изучении процессов самоорганизации с диффузионным механизмом переноса заряда, основанные на идее изменения свойств глубоких примесей в результате рекомбинационно- и температурно-стимулированных процессов. Ими была выдвинута концепция изменения эффективной концентрации глубоких примесных центров, выступающих в качестве канала рекомбинации, что, в свою очередь, может служить причиной ингибирования (убывания) скорости рекомбинации. В результате устанавливается периодическое распределение концентрации неравновесных носителей, что однозначно свидетельствует о начале процессов самоорганизации. В дальнейшем были рассмотрены возможности развития процессов самоорганизации в условиях фотовозбуждения (в частности в фотоэле-

<sup>1</sup> Rummukaren M., Makkonen I., Ranki V., Puska N., Saarinen K., Gossman H.-J. L. Vacancy - Impurity Complexes in Highly Sb-Doped Si Grown by Molekular Beam Epitaxy // Physical Review Letters. – 2005. - Vol.94, No160. - P. 165501: 1-4.

<sup>2</sup> Каминский В.В. Казанин М.М., Клишин А.Н., Соловьев С.М., Голубков А.В. Наблюдение термовольтаического эффекта в структурах на основе сульфида самария // Журнал технической физики. – Санкт-Петербург. 2011. – Т.81, вып.6. – С.150-152.

<sup>3</sup> Саидов А.С. Термоэлектрические свойства технического кремния полученного восьмикратной переплавкой на солнечной печи // Альтернативная энергетика и экология. – Россия, 2010. – №3(83). - С.22-25.

<sup>4</sup> Karageorgy-Alkalaev P.M., Leiderman A.Yu. The synergetic phenomena in photoexcited semiconductors // Physica Status Solidi (a). –1987. - Vol.100, No.1. - P.221-231.

ментах) и инжекции, происходящей в полупроводниках, полученных в условиях экстремального легирования.

На сегодняшний день остается ряд совершенно неизученных вопросов, касающихся возможности развития процессов самоорганизации в полупроводниках, содержащих комплексы примесей и вакансий, в частности, в полупроводниках  $A^{III}B^V$   $n$ -типа проводимости, выращенных по методу Чохральского и изначально содержащих в себе комплексы типа мелкий донор и вакансия.

**Связь темы диссертации с научными исследованиями научно-исследовательской организации, где выполнена диссертационная работа.** Диссертационная работа выполнена на основе научно-исследовательского плана Физико-технического института в рамках фундаментального проекта: Ф2-ФА-0-97004 «Динамика солитонов в ультрахолодных квантовых газах и оптических системах, и синергетические процессы в многокомпонентных полупроводниках» (2012-2016 гг).

**Целью исследования** является определение механизма возникновения процессов самоорганизации и термостимулированных синергетических процессов в полупроводниках типа  $A^{III}B^V$ , а также инжекционных явлений в структурах, создаваемых на их основе.

**Задачи исследования:**

разработка нового варианта статистики рекомбинации неравновесных носителей, соответствующей конкретно  $n$ -полупроводникам типа  $A^{III}B^V$ ;

выявление механизма развития процессов самоорганизации вакансий и примесей в  $n$ -полупроводниках типа  $A^{III}B^V$ , выращенных по методу Чохральского;

определение механизма токопрохождения в условиях развития процессов самоорганизации вакансий и примесей в однородных полупроводниках и структурах, созданных на их основе.

**Объектом исследования** являются широкозонные полупроводники типа  $A^{III}B^V$ , обладающие  $n$ -типом проводимости и выращенные по методу Чохральского.

**Предметом исследования** являются процессы самоорганизации и термостимулированные термовольтаические явления в широкозонных полупроводниках типа  $A^{III}B^V$ .

**Методы исследований.** Используются общеизвестные методы решения и анализа нелинейных дифференциальных уравнений, компьютерное моделирование в программной среде Mathcad, апробированные методы измерения вольтамперных характеристик и температурных зависимостей токов и напряжений.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

рассчитана скорость рекомбинации неравновесных носителей в полупроводниках  $A^{III}B^V$   $n$ -типа проводимости, происходящей через сложный двухуровневый рекомбинационный комплекс типа мелкий донор и вакансия;

показано, что время жизни неравновесных носителей в полупроводниках  $A^{III}B^V$   $n$ -типа проводимости при совместной рекомбинации через простые рекомбинационные центры, свободные вакансии, комплексы типа мелкий донор и вакансия возрастает с уровнем возбуждения;

теоретически предсказано, что в однородных полупроводниках  $A^{III}B^V$   $n$ -типа проводимости под действием однородного нагрева происходит самоорганизация вакансий и мелких доноров, приводящая к возникновению синергетических токов и напряжений, что экспериментально подтверждено на полупроводниках GaSb<Te>, GaAs<Sn>, GaAs<Te> и InP<Te>;

показано, что в полупроводниках с периодическим распределением рекомбинационных центров при инжекционно-диффузионном и диффузионно-дрейфовом режимах при расчете токовых характеристик необходимо учитывать возникающие периодические добавки.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

установлено возрастание времени жизни неравновесных носителей в полупроводниках типа  $A^{III}B^V$  с ростом уровня возбуждения, благодаря учету рекомбинации через три канала: простые рекомбинационные центры, комплексы типа мелкий донор и вакансия, свободные вакансии;

установлено расширение температурного диапазона работы  $p$ - $n$ -структур, создаваемых на основе полупроводников типа  $A^{III}B^V$  за счет температурно-стимулированных процессов самоорганизации.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием обоснованных методов решения, сопоставлением полученных теоретических результатов с результатами экспериментов и совпадением результатов расчета с экспериментальными данными.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость исследования заключается в создании новых представлений о развитии термостимулированных процессов самоорганизации вакансий и примесей в полупроводниках.

Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при создании полупроводниковых приборов (в частности, фотоэлементов), работающих в более широком температурном диапазоне.

**Внедрение результатов исследования.** На основе механизма развития процессов самоорганизации вакансий и примесей в широкозонных полупроводниках типа  $A^{III}B^V$ :

разработанная модель распада комплексов типа мелкий донор и вакансия под воздействием однородного нагрева с их дальнейшей самоорганизацией, которая приводит к возникновению синергетических токов и напряжений, использовалась в рамках фундаментального проекта «Ф-2-37 – Особенности лазерно-индуцированных нелинейных процессов дефектообразования в полупроводниках» (2012-2016 гг.) при разработке неразрушающего экспресс-метода контроля и прогнозирования надежности инжекцион-

ных фотоприемников и фотодиодных структур в ходе эксплуатации (Справка Агентства по науке и технологиям РУз №ФТА-02-11/1345 от 22.12.2017 года). Использование научных результатов позволило выявить аналогию теплового и лазерно-индуцированного воздействий на процессы дефектообразования в полупроводниках;

влияние периодического изменения концентрации эффективно работающих рекомбинационных центров на процессы прохождения тока в *p-n*-структурах было применено в АО «FOTON» при производстве пластин и кристаллов полупроводниковых приборов (Справка №02-1035 от 04.05.2018 года АК Узэлтехсаноат). Использование научных результатов позволило улучшить токовые характеристики *p-n*-структур работающих в инжекционно-диффузионном и диффузионно-дрейфовом режимах.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 4 международных и 11 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикации результатов исследования.** По теме диссертации опубликованы 28 научных трудов, из них 14 статей в научных журналах, в том числе 6 статей в зарубежных международных реферируемых журналах.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 105 страницы машинописного текста, включая 21 рисунок и 2 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В **введении** обоснована актуальность и востребованность темы диссертации. Показано соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике. Приведена степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выявлены объекты, предмет и методы исследования. Изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их научная и практическая значимость. Приведены краткие сведения о внедрении результатов исследования, об их опубликованности, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе «**Анализ предшествующих работ по самоорганизации примесей в полупроводниках и термодинамическому обоснованию возможности существования комплексов типа вакансия + примесь в полупроводниках типа  $A^{III}B^V$** » рассматривается синергетика, как новое направление науки, охватывающая такие разные области человеческого знания как биология, химия, социология и др. Дается краткий обзор первых работ, посвященных развитию процессов самоорганизации в однородных полупроводниках с глубокими примесями в условиях фотовозбуждения. Дается также краткий обзор экспериментов, посвященных наблюдению процессов возникновения самоорганизации различных дефектов и комплексов в условиях рекомбинационно- и температурно-стимулированной

перестройки рекомбинационных центров. Анализируются факты, свидетельствующие о наличии комплексов типа мелкий донор + вакансия в полупроводниках типа  $A^{III}B^V$ , обладающих  $n$ -типом проводимости и выращенных по методу Чохральского, а также обсуждается термодинамика образования таких комплексов. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулирована постановка задачи.

Во второй главе «Исследование статистики рекомбинации в полупроводниках со сложными перестраивающимися центрами (комплексами) типа мелкий донор и вакансия» разработана статистика рекомбинации неравновесных носителей для полупроводников типа  $A^{III}B^V$  с  $n$ -типом проводимости, выращенных по методу Чохральского, в которых рекомбинация неравновесных носителей происходит через рекомбинационный комплекс типа мелкий донор и вакансия. Модель рекомбинации для такого комплекса показана на рис. 1. Вывод статистики рекомбинации электронов и дырок для такой модели основан на учете внутрикомплексного обмена уровня донора с уровнем вакансии и на отказе от одного из упрощающих предположений, лежащих в основе классической статистики Шокли-Рида, а именно, предположения, что время закрепления захваченного носителя заряда на рекомбинационном центре незначительно по сравнению со временем, требуемым в среднем ловушке, чтобы испустить электрон или захватить дырку (т.е. отказе от предположения о том, что ловушка, захватив электрон, может сразу, безинерционно, принять дырку или, захватив дырку, тут-же, безинерционно, принять электрон).

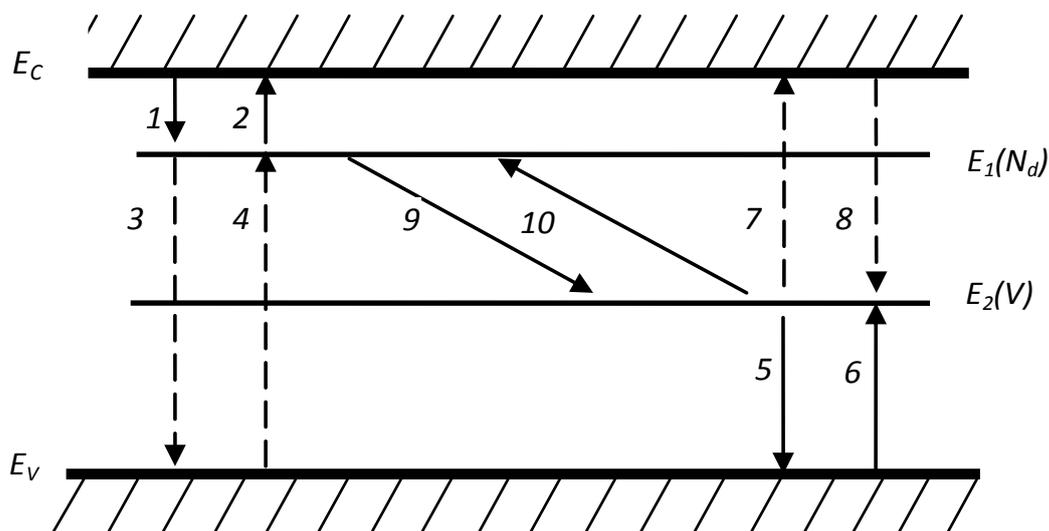


Рис. 1. Схема рекомбинации через рекомбинационный комплекс типа мелкий донор и вакансия

Был проведен расчет скорости рекомбинации неравновесных носителей заряда в такой модели и получено следующее выражение:

$$U = N_R \frac{c_{n1}c_{p2}(n(p + p_{12}) + p_{12}(n + n_{11}))}{c_{n1}(n + n_{11}) + c_{p2}(p + p_{12}) + \frac{c_{n1}c_{p2}}{c_{12}}(n + n_{11})(p + p_{12})}. \quad (1)$$

Из (1) ясно видно, что наличие внутрикомплексного электронного обмена приводит к появлению в знаменателе последнего члена, содержащего коэффициент межуровневого обмена  $c_{12}$ . Было показано, что при достаточно высоких уровнях возбуждения внутрикомплексный обмен электронами начинает играть определяющую роль, что может привести к насыщению скорости рекомбинации.

Далее рассматриваются процессы рекомбинации, определяющие время жизни неравновесных носителей в полупроводниках  $A^{III}B^V$ , выращенных по методу Чохральского и содержащих рекомбинационные комплексы типа мелкий донор и вакансия. В таких материалах имеются три канала рекомбинации: 1) простые рекомбинационные центры, 2) рекомбинационные комплексы типа мелкий донор и вакансия и 3) свободные вакансии (при высоком уровне возбуждения) (см. рис.2). Показано, что если преобладающим будет второй канал, то время жизни неравновесных носителей не будет постоянной величиной (как это традиционно считается), а может расти с уровнем возбуждения, что скажется на основных характеристиках фотоэлемента.

В третьей главе «Исследование термостимулированных синергетических процессов в  $n$ -полупроводниках типа  $A^{III}B^V$ , выращенных по методу Чохральского» приводятся результаты исследований термостимулированных процессов самоорганизации в однородных образцах с простыми омическими контактами, изготовленных из полупроводников  $A^{III}B^V$   $n$ -типа проводимости, полученных по методу Чохральского. В таких материалах при комнатной температуре отсутствуют свободные вакансии, поскольку они в процессе выращивания объединяются с мелкой легирующей примесью, образуя комплексы типа мелкий донор и вакансия.

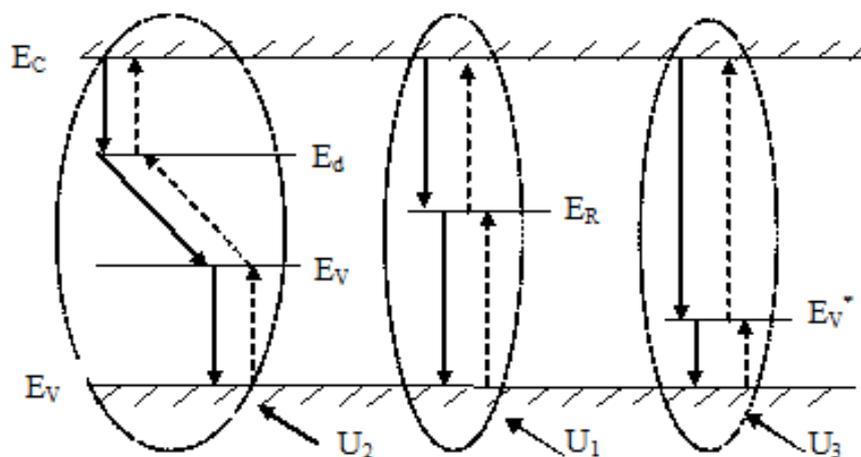


Рис.2. Схема рекомбинации в  $n$ -GaAs, содержащем простые рекомбинационные центры  $N_R$  (с уровнем  $E_R$ ), рекомбинационные комплексы  $N_{dV}$  (с уровнями  $E_d$  и  $E_v$ ) и свободные вакансии  $V$  (с уровнем  $E_v^*$ )

Уравнение, описывающее динамику изменения вакансий в таком полупроводнике под действием температуры, имеет вид:

$$\frac{\partial V_{vac}}{\partial t} = D_V \frac{\partial^2 V_{vac}}{\partial x^2} + V_{vac}(Q) - U_V + K(Q)N_{dV} - K_1(Q)N_{dV}. \quad (2)$$

Если при однородном нагреве распад комплексов происходит интенсивнее, чем их образование, т.е.  $K(Q) > K_1(Q)$ , то решение уравнения (2) в стационарном случае описывается выражением гармонического осциллятора:

$$V_{vac} = V_{vac0} + V_{vac}^* \sin(\omega x). \quad (3)$$

Поскольку каждый комплекс состоит из одного мелкого донора и одной вакансии, то в этом процессе высвобождается такое же количество мелких доноров, что и вакансий. В результате концентрация легирующих мелких доноров перестает быть постоянной и тоже приобретает периодический характер:

$$N_d = N_{d0} + V_{vac}^* \sin(\omega x). \quad (4)$$

Подобное поведение объясняется процессами самоорганизации, развивающимися под влиянием однородного нагрева, а именно: воздействие температуры приводит к распаду присущих именно таким материалам комплексов типа мелкий донор и вакансия, образованию периодического распределения концентрации высвободившихся свободных вакансий (3) вдоль образца и образованию соответствующего периодического распределения концентрации свободных доноров (4), что неизбежно ведет к возникновению изотипных потенциальных барьеров типа  $n-n^+$  с диффузионным потенциалом:

$$V_{n-n^+} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d}{N_{d0}}. \quad (5)$$

Поскольку в полупроводнике есть изотипные потенциальные барьеры, в нем появляется внутреннее электрическое поле  $E_D$  Демберовского типа:

$$E_D = -\frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \left( \frac{dn}{dx} \right)^{-1} n. \quad (6)$$

Соответственно, на границах разомкнутого образца возникает динамическая разность потенциалов, которую справедливо назвать синергической тепло-ЭДС Демберовского типа:

$$V_Q = -\frac{kT}{q} \frac{(b-1)}{(b+1)} \ln \frac{n(w)}{n(0)}. \quad (7)$$

Эта ЭДС определяется спонтанно возникающим в однородном полупроводнике под действием однородного нагрева перепадом

концентрации свободных носителей. Такая синергетическая тепло-ЭДС принципиально отличается от обычной ЭДС Дембера, возникающей, как известно, в результате привнесенного извне (например, инъекцией) изменения концентрации носителей. Единственным общим свойством двух этих ЭДС является их одинаковая зависимость от разности подвижностей электронов и дырок.

Так как концентрация легирующей примеси периодична по длине образца, то концентрация свободных электронов также станет периодической, во всяком случае у нее появится периодическая добавка:

$$n = n_n + \tau_n Q + V_{vac}^* \sin(\omega \cdot x). \quad (8)$$

Полное падение напряжения на образце будет:

$$V = \frac{J}{q\mu_p(b+1)} \int_0^w \frac{dx}{n} - \frac{kT(b-1)}{q(b+1)} \int_0^w \frac{dn}{n}. \quad (9)$$

Используя выражение для концентрации электронов (8), легко получить окончательную зависимость тока от напряжения:

$$J = \frac{qD_p(b+1)(n_n + \tau_n Q(T))^2}{d \left( n_n + \tau_n Q(T) + \frac{V^*}{\omega} (\cos \omega d - 1) \right)} \frac{q}{kT} (V - V_{o.c.}) \quad (10)$$

и предельную синергетическую Демберовскую тепло-ЭДС:

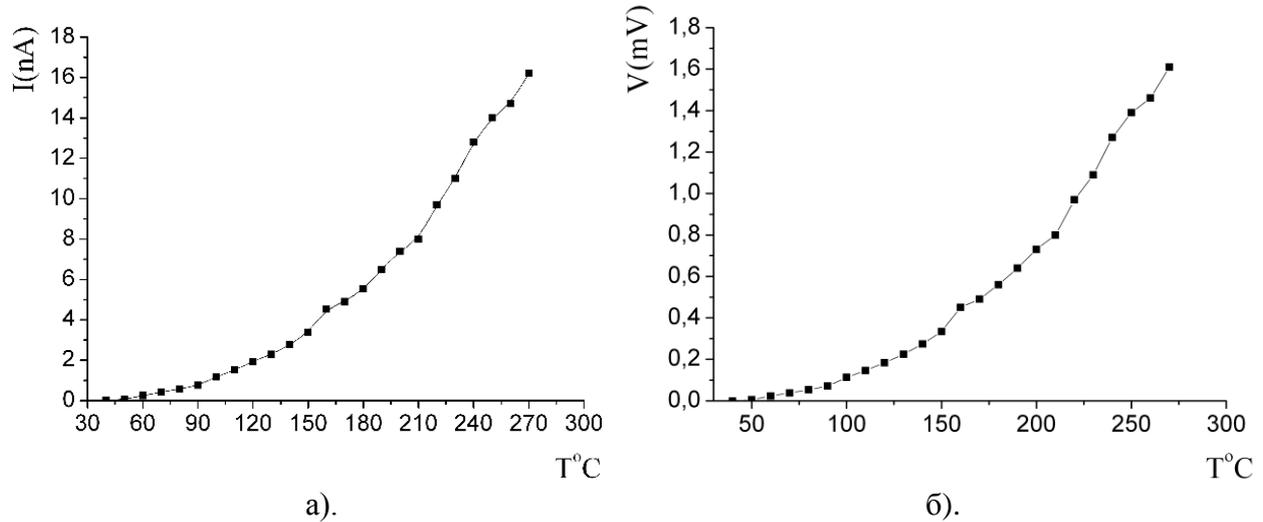
$$V_{o.c.} = V|_{J=0} = -\frac{kT(b-1)}{q(b+1)} \ln \left( 1 + \frac{V^* \sin \omega d}{n_n + \tau_n Q(T)} \right). \quad (11)$$

Для подтверждения развитых теоретических представлений исследовались четыре полупроводниковых материала типа  $A^{III}B^V$ , выращенных по методу Чохральского и обладающих  $n$ -типом проводимости: GaAs<Sn>, GaAs<Te>, InP<Te>, GaSb<Te>. Во всех образцах с простыми омическими контактами, изготовленных из этих четырех материалов, был экспериментально установлен факт появления токов и напряжений в условиях однородного нагревания, т.е. при  $T > 50^\circ \div 60^\circ C$  все они становятся своеобразными генераторами тока и напряжения. Результаты измерений токовых и вольтовых температурных зависимостей, наблюдавшихся при однородном нагреве однородных образцов с омическими контактами, изготовленных из данных материалов, приведены на рисунках 3, 4, 5 и 6.

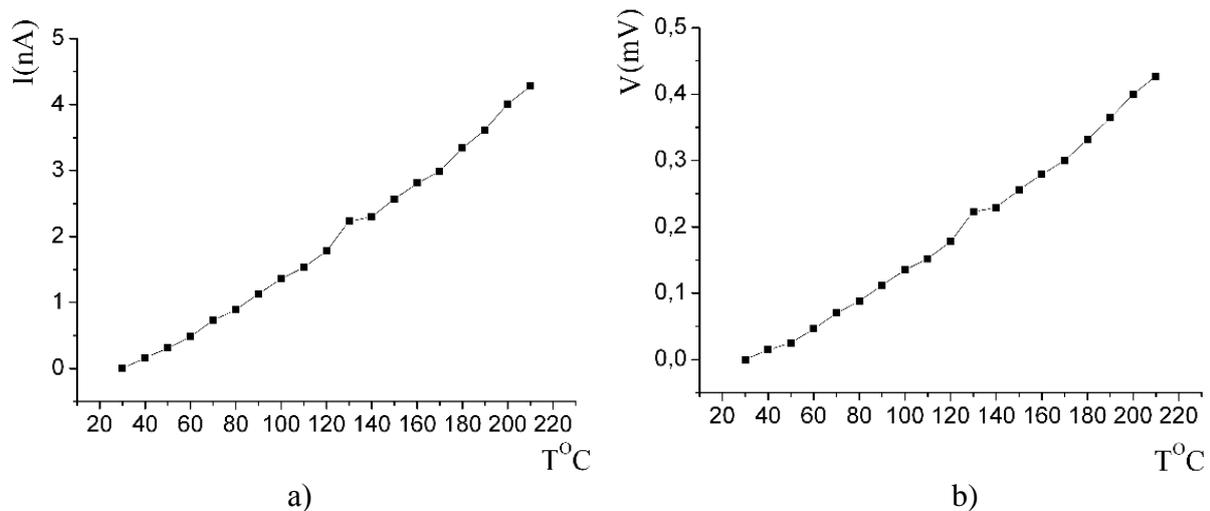
Развитые выше представления качественно хорошо объясняют появление токов и напряжений при однородном нагреве однородных образцов, изготовленных из GaAs<Sn> и GaSb<Te> (см. рис.3 и рис.4).

По-видимому, в случае InP<Te> и GaAs<Te> процессы носят более сложный характер – падение напряжения на изотипном  $n-n^+$ -переходе может быть существенным и даже определяющим, так что для расчета можно

использовать представления теории генерационно-рекомбинационных токов, когда ток определяется исключительно только скоростью рекомбинации свободных носителей. В свою очередь, рекомбинация в полупроводниках с такой сложной системой примесей, дефектов и дефект-примесных комплексов типа мелкий донор и вакансия протекает не по обычным законам.



**Рис. 3. Зависимости тока (а) и напряжения (б) от температуры для образца GaAs<Sn> n-типа с омическими контактами.**

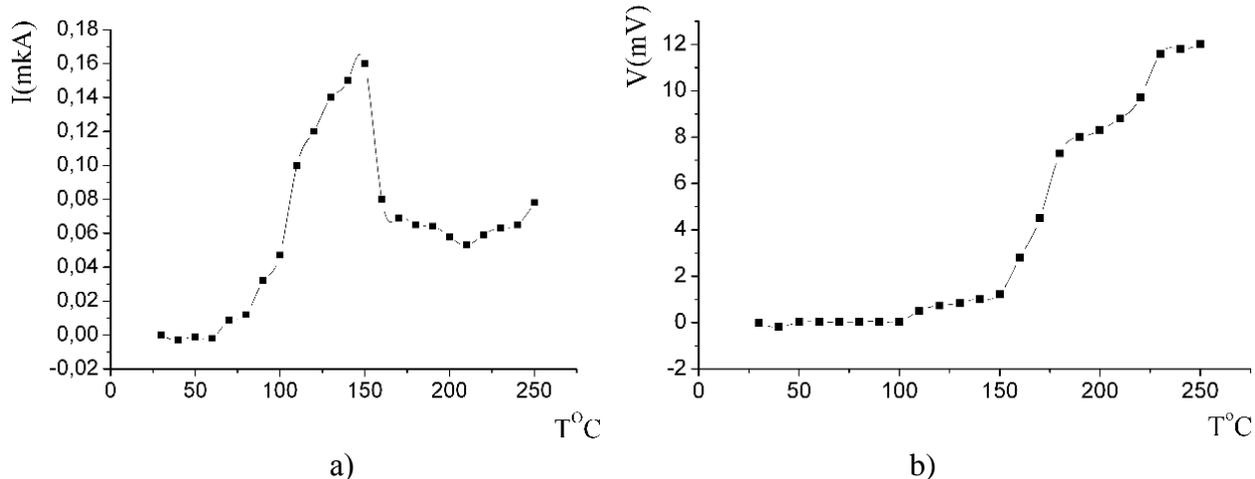


**Рис. 4. Зависимости тока (а) и напряжения (б) от температуры для образца GaSb<Te> n-типа с омическими контактами.**

Появляется внутрикомплексное взаимодействие свободных носителей и сама концентрация рекомбинационных центров (комплексов) оказывается изменяющейся в процессе возбуждения полупроводника. В случае простого предположения о том, что концентрация эффективно работающих рекомбинационных комплексов равна:

$$N_{Reff} = N_{dV} - V_{vac}(T), \quad (12)$$

причем  $V_{vac}$  растет с температурой, легко удастся объяснить спад тока и небольшой его последующий подъем на рис.5.



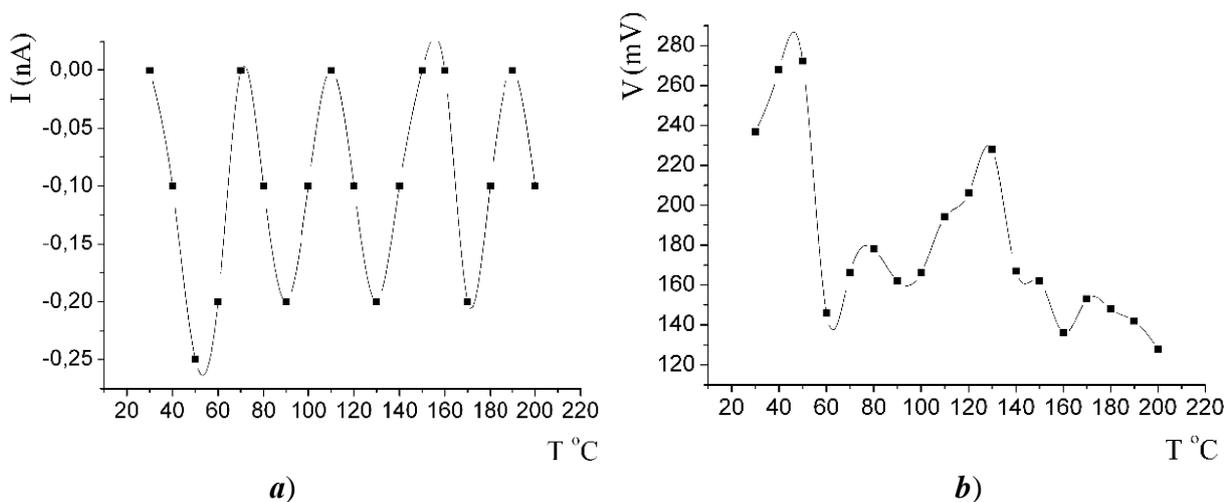
**Рис. 5.** Зависимости тока (а) и напряжения (б) от температуры для образца InP<Te> *n*-типа с омическими контактами.

Если же концентрация вакансий является периодической функцией (3), то  $N_{Reff}$  тоже будет периодической функцией вида:

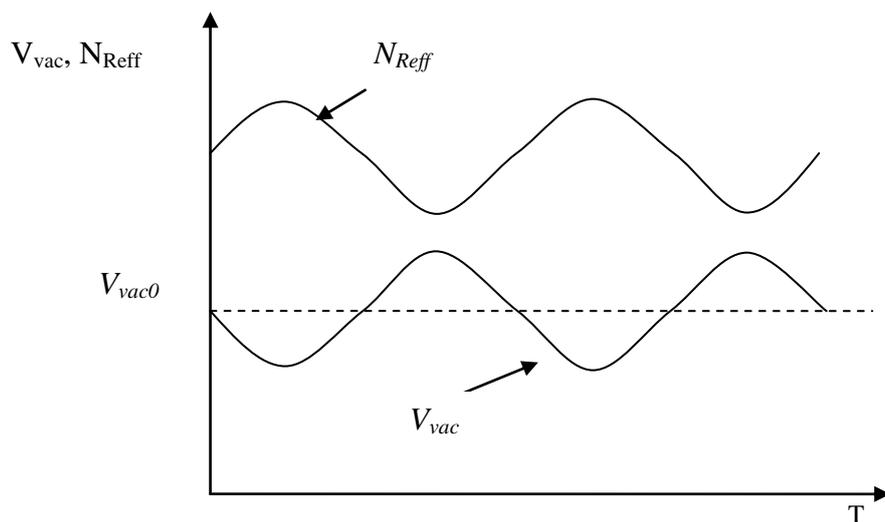
$$N_{Reff} = N_{dV} - V_0 - V_{vac}^* \sin(\omega \cdot d). \quad (13)$$

Это иллюстрируется рисунком 7, из которого видно, что зависимость  $N_{Reff}(T)$  качественно хорошо совпадает с видом зависимости  $I(T)$  на рис.6.

В действительности эти представления легко совместимы. Если  $V = V_0 + V^* \sin(\omega \cdot x)$ , но изотипный барьер один, протяженность его небольшая и  $\sin(\omega \cdot x) \approx \omega \cdot x$ , то  $V = V_0 + V^* \omega \cdot x$ , тогда  $N_{Reff} = N_{dV} - V_0 - V^* \omega \cdot d$  и если  $\omega = \alpha \cdot T$ , то  $N_{Reff} = N_{dV} - V_0 - V^* \cdot \alpha \cdot T \cdot d$ , т.е.  $N_{Reff}$  просто убывает с температурой. Таким образом, предлагаемая модель позволяет качественно объяснить появление термостимулированных токов при однородном нагревании однородных образцов с простыми омическими контактами в материалах  $A^{III}B^V$  *n*-типа проводимости, выращенных по методу Чохральского (конкретно в GaAs<Te> и InP<Te>).

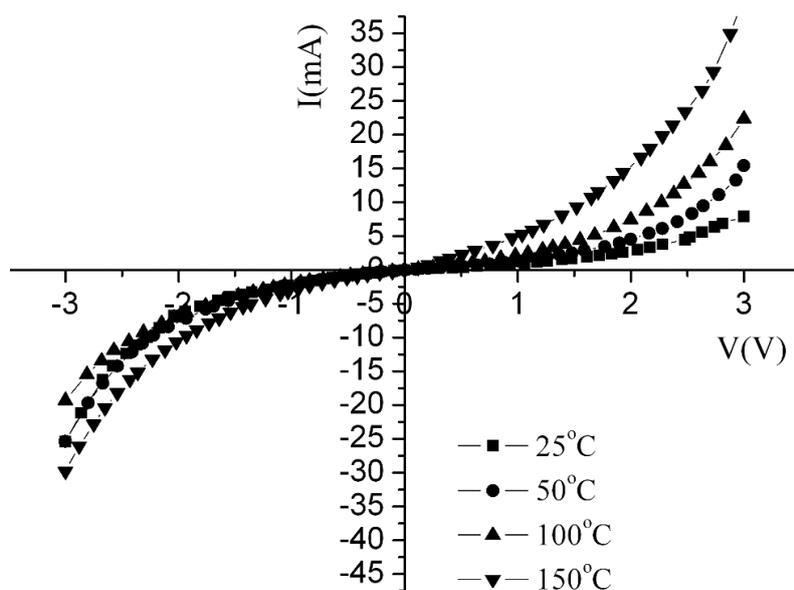


**Рис. 6.** Зависимости тока (а) и напряжения (б) от температуры для образца GaAs<Te> *n*-типа с омическими контактами.



**Рис.7. Качественный вид зависимостей концентрации вакансий  $V_{vac}$  и концентрации эффективных рекомбинационных комплексов  $N_{Reff}$  от температуры.**

Таким образом, несмотря на явные различия в характере зависимостей  $J(T)$ , во всех четырех материалах группы  $A^{III}B^V$  наблюдается появление токов и напряжений при однородном нагреве и, так или иначе, оно связывается с возникновением изотипных потенциальных барьеров и внутренних электрических полей. Тогда в этом же температурном интервале ВАХ должна показывать наличие выпрямления тока. В качестве примера, такой набор температурных зависимостей ВАХ для образца из  $InP<Te>$  представлен на рис.8. Видно, что ВАХ при комнатной температуре ( $25^{\circ}C$ ) имеет чисто омический характер, но с ростом температуры появляется выпрямление. Оно тем больше, чем выше температура. Этот эксперимент однозначно указывает на наличие выпрямляющего потенциального барьера при  $T > 50^{\circ}-60^{\circ}C$ .



**Рис.8. Вольт-амперная характеристика образца  $R_{Ohm}$ - $n$ - $InP<Te>$ - $R_{Ohm}$  с простыми омическими контактами.**

В четвертой главе «Исследование инжекционных диффузионных режимов в условиях изменяющейся концентрации рекомбинационных центров» рассматривается инжекционно-диффузионный режим работы  $p-n$ - и  $p-n-n^+$ -диодных структур в условиях изменяющейся концентрации рекомбинационных центров. В частности, рассматривается диффузионный режим двойной инжекции в условиях, когда рекомбинация происходит через комплекс типа мелкий донор и вакансия, причем скорость рекомбинации претерпевает насыщение и последующее ингибирование, обусловленное уменьшением числа эффективно работающих центров. В результате в выражении, описывающем распределение концентрации неравновесных носителей, появляются периодические члены:

$$p = \frac{N_R}{\alpha} + C_1 \cos(\sqrt{\omega^*} \cdot x) + C_2 \sin(\sqrt{\omega^*} \cdot x). \quad (14)$$

Это обуславливает появление периодической добавки и в выражении для зависимости напряжения от тока.

Рассмотрен диффузионно-дрейфовый инжекционный режим в условиях, когда амбиполярная скорость дрейфа определяется модуляцией заряда центров прилипания, причем дрейф происходит слабее, чем рекомбинация неравновесных носителей, идущая через двухуровневый рекомбинационный комплекс. Показано, что в этом случае распределение концентрации неравновесных носителей также носит периодический характер:

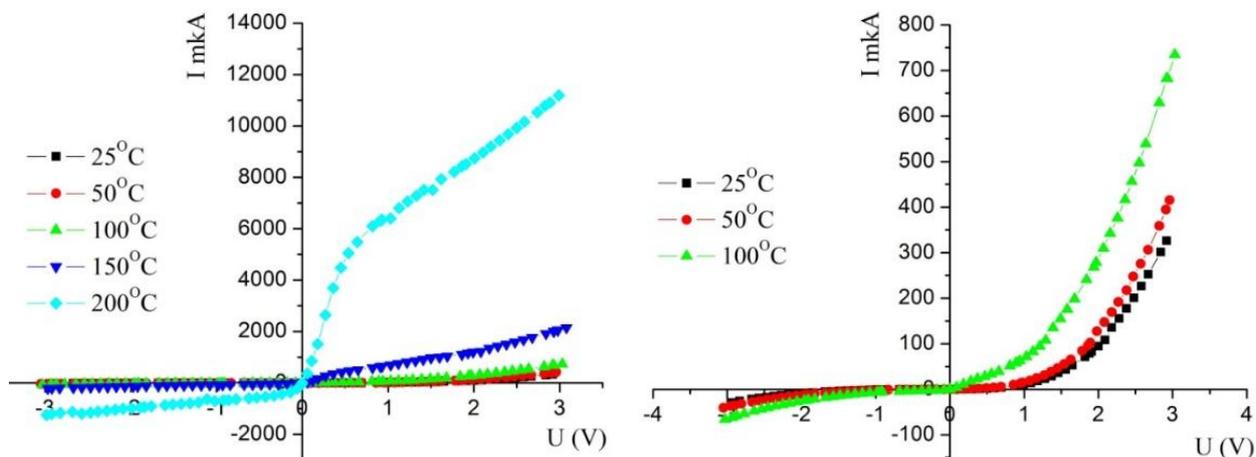
$$p' = e^{-\frac{aJx}{2}} [C_1 \cos(\omega \cdot x) + C_2 \sin(\omega \cdot x)], \quad (15)$$

где  $\omega = \sqrt{\frac{\beta c_{12}}{D_p} - \left(\frac{aJ}{2}\right)^2}$  зависит от тока. В результате на фоне простой линейной зависимости тока от напряжения могут возникать колебания.

Рассмотрен инжекционно-диффузионный режим в  $p-n$ - и  $p-i-n$ -структурах в условиях периодического изменения концентрации рекомбинационных центров, которая иногда складывается в технологическом процессе выращивания материала, например, при получении поликристаллического кремния в результате многократной переплавки технического кремния марки КРЗ на открытом воздухе на солнечной печи. В этом случае в выражении для распределения концентрации неравновесных носителей появляется член, обусловленный периодической зависимостью концентрации рекомбинационных центров:

$$p = p(0)e^{-\frac{x}{L_p}} \left[ 1 - \frac{N_R^* c_{eff}}{D_p} \frac{\left(\frac{1}{L_p^2} - \omega^2\right) \sin(\omega \cdot x)}{\left(\frac{1}{L_p^2} + \omega^2\right)^2} \right], \quad (16)$$

что также приводит к появлению периодических добавок в зависимость напряжения от тока.



**Рис.9. Вольт-амперные характеристики для структуры с  $p$ - $n$ -переходом на основе  $n$ -GaAs<Sn> с простыми омическими контактами при различных температурах.**

Приведены результаты исследований структур с  $p$ - $n$ -переходом, созданных на основе  $n$ -GaAs<Sn>, в температурном диапазоне 25-200°C. Показано, что при нагреве такая структура генерирует ток (до 0,45 нА при  $T=110^\circ\text{C}$ ) и напряжение (до 260 мВ при  $T=50^\circ\text{C}$ ). Приведены также ВАХ таких структур (рис.9), имеющие хорошие выпрямляющие свойства вплоть до 200°C.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе механизма развития процессов самоорганизации вакансий и примесей в широкозонных полупроводниках типа  $A^{III}B^V$  сделаны следующие выводы:

1. Разработана статистика рекомбинации неравновесных носителей для модели рекомбинационного комплекса типа мелкий донор и вакансия и показано, что при низком уровне возбуждения выражение для скорости рекомбинации практически не отличается от обычного выражения статистики Шокли-Рида, но при высоком уровне возбуждения скорость рекомбинации замедляется до ее полного насыщения, что служит основой развития процессов самоорганизации.

2. Исследование возможных изменений времени жизни неравновесных носителей в полупроводниках типа  $A^{III}B^V$   $n$ -типа проводимости, проведенное в предположении о существовании трех различных каналов рекомбинации, показало, что в широком диапазоне возбуждения, определяющим будет процесс через двухуровневый рекомбинационный комплекс типа мелкий донор и вакансия, приводящий к линейному увеличению времени жизни основных носителей и росту тока короткого замыкания фотоэлемента.

3. Исходя из факта изначального существования в  $n$ -полупроводниках типа  $A^{III}B^V$  комплексов типа мелкий донор и вакансия выдвинута идея, что они легко распадаются под действием однородного нагрева, в результате чего развиваются процессы самоорганизации вакансий и мелких легирующих доноров, формирующие в объеме полупроводника изотипные  $n-n^+$  потенциальные барьеры (т.е. внутренние электрические поля), которые являются причиной появления токов и напряжений, синергетических по своей природе.

4. Показано, что когда при возникновении изотипных барьеров большая часть образца квазинейтральна и основное падение напряжения приходится именно на нее, то зависимость возникающего синергетического напряжения от температуры монотонная, а в случае, когда падение напряжения на  $n-n^+$ -переходе является определяющим и необходимо использовать теорию генерационно-рекомбинационных токов, имеет место периодическая зависимость напряжения от температуры.

5. Рассмотрен инжекционный диффузионный режим в  $p-n$ - и  $p-i-n$ -структурах с учетом изменения концентрации эффективно работающих рекомбинационных центров и показано, что подобные изменения приводят к появлению периодических добавок в выражениях для концентраций свободных носителей и зависимости напряжения от тока.

6. Показано, что в  $p-n$ -структурах, изготовленных из  $n\text{-GaAs}\langle\text{Sn}\rangle$ , имеет место термовольтаический эффект, т.е. генерация тока и напряжения в условиях однородного нагрева, причем ВАХ этих структур сохраняют выпрямляющие свойства при достаточно высоких значениях температуры вплоть до  $200^\circ\text{C}$ .



**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.30.05.2018.FM/T.34.01 AT PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE**

---

**PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE**

**KHASHAEV MUSLIM MUSAGITOVICH**

**MECHANISM OF DEVELOPMENT OF SELF-ORGANIZATION  
PROCESSES OF VACANCIES AND IMPURITIES IN WIDE-BAND  
SEMICONDUCTORS OF TYPE A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>**

**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 doctoral dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.1.PhD/FM41.**

Dissertation has been prepared at physical-technical institute.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (fti.uz) and on «Ziyonet» information and educational portal (www.ziyonet.uz).

**Scientific supervisor:**                   **Leyderman Ada Yulevna**  
doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Official opponents:**                   **Aripov Khayrulla Kabulovich**  
doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Rasulov Rustam Yavkachovich**  
doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Leading organization:**               **The National University of Uzbekistan**

The Defense will take place on «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 at \_\_\_\_\_ at the meeting of Scientific Council number DSc.30.05.2018.FM/T.34.01 at Physical-technical institute. (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net).

The doctoral dissertation is possible to review in Information-resource centre at Physical-technical institute (is registered №\_\_\_\_) (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-30-41).

The Abstract of the dissertation sent out on «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018.

(Mailing report № \_\_ on «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018).

**N.R. Avezova**

Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical sciences

**O.A. Abdulhaev**

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, PhD in physics and mathematics

**A. Abdurahmanov**

Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical sciences, professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of research work** is to study the possibility of the appearance of self-organization processes and thermostimulated synergetic processes in semiconductors of the  $A^{III}B^V$  type grown by the Czochralski method, as well as injection phenomena in the structures created on their basis

**The objects of the research work** are wide-gap semiconductors of the type  $A^{III}B^V$  with n-type conductivity and grown by the Czochralski method.

### **Scientific novelty of the research work:**

a variant of the recombination statistic for nonequilibrium carriers in semiconductors  $A^{III}B^V$  of the *n*-type conductivity, which occurs through the compound two-level recombination complexes of type the small donor and vacancy, was first developed;

it is shown for example of gallium arsenide that the lifetime of nonequilibrium carriers in *n*-type  $A^{III}B^V$  semiconductors, taking into account the possibility of recombination not only through simple recombination centers, but also through small donor and vacancy complexes and free vacancies, increases with the level of excitation;

it was first theoretically predicted that in homogeneous *n*-type conductivity  $A^{III}B^V$  semiconductors grown by the Czochralski method under the action of homogeneous heating the self-organization of vacancies and shallow donors appears, which leads to the appearance of isotype *n-n*<sup>+</sup> junctions and the appearance of synergistic currents and voltages; this phenomenon was confirmed experimentally in *n*-semiconductors GaSb <Te>, GaAs <Sn>, GaAs <Te> and InP <Te>;

it has been shown that in semiconductors with periodic distribution of recombination centers at calculating injection-diffusion and diffusion-drift current characteristics appearing periodic additions must be taken into account.

**Implementation of the research results.** On the basis of the mechanism for the development of processes of self-organization of vacancies and impurities in wide-band semiconductors of the type  $A^{III}B^V$ :

the model of the decay of small donor and vacancy complexes in  $A^{III}B^V$  type semiconductors under the influence of homogeneous heating with their further self-organization leading to the appearance of synergistic currents and voltages was used in the determination of physical mechanisms processes within the framework of the fundamental project «F-2-37-Features of laser-induced nonlinear processes of defect formation in semiconductors» (2012-2016) (Information Agency for Science and Technology of the Republic of Uzbekistan №FTA-02-11 / 1345 dated December 22, 2017). The use of these scientific results allowed to reveal the analogy between the thermal effect and laser-induced effects for defect formation processes in semiconductors;

the effect of periodic changes of the concentration of efficiently operating recombination centers on the current transport in p-n structures was applied in JSC FOTON for the production of plates and crystals of semiconductor devices (Reference No.02-1035 dated 04.05.2018 by AK Uzeltehsanoat). The use of these

scientific results allowed to improve the current characteristics of p-n-structures operating at injection-diffusion and diffusion-drift conditions.

**Structure and volume of dissertation.** Dissertation consists of introduction, four chapters, conclusions and a list of references. The text of the thesis is printed on 105 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М. Особенности рекомбинации в полупроводниках  $A^{III}B^V$  // Доклады Академии Наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2012. – №3. – С. 22-24. (01.00.00, №7)

2. Leyderman A.Yu., Saidov A.S., Khashaev M.M., Rahmonov U.Kh. Thermovoltaic processes in gallium arsenide doped with tin // Applied Solar Energy. – New York, 2012. – Vol.48, No.3. – P.165-168. (№41, SCImago, IF=0,279)

3. Leyderman A.Yu., Saidov A.S., Khashaev M.M., Rahmonov U.Kh. About Possibility of Development Synergetic Processes in Semiconductors of Type  $A^{III}B^V$  // Journal of Materials Science Research. – Canada, 2013. – Vol.2, No.2. – P.14-21. (01.00.00, №9)

4. Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М. Влияние синергетических процессов, обуславливающих периодическое распределение рекомбинационных центров, на концентрацию неравновесных носителей // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2012. – №6. – С.13-15. (01.00.00, №7)

5. Leyderman A.Yu., Khashaev M.M. Lifetime specifics of nonequilibrium carriers in photoelectric cells based on gallium arsenide obtained via the Czochralski method // Applied Solar Energy. – New York, 2013. – Vol. 49, No.4. – P.244-247. (№41, SCImago, IF=0,279)

6. Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М. О возможности возникновения колебаний напряжения в полупроводниковых диодных структурах, работающих в диффузионном инжекционном режиме // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2014. – №2. – С.22-23. (01.00.00, №7)

7. Leyderman A.Yu., Saidov A.S., Khashaev M.M., Rahmonov U.Kh. Study of properties of tellurium doped indium phosphide as photoconversion material // Applied Solar Energy. – New York, 2014. – Vol. 50, No.3. – P.143-145. (№41, SCImago, IF=0,279)

8. Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М. Влияние рекомбинационно- и температурно-стимулированного изменения концентрации рекомбинационных центров на инжекционный диффузионный режим // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2014. – Т.16, №3. – С. 208-213. (01.00.00, №5)

9. Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М. Влияние периодического распределения концентрации рекомбинационных центров на диффузионные инжекционные процессы // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2014. – №5. – С. 24-27. (01.00.00, №7)

10. Leyderman A.Yu., Saidov A.S., Khashaev M.M., Rahmonov U.Kh. Study of GaSb Doped with Te as a Material for Photovoltaic Systems // Applied Solar

Energy. – New York, 2015. – Vol. 51, No.2. – P.117-119. (№41, SCImago, IF=0,279)

11. Лейдерман А.Ю., Саидов А.С., Хашаев М.М., Рахмонов У.Х. Термовольтаические синергетические эффекты самоорганизации примесей и дефектов в полупроводниках типа  $A^{III}B^V$  // Альтернативная энергетика и экология. – Россия, 2015. – №7 (171). – С.55-69. (01.00.00, №9)

12. Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М. О возможности возникновения колебаний тока в условиях диффузионно-дрейфового инжекционного режима // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2015. – Т.17, №6. С.366-371. (01.00.00, №5)

13. Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М. Влияние периодического распределения концентрации рекомбинационных центров на инжекционно-диффузионный режим в структурах с  $p$ - $n$ -переходом // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. –Ташкент, 2016. – №2.– С.9-13. (01.00.00, №7)

14. Хашаев М.М., Лейдерман А.Ю., Саидов А.С., Рахмонов У.Х. Термостимулированные процессы в структурах, созданных на базе  $n$ -GaAs<Sn>, выращенного по методу Чохральского // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2017. –№3. – С.14-16. (01.00.00, №7)

### **II бўлим (II часть; II part)**

15. Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М. Исследование возможности возникновения процессов самоорганизации в арсениде галлия  $n$ -типа // Фотоэлектрические и теплофизические основы преобразования солнечной энергии. Материалы Республиканской научно-технической конференции. 22-24 мая 2011. – Фергана, 2011. – С.12-13.

16. Хашаев М.М., Лейдерман А.Ю. Исследование возможности возникновения процессов самоорганизации в арсениде галлия  $n$ -типа // Мустакиллик йилларида илм-фан тараққиёти: ёш олимлар муҳим фундаментал натижалари, амалий ютуқлари ва инновациялар. Республика ёш олимлар илмий-амалий конференцияси материаллари. 11 ноябрь 2011. – Ташкент, 2011. – С.60-62.

17. Хашаев М.М. Модель рекомбинации через комплекс мелкий донор + вакансия // Студент и научно-технический прогресс. Материалы 50-й юбилейной международной научной студенческой конференции. 13-19 апреля 2012. – Новосибирск, 2012. –С.72.

18. Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М., Рахмонов У.Х. Тепловольтаические свойства  $n$ - GaAs<Sn> // Структурная релаксация в твердых телах. Материалы IV международной научно-практической конференции. 29-31 мая 2012. – Украина, Винница, 2012. –С.201-202.

19. Хашаев М.М. Распределение концентрации и ВАХ  $p$ - $i$ - $n$  структур в условиях ингибирования скорости рекомбинации // Студент и научно-технический прогресс. Материалы 51-й международной научной студенческой конференции. 12-18 апреля 2013.– Новосибирск, 2013. –С.73.

20. Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М. Релаксационные процессы в полупроводниках с двухуровневыми рекомбинационными комплексами // IV международная конференция по актуальным проблемам молекулярной спектроскопии конденсированных сред. 29-31 мая 2013. – Самарканд, 2013. – С. 86.

21. Хашаев М.М., Лейдерман А.Ю. Влияние периодического распределения концентрации рекомбинационных центров на инжекционные процессы // Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Труды международной конференции, посвященной 70-летию Физико-технического института НПО «Физика-Солнце». 14-15 ноября 2013. – Ташкент, 2013. – С.269-271.

22. Khashaev M.M., Leyderman A.Yu., Saidov A.S., Rahmonov U.H. Generation-recombination currents caused by thermo - stimulated processes in semiconductors  $A^{III}B^V$  with  $n$ -type conductivity // European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches, proceedings of the 10<sup>th</sup> International scientific conference. ORT Publishing. June 5, 2014. – Stuttgart, 2014. – P.68-74.

23. Лейдерман А.Ю., Саидов А.С., Хашаев М.М., Рахмонов У.Х. Термостимулированные процессы самоорганизации в полупроводниках типа  $A^{III}B^V$  // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Материалы IX Международного симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. Сентябрь 2014.–Москва, 2014. – С.9-16.

24. Хашаев М.М., Лейдерман А.Ю. Генерационно-рекомбинационные токи в полупроводниках с изменяющейся концентрацией рекомбинационных центров // Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Сборник тезисов докладов республиканской конференции, посвященной 100-летию академика С.А. Азимова. 6-7 ноября 2014. – Ташкент, 2014. – С. 93-94.

25. Хашаев М.М., Лейдерман А.Ю. Термостимулированные синергетические процессы в полупроводниках  $A^{III}B^V$  // Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Сборник тезисов докладов международной конференции. 5-6 ноября 2015. – Ташкент, 2015. –С.151-155.

26. Хашаев М.М., Лейдерман А.Ю. Особенности рекомбинации неравновесных носителей в полупроводниках  $A^{III}B^V$  в условиях сильного фотовозбуждения // V международная конференция по актуальным проблемам молекулярной спектроскопии конденсированных сред. 22-24 сентября 2016. – Самарканд, 2016. -С. 100.

27. Leyderman A.Yu., Khashaev M.M. Synergetic processes in semiconductors  $A^{III}B^V$  // The International Symposium «New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects». 10-11 November 2016. – Tashkent, 2016. – P.191-192.

28. Хашаев М.М., Лейдерман А.Ю., Рахмонов У.Х. Термостимулированные процессы в структуре на основе  $n$ -GaAs<Sn>, выращенного по методу Чохральского. Сборник тезисов докладов международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». 13-14 июня 2017. – Ташкент, 2017. – С.194-196.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ( 22.05.2018 йил).

Босишга рухсат этилди: 5.07.2018 йил.  
Бичими 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 2,9. Адади: 100. Буюртма: № 251.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»  
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.