

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ
КЕНГАШ**

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ
АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

САТТИЕВ АБДУЛАЗИЗ РАСУЛЖОНОВИЧ

**ПАЛЛАДИЙ, ОЛТИНГУГУРТ ВА РУҲ БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН
КРЕМНИЙДАГИ КИРИТМА-НУҚСОН ҲОЛАТЛАРИНИНГ
ШАКЛЛАНИШИДА РАДИАЦИОН СТИМУЛЛАШГАН ЖАРАЁНЛАР**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Тошкент – 2019

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

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

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

Саттиев Абдулазиз Расулжонович

Палладий, олтингугурт ва рух билан легирланган кремнийдаги
киритма-нуқсон ҳолатларининг шаклланишида радиацион
стимуллашган жараёнлар..... 3

Саттиев Абдулазиз Расулжонович

Радиационно-стимулированные процессы в формировании примесно-
дефектных состояний в кремнии, легированном палладием, серой и
цинком..... 22

Sattiev Abdulaziz Rasuljonovich

Radiation-stimulated processes in formation of impurity-defect states in
silicon, doped by palladium, sulfur and zinc..... 41

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 48

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ
КЕНГАШ**

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ
АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

САТТИЕВ АБДУЛАЗИЗ РАСУЛЖОНОВИЧ

**ПАЛЛАДИЙ, ОЛТИНГУГУРТ ВА РУҲ БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН
КРЕМНИЙДАГИ КИРИТМА-НУҚСОН ҲОЛАТЛАРИНИНГ
ШАКЛЛАНИШИДА РАДИАЦИОН СТИМУЛЛАШГАН ЖАРАЁНЛАР**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Тошкент – 2019

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.4.PhD/FM295 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институти ва Андижон Давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.inp.uz) ва «Ziynet» ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	Зайнабидинов Сиражиддин физика-математика фанлари доктори, профессор, академик
Расмий оппонентлар:	Ашуров Мухсинджан Хурамович физика-математика фанлари доктори, профессор, академик Арипов Хайрулла Кабулович физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	Фарғона Давлат университети

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти, Астрономия институти, Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент шаҳри, Улуғбек кўрғони, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-18; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент шаҳри, Улуғбек кўрғони, ЯФИ. Тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2019 йил « ____ » _____ куни тарқатилди.
(2019 йил “ ____ ” _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

М. Ю. Ташметов

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

Э.М.Турсунов

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

И. Нуриддинов

Илмий даражалар берувчи Илмий
кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда қаттиқ жисм электроникаси соҳасида ярим ўтказгичларнинг электрофизик параметрларини, таъқиқланган соҳаларда чуқур энергетик сатҳлар ҳосил бўлишига олиб келувчи легирлаш жараёнлари ёрдамида бошқариш, материаллар хусусиятларини шакллантиришнинг энг истиқболли усулларидан биридир. Ҳозирги вақтда керакли киритмани унинг типига (донор, акцептор ёки амфотер) боғлиқ равишда танлаб олиш, легирланган кристалл параметлари ва характеристикаларини ҳамда материалнинг фотосезгирлиги, термосезгирлиги, тензосезгирлиги ва радиация таъсирига барқарорлиги каби муҳим хоссаларини ўзгартириш орқали бошқариш имконини беради. Тажрибада легирланган ярим ўтказгич кристалларни олишда, асосан тез диффузияланувчи, кристаллнинг таъқиқланган соҳасида электрон сатҳлар ҳосил қилувчи киритмалардан фойдаланилади. Кремнийнинг кристалл панжарасида чуқур сатҳли нуқсон марказларини ҳосил қилувчи бундай киритмалар кичик концентрацияли электрофаол ҳолатларга эга бўлиб, бошқариб бўлмайдиган ва технологик киритмалар билан комплекслар ҳосил қилишга мойил эмаслиги кузатилади.

Сўнгги йилларда жаҳон амалиётида ярим ўтказгич кристалларда киритма нуқсон ҳолатини бошқариш учун бошқа технологик усуллар билан бирга турли физик таъсирлар ўтказиш усуллари қўлланмоқда. Булардан бири кириб боровчи радиациядир. Легирланган ярим ўтказгичларда нуқсонли ҳолатларни ўзгартириш ташқи таъсирларда мураккаб физик-кимёвий жараён бўлиб, трансформацияга, парчаланишга ёки янги биржинсли бўлмаган тузилмаларнинг шаклланишига, дастлабки материалнинг таркибий мукаммаллигига, материалнинг киритма билан легирлаш даражасига ҳамда дастлабки кристаллда технологик ва газ ҳосил қилувчи кимёвий элементларнинг мавжудлигига боғлиқ бўлиб, кристалл ҳажмида нуқсонларнинг бир жинсли тақсимланиши билан белгиланади. Жаҳондаги бир қанча лабораторияларда олиб борилган тажрибавий ва назарий изланишлар шуни кўрсатадики, кремний модификацияси соҳасида легирланган материалнинг кристалл таркибида ҳосил бўлган нуқсон ҳолатлари киритма комплексларининг радиациявий парчаланиш жараёнлари эътибордан четда қолган. Ташқи таъсирлар бўлганда хусусий ҳамда бошқариб бўлмайдиган киритмали нуқтавий нуқсонларни ва кристаллнинг бошқа биржинсли бўлмаган компонентлари билан кремний-киритма қаттиқ эритмасининг ўзаро таъсир механизми ўрганилмаган. Буларнинг барчаси янгича назарий ва амалий ёндашувни талаб этади. Ташқи таъсирлар ёрдамида структуравий нуқсон комплексларини ҳосил қилиш ва ўзгартириш механизмларини, легирланган ярим ўтказгич материалларининг хоссаларини мақсадли бошқариш учун аниқлаштириш – радиациявий технологияларнинг долзарб соҳаларидан бири бўлиб, “нуқсонлар инженерияси” деб аталади.

2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида “...ички ва ташқи бозорларда маҳаллий

маҳсулотларнинг рақобатбардошлигини принципиал жихатдан янгича тур маҳсулот ва технологиялар ишлаб чиқишни ўзлаштириш орқали”¹ таъминлаш вазифаси қўйилган. Шу нуқтаи назардан легирланган ярим ўтказгич материаллар хоссаларини мақсадли бошқариш учун ташқи омиллар ва нуқсон комплекслари қайта пайдо бўлишининг янги механизмларини топиш ва улар асосида ярим ўтказгич асбоб-ускуналар яратиш ҳамда уларнинг фойдаланиш вақти давомийлигини ошириш замонавий ярим ўтказгичлар физикаси ва техникасининг ўта муҳим масаласидир.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ–2789-сонли “Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш бўйича чора-тадбирлар тўғрисида”ги Қарори ҳамда 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. Мазкур тадқиқот иши республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Легирланган ярим ўтказгич материаллар устида олиб борилган изланишлар ва улар асосида яратилган асбоблар, шунингдек, нуқсон ҳолатининг шаклланишига олиб келувчи физик жараёнларни ўрганиш бўйича чоп этилган илмий мақолалар ва монографияларда, энциклопедик маълумотномаларда таниқли олимлар, масалан: америкалик (Милнс А., Корбетт Ж.М., Са С.Т., Уоткинс Дж.Д., Бекман Х.Х.), россиялик (Фистуль В.И., Лебедев А.А., Мильвидский М.Г.) ва ўзбекистонлик (Баходирхонов М.С., Абдурахмонов К.П., Мамадалимов А.Т., Зайнабидинов С.) ва бошқа олимлар томонидан кенг баён этилган.

Бу тадқиқотларда ярим ўтказгичлардаги киритма атомларининг турлари ва ҳолатлари, уларнинг диффузияси, термодинамикаси ва эриш кинетикаси, улар ҳосил қиладиган чуқур сатҳли марказлар, энергетик сатҳлар, заряд ҳолатлари ва комплекс тузилмалар характерлари ўрганилган. Монокристаллар ва ярим ўтказгич бирикмаларда баъзи легирловчи киритмаларнинг бошқариб бўлмайдиган кимёвий элементлар билан ўзаро таъсири ҳамда миграцияси тўғрисидаги назарий ва амалий натижалар таҳлил қилинган. Киритмаларнинг водородга ўхшаш, газ ҳосил қилувчи, амфотер ва изовалент ҳолатлари ва ўрганилганлик даражаси кўриб чиқилган.

Бироқ киритма атомларининг хусусий атомлар ва кристаллдаги радиациявий нуқсонлари, кристалл панжарасидаги дислокациялар ва бошқа давомий нуқсонлар, шунингдек, адсорбция жараёнлари мутахассислар ва

¹Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги фармони.

ишлаб чикувчилар назаридан четда қолаётган муҳим ҳодисалардир. Ташқи физик таъсирлар натижасида ҳосил қилинган структуравий нуқсонларнинг тузилиши, ўлчамлари, барқарорлиги ва қайта шаклланиши ҳақида маълумотлар йўқ, алоҳида нуқсонларнинг ўзига хос табиатига, шунингдек, легирланган кристалларда кластерларнинг ва кичик ўлчамли наноконпозицияларнинг шаклланиш механизмларига, айниқса, кислород, углерод ва водород қатнашган ҳолатларга эътибор берилмаган. Легирланган ярим ўтказгич кристаллининг характеристикаси ва параметрларини модификациялаш учун ҳамда уларда янги функционал хоссаларни пайдо қилиш мақсадида ушбу ишда янгича ёндашув таклиф этилган. Бунда монокристалл кремний асосида легирланган ярим ўтказгичлар хоссаларини бошқариш мақсадида радиациявий таъсир ва термик ишлов жараёнлари биргаликда амалга оширилган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Ядро физикаси институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг ФА-Ф2-Ф066+Ф072 «Кичик ўлчамли наноконпозициялар ва нанозарраларни ўзи ичига олган ярим ўтказгич материалларнинг хоссалари ва тузилмаси» (2007–2011 йй.), Ф2-ФА-Ф121 «Бир жинсли бўлмаган микроҳолатларнинг шаклланиши ва уларнинг нейтронлар ёрдамида легирланган кремнийнинг гидрогенлаш пайтида фундаментал хоссаларига таъсири» (2012–2016 йй.) ҳамда ОТ-Ф2-20 «Легирланган кремнийда радиация таъсирида юз берадиган кичик ўлчамли структура ўзгаришлари ва уларнинг монокристалл хоссаларига таъсири» (2017–2021 йй.) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади кремнийдаги киритма-нуқсон ҳолатларини ўзгартиришнинг радиациявий рағбатлантирилган жараёнларини легирловчи киритма турига боғлиқ равишда ўрганиш ва уларнинг хоссаларини термордиациявий такомиллаштириш усулларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

чуқур энергетик сатҳ ҳосил қилувчи донор, акцептор ва амфотер характерга эга бўлган энг яхши, энг қулай киритмаларни аниқлаш ва кремнийни руҳ, олтингугурт ва палладий киритмалари билан бир жинсли легирлаш усулини ишлаб чиқиш;

Zn, S ва Pd билан легирланган кремнийда ҳосил қилинган нуқсон ҳолатларининг структура параметрлари ва энергетик сатҳларини топиш ҳамда уларнинг кристаллнинг электрофизик ва рекомбинацион хусусиятларига таъсирини аниқлаш;

кремнийдаги радиация билан рағбатлантирилган жараёнларга узвий боғлиқ бўлган структуравий ўзгаришлар механизмини материалнинг легирланиш даражасига ва электрофаол таркибий нуқсон марказлари концентрациясига боғлиқ ҳолда аниқлаш;

ичига кириб боровчи радиация таъсирида легирланган кремнийда кечадиган радиациявий ва киритма нуқсонларини, турли квазикимёвий реакцияларни тавсифлаш учун назарий ёндашувни ишлаб чиқиш;

легирланган кремнийга радиациявий таъсир ўтказилганда ундаги структуравий ўзгаришларнинг энг маъқул шароитларини аниқлаш ва легирланган материал хоссаларини радиациявий модификациялаш усулини топиш;

Тадқиқотнинг объекти сифатида рух, олтингугурт ва палладий киритмалари билан легирланган монокристалл ва нейтронлар билан трансмутацияланган кремний намуналари олинган.

Тадқиқотнинг предмети бўлиб рух, олтингугурт ва палладий киритмалари билан легирланган монокристалл кремнийдаги нуқсон ҳолатларининг шаклланишидаги терморadiaциявий-стимуллашган жараёнлар ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқотда чуқур сатҳларнинг ностационар сиғим спектроскопияси (DLTS), фото сиғим спектроскопияси, индуцирланган фото сиғим, стационар фото ўтказувчанлик, рентгенфлуоресцент ва рентгендифракция усуллари, инфрақизил микроскопия ва p-n структураларнинг тескари қаршилиқдаги тикланиш вақти усулларида фойдаланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгиллиги қуйидагилардан иборат:

биринчи марта кремнийни олтингугурт ва родий киритмалари билан легирлашнинг дастлаб киритилган фосфор ва палладий изотопларини ядровий трансмутация қилишга асосланган икки босқичли усули таклиф қилиниб, амалга оширилган ва ядровий трансмутацияланган легирланган кремнийда олтингугурт, палладий ва родий марказлари ҳосил қилган чуқур энергетик сатҳлар идентификацияланган;

кремнийда палладий киритмаси [Pd-V] вакансия-киритма бирикмали ҳамда киритманинг водород билан кимёвий боғланиши бирикмаси [Pd-H] кўринишидаги кичик ўлчамли нуқсонларни шакллантириши билан бирга $E_c - 0,18$ эВ, $E_v + 0,34$ эВ ва $E_v + 0,32$ эВ энергетик сатҳларни ҳосил қилиши, рух билан легирланган p- типли кремнийдаги рух киритмаси эса радиация таъсирида қуёш элементлари фотоэлектрик характеристикалари барқарорлигининг ошишига ва уларнинг инфрақизил соҳада спектрал сезгирлиги ортишига олиб келиши аниқланган;

биринчи марта легирланган монокристалл кремнийда вужудга келадиган мис-кислород нанокристаллитлари уч хил ҳолатда: матрица панжарасининг тугунлари орасида алоҳида атомлар ҳолида, Cu_2O ва CuO нанокристаллитлари таркибида бўлиши аниқланган. Ушбу нанокристаллитлар дискрет чуқур сатҳларни ҳосил қилиши, уларнинг миқдори диффузия режими ва намуналарни диффузиядан кейинги совитиш тезлиги билан аниқланиши топилган;

монокристалларда нуқсон ҳолатлари ҳосил бўлиш кинетикасини тавсифловчи дифференциал тенгламалар системасининг квазистационар ечими, уларнинг ҳажмида турли киритмалар мавжудлигини ҳисобга олган ҳолда олинган ва ярим ўтказгичларда вакансиянинг киритма атомлари билан радиация таъсирида рекомбинацияси туфайли шаклланадиган структуравий нуқсонлар ҳолатларининг модели таклиф этилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

монокристалл кремний асосида берилган концентрациядаги Pd, Zn ва S киритмалар мавжуд бўлган қаттиқ эритма намуналарини олиш усули ишлаб чиқилган, кўрсатилган киритмалар билан кремнийни бир жинсли легирлашнинг оптимал шароитлари аниқланган;

кремний пластиналари юзасини барқарорлаштириш ва емирилишига йўл қўймаслик имконини берувчи S ва Pd билан легирланган кремнийни ядровий трансмутация йўли билан олиш усули, шунингдек, кристалл ҳажмида термо ва таркибий нуқсон ҳолатларини шакллантириш усули таклиф қилинган;

Zn билан легирланган кремнийдан қуёш элементларини тайёрлашда фойдаланиш, уларнинг барқарорлигини ҳамда фотоэлектрик характеристикаларини радиациявий таъсирга ва инфрақизил соҳада спектрал сезгирлигини ортишига олиб келиши аниқланган;

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги кенг ҳажмдаги маълумотлар комплекси, мустақил тажрибавий усуллар ва нуқсон ҳолатлари параметрларини назарий ҳисоблашлар ўтказиш ҳамда олинган натижаларни адабиётлардаги натижалар ҳамда умумфизикавий тушунчалар ва қонуниятларга зид бўлмаган натижаларга мослиги билан белгиланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти радиациявий-стимуллашган жараёнларни ўрганиш ва квазикимёвий реакцияларнинг кечиш жараёнларини аниқлаш ҳамда легирланган кремнийга ташқи физик таъсирлар бериш натижасида шаклланган нуқсон комплексларининг трансформацияси ва ҳосил бўлиш механизмлари топилгани билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти радиациявий ишлов бериш йўли билан легирланган ярим ўтказгич материалнинг хоссаларини ўзгартириш ёки янги хусусиятлар ҳосил қилишнинг физик асосларини ишлаб чиқилгани билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Палладий, олтингугурт ва рух билан легирланган монокристаллик кремнийни ва ундаги киритма-нуқсон марказларининг радиация таъсиридаги трансформацияланиш жараёнларини тадқиқ қилиш бўйича олинган натижалар асосида:

кремнийда рух миқдорининг ортиши билан қуёш элементларининг фотоэлектрик характеристикалари барқарорлиги ортиб боришининг аниқланган қонунияти «FOTON» АЖда n-тип ўтказувчанликка эга кремний асосида диффузион диодлар ишлаб чиқаришга татбиқ қилинган, кремнийли p^+ -n- p^+ структураларда «Электроника У-003» чизикли электрон тезлатгични қўллаб рекомбинация марказларини ҳосил қилишга доир радиация билан бошқариш технологияси ва топилган диффузион диодлардаги ҳосил қилинган p^+ қатлам қалинлигига киритилаётган радиацион нуқсонлар концентрациясининг боғлиқлиги эффекти «FOTON» АЖ корхонасида импульс диодлар тезкорлигини ошириш учун қўлланилган («UZELTEXSANOAT» Ассоциациясининг 2019 йил 13 июндаги 04-4/694-сонли хати). Илмий натижаларнинг қўлланилиши кремнийли p^+ -n- p^+

структураларда радиацион ишлов бериш йўли билан рекомбинация марказларини шакллантиришнинг бошқариладиган технологиясини яратиш имконини берган;

яримўтказгич монокристалларда радиация таъсирида нуқсонли ҳолатлар ҳосил бўлиш кинетикасини кристаллар ҳажмида вакансиялар ва уларнинг киритма атомлар билан рекомбинацияси иштирокидаги терморadiацион стимулланган турли нуқсонлар ҳосил бўлиш механизмини тавсифловчи дифференциал тенгламалар системасининг квазистационар ечими олинган. Ушбу ечим орқали атом реакторида нурлантириш йўли билан *i*- типли компенсирланган кремний олишнинг технологик режимларини ишлаб чиқишда фойдаланилган. Олинган кристалл асосида АЗ-ФА-Ф003 “Компенсирланган кремнийдан тайёрланган датчик асосида омборларда температура ва намликни масофадан назорат қилиш қурилмасини ишлаб чиқиш” (2015–2017 йй.) амалий лойиҳаси доирасида кремнийли термодатчик тайёрланган. (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясининг 2019 йил 14 июндаги 2/1255-1712-сонли хати). Илмий натижаларнинг қўлланилиши температура ва намликни назорат қилиш учун кремний датчиклари лаборатория намуналарини ишлаб чиқиш ва тайёрлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 6 та халқаро ва 2 та республика миқёсидаги илмий-амалий анжуманда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 16 та илмий иш чоп қилинган, шулардан 8 таси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 4 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, 4 та боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 126 бетни ташкил этади.

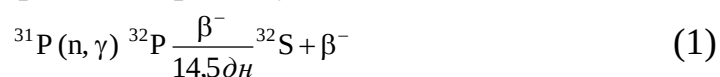
ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

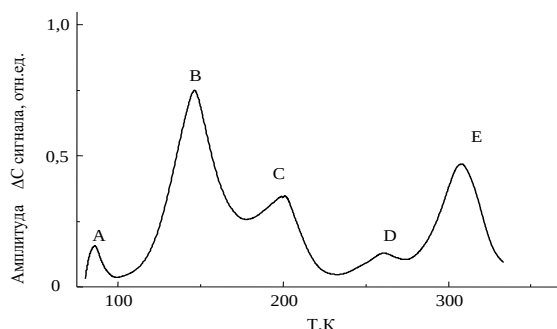
Диссертациянинг **“Палладий, олтингугурт ва рух киритмалари билан легирланган кремнийнинг параметрлари ва хоссалари”** деб номланган биринчи бобида палладий, олтингугурт ва рух киритмалари билан легирланган кремнийнинг хоссалари ва хусусиятлари тўғрисида адабиётлардаги маълумотларнинг таҳлили ва хулоса қилинган қисқача шарҳ

келтирилган. Шу билан бирга, фойдаланилган монокристалл кремний дастлабки намуналарининг маълумот кўрсаткичлари, технологик режимлари ва Pd, S ва Zn киритмалари билан биржинсли легирлаш усуллари, радиациявий ишлов бериш ва легирланган намуналарнинг тадқиқ қилиш усуллари учун ядрофизикавий қурилмаларнинг параметлари ва характеристикалари, электрик, спектрометрик ва фотоҳажмли хоссаларни тадқиқ қилиш натижалари келтирилган. Киритмалар ҳосил қилган чуқур сатҳлар ионланиш энергиялари, уларнинг электрофаол концентрациялари, ток ташувчиларнинг тутилиш кесими ва заряд ташувчилар концентрациясининг кремнийни Pd, S ва Zn билан легирлаш даражасига боғлиқ ҳолда ўзгаришлари ўрганилган. Олиб борилган тажрибалар ва изланишлар асосида олтингугурт кремнийда донор, рух – акцептор, палладий эса амфотер хоссаларини намоён қилиши тасдиқланган. Адабиётларда келтирилган маълумотларни ҳамда Pd, S ва Zn билан легирланган кремний хоссаларини таҳлил қилиш асосида диссертациянинг мақсад ва вазифалари белгиланган.

Диссертациянинг иккинчи боби **“Радиация таъсирида олтингугурт, палладий ва рух билан легирланган кремнийни тадқиқ этиш”** деб номланиб, унда айтиб ўтилган киритмалар билан легирланган кремнийга радиациявий таъсир кўрсатилгандаги тадқиқотларнинг асосий натижалари келтирилган. Бунда S, Pd ва Zn билан легирланган кремнийдаги радиациявий стимуллашган тадқиқот ва легирланган монокристалл олиш учун нейтрон трансмутация усулини қўллаш имкониятлари кўриб чиқилган. Кремнийни олтингугурт билан икки босқичли легирлаш технологияси таклифи киритилган. Бунда масала қуйидагилардан иборат: кремний сиртига қопланган ^{31}P изотопи термодиффузиядан сўнг нейтрон нурлари билан нурлантирилганда фосфор изотопи ядровий парчаланиш ҳисобига барқарор ^{32}S изотопига қуйида кўрсатилган реакция орқали ўтади:



^{32}S изотопи билан бойитилган трансмутацион легирланган қатламдан диффузиялар кенг доирада киритилаётган киритма концентрациясини бошқаришга ва бутун ҳажм бўйича етарлича биржинсли бўлган материал олишга имкон беради. Нейтрон трансмутация орқали олтингугурт киритмаси билан легирланган кремнийдан тайёрланган $p^+ - n - n^+$ -структурларнинг DLTS спектри ўрганилганда, кремнийнинг таъқиқланган соҳасида олтингугуртнинг ионизация энергиялари $E_c - 0,12$ (A); $E_c - 0,27$ (B); $E_c - 0,37$ (C); $E_c - 0,45$ (D) ва $E_c - 0,50$ (E) бўлган донор характердаги чуқур энергетик сатҳлари билан боғлиқ бўлган 5 та чўққи кузатилди (1-расм). Ушбу келтирилган натижалар кремнийга олтингугурт киритмасини термодиффузия усули орқали киритилган намуналардан тайёрланган $p^+ - n - n^+$ -структурларнинг DLTS спектри билан мос келади. Нейтрон трансмутация орқали олтингугурт киритмаси билан легирланган кремнийда ҳосил бўлган $E_c - 0,45$ эВ сатҳга тегишли D чўққи термо нуқсон билан боғлиқдир.



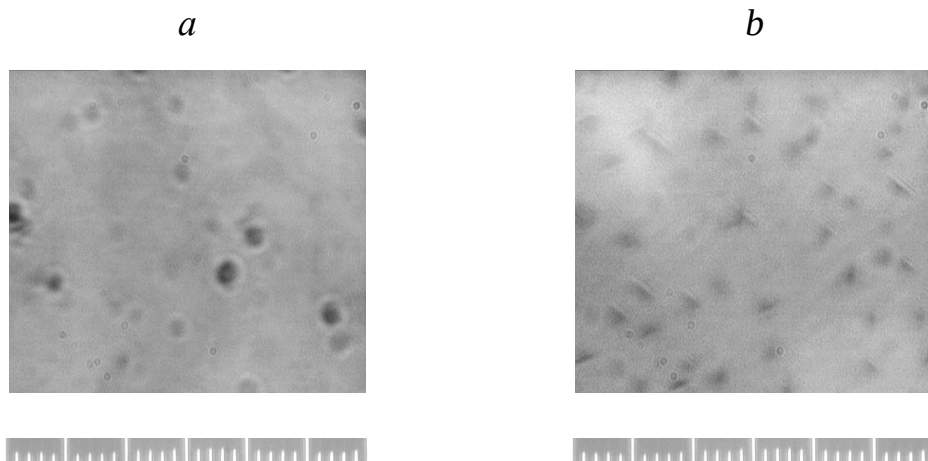
1-расм. Нейтрон трансмутация усули орқали олтингугурт билан легирланган кремнийнинг DLTS спектри

S ҳосил қилган сатҳлар концентрациясининг ошиб бориши, нейтронлар флюэнсининг ортиб бориши билан юз бериши ва олтингугурт ионланиш энергияси қийматининг термодиффузия усулида легирланган намуналардаги қиймати билан айнан мослиги Si<S> олишнинг нейтрон-трансмутация усулининг амалга оширилиши мумкинлигини тасдиқлайди. Si<S> олишнинг нейтрон-трансмутация усули қуйидаги устунликларга: нейтрон билан нурлантириш орқали олтингугурт концентрациясини бошқариш, кремний намуналари сиртида эрозиянинг йўқлиги ва легирланган кристаллнинг юқори даражадаги бир жинслиликка эга эканлигидир.

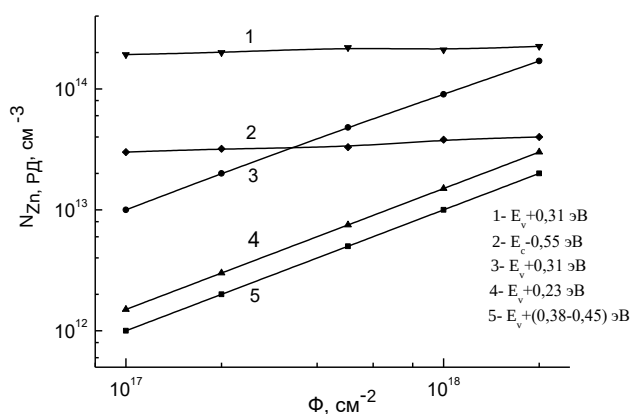
Термодиффузия усулида Pd билан легирланган Si да кечадиган физик жараёнларнинг қонуниятлари ўрганилди. Биринчи бор Si<Pd> намуналарини нейтрон-трансмутацияда реактор нейтронлари билан нурлантирилганда ^{102}Pd ва ^{104}Pd изотопларининг ^{103}Pd изотопига ядровий ўтишига олиб келади. Кристал ҳажмида кейинги босқич электрон қамраб олиш барқарор ^{103}Rh изотопи ҳосил бўлишига ва рекомбинацион марказлар пайдо бўлишига сабаб бўлади. $10^{18} \div 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ флюэнслар оралиғида нейтронлар билан нурлантирилгандан сўнг Si<Pd> намуналар тобланганда, палладийнинг $E_c - 0,22 \text{ эВ}$ сатҳи ҳосил бўлиши билан бир қаторда, Rh га тегишли $E_c - 0,32$ ва $E_c - 0,53 \text{ эВ}$ сатҳлар шаклланади. Бу эса нейтрон-трансмутация билан узвий боғлиқдир.

Si<Pd> намуналарининг микроструктураларини ўрганиш натижалари шуни кўрсатадики, кремний ҳажмидаги палладий термик диффузияда преципитатлар ва клестерлар кўринишидаги кичик ўлчамли тўпланишлар ҳосил қилади. Улар нейтронлар билан нурлантириш жараёнида стерженсифат нуқсонларга айланади (2-расм).

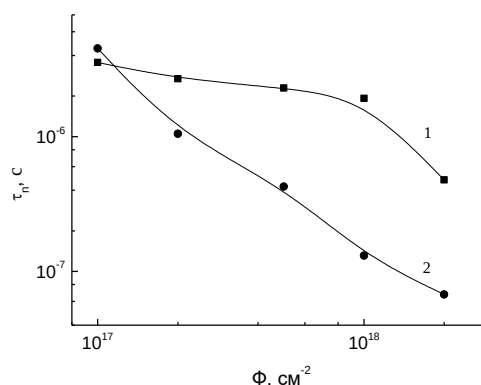
Легирланган кремний хоссаларига энг фаол таъсир этувчи йўлдош элемент, яъни водород атомларининг таъсири ўрганилди. Si<Pd> мисолида, водород Pd киритмаси билан квазикимёвий реакцияга осон кириши билан бир қаторда кремний панжарасидаги хусусий нуқсонлар билан реакцияга киришиши кўрсатилди.



2-расм. Pd билан легирланган кремний намуналари микрофотографияси: нурлантиришгача (а) ва нурлантиришдан сўнг (b)



3-расм. p-Si <Zn> (1,2) да рух ва p-Si да радиациявий нуқсонлар (3-5) сатҳлари концентрацияларининг γ -квантлар флюэнсига боғлиқ ўзгариши



4- расм. p-типли кремнийдаги асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтининг ^{60}Co γ - квантлар флюэнсига боғлиқ ўзгариши. 1-p-Si<Zn> ($N_{\text{Zn}} = 2,0 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$); 2-p-Si

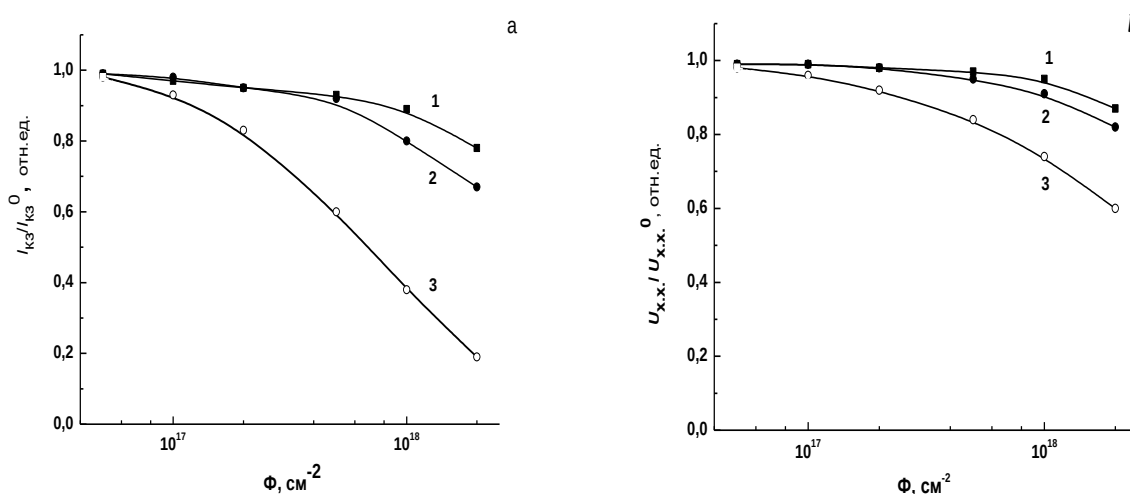
DLTS спектрида Si<Pd> намуналарига водород билан ишлов берилгунча ва ишлов берилгандан сўнг таҳлил қилиш жараёнидан кўринадики, аниқланган $E_c - 0,32$ эВ донор сатҳи [Pd-H] жуфтлигидаги киритманинг ҳосил бўлиши билан боғлиқ. Бунда у кремнийнинг кристалл панжарасида кучсиз боғланган ҳолатда бўлади ва иссиқлик таъсирида осонгина парчаланиб кетади.

Рух билан легирланган кремнийнинг микроструктурасини ўрганиш устида изланишлар олиб борилди ва кўрсатилган киритманинг радиациявий нуқсонлар киритиш самарадорлигига ҳамда қуёш элементларидаги характеристикалари деградациясига таъсири ўрганилди.

DLTS спектрида p-Si<Zn> намуналарини ^{60}Co γ - квантлари билан нурлантиришгача ва ундан сўнг ўлчанганда, акцептор характердаги рух

киритмасининг $E_v+0,31$ ва $E_c-0,55$ эВ энергетик сатҳлари билан бирга барчага маълум бўлган $E_v+0,23$ эВ сатҳли (дивакансия) ва $E_v+0,31$ эВ сатҳли К-марказ ($V-O-C$) ҳамда $E_v+(0,38\div 0,45)$ эВ сатҳли вакансия бор комплексига тегишли радиациявий нуқсон марказлари аниқланди. $p-Si<Zn>$ даги рух ҳосил қилган сатҳларнинг концентрациялари гамма нурлари таъсирида ўзгармагани, шу пайтнинг ўзида легирланмаган $p-Si$ даги барча радиацион нуқсонларнинг концентрациялари нурлантириш флюэнси ортиши билан 1 поғонага ошиши аниқланди (3-расм).

$p-Si <Zn>$ намуналарининг таъқиқланган соҳасига рекомбинацион компенсацияловчи радиациявий марказларни киритишнинг эффективлиги сезиларли камайишини асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақти τ_n ни ўлчаш натижалари ҳам тасдиқлайди (4-расм).



5-расм. $p-Si<Zn>$ (1,2) ва $p-Si$ (3) дан тайёрланган қуёш элементларининг I_{KT} (a) ва U_{KT} (b) қийматларининг ^{60}Co γ -квантлари флюэнсига боғлиқ ўзгариши. 1- $N_{Zn}=2,0\cdot 10^{14}cm^{-3}$; 2- $N_{Zn}=1,4\cdot 10^{14}cm^{-3}$

Рух киритмасидан фойдаланиб, радиация таъсирида кремнийли буюмларнинг параметрларини ва характеристикаларини барқарорлаштириш мақсадида $p-Si<Zn>$ дан кремнийли қуёш элементлари тайёрлаш технологияси бўйича p^+-p-p^+ - структуралар олинди. Қуёш элементларининг электрофизик ва фотоэлектрик характеристикаларининг радиацияга чидамлилиги кремнийдаги рухнинг концентрацияси билан аниқланиши топилди. $p-Si<Zn>$ даги рух миқдорининг ортиши токнинг қисқа туташув қийматининг I_{KT} ва кучланишнинг бўш ҳаракати U_{KT} (5-расм) деградация даражасининг камайишига ва инфрақизил соҳаларда қуёш элементларининг спектрал сезувчанлигининг ортишига ҳамда барқарорлашишига олиб келади.

Диссертациянинг «Палладий ва мис билан легирланган кремнийдаги нанокристаллитлар ва нуқсон комплекслар типи ва уларнинг радиациявий парчаланиши» деб номланган учинчи бобида кремний монокристаллининг таъқиқланган соҳасидаги миснинг мавжуд киритмалар

билан ҳосил қиладиган наноструктуралар ва уларнинг пайдо бўлиш эҳтимоллиги рентген дифрактометрияси тадқиқот натижалари орқали ўрганилган ҳамда киритма-нуқсон комплексларининг палладий билан легирланган кремнийдаги радиациявий-термик таъсирда кечадиган жараёнлари баён қилинган.

Кремний монокристаллидаги шаклланган киритма энергетик сатҳлари тузилиши ҳолатларини аниқлаштириш учун рентген дифракцияси усулида мис фрагментларининг таркибий ва фазавий ҳолатлари ўрганилган.

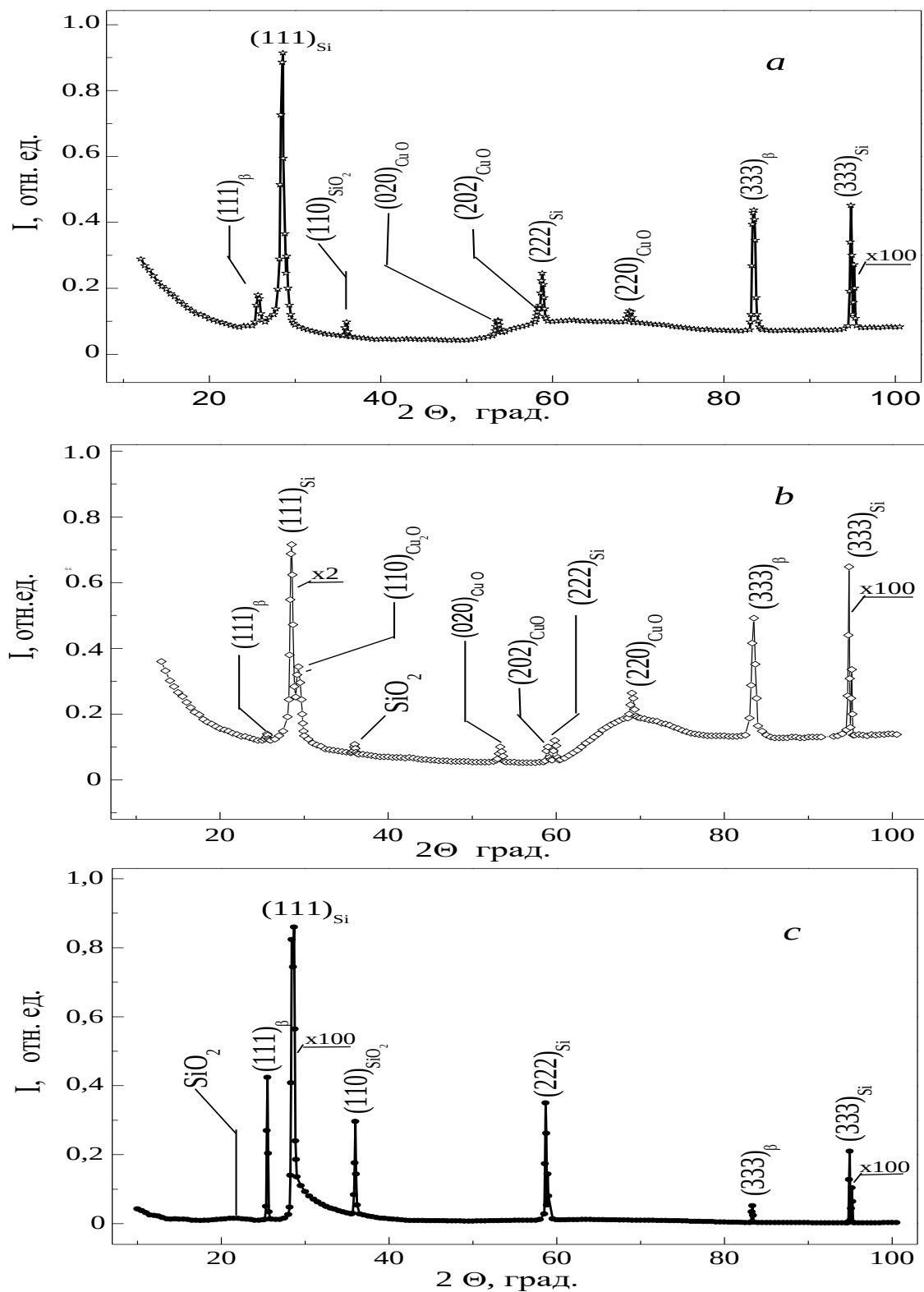
Миснинг намунавий легирловчи киритма сифатида танланиши, унинг бошқа тез диффузияланувчи киритмаларга нисбатан катта эрувчанлиги ва кремнийдаги нуқсон ҳолатлари ҳамда бошқариб бўлмайдиган киритмалар билан комплекслар пайдо қилишга мойиллиги билан тушунтирилган.

Тадқиқотлар легирланган ва легирланмаган ўстирилган ҳамда нейтрон-трансмутациявий, n - тип ўтказувчанликка эга бўлган Si монокристаллида ўтказилди. Дастлабки кремний монокристаллининг рентгенограммасини таҳлил қилиш шуни кўрсатдики, дифракцион тасвирда таъқиқланган $(222)_{Si}$ аксланиш, локал микро ўзгаришлар пайдо бўлишига боғлиқ бўлиши мумкин. Чунки улар кремний панжарасидаги кислороднинг нотекис тақсимлангани ва монокристалл панжарасининг нуқсонга мойил соҳаларида (НМС), яъни дислокацияларда, чегараларда ва уланиш жойларида жойлашганлигидадир.

Мис билан легирланган ўстирилган n - Si<Cu> ва нейтрон-трансмутацияланган n -Si<Cu> (6-расм) рентгенограммаларини солиштириш ва ўрганиш легирланган намуналарда SiO_2 - кристалл кварцнинг (110) киритма фазасини легирланмаган намуналарда шу рефлекс фаоллигига нисбатан 6 мартадан кўпроқ камайганлигини кўрсатди (6- с расм).

Бундан ташқари мис билан легирланган намуналарнинг рентгенограммаларида легирланмаган кремний монокристаллига хос бўлган кичик сочилиш бурчакларида ($2\theta \approx 21,6^\circ$) диффузиявий аксланиш кузатилмайди (6-*a* ва *b* расм). Бунга сабаб кристаллнинг юза қатламидан кислороднинг ташқарига чиқиб кетиши бўлиши мумкин, бунда юқори температурали диффузия жараёнида $SiO_2 + Si = 2SiO$ кимёвий реакцияси натижасида газсимон кўринишдаги кремний монооксиди SiO ҳосил бўлади.

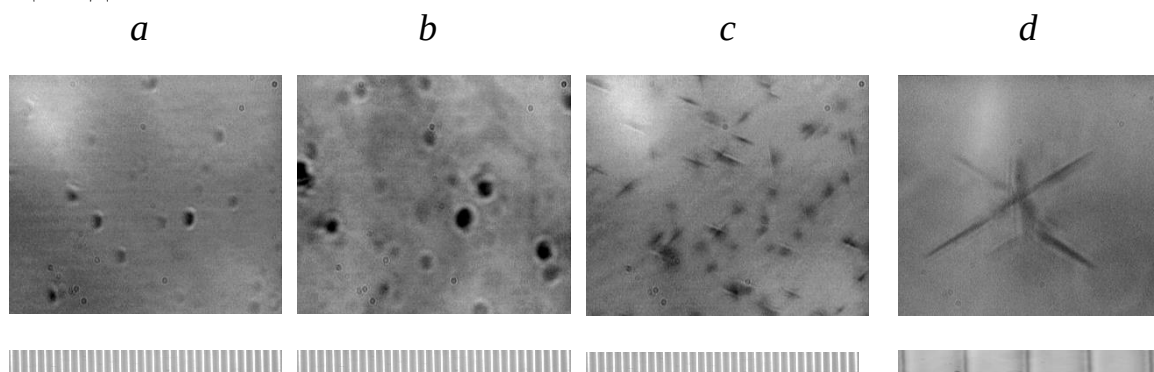
Si<Cu> бўйича олинган натижаларни ҳамда адабиётлардаги маълумотларни солиштириш ва таҳлил қилишдан маълум бўлдики, кремний монокристаллида мис уч хил кўринишда: кремний панжарасида тугунлараро атомлар кўринишида ҳамда Cu_2O ва CuO типигаги икки хил мис-кислородли нанокристаллитлар таркибида мавжуд бўлади. Бу нанокристаллитлар чуқур дискрет сатҳлар ҳосил қилиши топилди. Cu_2O типигаги нанокристаллитлар $17,5 \pm 1,5$ нм ўлчамдаги кубик симметрияга, CuO эса $14,5 \pm 1,5$ нм ўртача ўлчамдаги моноклин симметрияга эга эканлиги аниқланган.



6-расм. Ўстирилган $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ (а), мис билан легирланган ва нейтрон-трансмутацияланган $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ (б) ҳамда легирланмаган $n\text{-Si}$ (с) монокристалл кремнийнинг рентгенограммаси

Палладий билан легирланган кремнийга радиациявий-термик таъсир қилинганда киритмавий нуқсон комплексларининг ўзгариши ва шаклланиши жараёнларида легирланмаган намуналарда овал ва думалоқ шаклли, қатламли тақсимланган микронуқсонлар кузатилади, нуқсонлар ядроси

ўлчамлари ~ 10 мкм дан ошмайди (7-*a* расм). Палладий билан 1200 °C да легирланган намуналарда, кўрсатилган микронуксонлар ўлчамлари катталашади (15÷20 мкм) ва палладий атомларининг микронуксонларда тўпланиши киритма преципитатлари ҳосил бўлиши билан биргаликда кузатилади (7-*b* расм). Ушбу преципитатларнинг морфологияси, ўлчами ва зичлиги диффузия давомийлиги ва температурасига боғлиқ эканлиги аниқланди.



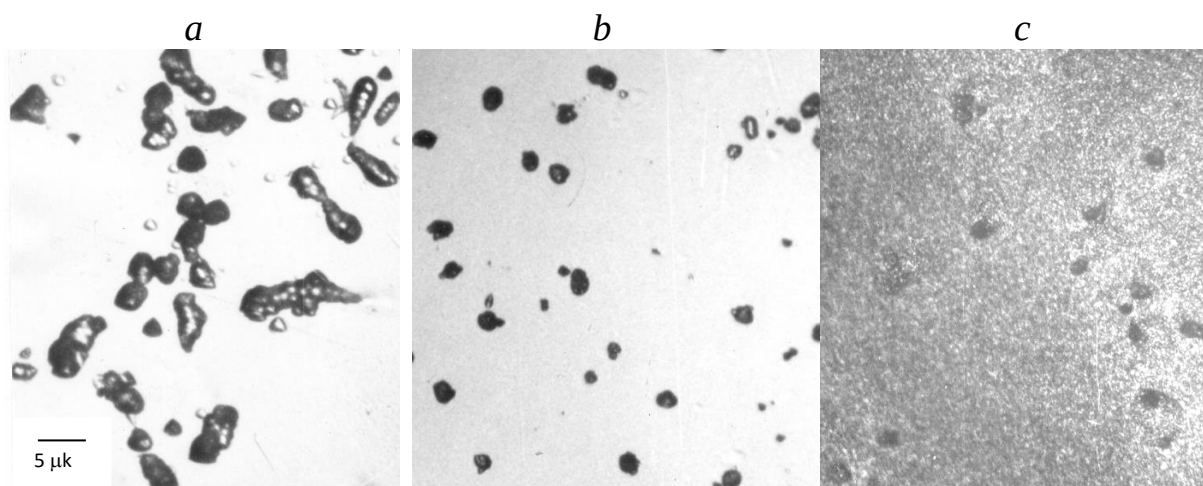
7- Расм. Кремний намуналарининг микрофотографияси: *a* – легирланмаган намуна; *b* - 1200°C температурада палладий билан легирланган намуна; *c, d* - 1250°C температурада палладий билан легирланган намуна

Палладий диффузияси температурасининг ва тоблаш давомийлигининг ошиши билан ушбу преципитатлари игнасимон кўринишдаги нуксонлар тўпламларига трансформацияланади. Уларнинг узунлиги 20÷25 мкм бўлиб, ҳажмли ва кўпқиррали устунчалар кўринишида бўлади (7-*c, d* расм).

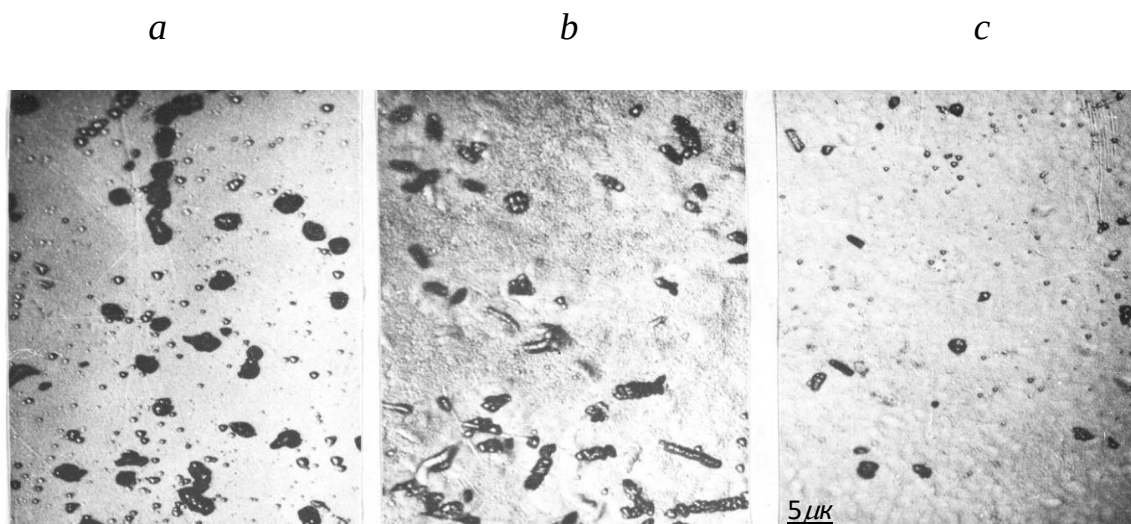
Легирланган кремний намуналарига 100÷600 °C температуралар оралиғида қўшимча термик ишлов берилганда, таркибий нуксонларнинг сезиларли ўзгариши кузатилади (8-расм). Термик ишлов температураси ортгани сари нуксонларнинг тўпланишлар зичлиги ва ўлчамлари 1 мкм гача сезиларли камайиши аниқланди. Бу эса палладий атомларининг кристалл ҳажмида электрофаоллик намоён қилмайдиган гомоатом тўпланишлари кўринишида концентрацияланиши билан тушунтирилади.

$\text{Si} \langle \text{Pd} \rangle$ га $10^{14} \div 10^{15}$ флюэнслар оралиғида нейтронлар билан радиациявий таъсир қилиш таркибий нуксонларнинг тури ва тарқалиши характери сезиларлича ўзгаришига олиб келади (9- расм).

Шунинг билан бир қаторда, нейтронлар флюэнсининг ортиши билан тўпланишларнинг зичлиги ва ўлчамлари камаяди, бу эса юзадаги палладий киритмаси атомларининг нурланиш жараёнида йўқолиши ва кристалл ҳажмидаги тўпланишларга ўтиши ҳамда янги нуксон ҳолатидаги етарлича бир жинсли бўлган Si-Pd қаттиқ эритма ҳосил бўлиши билан тушунтирилади. Улар қўшимча чуқур сатҳ яратади. Натижада ушбу преципитатларнинг қайта тақсимланиши кремний юзасидаги каби унинг ҳажми бўйича ҳам содир бўлади.



8-Расм. *a*- термоишловгача, 30 минут давомида 350⁰С (*b*) ва 530⁰С (*c*) температуралардаги термоишловдан сўнг палладий билан легирланган кремнийдаги структуравий нуқсонлар



9-Расм. *a*- нурланишгача ҳамда $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (*b*) ва $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (*c*) нейтрон флюэнсларида нурлантирилган палладий билан легирланган кремнийдаги структуравий нуқсонлар

Диссертациянинг тўртинчи боби «Радиациявий таъсирда легирланган кремнийдаги нуқсон ҳолатларининг рекомбинация жараёнлари» деб номланади. Ушбу бобда монокристаллардаги нуқсон ҳолатларини юзага келтириш кинетикасини уларнинг ҳажмида турли киритмалар мавжудлигини ҳисобга олиб тавсифловчи дифференциал тенгламалар системасини ечиш усули кўриб чиқилган. Квазистационар ечим олиш учун кичик параметр усули ривожлантирилган ва уни қўллаш соҳалари ўрганилган. Кристалларда термостимулланган нуқсонлар, вакансиялар ва уларнинг киритма атомлари билан рекомбинацияси жараёнларини ва механизмини белгиловчи турли феноменологик характеристикалар белгилаб олинган.

Кинетик тенгламалар системаси ушбу кўринишда тақдим этилган:

$$\begin{cases} \frac{dN_V}{dt} = -k_1 N_V N_I - k_2 N_V N_Y - \frac{N_V}{\tau_V} \\ \frac{dN_I}{dt} = -k_1 N_I N_V - k_3 N_Y N_I - k N_I N_0 - \frac{N_I}{\tau_V} \\ \frac{dN_Y}{dt} = -k_2 N_Y N_V - k_3 N_Y N_I - k_4 N_Y N_0 - \frac{N_Y}{\tau_Y} \end{cases} \quad (2),$$

бу ерда t – диффузиядан сўнгги совиш ва квазикимёвий реакциялар кечиши вақти; k_1, k_2, k_3, k_4 – тутилиш эҳтимоллиги (хусусан, $k_1 = 1/N_{V(\text{ёки } I)}\tau$, $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$); N_V, N_I, N_Y – мос равишда вакансиялар, хусусий тугунлараро ва киритма атомлари концентрациялари; N_0 – кислород атомлари концентрацияси; $1/\tau_V, N_V, N_I$ ва N_Y ни стокка кетиш эҳтимоллиги ва $[V-Y]$ комплексининг парчаланиши;

Ишончли модел комплекслар ҳосил бўлиш эҳтимолининг нурлантирилаётган материал параметрларига ва ташқи таъсир факторларининг шартларига боғлиқлигини назарда тутди. Шунингдек, вакансияларнинг тугунлараро атомлар билан тескари рекомбинация ҳодисаларини ҳисобга оладиган $V + I \rightarrow X$ ва $\gamma + X \rightleftharpoons V + I$ реакциясида кинетик энергиянинг йўқотилишини ва уларнинг нурлантирилган намунадаги миграцияларини назарда тутган модель ривожлантирилди. Бу ерда X – асосий материал атомлари. Вакансиялар пайдо бўлиши жараёни V , уларнинг киритма атомлари билан рекомбинацияси Y ва γ – радиация таъсирида A комплексларнинг ҳосил бўлиши қуйидаги реакциялар билан тушунтирилади:



Ядровий трансмутация билан биргаликда кечадиган радиациявий нурлантиришнинг катта флюэнсларида (3) ифода билан тавсифланаётган жараёнларни намунанинг асосий элементлари концентрацияларининг ўзгаришларини ҳисобга олиб модификациялаш керак. Вакансиялар ва киритма атомлари концентрацияларининг ўзгаришлари динамикасини ҳисобга олувчи модель таклиф этилди ва уни тажрибада текшириш имкони кўриб чиқилди.

ХУЛОСА

«Палладий, олтингугурт ва руҳ билан легирланган кремнийдаги киритма-нуқсон ҳолатларининг шаклланишида радиацион стимуллашган жараёнлар» мавзуси бўйича олиб борилган тадқиқотлар ва олинган натижалар асосида қуйидагича хулосалар қилинди:

1. Биринчи марта кремнийни биржинсли легирлашнинг олтингугурт киритмасини икки босқичли киритиш йўли билан амалга оширишнинг амалий таклифи киритилди. Бунда термодиффузияда ^{32}P фосфор изотопи юза қатламдан кремний пластиналари ҳажмига ўтади, сўнгга киритилган киритма нейтрон нурланишда ^{32}S барқарор изотопига ядровий трансмутацияланади.

Кристаллни легирлашнинг икки босқичли усулини қўллаш кремний юзасида бузилишларнинг бўлмаслигини таъминлаши ва материал ҳажмидаги олтингугурт концентрациясини бошқариш имконини бериши аниқланди.

2. $10^{18} \div 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ нейтрон флюэнслари оралиғида нурлантириш ва ундан кейин палладий билан легирланган кремний намуналарининг тобланиши ^{102}Pd ва ^{104}Pd изотопларининг ^{103}Pd изотопига ядровий айланиши, сўнгра электронни тутиш орқали кристалл ҳажмида барқарор бўлган ^{103}Rh изотопига ўтиши аниқланди. Бунда палладийнинг $E_c - 0,22 \text{ эВ}$ сатҳи билан бир қаторда нейтрон трансмутацияда ҳосил бўлган Rh киритмасига тааллуқли бўлган $E_c - 0,32$ ва $E_c - 0,53 \text{ эВ}$ сатҳлари шаклланади.

3. Палладий киритилган кремнийда аниқланган $E_c - 0,18$ ва $E_v + 0,34 \text{ эВ}$ акцептор сатҳлар $[\text{Pd}-\text{V}]$ комплексларининг бир каррали ва икки каррали манфий зарядланган ҳолати билан тушунтирилади. Аниқланган $E_v + 0,32 \text{ эВ}$ донор сатҳ эса унинг водород билан $[\text{Pd}-\text{H}]$ комплекси кўринишдаги кимёвий боғланиши маҳсули ҳисобланади.

4. Палладий киритмаси атомлари диффузияда кристаллнинг эластиклик энергиясини ўзгартиради ва кремнийнинг ҳажмида турли кўринишдаги преципитатлар, кластерлар ва микронуксонлар атрофида киритма булутлари кўринишидаги тўпламларини ҳосил қилади, улар эса нейтрон билан нурлантириш жараёнида таёқсимон нуксонлар кўринишига трансформацияланади.

5. p- типдаги Zn билан легирланган кремний намуналарида Zn киритмаси концентрацияси ортгани сари дивакансия кўринишидаги радиациявий нуксонларни киритиш самарадорлиги ва K- марказнинг камайиши аниқланди. Вакансия-бор типдаги радиациявий нуксон комплекслари киритилиш самарадорлиги эса легирланган намуналарда ҳам, назорат намуналарида ҳам бир-бирига яқин қийматларга эга бўлиши ва амалда ўзгармаслиги топилди.

6. $\text{Si} \langle \text{Zn} \rangle$ дан тайёрланган қуёш элементларининг фотоэлектрик характеристикаларининг деградация даражаси ва фотосезгирлиги кремнийдаги рух миқдори билан аниқланиши кўрсатилди. p-Si $\langle \text{Zn} \rangle$ даги киритма концентрациясининг ортиши қуёш элементларининг ИҚ соҳасида спектраль сезгирлигининг ошишига ва уларнинг фотоэлектрик характеристикаларининг радиациявий деградацияси самарадорлиги сезиларли камайишига олиб келади.

7. Мис билан легирланган кремний монокристаллида ҳосил бўлувчи мис-кислородли нанокристаллитлар 3 хил ҳолатда бўлиши: матрица панжарасининг тугунлараро ҳолатида ва ўлчамлари мос равишда $17 \pm 1,5$ ва $14 \pm 1,5 \text{ нм}$ бўлган Cu_2O ва CuO нанокристаллитлар таркибида ҳамда миснинг кислород билан ҳар бир наноҳолати тегишли бўлган дискрет чуқур сатҳлар ҳосил қилиши, уларнинг концентрациялари эса диффузия режими ва намуналарнинг термодиффузиядан кейинги совиши тезлигига боғлиқлиги аниқланди.

8. Таркибида палладий преципитатлари бўлган $\text{Si} \langle \text{Pd} \rangle$ намуналарга $10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-2}$ нейтрон флюэнслари оралиғида радиациявий таъсир

килинганда нурлантирилгандан сўнг ҳосил бўладиган қўшимча $E_c - 0,28$ ва $E_v + 0,17$ эВ акцептор сатҳлар ҳосил бўлиши кузатилди ҳамда улар электропассив ҳолатдаги палладий комплексларининг парчаланиши ва уларнинг компонентларини кристалл панжарадаги хусусий нуқсонлар билан ўзаро таъсирлашишига боғлиқлиги аниқланди.

9. Легирилган кремнийнинг рекомбинацион ва электрофизик параметрларининг радиациявий бузилишлари киритилган киритма типи билан аниқланади. n- Si да S типдаги донор киритмаси ва p- Si да Zn типдаги акцептор киритмаси кристаллнинг кўрсатилган параметрларини радиация таъсирига чидамлилигини оширади, амфотер типдаги Pd киритмаси эса n- ва p- типли кремнийнинг радиация таъсирига барқарорлигини ёмонлаштириши кўрсатиб берилди.

10. Монокристалларда нуқсон ҳолатлари ҳосил бўлишининг кристалл ҳажмида турли киритмалар борлигида юз берадиган квазикимёвий реакциялар бориши жараёнини ҳисобга олувчи дифференциал тенгламалар системасини ечиш усули таклиф этилди. Тенгламаларнинг квазистационар ечимларини ҳамда бу механизмлар ва жараёнларни белгилаб берувчи турли феноменологик характеристикаларда унинг кичик параметр усули ривожлантирилди.

11. Ярим ўтказгичларда структуравий нуқсонлар ҳолатлари шаклланишининг модели таклиф этилди. Бунда радиациявий-стимуллашган киритма атомларининг вакансиялар билан рекомбинацияланиши, вакансияларнинг тугунлараро атомлар билан ўзаро таъсирлашишида тескари кечувчи реакциялари ҳамда тугунлараро атомларнинг киритма атомлари билан қўшимча таъсирлашиши жараёнлари туфайли шаклланиши назарда тутилади. Киритмалар, вакансиялар ва вакансияларнинг киритмалар билан ўзаро таъсирлашишида ҳосил бўлган комплексларнинг концентрацияларини шу модель доирасида тажрибада текшириш имконини берадиган аналитик ифодаси олинди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ,
АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ, НАЦИОНАЛЬНОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ,
АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

САТТИЕВ АБДУЛАЗИЗ РАСУЛЖОНОВИЧ

**РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ФОРМИРОВАНИИ ПРИМЕСНО-ДЕФЕКТНЫХ СОСТОЯНИЙ
В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ПАЛЛАДИЕМ, СЕРОЙ И ЦИНКОМ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Ташкент–2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2018.4.PhD/FM295.

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан и Андижанском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:

Зайнабидинов Сиражидин,
доктор физико-математических наук, профессор,
академик

Официальные оппоненты:

Ашуров Мухсинджан Хурамович,
доктор физико-математических наук, профессор,
академик

Арипов Хайрулла Кабулович,
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

Ферганский государственный университет

Защита диссертации состоится «___» _____ 2019 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики, Астрономическом институте, Национальном университете Узбекистана. (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел.: (+99871) 289–31–18; факс: (+99871) 289–36–65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (зарегистрирована за №___). Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел. (+99871) 289–31–19).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2019 г.

(Реестр протокола рассылки № _____ от _____ 2019 г.).

М. Ю. Ташметов,
председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Э.М. Турсунов,
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н.

И. Нуритдинов,
председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В современном мире в области твердотельной электроники управление электрофизическими параметрами полупроводников с использованием процессов легирования их примесями, приводящими к формированию глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне, стало одним из перспективных способов управления свойств материалов. При этом для выбора оптимальной легирующей примеси в зависимости от типа (донорный, акцепторный или амфотерный), параметры и характеристики легированного кристалла претерпевают изменения, с приданием материалу таких важных свойств, как фоточувствительность, термочувствительность, тензочувствительность и радиационная стойкость. На практике, в основном, для получения легированного полупроводникового кристалла используют быстродиффундирующие примеси, создающие электронные уровни в запрещенной зоне кристалла. В кристаллической решетке кремния такие примеси, создающие глубокие дефектные центры обычно имеют ограниченную растворимость и низкую концентрацию электрически активных состояний, невысокую склонность к образованию комплексов с неконтролируемыми и технологическими примесями.

В последние годы в мировой практике для управления примесными дефектными состояниями в полупроводниковых кристаллах наряду с другими технологическими способами широко используются различные виды физических воздействий, одним из которых является проникающая радиация. Перестройка дефектных состояний в легированных полупроводниках при таких внешних воздействиях является сложным физико-химическим процессом, который сопровождается трансформацией, распадом или формированием новых неоднородностей в кристалле, зависящих от структурного совершенства исходного кристалла, степени легирования материала примесью, содержания технологических и газообразующих химических элементов в исходном кристалле и определяются однородностью распределения структурных и примесных дефектов в объеме. В связи с этим проведенный анализ результатов экспериментальных и теоретических работ многих исследователей мира в области модификации легированного кремния показывает, что почти отсутствуют сведения о кристаллической структуре образовавшихся дефектных состояний в легированном материале при радиационном распаде примесных комплексов. Не изучен механизм распада твердого раствора кремний–примесь при внешних воздействиях и взаимодействие их компонентов с собственными, неконтролируемыми примесными, точечными дефектами и другими неоднородностями кристалла. Все это требует поиска новых теоретических и практических подходов, чтобы на атомарном уровне выявить механизмы образования и перестройки структурных дефектных комплексов для целенаправленного управления свойствами легированных полупроводниковых материалов внешними воздействиями, что является

одним из актуальных и бурно развивающихся направлений радиационной физики твердого тела и радиационной технологии, т.е. так называемой «инженерии дефектов».

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан по пяти приоритетным направлениям на 2017–2021 годы ¹ отмечены «...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 механизмов образования и перестройки структурно-дефектных комплексов для целенаправленного управления свойств легированных полупроводниковых материалов воздействующими факторами, разработка на их основе полупроводниковых структур и электронных приборов, обладающих большими эксплуатационными ресурсами, являются важнейшими задачами современной физики и техники полупроводников.

Исследования, проводимые в рамках настоящей диссертационной работы в определенной степени служат решению задач по развитию фундаментальных и прикладных проблем современной твердотельной микроэлектроники и радиационной физики полупроводников, что соответствует обозначенным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы» и Постановлении № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности».

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование проведено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан – II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. Исследования в области легированных полупроводниковых материалов и приборах на их основе и изучения физических процессов, приводящих к формированию дефектных состояний в указанных материалах, проводились многими учеными, например, американскими (Милнс А., Corbett J.M., Sah C.T., Watkins G.D., Векман Н.Н.), российскими (Фистуль В.И., Лебедев А.А., Мильвидский М.Г.), узбекскими (Бахадырханов М.С., Абдурахманов К.П., Мамадалимов А.Т., Зайнабидинов С.) и др.

В результате этих исследований рассмотрены виды и состояния примесных атомов в полупроводниках, их диффузия, термодинамика и кинетика растворимости, характер образуемых ими глубоких центров, энергетических уровней, зарядовых состояний и комплексообразований.

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 07 февраля 2017 г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы».

Проанализированы теоретические и экспериментальные данные о миграции и взаимодействии некоторых легирующих примесей с неконтролируемыми химическими элементами в монокристаллах и полупроводниковых соединениях. Рассмотрены состояния изученности и поведения водородоподобных, газообразующих, амфотерных и изовалентных примесей.

Однако специалисты и разработчики мало внимания обращали на такие важные явления, как взаимодействие атомов примеси с собственными и радиационными дефектами кристалла, дислокациями и другими протяженными дефектами кристаллической решетки, а также процессы адсорбции. Отсутствуют сведения о структуре, размерах, стабильности и перестройке образованных структурных дефектов при внешних физических воздействиях, не обращено внимание на специфику поведения отдельных примесей, а также на механизмы формирования кластеров и низкоразмерных наноконпозиций в легированных кристаллах, в особенности с участием кислорода, углерода и водорода. Для модификации параметров и характеристик легированного полупроводникового кристалла и придания им новых функциональных свойств, в данной работе предлагается новый подход – использование радиационного воздействия в комбинации с термической обработкой с целью управления свойствами легированных полупроводников, на базе монокристаллического кремния.

Связь темы диссертационного исследования с результатами научно-исследовательских работ учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики ФА-Ф2-Ф066+Ф072 «Свойства и структуры полупроводниковых материалов, содержащих низкоразмерные наноконпозиции и наночастицы» (2007–2011) и Ф2-ФА-Ф121 «Формирование микронеоднородностей и их влияние на фундаментальные свойства ядерно-легированного кремния при гидрогенизации» (2012–2016 гг.) и ОТ-Ф2-20 «Низкоразмерные структурные превращения в легированном кремнии при радиационном воздействии и влияние их на свойства монокристалла» (2017–2020).

Целью исследования является изучение радиационно-стимулированных процессов перестройки примесно-дефектных состояний в кремнии в зависимости от типа легирующей примеси и выявление способов терморadiационной модификации их свойств.

Задачи исследования:

определить вид оптимальных примесей, создающих глубокие энергетические уровни донорного, акцепторного и амфотерного характера и разработать способ однородного легирования кремния примесями цинка, серы и палладия;

выявить структурные параметры и энергетические уровни сформированных дефектных состояний в кремнии, легированном Zn, S и Pd, и определить их влияние на электрофизические и рекомбинационные свойства кристалла;

установить механизмы структурных превращений, обусловленных радиационно-индуцированными процессами, в кремнии в зависимости от степени легирования материала и концентрации электрически активных структурных дефектных центров;

разработать теоретический подход для описания различных квазихимических реакций, протекающих в легированном кремнии с участием радиационных и примесных дефектов при воздействии проникающей радиации;

определить оптимальные условия структурных превращений в легированном кремнии при радиационном воздействии и выявить способ радиационной модификации свойств легированного материала.

Объектом исследования являются монокристаллический и нейтронно-трансмутационные образцы кремния, легированные примесями цинка, серы и палладия.

Предметом исследования являются терморadiационно-стимулированные процессы перестройки дефектных состояний в легированных монокристаллах Si<Pd>, Si<S> и Si<Zn>.

Методы исследования. Нестационарная емкостная спектроскопия глубоких уровней (DLTS), фотоемкостная спектроскопия (ФЕ), индуцированная фотоемкость (ИФ), стационарная фотопроводимость, рентгенофлуоресцентный и рентгенодифракционные методы, инфракрасная микроскопия и измерения времени восстановления обратного сопротивления p-n структур.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

впервые предложен и реализован двухстадийный способ получения легированного кремния примесями серы и родия, основанный на ядерной трансмутации введенных изотопов фосфора и палладия, и идентифицированы энергетические уровни сформированных глубоких центров серы, палладия и родия в ядерно-трансмутационно легированном кремнии;

выявлено, что примесь палладия в кремнии формирует низкоразмерные дефекты в виде вакансионного комплекса [Pd-V] и химического соединения с водородом в виде комплекса [Pd-H], с уровнями $E_c-0,18$ эВ, $E_v+0,34$ эВ и $E_v+0,32$ эВ, а примесь цинка в p-Si<Zn> приводит к возрастанию стабильности фотоэлектрических характеристик СЭ при воздействии радиации и повышению в ИК области их спектральной чувствительности;

впервые выявлено, что формирующиеся медь-кислородные нанокристаллиты в легированных монокристаллах кремния находятся в трех состояниях: в виде отдельных атомов в междоузельном положении в решетке матрицы и в составе нанокристаллитов Cu_2O и CuO , а каждое из них формирует дискретные глубокие уровни, количество которых определяется режимами диффузии и скоростью охлаждения образцов после диффузии;

получено квазистационарное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих кинетику образования дефектных состояний в монокристаллах, с учетом наличия в их объеме различных примесей и

предложена модель формирования структурно-дефектных состояний в полупроводниках, обусловленных радиационно-стимулированной рекомбинацией вакансий с атомами примеси.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан способ получения образцов твердого раствора на основе монокристаллического кремния, содержащего примеси Pd, Zn и S с заданной концентрацией, и определены оптимальные условия однородного легирования кремния указанными примесями;

предложен способ получения легированного серой и палладием кремния путем ядерной трансмутации, позволяющий исключить эрозию и стабилизировать поверхности пластин кремния, а также формирование термо-структурных дефектных состояний в объеме кристалла;

выявлено, что использование кремния, легированного цинком, для изготовления кремниевых солнечных элементов обеспечивает повышение стабильности их фотоэлектрических характеристик к радиационному воздействию и возрастанию спектральной чувствительности в ИК области.

Достоверность результатов исследования обуславливается применением комплекса высокоинформативных, независимых экспериментальных методов и проведением теоретических расчетов параметров дефектных состояний, сопоставлением полученных результатов с литературными данными и не противоречием результатов существующим общефизическим понятиям и закономерностям.

Научная и практическая значимость результатов исследования заключается в изучении радиационно-стимулированных процессов и выявлении закономерности протекания квазихимических реакций, установлении механизмов образования и трансформации сформированных дефектных комплексов в легированном кремнии при внешних физических воздействиях.

Практическое значение определяется разработкой физических основ получения новых или модификацией свойств легированного полупроводникового материала путем радиационной обработки.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию монокристаллического кремния, легированного примесями палладия, серы и цинка, и влиянию радиации на процессы трансформации примесно-дефектных центров:

установленная закономерность возрастания стабильности фотоэлектрических характеристик солнечных элементов с увеличением содержания цинка в кремнии была внедрена в АО «FOTON» при производстве диффузионных диодов на основе кремния n-типа проводимости, разработанная радиационно управляемая технология по формированию рекомбинационных центров в кремниевых p^+-n-p^+ структурах с использованием линейного электронного ускорителя «Электроника У-003» и обнаруженный эффект по зависимости концентрации вводимых радиационных дефектов от толщины сформированного p^+ слоя в диффузионных диодах использованы на

предприятии АО «FOTON» для повышения быстродействия импульсных диодов (Справка о внедрении «UZELTEXSANOAT» № 04-4 / 694 от 13.06.2019). Использование научных результатов в АО «FOTON» позволило создать управляемую технологию по формированию рекомбинационных центров в кремниевых p^+-n-p^+ структурах путем радиационной обработки;

полученное квазистационарное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих кинетику образования дефектных состояний в полупроводниковых монокристаллах при радиационном воздействии с учетом наличия в их объеме различных примесей, механизм процесса образования терморadiационно-стимулированных дефектов с участием вакансий и их рекомбинации с примесными атомами в кристаллах использован для разработки технологических режимов получения компенсированного кремния i -типа путем облучения на атомном реакторе ВВР-СМ, на базе полученного кристалла изготовлен кремниевый термодатчик для приборов дистанционного контроля температуры в рамках прикладного проекта № АЗ-ФА-Ф003 «Разработка устройства дистанционного контроля температуры и влажности в хранилищах на основе датчика из компенсированного кремния» (2015–2017 гг.) (Справка о внедрении Академии наук Республики Узбекистан № 2/1255-1712 от 14.06.2019). Полученные научные результаты позволило разработать и изготовить лабораторные образцы кремниевых датчиков для контроля температуры и влажности.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования докладывались и обсуждались на 6 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, из них 8 научных статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 4 в международных научных журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 126 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновываются актуальность и востребованность проведенных исследований, приведен анализ современного состояния исследований по теме диссертации, определены цели и задачи исследования, изложены новизна и практические результаты, раскрыта научная и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения по опубликованным работам, а также о структуре диссертации.

В первой главе «Свойства и параметры кремния, легированного примесями палладия, серы и цинка» приведены обзор и анализ литературных данных о свойствах и параметрах кремния, легированного

примесями палладия, серы и цинка, данные о параметрах использованных исходных образцов монокристаллического кремния, технологические режимы и способы получения однородно легированных образцов с примесями Pd, S, и Zn, параметры и характеристики ядерно-физических установок для радиационной обработки и методы исследования легированных образцов, а также результаты исследований электрических, спектрометрических и фотоемкостных свойств, определены энергии ионизации глубоких примесных уровней, их электрически активная концентрация, сечения захвата носителей тока и изучены изменения концентрации носителей тока от степени легирования кремния палладием, серой и цинком. Исследовано и экспериментально подтверждено, что сера в кремнии проявляет донорное, цинк акцепторное, а палладий амфотерное свойство. На основе анализа литературных данных и изучения параметров и свойств кремния, легированного Pd, S и Zn, сформулированы цель и задачи диссертации.

Во второй главе **«Исследование кремния, легированного серой, палладием и цинком, при радиационном воздействии»** приведены основные результаты по исследованию радиационно-стимулированных процессов в Si, легированном S, Pd и Zn. Рассмотрены возможности применения метода нейтронной трансмутации для получения легированных монокристаллов. Предложена технология двухстадийного легирования кремния серой, заключающаяся в термодиффузии изотопа ^{31}P из нанесенного слоя с последующим ядерным превращением изотопа фосфора в стабильный изотоп ^{32}S по реакции, протекающей при нейтронном облучении:



Показано, что диффузия из трансмутационно-легированного слоя, обогащенного изотопом ^{32}S , позволяет в широком диапазоне регулировать концентрацию вводимой примеси и получать более однородно легированный материал по всему объему. При изучении спектра DLTS кремниевых p^+-n-p^+ -структур, легированных примесью серы нейтронной трансмутацией, обнаружено пять пиков, которые связаны с формированием в запрещенной зоне кремния глубоких уровней серы с энергиями ионизации $E_c-0,12$ (A); $E_c-0,27$ (B); $E_c-0,37$ (C); $E_c-0,45$ (D) и $E_c-0,50$ (E) эВ донорного характера (рис. 1), что хорошо согласуется со спектром диодов из Si, легированного примесью серы термодиффузионным методом, а обнаруженный пик D, ответственный за уровень $E_c-0,45$ эВ, обусловлен термодефектом.

Возрастание концентрации уровней S с ростом флюенса нейтронов и идентичность значений энергии ионизации серы в нейтронно-легированном Si с образцами, легированными термодиффузионным методом, позволяет подтвердить реализуемость предложенного метода получения $\text{Si}\langle\text{S}\rangle$ методом нейтронной трансмутации. Выявлено следующее преимущество нейтронно-трансмутационного метода получения $\text{Si}\langle\text{S}\rangle$: управляемость концентрацией

серы нейтронным облучением, отсутствие эрозии поверхности образцов Si и высокая однородность легированного кристалла.

Изучена закономерность физических процессов, протекающих в Si, легированном Pd термодиффузионным методом.

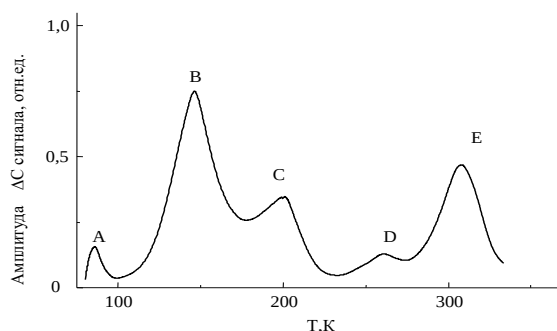


Рис. 1. Спектр DLTS образцов кремния, легированных серой нейтронно-трансмутационным способом

При нейтронной трансмутации впервые обнаружено, что облучение реакторными нейтронами образцов Si<Pd> приводит к ядерным превращениям изотопов ^{102}Pd и ^{104}Pd в ^{103}Pd в объеме кристалла с последующим электронным захватом в стабильный изотоп ^{103}Rh и формированию рекомбинационных центров. Показано, что после облучения флюенсами нейтронов в интервале $10^{18} \div 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ с последующим отжигом образцов Si<Pd>, наряду с образованным уровнем палладия $E_c - 0,22 \text{ эВ}$, формируются уровни $E_c - 0,32$ и $E_c - 0,53 \text{ эВ}$, принадлежащие примеси Rh, обусловленной нейтронной трансмутацией.

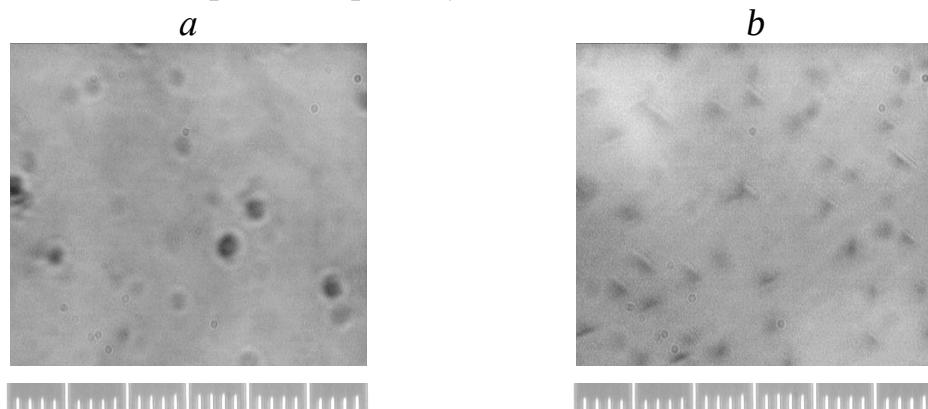


Рис. 2. Микрофотографии образцов кремния, легированного Pd до (а) и после облучения (b)

Результаты исследований микроструктуры образцов Si<Pd> показали, что атомы палладия при термической диффузии образуют в объеме кремния низкоразмерные скопления в виде преципитатов и кластеров, которые в процессе нейтронного облучения трансформируются в стержнеобразные дефекты (рис. 2).

Изучено влияние наиболее активного сопутствующего элемента атомов водорода на свойства легированного Si. На примере Si<Pd> показано, что

водород легко вступает в квазихимическую реакцию с примесью Pd и собственными дефектами кристаллической решетки кремния. Из анализа спектров DLTS образцов Si<Pd> до и после обработки в водородосодержащей среде показано, что обнаруженный донорный уровень $E_c - 0,32$ эВ связан с формированием примесной пары [Pd-H] и находится в слабо связанном состоянии в кристаллической решетке кремния и легко распадается при термическом воздействии.

Проведено исследование микроструктуры кремния, легированного цинком и изучено влияние указанной примеси на эффективность введения радиационных дефектов и деградации характеристик солнечных элементов.

В образцах p-Si<Zn> при измерении спектра DLTS до и после облучения γ -квантами ^{60}Co обнаружены акцепторные уровни цинка $E_v + 0,31$ и $E_c - 0,55$ эВ и известные центры РД с уровнем $E_v + 0,23$ эВ (дивакансия) и $E_v + 0,31$ эВ, принадлежащий К-центру (комплекс V–O–C), а также уровень $E_v + (0,38 \div 0,45)$ эВ, приписываемый к комплексу вакансия–бор. Выявлено, что концентрации уровней цинка p-Si<Zn> с дозой гамма-облучения не претерпевают существенных изменений, в то время как концентрации всех уровней РД в нелегированном p-Si с повышением флюенса облучения возрастают на порядок (рис. 3).

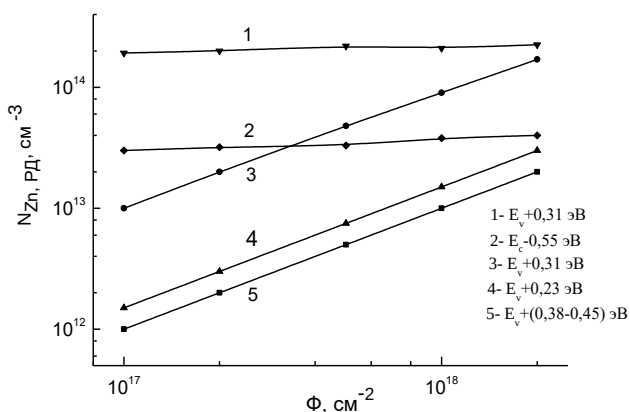


Рис. 3. Зависимость изменения концентрации уровней Zn в p-Si<Zn> (1,2) и РД (3-5) в p-Si от флюенса γ -квантов

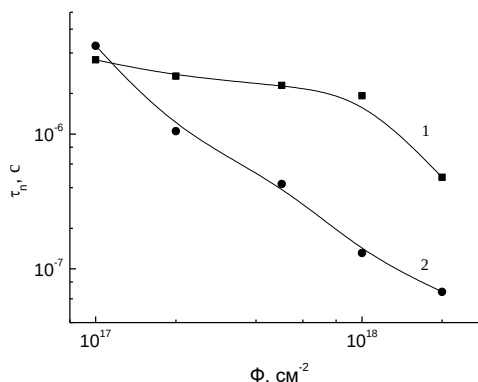
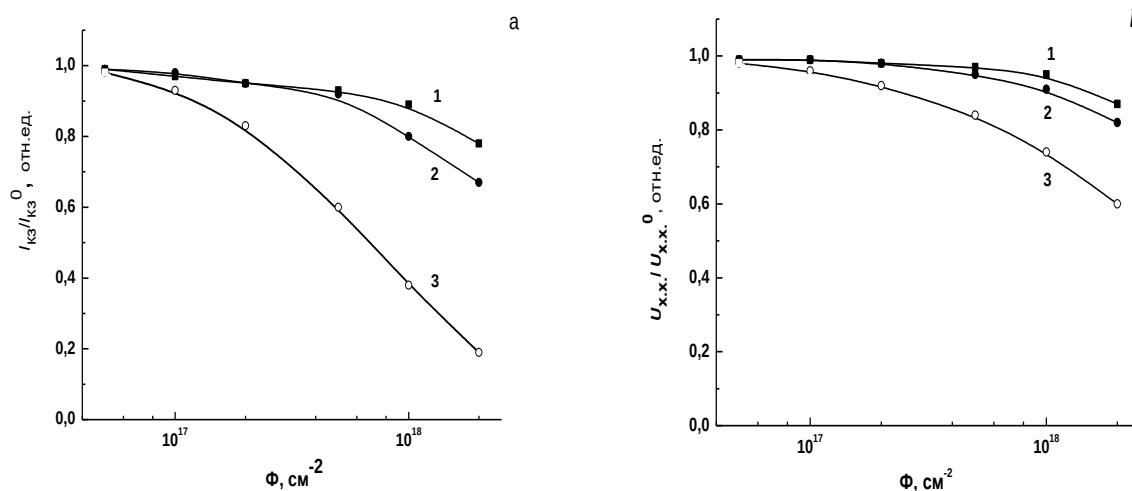


Рис. 4. Зависимости изменения времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии p-типа от флюенса γ -квантов ^{60}Co : 1 – p-Si<Zn> ($N_{\text{Zn}} = 2,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$); 2 – p-Si

Существенное уменьшение эффективности введения рекомбинационных компенсирующих радиационных центров в запрещенную зону образцов из p-Si<Zn> подтверждают и результаты измерения времени жизни неосновных носителей заряда τ_n (рис. 4).

Для выяснения возможности использования примеси цинка для стабилизации характеристик и параметров кремниевых изделий к воздействию проникающей радиации были получены $p^+ - p - p^+$ -структуры по технологии изготовления кремниевых солнечных элементов (СЭ) из p-

Si<Zn>. Обнаружено, что радиационная стойкость электрофизических и фотоэлектрических характеристик СЭ определяется концентрацией цинка в кремнии. Увеличение содержания цинка в p-Si<Zn> приводит к уменьшению степени деградации значений тока короткого замыкания $I_{кз}$ и напряжения холостого хода $U_{хх}$ (рис. 5), а также к повышению и стабилизации спектральной чувствительности СЭ в инфракрасной области.



**Рис. 5. Изменение значений $I_{кз}$ (a) и $U_{хх}$ (b) солнечных элементов, изготовленных из p-Si<Zn> (1,2) и p-Si (3) от флюенса γ -квантов ^{60}Co :
1 – $N_{\text{Zn}} = 2,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 2 – $N_{\text{Zn}} = 1,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$**

В третьей главе «Нанокристаллиты и типы дефектных комплексов в кремнии, легированном палладием и медью, и их радиационный распад» излагаются результаты исследования по рентгеновской дифрактометрии об образовании наноструктурных фрагментов меди с фоновыми примесями и их видов, и возможности формирования ими энергетических уровней в запрещенной зоне монокристаллов кремния, а также исследования процессов формирования и перестройки примесно-дефектных комплексов при радиационно-термических воздействиях в кремнии, легированном палладием.

Для выяснения состояния структурных характеристик сформированных примесных энергетических уровней в монокристалле кремния были исследованы фазовые и структурные фрагменты меди в легированных образцах методом рентгеновской дифракции.

Выбор меди в качестве опытной легирующей примеси обусловлен тем, что она имеет большую растворимость в кремнии по сравнению с другими быстродиффундирующими примесями и склонность к комплексообразованию с неконтролируемыми примесями и дефектными состояниями кремния.

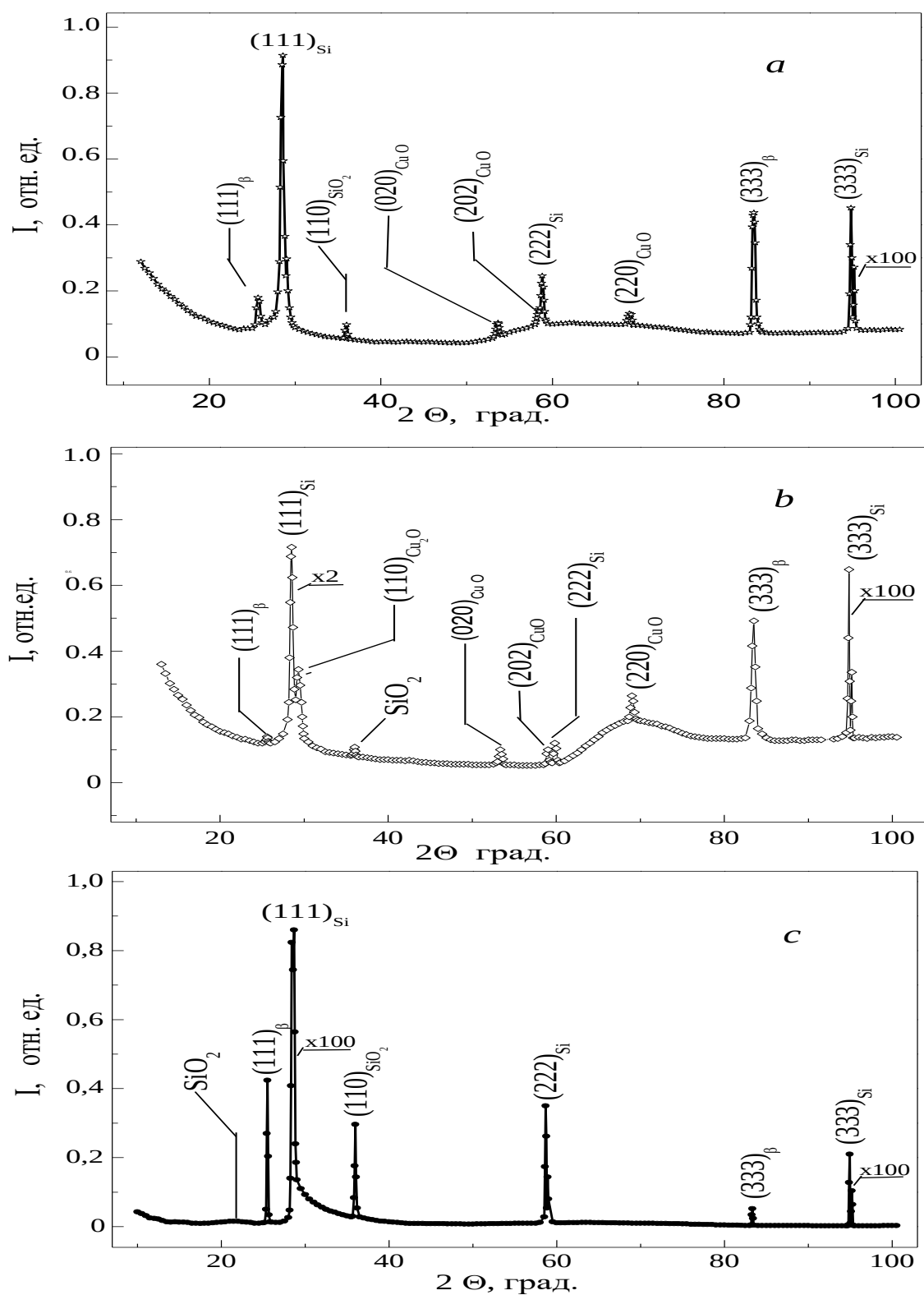


Рис. 6. Рентгенограммы легированного медью ростового n-Si<Cu> (a), нейтронотрасмутационного n-Si<Cu> (b) и нелегированного n-Si (c) монокристаллического кремния

Исследования проводились на легированном и нелегированном ростовом и нейтроно-трансмутационном монокристаллическом кремнии n-типа проводимости.

Анализ рентгенограммы исходных монокристаллов Si показывает, что присутствие запрещенного отражения $(222)_{\text{Si}}$ в дифракционной картине, возможно, связано с возникновением локального микроискажения, обусловленного неоднородным распределением кислорода в решетке кремния и размещением его в дефектоспособных областях (ДСО) решетки монокристалла, то есть на дислокациях, границах и на стыках раздела.

Изучение и сравнение рентгенограммы легированного медью ростового $\text{n-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ и нейтроно-трансмутационного $\text{n-Si}\langle\text{Cu}\rangle\text{NDS}$ (рис. 6) показало, что в легированных образцах наблюдается уменьшение интенсивности рефлекса (110) примесной фазы кристаллического кварца – SiO_2 более чем в шесть раз по сравнению с интенсивностью этого рефлекса в нелегированных образцах (рис. 6 с).

Кроме того, на рентгенограммах легированных медью образцов не наблюдается диффузное отражение в малых углах рассеяния ($2\Theta \approx 21,6^\circ$) (рис. 6, *a* и *b*), характерное для нелегированных монокристаллов кремния. Причиной этого может быть удаление кислорода из поверхностного слоя кристалла наружу в виде газообразного монооксида кремния SiO в результате химической реакции $\text{SiO}_2 + \text{Si} = 2\text{SiO}$ в процессе высокотемпературной диффузии.

Из анализа и сопоставления полученных результатов с литературными данными по $\text{Si}\langle\text{Cu}\rangle$ выявлено, что медь в монокристалле кремния присутствует в трех формах: в виде междоузельных атомов в решетке кремния и в составе двух медь-кислородных нанокристаллитов типа Cu_2O и CuO , которые образуют дискретные глубокие центры. Установлено, что нанокристаллиты типа Cu_2O имеют кубическую симметрию с размерами $17,5 \pm 1,5$ нм, а CuO моноклинную симметрию со средним размером $14 \pm 1,5$ нм.

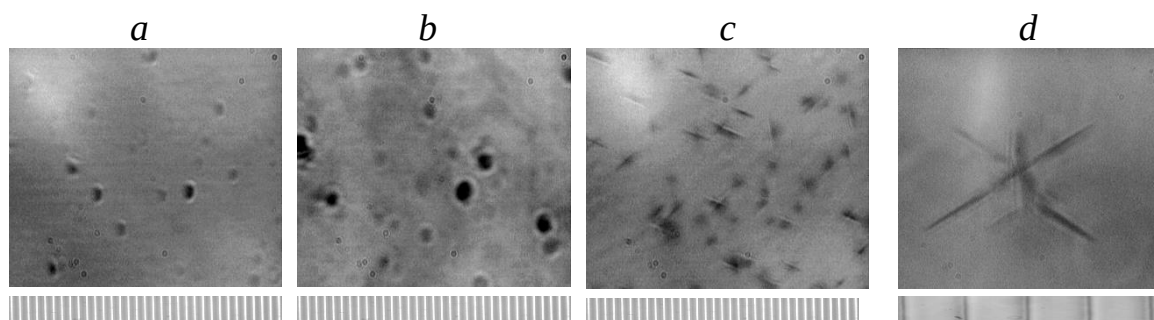


Рис. 7. Микрофотографии образцов кремния: а – нелегированный образец; б – образец, легированный палладием после диффузии при температуре 1200°C ; в, д – образец, легированный палладием после диффузии при температуре 1250°C

Из исследования процессов формирования и перестройки примесно-дефектных комплексов при радиационно-термических воздействиях в кремнии, легированном палладием, показано, что в нелегированных образцах

наблюдаются микродефекты, имеющие овальную и кругловатую форму со слоистым распределением, размеры ядра дефектов не превышают ~ 10 мкм (рис. 7,а).

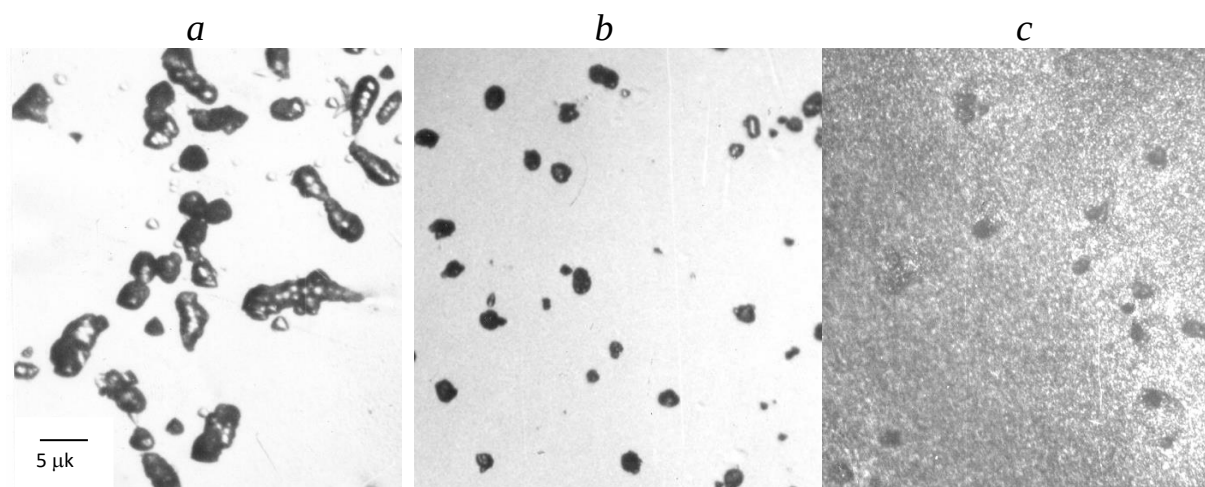


Рис 8. Структурные дефекты в кремнии, легированном палладием до (a) и после термообработки в течение 30 минут при температуре 350°C(b) и 530°C(c)

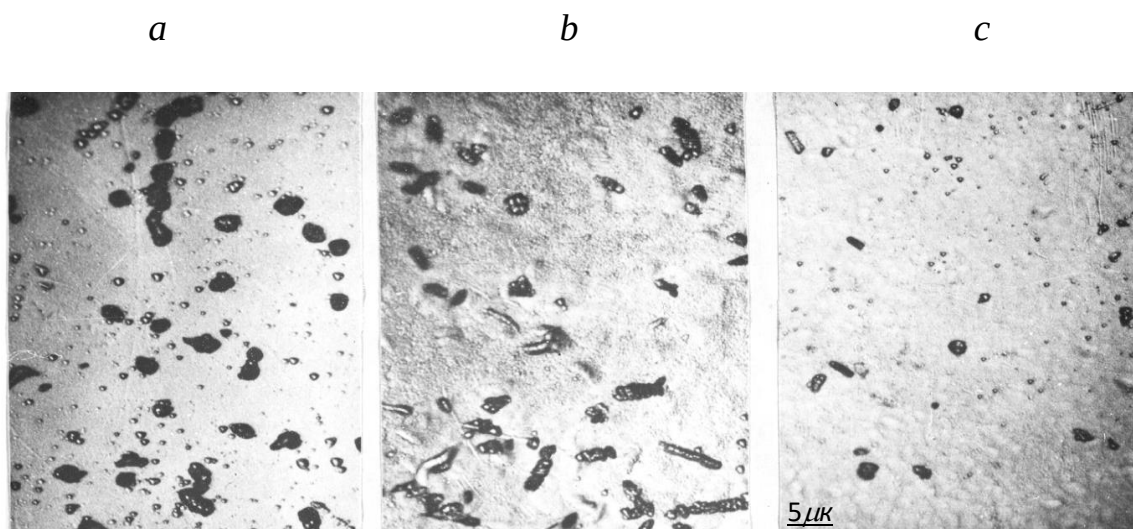


Рис 9. Структурные дефекты в кремнии, легированном палладием до (a) и после облучения флюенсами нейтронов $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (b) и $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (c)

В образцах, легированных палладием при 1200°C, размеры указанных микродефектов увеличиваются ($15 \div 20$ мкм) и наблюдается скопление атомов палладия на микродефектах с образованием примесных преципитатов (рис. 7, b). Выявлено, что морфология, размер и плотность этих преципитатов зависят от температуры и длительности диффузии. С повышением температуры диффузии палладия и длительности отжига эти преципитаты трансформируются в скопления дефектов иглообразной формы длиной $20 \div 25$ мкм в виде объемных многогранников типа колонны (рис. 7, c и d).

Дополнительная термообработка легированных образцов кремния в интервале температур 100÷600⁰С приводит к существенному изменению характера этих структурных дефектов (рис. 8). Установлено, что по мере повышения температуры термообработки плотность и размеры скоплений существенно уменьшаются до 1 мкм, что объясняется концентрированием атомов палладия на выделениях в виде гомоатомных скоплений в объеме кристалла, которые не проявляют электроактивности.

Радиационное воздействие нейтронами на Si<Pd> в интервале флюенсов 10¹⁴÷10¹⁵ см⁻² приводит к существенному изменению вида и характера распределения структурных дефектов (рис. 9).

При этом с повышением флюенса нейтронов плотность и размеры скоплений уменьшаются, что обусловлено удалением примесных атомов палладия в процессе облучения с поверхности, находящихся в скоплениях, с последующим переходом в объем кристалла и образованием более однородного твердого раствора Si-Pd с новым дефектным состоянием, создающим дополнительные глубокие уровни. В результате происходит перераспределение этих преципитатов как на поверхности кремния, так и в объеме.

В четвертой главе «Процессы рекомбинации дефектных состояний в легированном кремнии при радиационном воздействии» рассматривается метод решения системы дифференциальных уравнений, описывающих кинетику образования дефектных состояний в монокристаллах, с учетом наличия в их объеме различных примесей. Развита метод малого параметра для получения квазистационарного решения и исследования области его применимости при различных феноменологических характеристиках, определяющих механизм и процессы образования термостимулированных дефектов, вакансий и их рекомбинации с примесными атомами в кристаллах. Система кинетических уравнений представлена в виде

$$\begin{cases} \frac{dN_V}{dt} = -k_1 N_V N_I - k_2 N_V N_Y - \frac{N_V}{\tau_V} \\ \frac{dN_I}{dt} = -k_1 N_I N_V - k_3 N_Y N_I - k N_I N_0 - \frac{N_I}{\tau_V} \\ \frac{dN_Y}{dt} = -k_2 N_Y N_V - k_3 N_Y N_I - k_4 N_Y N_0 - \frac{N_Y}{\tau_Y} \end{cases}, \quad (2)$$

где t – время последиффузионного охлаждения и протекания квазихимических реакций, k_1, k_2, k_3, k_4 – вероятности захвата (в частности, $k_1 = 1/N_{V(или I)}\tau$, см⁻³с⁻¹), $1/\tau$ – вероятность ухода N_V, N_I и N_Y на стоки и распад комплекса $[V-Y]$, N_V, N_I, N_Y – концентрации соответственно вакансий, собственных междоузельных и примесных атомов, N_0 – концентрация атомов кислорода.

Более реальная модель должна учитывать зависимость значений вероятностей образования комплексов от физических параметров облучаемых материалов и условий воздействующего внешнего фактора.

Также развита модель с учетом явлений обратной рекомбинации вакансий с междоузельным атомом: $V + I \rightarrow X$ и учетом потери кинетической энергии фрагментов прямой реакции $\gamma + X \xrightarrow{z} V + I$ и их миграции в облучаемом образце, где X – атомы основного материала. Процесс образования вакансий V и их рекомбинация с атомами примеси Y с образованием комплексов A под действием γ -радиации, описывается реакциями



Очевидно, что при больших флюенсах радиационного облучения, сопровождающегося ядерной трансмутацией, процессы, описываемые выражением (3), должны быть модифицированы с учетом изменения концентрации основных элементов образца. Предложена модель с учетом динамики изменения концентрации вакансии и атомов примеси и рассмотрена возможность ее экспериментальной проверки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований и полученных результатов по диссертации на тему «Радиационно-стимулированные процессы формирования примесно-дефектных состояний в кремнии, легированном палладием, серой и цинком» сделаны следующие выводы.

1. Впервые предложена и практически реализована методика получения однородно легированного кремния путем двухстадийного введения примеси серы, заключающаяся в термодиффузии изотопа фосфора ^{32}P из нанесенного слоя в объем кремниевых пластин с последующей ядерной трансмутацией введенной примеси в стабильный изотоп ^{32}S нейтронным облучением. Установлено, что применение двухстадийного метода для легирования кристалла исключает эрозии поверхности кремния и дает возможность управлять концентрацией серы в объеме материала.
2. Показано, что облучение флюенсами нейтронов в интервале $10^{18} \div 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ с последующим отжигом образцов кремния, легированного палладием, приводит к ядерным превращениям изотопов ^{102}Pd и ^{104}Pd в ^{103}Pd в объеме кристалла с последующим электронным захватом в стабильный изотоп ^{103}Rh . При этом наряду с уровнем палладия $E_c - 0,22 \text{ эВ}$ формируются уровни $E_c - 0,32$ и $E_c - 0,53 \text{ эВ}$, принадлежащие образовавшейся примеси Rh при нейтронной трансмутации.
3. Установлено, что акцепторные уровни $E_c - 0,18$ и $E_v + 0,34 \text{ эВ}$, обнаруженные в кремнии при введении палладия, обусловлены однократно и двукратно отрицательно заряженными состояниями комплексов $[\text{Pd}-V]$, а обнаруженный донорный уровень $E_v + 0,32 \text{ эВ}$ является продуктом его химического соединения с водородом в виде комплекса $[\text{Pd}-\text{H}]$.

4. Показано, что примесные атомы палладия при диффузии изменяют упругую энергию кристалла, образуя в объеме кремния скопления в виде различных преципитатов, кластеров и примесных облаков вокруг микродефектов, которые в процессе облучения нейтронами трансформируются в стержнеобразные дефекты.
5. Выявлено, что эффективность введения радиационных дефектов типа дивакансия и К-центр в кремниевых образцах р-типа, легированных цинком, с повышением концентрации примеси уменьшается, а эффективность введения радиационного дефектного комплекса типа вакансия–бор практически не изменяется и имеет близкие значения как в легированных, так и в контрольных образцах.
6. Показано, что фоточувствительность и степень деградации фотоэлектрических характеристик солнечных элементов, изготовленных из Si<Zn>, определяются содержанием цинка в кремнии. Увеличение концентрации примеси в р-Si<Zn> приводит к возрастанию в ИК области спектральной чувствительности СЭ и существенному уменьшению эффективности радиационной деградации их фотоэлектрических характеристик.
7. Выявлено, что формирующиеся медь-кислородные нанокристаллиты в легированных медью монокристаллах кремния находятся в трех состояниях: в междоузельном положении в решетке матрицы и в составе нанокристаллитов Cu_2O и CuO со средними размерами соответственно $17 \pm 1,5$ и $14 \pm 1,5$ нм, а каждое наносостояние меди с кислородом формирует соответствующие дискретные глубокие уровни, концентрация которых определяется режимами диффузии и скоростью после термодиффузионного охлаждения образцов.
8. Установлено, что при радиационном воздействии в образцах Si<Pd>, содержащих преципитаты палладия, после облучения нейтронами флюенсами в пределах $10^{13} \div 10^{14}$ см⁻² в объеме легированного кремния образуются дополнительные акцепторные уровни $E_c - 0,28$ и $E_v + 0,17$ эВ, обусловленные распадом комплексов палладия, находящихся в электрически пассивном состоянии, и взаимодействием их компонент с собственными дефектами кристаллической решетки.
9. Установлено, что радиационная деградация электрофизических и рекомбинационных параметров легированного кремния определяется типом введенной примеси, донорные примеси типа S в n- Si и акцепторные примеси типа Zn в р- Si приводят к повышению устойчивости указанных параметров кристалла, а амфотерные примеси типа Pd к ухудшению стабильности как n-, так и р-Si к воздействию радиации.
10. Предложено решения системы дифференциальных уравнений, описывающих кинетику образования дефектных состояний в монокристаллах с учетом процесса протекания квазихимических реакций при наличии в объеме кристалла различных примесей. Развита метод малого параметра для получения квазистационарного решения

уравнений и области его устойчивости при различных феноменологических характеристиках, определяющих эти механизмы и процессы.

11. Предложена модель формирования структурных дефектных состояний в полупроводниках, обусловленных радиационно–стимулированной рекомбинацией вакансий с атомами примеси, учитывающая протекание обратных реакций взаимодействия вакансий с междоузельными атомами и с дополнительным взаимодействием междоузельных атомов с атомами примеси. Получено аналитическое выражение для определения концентраций примеси, вакансий и комплексов, образованных при взаимодействии вакансий с примесью, в рамках этой модели, допускающей экспериментальную проверку.

**SCIENTIFIC COUNCIL № DSC.27.06.2017.FM/T.33.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS,
ASTRONOMICAL INSTITUTE, NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

**INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS
ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

SATTIEV ABDULAZIZ RASULJONOVICH

**RADIATION-STIMULATED PROCESSES IN FORMATION OF
IMPURITY-DEFECT STATES IN SILICON, DOPED BY PALLADIUM,
SULFUR AND ZINC**

01.04.07 – Condensed matter physics

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

Tashkent – 2019

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under B2018.4.PhD/FM295.

The doctor of philosophy dissertation has been carried out at the Institute of Nuclear Physics of Uzbekistan Academy of Sciences and Andijan State University.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian and English) is posted on the web page at the address of www.inp.uz and Information-educational portal “Ziyonet” (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor:

Zaynabiddinov Sirajidin

doctor of sciences in physics and mathematics, professor
academician

Official opponents:

Ashurov Mukhsindjan Khuramovich

doctor of sciences in physics and mathematics, professor,
academician

Aripov Khayrulla Kabulovich

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Leading organization:

Ferghana State University

Defense will take place on the «____» _____ 2019, at ____ at the meeting of Scientific council DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 at Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute, National University of Uzbekistan. (Address: 100214, Tashkent, Ulughbek, Institute of Nuclear Physics. Phone: (+99871) 289-31-18; Fax: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The dissertation is registered at Information-resource center of Institute of Nuclear Physics (registration No____). Address: 100214, Tashkent, Ulughbek, Institute of Nuclear Physics, Phone (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “____” _____ 2019.
(Registry record No. ____ dated “____” _____ 2019.)

M. Y. Tashmetov

Chairman of scientific council on award of scientific
degree of doctor of sciences D.Ph.M.S., professor

E.M. Tursunov

Scientific secretary of scientific council on award
of scientific degree of doctor of sciences D.Ph.M.S.

I. Nuritdinov

Chairman of scientific seminar under scientific
council on award of scientific degree
of doctor of sciences, D.Ph.M.S., professor

INTRODUCTION (Annotation of doctor of philosophy dissertation)

Topicality and demand of the theme of dissertation. In the modern world in the field of solid-state electronics, the management of the electrophysical parameters of semiconductors using doping processes with impurities leading to the formation of deep energy levels in the forbidden zone became one of the promising ways to control the properties of materials. At the same time, in order to select the optimal dopant depending on the type (donor, acceptor or amphoteric), the parameters and characteristics of the doped crystal undergo changes, giving the material such important properties as photo, heat and tension sensitivities, and radiation resistance. In practice, mainly fast-diffusing impurities are used, to obtain a doped semiconductor crystal, which create electronic levels in the forbidden zone of the crystal. In the crystal lattice of silicon, such impurities, which create deep defect centers, usually have limited solubility and low concentration of electrically active states, a low tendency to form complexes with uncontrolled and technological impurities.

In recent years various types of physical effects are widely used in worldwide practice for controlling impurity defective states, one of which is penetrating radiation. The restructuring of defective states in doped semiconductors under such external influences is a complex physico-chemical process, which is accompanied by transformation, decay or the formation of new inhomogeneities in the crystal, depending on the structural perfection of the original crystal, the degree of doping of the material with the impurity, the content of technological and gas-forming chemical elements in the original crystal and determined by the homogeneity of the distribution of structural and impurity defects in the volume. In this regard, the analysis of the results of experimental and theoretical work of many researchers in the world in the field of modification of doped silicon shows that there is almost no information on the crystal structure of the formed defective states in the doped material during the radiative decomposition of impurity complexes. The mechanism of decomposition of a silicon-impurity solid solution under external influences and the interaction of their components with their own, uncontrolled impurity, point defects and other inhomogeneities of the crystal have not been studied. All these require a search for new theoretical and experimental approaches, at the atomic level to reveal the mechanisms of formation and restructuring of structural defective complexes for the purposeful control of the properties of doped semiconductor materials by external influences, which is one of the current and rapidly developing areas of radiation technology, i.e. the so-called “defect engineering”.

In accordance with the Action Strategy for the Further Development of the Republic of Uzbekistan in five priority directions for 2017-2021¹ the tasks have been pointed out “... mastering the production of fundamentally new types of products and technologies, ensuring on this basis the competitiveness of domestic

¹Decree of the President of the Republic of Uzbekistan “On the Strategy for the Further Development of the Republic of Uzbekistan” No. 4947 of 07 February 2017.

goods at external and internal markets”. In this aspect, to explore new mechanisms for the formation and restructuring of structurally defective complexes for the purposeful control of the properties of doped semiconductor materials by influencing factors, the development on their basis of semiconductor structures and electronic devices with greater operational resources are the most important tasks of modern physics and semiconductor technology.

Research carried out within the framework of this dissertation in some sense serves to solve the problems of developing fundamental and applied problems of modern solid-state microelectronics and radiation physics of semiconductors, which corresponds to the Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-4947 “On the Action Strategy for the Further Development of the Republic of Uzbekistan” for 2017–2021” dated February 7, 2017, and Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-2789 “On Measures for Further Improvement of Activities of the Academy of Sciences, organization, management and financing of research activities ” dated February 17, 2017.

Conformity of the research to the main priorities of science and technology development of the republic. The dissertation research has been carried out in accordance with the priority areas of science and technology in the Republic of Uzbekistan: II. “Power, energy and resource saving”.

Degree of study of the problem. Research in the field of doped semiconductor materials and devices based on them and the study of physical processes leading to the formation of defective states in these materials conducted by many scientists, for example, USA (Milns A., Corbett J.M., Sah C.T., Watkins G. D., Bekman H.H.), Russian (Fistul V.I., Lebedev A.A., Milvidsky M.G.), Uzbek (Bakhadyrkhanov M.S., Abdurakhmanov K.P., Mamadalimov A.T., Zainabidinov S.) and others.

As a result of these studies, the types and states of impurity atoms in semiconductors, their diffusion, thermodynamics and solubility kinetics, the nature of the deep centers formed by them, energy levels, charge states and complex formations have been considered. The theoretical and experimental data on the migration and interaction of some dopants with uncontrolled chemical elements in single crystals and semiconductor compounds have been analyzed. The states of study and the behavior of hydrogen-like, gas-forming, amphoteric and isovalent impurities have been considered.

However, specialists and developers paid less attention to such important phenomena as the interaction of impurity atoms with intrinsic and radiation crystal defects, dislocations and other extended crystal lattice defects, as well as adsorption processes. There is no information on the structure, size, stability and restructuring of the formed structural defects under external physical influences, no attention is paid to the specific behavior of individual impurities, and also to the mechanisms of cluster formation and low-size nanocompositions in doped crystals, especially with the participation of oxygen, carbon and hydrogen. To modify the parameters and characteristics of a doped semiconductor crystal and impart new functional properties to them, this work proposes a new approach — the use of

radiation exposure in combination with heat treatment to control the properties of doped semiconductors based on monocrystalline silicon.

Connection of the topic of dissertation with the scientific works of scientific research organizations, where the dissertation was carried out.

The dissertational work was carried out within the framework of research projects of the Institute of Nuclear Physics FA-F2-F066+F072 "Properties and structures of semiconductor materials containing low-size nanocompositions and nanoparticles" (2007-2011) and F2-FA-F121 "Formation of micro-inhomogeneities and their effect on fundamental properties of nuclear-doped silicon during hydrogenation "(2012-2016) and OT-F2-20" Low-size structural transformations in doped silicon under radiation exposure and their influence on the properties of a single crystal "(2017-2020).

The aim of the reserach is to study radiation-stimulated processes of restructuring of impurity-defect states in silicon, depending on the type of dopant and to identify methods of thermoradiation modification of their properties.

The tasks of the research:

to determine the type of optimal impurities that create deep energy levels of donor, acceptor and amphoteric character and to develop a method for uniform doping of silicon with admixtures of zinc, sulfur and palladium;

to identify the structural parameters and energy levels of the formed defect states in silicon doped with Zn, S, and Pd, and to determine their influence on the electrophysical and recombination properties of the crystal;

to establish the mechanisms of structural transformations caused by radiation-induced processes in silicon, depending on the degree of doping of the material and the density of electrically active structural defect centers;

to develop a theoretical approach to describe various quasi-chemical reactions occurring in doped silicon with the participation of radiation and impurity defects when exposed to penetrating radiation;

to determine the optimal conditions for structural transformations in doped silicon under radiation exposure and to identify the method of radiation modification of the properties of the doped material.

The objects of the research are single-crystal and neutron transmutational silicon samples doped with zinc, sulfur and palladium impurities.

The subject of research is the thermally stimulated processes of restructuring of defect states in doped Si <Pd>, Si <S> and Si <Zn> single crystals.

The methods of the research. Unsteady deep level capacitive spectroscopy (DLTS); photo-capacitance spectroscopy (PS); induced photo-capacity (IP); stationary photoconductivity; X-ray fluorescence and X-ray diffraction methods; infrared microscopy and measurement of the recovery time of the inverse resistance of p-n structures.

The scientific novelty of the research is as follows:

for the first time, a two-stage method for obtaining doped silicon with sulfur and rhodium impurities, based on nuclear transmutation of introduced phosphorus and palladium isotopes, was proposed and implemented, and the energy levels of

the formed deep centers of sulfur, palladium and rhodium in nuclear-transmutation doped silicon were identified;

it was found that palladium impurity in silicon forms low-dimensional defects in the form of a vacancy complex $[Pd - V]$ and a chemical compound with hydrogen in the form of a complex $[Pd - H]$, with levels $E_c - 0.18$ eV, $E_v + 0.34$ eV and $E_v + 0.32$ eV, and the admixture of zinc in p-Si $\langle Zn \rangle$ leads to an increase in the stability of the photoelectric characteristics of the SC when exposed to radiation and an increase in their spectral sensitivity in the IR region;

for the first time it was revealed that the forming copper-oxygen nanocrystallites in doped silicon single crystals are in three states: as individual atoms in an interstitial position in the matrix lattice and as part of Cu_2O and CuO nanocrystallites, and each of them forms discrete deep levels, the number of which is determined by diffusion modes and the cooling rate of the samples after diffusion;

a quasistationary solution of a system of differential equations describing the kinetics of the formation of defect states in single crystals was obtained, taking into account the presence in their volume of various impurities and a model is proposed for the formation of structurally defective states in semiconductors caused by radiation-stimulated recombination of vacancies with impurity atoms.

The practical results of the research are as follows:

a method for obtaining samples of a solid solution based on monocrystalline silicon containing impurities of Pd, Zn and S with a given density has been developed, and the optimal conditions for the uniform doping of silicon with these impurities have been determined;

a method for obtaining doped with sulfur and palladium silicon by nuclear transmutation has been proposed, which allows to eliminate erosion and stabilize the surfaces of silicon wafers, as well as the formation of thermo-structural defective states in the bulk of the crystal;

it has been found that the use of zinc-doped silicon for the manufacture of silicon solar cells provides an increase in the stability of their photoelectric characteristics to radiation exposure and an increase in spectral sensitivity in the IR region.

The reliability of the research results is determined by the use of a complex of highly informative, independent experimental methods and by carrying out theoretical calculations of the parameters of defect states, comparing the results obtained with the literature data and not contradicting the results to the existing general physical concepts and laws.

The scientific and practical significance of the research results consists of studying radiation-stimulated processes and identifying patterns of quasi-chemical reactions, determining the mechanisms of formation, and transformation of the formed defective complexes in doped silicon under external physical influences.

The practical significance is determined by the development of the physical basis of obtaining new or modifying the properties of the doped semiconductor material by radiation processing.

The application of research results. Based on the obtained results on the study of single-crystal silicon doped with impurities of palladium, sulfur and zinc and the effect of radiation on the transformation processes of impurity-defect centers:

the established pattern of increasing the stability of the photovoltaic characteristics of solar cells with increasing zinc content in silicon has been applied at FOTON in the production of diffusion diodes based on silicon of n-type conductivity, developed radiation-controlled technology for the formation of recombination centers in silicon $p^+ - n - n^+$ structures with using a linear electron accelerator "Electronics U-003" and the observed effect on the dependence of the concentration of input radiation defects on the thickness of the measured p^+ layer in diffusion diodes was used at the enterprise of FOTON to increase the performance of pulsed diodes (Deployment certificate UZELTEXSANOAT No. 04-4/694 of June 13, 2019). The usage of scientific results in "FOTON" allowed us to create a controlled technology for the formation of recombination centers in silicon $p^+ - n - n^+$ structures by radiation processing;

the obtained quasistationary solution of a system of differential equations describing the kinetics of the formation of defect states in semiconductor single crystals under radiation exposure, taking into account the presence in their volume of various impurities, the mechanism of the formation of thermoradiation-stimulated defects with the participation of vacancies and their recombination with impurity atoms in crystals has been used to develop technological regimes method of obtaining compensated silicon of the i -type by irradiation on the atomic reactor VVR-SM, on the basis of The silicon crystal fabricated a silicon thermal sensor for remote temperature control devices as part of the application project No. AZ-FA-F003, "Development of a remote temperature and humidity control device in storages based on a compensated silicon sensor" (2015-2017). (Reference on the implementation of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2/1255-1712 of 06/14/2019). The obtained scientific results allowed to develop and manufacture laboratory samples of silicon sensors for temperature and humidity control.

Approbation of the research results. The research results were reported and discussed at 6 International and 2 Republican scientific and practical conferences.

Publication of the research results. On the dissertation theme there were published 16 scientific works, including 8 scientific papers in publications recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of doctor of philosophy dissertation, including 4 in international scientific journals.

Volume and structure of the dissertation. The dissertation consists of introduction, four chapters, conclusion and list of references. The total volume of the thesis is 126 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Makhkamov Sh., Tursunov N.A., Karimov M., Sattiev A.R., Ashurov M., Erdonov M., Kholmedov Kh.M. Two-stage doping of silicon with phosphorus-32 and sulfur-32 isotopes // Technical Physics Letters. –New York, 2008. –V.34, N7. –pp. 574–576. (№11. Springer; IF=0,808)
2. Makhkamov Sh., Tursunov N.A., Karimov M., Zainabidinov S., Sattiev A.R., Erdonov M.N., Kholmedov Kh.M. Investigation of the electrophysical properties and structures of impurity-defective complexes in silicon doped with palladium // Russian Physics Journal. – New York, 2010. –V.53, N5. – pp. 499-503. (№11. Springer; IF=0,555)
3. Makhkamov Sh., Muminov R.A., Karimov M., Tursunov N.A., Sattiev A.R., Erdonov M.N., Kholmedov Kh.M. Influence of the Conductivity Type of Silicon on the Process of Radiation Degradation of Solar Sells // Applied Solar Energy. –New York, 2013. –V.49, N2. –pp. 62–66. (№11. Springer; IF=0,47)
4. Makhkamov Sh., Muminov R.A., Karimov M., Abdurakhmanov K.P., Tursunov N.A., Sattiev A.R., Erdonov M.N., Kholmedov Kh.M. Formation of radiation defects in zinc- doped silicon Solar Sells // Applied Solar Energy. –New York, 2013. –V.49, N4. –pp.185–191. (№11. Springer; IF=0,47)
5. Махкамов Ш., Хугаев А.В., Турсунов Н.А., Каримов М., Умарова Ф.Т., Нормурадов А.Б., Саттиев А.Р. Радиационно – стимулированная рекомбинация дефектов в полупроводниках // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2014. –Т16, №3. –С. 214–218. (01.00.00. №5).
6. Махкамов Ш., Каримов М., Турсунов Н.А., Хугаев А., Саттиев А.Р., Холмедов Х.М., Махмудов Ш., Умарова Ф.Т., Эрдонов М.Н. Решение системы кинетических уравнений для описания взаимодействия дефектных состояний в легированных полупроводниках // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2014. –Т16, №4. –С. 265–270. (01.00.00. №5).
7. Махкамов Ш., Умарова Ф.Т., Хугаев А.В., Саттиев А.Р., Нормуродов А.Б., Холмедов Х.М. О модели радиационно – стимулированной рекомбинации вакансий с примесями в полупроводниках с учетом обратных реакций их взаимодействия с междоузельными атомами // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2015. – Т17, № 5. –С. 295–300. (01.00.00. №5).
8. Саттиев А.Р., Зайнабидинов С., Махкамов Ш., Ташметов М.Ю., Эрдонов М.Н., Холмедов Х.М., Сабиров С.С. Исследование времени жизни носителей заряда в кремнии при легировании примесью цинка и серебра // Научно-технический журнал ФерПИИ. – Фергана, 2019. – Т23, № 2. –С. 140– 143. (05.00.00. №20).

II бўлим (II часть; part II)

9. Makhkamov Sh., Tursunov N.A., Karimov M., Zaynabidinov S., Ashurov M., Sattiev A.R., Erdonov M.N., Kholmedov Kh.M. Special features of recombination processes in silicon alloyed by palladium // The Seventh International Conference «Modern problems of nuclear physics»: Book of Abstracts, 22–25 September, 2009.– Tashkent (Uzbekistan), 2013. –pp. 152–153.
10. Махкамов Ш., Муминов Р.А., Каримов М., Турсунов Н.А., Саттиев А.Р., Эрдонов М.Н., Холмедов Х.М. Влияние облучения на фотоэлектрические свойства кремниевых фоторезисторов, легированных серой и родием // Материалы Международной конференции, посвященной 70-летию Физико-технического института «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 14–15 ноября, 2013.– Ташкент (Узбекистан), 2013. –С. 178–180.
11. Makhkamov Sh., Karimov M., Zainabidinov S.Z., Tursunov N.A., Sattiev A.R., Erdonov M.N. Radiation induced degradation of zinc doped silicon solar elements// 7-th Eurasian Conference «Nuclear science and its application»: Book of Abstracts, 21–24 October, 2014.–Baku (Azerbaijan), 2014.–pp. 184–185.
12. Саттиев А.Р., Эрдонов М.Н., Махкамов Ш., Зайнабидинов С.З., Эргашев Х.А., Холмедов Х.М. Влияние гамма излучения ^{60}Co на электрофизические свойства нейтронно-трансмутационного кремния легированного медью // Материалы III Международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах», 14–15 ноября, 2014.–Фергана (Узбекистан), 2014.–С. 358–360.
13. Махкамов Ш., Зайнабидинов С.З., Саттиев А.Р., Эрдонов М.Н., Холмедов Х.М., Эргашев Х.А. Управление быстродействием диффузионных диодов электронным облучением // Республика илмий-амалий конференцияси материаллари «Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари», 4–5 декабря, 2015.–Андижан (Узбекистан), 2015. –С. 7–8.
14. Махкамов Ш., Каланов М.У., Зайнабидинов С.З., Саттиев А.Р., Эрдонов М.Н., Эргашев Х.А., Холмедов Х.М. Влияние водорода на состояние медь-кислородных преципитатов в монокристаллах кремния // XIII международная научная конференция «Физика твердого тела», 26–28 апреля, 2016. –Астана (Казахстан), 2016. –С. 94–97.
15. Махкамов Ш., Ташметов М.Ю., Саттиев А.Р., Эрдонов М.Н., Холмедов Х.М. Влияние водорода на электрофизические свойства кремния, легированного палладием // Труды международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 13–14 июня, 2017. –Ташкент (Узбекистан), 2017. –С. 264–266.

16. Саттиев А.Р., Махкамов Ш., Ташметов М.Ю., Эрдонов М.Н., Холмедов Х.М. Легирование кремниевых эпитаксиальных слоев быстродиффундирующими примесями // XII Международная конференция «КРЕМНИЙ-2018», 22–26 октября, 2018. – Черногловка (Россия), 2018. –С. 103.

Илмий раҳбар

С. Зайнабидинов

Талабгор

А.Р. Саттиев