

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.08.2019. FM/T.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

КУЛИЕВ ШУКУРУЛЛО МУСТАФАЕВИЧ

**ЎРТАЧА ҚУВВАТЛИ КРЕМНИЙЛИ ДИОДЛАРНИНГ
ФУНКЦИОНАЛ ПАРАМЕТРЛАРИНИ БОШҚАРИШ
УСУЛЛАРИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2019

Докторлик (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (PhD) диссертации

Contents of the of Doctoral (PhD) Dissertation Abstract

Кулиев Шукурулло Мустафаевич

Ўртача қувватли кремнийли диодларнинг функционал параметрларини бошқариш усулларини ишлаб чиқиш..... 3

Кулиев Шукурулло Мустафаевич

Разработка способов управления функциональными параметрами кремниевых диодов средней мощности 21

Kuliev Shukurullo Mustafaevich

Development of methods for controlling the functional parameters of medium-power silicon diodes..... 39

Эълон қилинган илмий ишлар рўйхати

Список опубликованных научных работ
List of published research works 43

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.08.2019. FM/T.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

КУЛИЕВ ШУКУРУЛЛО МУСТАФАЕВИЧ

**ЎРТАЧА ҚУВВАТЛИ КРЕМНИЙЛИ ДИОДЛАРНИНГ
ФУНКЦИОНАЛ ПАРАМЕТРЛАРИНИ БОШҚАРИШ
УСУЛЛАРИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2019

Фалсафа доктори (Phd) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.3. PhD/T843 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси ЎЗРФА Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.ispm.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: **Раҳматов Аҳмад Зайнидинович**
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Алиев Райимжон**
техника фанлари доктори, профессор

Раҳманов Анваржон Таджибаевич
техника фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот: **Фарғона политехника институти**

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.30.08.2019.FM/T.01.12 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «__» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел. (99871) 248-79-94, факс: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, ЎЗМУ қошидаги ЯФМ ИТИ мажлислар зали).

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин (___ рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел. (99871) 248-79-59. e-mail: info@ispm.uz).

Диссертация автореферати 2019 йил «__» _____ куни тарқатилди.

(2019 йил «__» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси).

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

С.С.Насриддинов,
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.д., доцент

А.Т.Мамадалимов,
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф. д., академик.

КИРИШ (фалсафа доктори диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурлиги. Дунёда, юқори ва ўртача қувватли электроника соҳасининг жадал ривожланиб бораётган бугунги кунда, ўзгарувчан ва ўзгармас тоқларни тўғрилашга, инвертирлашга ва ростлашга, таъминловчи тизимларни стабиллаштиришга, радиоэлектрон аппаратураларни импульсли ўта кучланишлардан ҳимоялашга мўлжалланган ўртача қувватли юқори частотали диодларнинг функционал параметрларини оптималлаштириш истикболли йўналишлардан бири ҳисобланади. Бу жиҳатдан, кремнийли юқори частотали диодли структураларнинг тезкорлигини ошириш ва фойдали сигналнинг исрофини камайтириш мақсадида энг муҳим вазифалардан бири дифференциал қаршилиқни ва асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг, яшаш вақтини, шунингдек силқиш тоқларини камайтиришни ва белгиланган тешилиш кучланишларини сақлаб қолиш йўллари аниқлашдан иборатдир.

Бугунги кунга келиб, дунё бўйича юқори частотали юқори ва ўртача қувватли диодларнинг асосий параметрларини бошқариш йўллари ишлаб чиқишга жуда катта эътибор қаратилмоқда. Бу борада мақсадли тадқиқотларни амалга ошириш, жумладан, куйида келтириладиган йўналишларни рўёбга чиқариш муҳим вазифалардан саналади: тоқ ташиш механизмларининг база соҳаси параметрларига радиация таъсири пайтидаги боғлиқлигини аниқлаш, дифференциал қаршилиқ ўзгаришлари динамикасининг берилган қонуниятини таъминлаб берувчи физик мезонларни аниқлаш, тоқли характеристикаларнинг кучланиш тушиши ва тешилиш жараёнлари билан ўзаро боғланишини ойдинлаштириш, силқиш тоқини ортиш сабаблари ва механизмларини аниқлаш ва уларни йўқотиш йўллари ишлаб чиқиш.

Республикамизда амалий тадқиқотларга, фанни ривожлантириш устувор йўналишларига, илмий-тадқиқотлар натижаларини жорий қилишга катта эътибор берилмоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича 2017-2021 йилларга мўлжалланган Ҳаракатлар стратегиясига¹ кўра, асосий эътибор илмий-тадқиқот ва инновацион фаолиятни рағбатлантириш масалаларига, илмий-инновацион фаолият ютуқларини амалиётда қўллашнинг самарали механизмларини яратишга, айниқса, импорт ўрнини босувчи турли мақсадли яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқариш масалаларига эътибор берилмоқда. Алоҳида таъкидлаш лозимки, ушбу фаолият илмий ривожланишнинг замон талабларига жавоб бера оладиган илмий натижаларни олишга йўналтирилган фаол тадбиркорликни, инновацион ғояларни ва технологияларни қўллаб-қувватлаш доирасида амалга оширилади. Шу жиҳатдан, алоҳида эътибор яримўтказгичли структураларнинг функционал хусусиятларини ва ишчи режимлари стабиллигини аниқловчи физик жараёнларни тадқиқ қилиш масалаларига қаратилади. Ўз навбатида, электротехника соҳаси учун, технологик жараёнларни бошқариш ва радиоэлектрон аппаратураларни ҳимоялаш қурилмаларида ишлатиш учун, жумладан, уларнинг рақо-

¹ 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947 – сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси» тўғрисидаги Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

батбардошлигини ошириш учун мўлжалланган юқори частотали кремнийли диодларнинг асосий параметрларини бошқариш методларини ишлаб чиқиш муҳим ўрин тутди.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 30 майдаги ПҚ-4348-сонли «Электротехника саноатини ривожлантириш учун қулай шарт-шароитлар яратиш ва тармоқнинг инвестициявий ҳамда экспорт салоҳиятини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги, 2018 йил 14 июлдаги ПҚ-3855-сонли «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижалари тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республикада фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мос келиши. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожлантиришнинг муҳим йўналиши II «Энергетика, энергия ва ресурс-тежамкорлик» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Юқори частотали ўзгарувчан токни тўғирлашга, ишчи кучланишни стабиллаштиришга, электротехник ускуналарни импульсли ўтакучланишлардан химоялашга мўлжалланган диодларга бўлган ва йилдан-йилга ўсиб бораётган эҳтиёжни саноатда ишлаб чиқарилаётган кремнийли тўғриловчи ва тўғриловчи-чекловчи диодларни ишлатиш билан таъминлаб беришнинг ҳеч иложи йўқ. Чунки уларда тескари токни тикланиш вақти нисбатан катта ($10^{-6} \div 10^{-4}$ сек) ҳамда ишлаш тезкорлиги ҳам паст. Уларга талаб қилинаётган электр параметрларни таъминлаш учун, конструкциясига ва аниқ структурасига мос ҳолда уларга маълум дозада ва вақт давомида радиацияли ҳамда иссиқлик таъсирида ишлов берилади.

АҚШлик олимлар² Douglas Jones B.Sc. ва Douglas Schumacher B.S. (Вашингтон Университети) 1N2482 маркали саноат диодларига 6, 8, 12 и 18 MeV дозали электронлар билан таъсир кўрсатиш йўли билан, энг яхши параметрларни таъминловчи оптимал доза 8 MeV (0.5 Mrad) эканлигини ҳамда энергияни 18 MeV гача кўтариш эса параметрларнинг ёмонлашувига олиб келганини исбот қилиб бердилар.

Хитойлик олимлар³ Jia Yun-Peng, Zhao Xuan, Yang Fei ва бошқалар томонидан, кремнийли тез тикланувчи диодларнинг ишлаш тезкорлигини ошириш мақсадида, электронлар билан радиацион таъсирлаш амалга оширилган

² Douglas Jones B. Sc. Douglas Schumacher B. S. Technical innovation and note Stabilization of radiation damage in a silicon diode radiation detector // International Journal of Radiation Oncology Biology Physics. Volume 6, Issue 1, January 1980, Pages 109-110.

³ Jia Yun-Peng, Zhao Bao, Yang Fei, Wu Yu, Zhou Xuan, Li Zhe and Tan Jian Effekt of combined platinum and electron on the temperature dependence of forward voltage in fast recovery diode // Chinese Physical Society B 2015, Volume 24 Number (12): 126104

ва DLTS характеристикаларни ўлчаш асосида айнан ишлаш тезкорлигини оширишга масъул бўлган E_d ($E_c-0.376$ эВ) чуқур сатҳ топилган.

Кучланишнинг тўғри тушишини ҳисобланган микдор $\sim 1,0$ В гача пайтириш мақсадида, Украина Миллий Фанлар академияси Яримўтказгичлар физикаси институти профессори Р.В. Конакова⁴ раҳбарлигида ва профессор К.А. Исмаилов бошчилигидаги қорақалпоғистонлик олимлар билан биргаликда, кремнийли диффузион диодлар $5 \cdot 10^5$ Gy дозали гамма-квантлар билан нурлантирилган. Натижада диодларда ноидеаллик коэффициенти деярли назарий қийматга мос келувчи 1.17 га тенг бўлган вольтампер характеристика олинган.

Ўзбекистонлик профессор А.В. Каримов⁵ раҳбарлигида юқори частотали ва юқори қувватли диодлардаги иссиқлик жараёнларини импульсли таъсир остида ўрганиш бўйича изланишлар олиб борилмоқда. Профессор А.З. Рахматов^{6,7} раҳбарлигида, маҳсулотларнинг радиация таъсиридан кейинги параметрларини башоратлаш орқали нурлантиришнинг оптимал дозасини танлаш ва технологик жараённинг қайтарилувчанлигини ва яроқли асбоблар чиқишини ошириш имконини берувчи кучланиш чеклагичларининг ва юқори қувватли ва юқори частотали диодларнинг асосий параметрларини ҳи-соблашнинг муҳандислик услуби ишлаб чиқилган. Шунингдек, кремнийли p^+-n-n^+ - структуралар ишчи параметрларини гамма ва электрон нурланиш таъсирида қийслаш тадқиқотлари ўтказилиб, уларнинг ўзаро алмаштирила олинислари ва таъсир шартларини танлаш йўли билан p^+-n-n^+ структуралар ишлаш тезкорлигини ўн баробаргача (50 нсек) кўтариш мумкинлиги кўрсатилган.

Ҳозирги пайтга келиб, тўғриловчи-чекловчи диодларнинг характеристикавий параметрларини яхшилашнинг турли усуллари, жумладан, радиацияли нурлантириш, рекомбинацион марказлар ҳосил қилувчи аралашмалар билан легирлаш, конструктив-технологик усуллар ишлатилмоқда.

Бироқ функционал параметрларни оптималлаштириш жараёни, диодлар конструкциясини ва аниқ структураларини ҳисобга олган ҳолда, хусусан, ўртача қувватли кремнийли диодларга мос ҳолда, таъсирлашаётган факторларнинг шартлари ва режимларини танлашни талаб қилади.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган илмий-тадқиқот муассаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация

⁴ Болтовец, К.А. Исмаилов, Р.В. Конакова, М.Б. Тагаев. Кремниевые диффузионные диоды с вольт-амперными характеристиками, близкими к идеальным // Журнал технической физики, Санкт – Петербург, 1998 том 68, №10, С. 131-132

⁵ Каримов А.В., Каримов А.А., Рахматов А.З., Дадаматова К.Т. Моделирование тепловых процессов высокочастотного кремниевого $p-i-n$ -диоода // Физическая инженерия поверхности, Харьков. 2014. Т.12. № 1. –С.14-19

⁶ Рахматов А.З., Ташметов М.Ю. Каримов А.В. Технология изготовления полупроводниковых высокочастотных и ограничительных диодов // под редакцией академика Р.А.Муминова. Изд-во: «Фан ва технология», Ташкент 2018. С.210

⁷ Рахматов А.З., Ташметов М.Ю., Сандлер Л.С. Влияние проникающей радиации на параметры кремниевого планарного высокочастотного высоковольтного выпрямительного диода. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. (98) –Киев, 2011.- №4.-С. 26-33.

тадқиқотлари Физика-техника институти фундаментал ва амалий лойиҳалар режасидаги ФА-А3-Ф026 рақамли «Кремнийли юқори қувватли яримўтказгичли асбобларнинг ишчи параметрларини оптималлаштириш усулларини ишлаб чиқиш» (2015-2017 йй.), ФА-Атех-2018-225 рақамли «Электротехник асбобларнинг химоя электрон блоклари учун корпуссиз тўғриловчи-чекловчи диодларни ишлаб чиқиш» (2018-2020 йй.) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади ўртача қувватли кремнийли диодларнинг функционал параметрларини бошқариш ва тузатиш терморадиацияли таъсирлашга асосланган усулларини ишлаб чиқишдан иборат.

Қўйилган мақсадга кўра қуйидаги **вазифаларни** бажариш лозим:

ўртача қувватли кремнийли планар диодлар параметрларини бошқариш йўллари ишлаб чиқиш;

кремнийли планар диодларда ташқи таъсирлар (радиация, ҳарорат) нинг силқиш тоқларига таъсирини ўрганиш ва ток ташиш механизмларини ўрганиш;

кремнийли планар диод структуралардаги металл-шиша улоғи чегараларининг ток характеристикаларига таъсирини тадқиқ қилиш;

тўғриловчи-чекловчи диодларнинг ток характеристикаларини ўлчов стендини ишлаб чиқиш ва уни йиғиш;

тадқиқ этилаётган кремнийли диодларнинг вольтампер характеристикаларини сокин ва тешилиш режимларида ўрганиб чиқиш.

Тадқиқот объекти эпитаксиал-диффузион $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структуралар, диффузион $p^{++}pnn^{++}$ - структуралар ҳамда поликристалл қатламли $p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ -структуралар асосидаги ўртача қувватли кремнийли планар ва диффузион диодлардан иборат.

Тадқиқот предмети радиация ва иссиқлик таъсирлари остидаги физик жараёнлар, ток характеристикаларининг шаклланиш механизмларидан иборат.

Тадқиқот усуллари. Диссертация ишини бажариш жараёнида радиацияли таъсирлаш ва термик ишлов беришнинг технологик усуллари; вольтамперли, вольтфарадали, вақтга боғлиқли характеристикалар каби электр ва иссиқлик параметрларини (ҳарорат, кучланиш, ток, сиғим, ноасосий ташувчиларнинг яшаш вақти ва тескари токнинг тикланиш вақти) ўлчаш усуллари-дан фойдаланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагиларни ўз ичига олади:

оксидли қатлам остидаги электронлар концентрациясининг гамма-квантлари билан радиацион нурлантирилганда оксидли қатламлардан ток сизиб оқишининг пайдо бўлиши нейтраллашувчи ортиқча мусбат зарядлар ҳисобидан ортишига боғлиқлиги исботланган;

кремнийли диодларнинг вольтампер характеристикаларини уларнинг тезкорлиги билан оптимал мослашувини (тўғри дифференциал қаршиликни ва тескари ток сизиб оқиши камайишини) таъминлайдиган стабиллаштирувчи термик ишлов билан гамма квантлар ва электронлар билан нурлантириш жараёнини бир йўла қўшиш усули ишлаб чиқилган;

ўртача қувватли эпитаксиал-диффузияли диодлар $\Phi_\gamma = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ дозали гамма-квантлар билан нулантирилганда, вольтампер характеристикаларида иккита: ток ташишнинг диффузияли механизми устун келган ($m_1=1.1$) ва кетма-кет қаршилиқнинг таъсири бўлган ($m_1=1.5$) участкалар ҳосил бўлиши, аралашмалар градиентининг арзимаган ўзгаришида ҳам ($5,25 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$ дан $5,07 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$ гача) ноасосий ташувчилар яшаш вақтининг кўпроқ камайиши билан боғлиқ бўлган тўғри кучланиш тушишининг 10% гача пасайиши асосланган;

илк бор диффузияли диодларни электронлар билан нурлантирилганда ток ўсишининг дастлабки участкасида кучланиш тушиши камайиши (0.15В га), 0.45В дан ортиқ кучланишларда эса база қаршилиги таъсири ҳисобига ортиши ноасосий ташувчиларнинг яшаш вақти ва ҳаракат тезкорлигини ўн баробарга ошириш билан камайиши исботланган;

илк бор стабиллаштирилган ток билан таъминлаш учун, шунингдек, токи кескин ортиб кетувчи яримўтказгичли структураларнинг статик характеристикаларини ўлчаш учун мўлжалланган универсал микросхема майдон транзисторида, динамик юкли каскад асосида ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари. Ўртача қувватли кремнийли диодларнинг функционал параметрларини бошқариш усуллари, ишлаб чиқарилаётган ўртача қувватли кремнийли диодларнинг фойдаланиш параметрларини яхшилаш учун аҳамиятга эга бўлган терморadiaцияли таъсирлаш йўли асосида ишлаб чиқилди.

Тадқиқотлар натижаларининг ишончилиги яримўтказгичли асбобларнинг параметрларини ва характеристикаларини назорат қилишнинг замонавий илмий ва технологик усуллариининг ишлатилиши билан тасдиқланади. Тажрибавий маълумотларнинг ишончилиги бир-бирига боғлиқ бўлмаган ва бир-бирини ўзаро тўлдирадиган ўлчаш ҳамда маълумотлар устида ишлаш усуллариининг қўлланганлиги билан таъминланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, улар юқори частотали юқори қувватли диодларида радиация ва термик ишлов таъсири пайтида юз берадиган жараёнлар ҳақидаги физик тасавурларни кенгайтиришга ёрдам беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти, диод структураларига термик ишлов беришнинг ишлаб чиқилган усулларида ва режимларидан фойдаланиш параметрлардаги фарқларни камайитиришга ва иш самарадорлигини оширишга имкон беришида ўз аксини топади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Ўртача қувватли кремнийли диодларнинг функционал параметрларини бошқариш усуллари бўйича олинган натижалар асосида:

майдон транзисторида динамик юкли каскаднинг функционал имкониятларини кенгайтириш йўллари бўйича «Универсал микросхема» га Ўзбекистон Республикаси интеллектуал мулк Агентлигининг ихтирога патенти олинган (№ IAP 05540 от 31.01.2018). Ишлаб чиқилган микросхема токи

кескин ортиб кетувчи яримўтказгичли структураларнинг статик характеристикаларини ўлчаш учун токнинг прецизион регулятори (тартиблаштиргичи)ни яратишга имкон берган;

кремнийли диодларни гамма-квантлари билан нурлантириш бўйича олинган натижалар «Новосибирск яримўтказгичли асбоблар заводида ўртача қувватли p^+n-n^+ -структурали диодларни ишлаб чиқаришда фойдаланилган («Новосибирск яримўтказгичли асбоблар заводи ОКБси билан» акционерлик жамиятининг 2019 йил 25 апрелдаги № 04/401-188/3158-сон маълумотнома). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичли диодларда ток сизиб оқиб кетишини 10 мартагача камайтириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертациянинг асосий натижалари 2та халқаро ва 3та республика миқёсидаги конференцияларда муҳокамадан ўтказилган.

Натижаларнинг нашр қилинганлиги. Диссертации мавзуси бўйича 13та илмий ишлар нашр қилинган бўлиб, улардан 7та мақола диссертациянинг муҳим натижаларини нашр этиш учун Ўзбекистон Республикаси Олий Аттестация Комиссияси томонидан тавсия этилган журналларда чоп этилган, ихтиро учун 1та патент олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва илова қисмларидан иборат. Диссертация матни 113 бетдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурлиги асослантириб берилган, тадқиқотларнинг республикадаги фан ва технологияларни ривожлантиришнинг муҳим йўналишлари билан боғлиқлиги аниқланган, муаммонинг ўрганилганлиги даражаси кўрсатиб берилган, мақсад ва вазифалар кўрсатилиб, тадқиқотнинг илмий янгилиги ёритилган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асослантирилиб, уларнинг назарий ва амалий аҳамиятлари очиб берилган, натижаларнинг ҳаётга жорий қилиниши ва ишнинг апробацияси ҳақида қисқача маълумотлар келтирилган, шунингдек диссертациянинг структураси ва ҳажми ҳақида маълумотлар берилган.

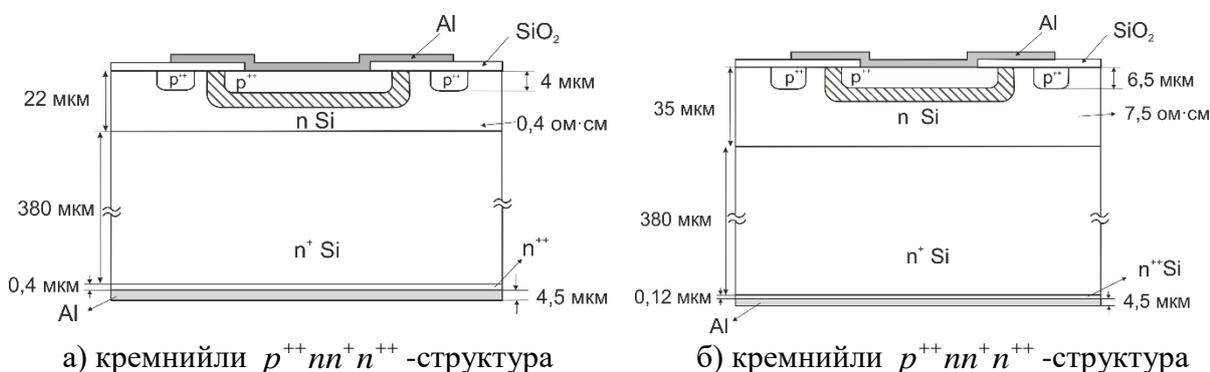
«Тўғриловчи-чекловчи диодлар: замонавий ҳолати ва ривожлантириш тенденцияси» номли биринчи бобда, тўғриловчи-чекловчи ва тўғриловчи диодларнинг конструкциялари уларнинг асосий электрик характеристикалари қараб чиқилган, тўғриловчи-чекловчи диодларнинг характеристик параметрларини яхшилашнинг турли йўллари таҳлил қилинган, шунингдек, тўғриловчи диоднинг сақланувчи қувватини таъминлашнинг айрим хусусиятлари очиб берилган. Адабиётларда мавжуд бўлган маълумотлар таҳлили асосида ҳал этилиши лозим бўлган вазифалар белгиланган.

«Тадқиқот объектларининг техник-технологик хусусиятлари ҳамда уларни текшириш услублари» деб номланган иккинчи бобда тўғриловчи-чекловчи ва тўғриловчи диодни тайёрлаш жараёнларининг техник-технологик хусусиятлари, уларнинг муҳим параметрларини радиацияли таъсирлашдан олдин ва кейин текшириш усуллари келтирилган, шунингдек, текширилаётган кремнийли структураларнинг вольтампер характеристикаларини ўлчашга мўлжалланган, токни тартибга солиб турувчи микросхемани яратиш принципининг асослари тавсифлаб берилган.

Мавжуд технологияларни таҳлил қилиш асосида, «ФОТОН» АЖда, ўртача қувватли кремнийли диодларнинг функционал қувватларини бошқариш усуллари ишлаб чиқиш, ишчи режим ишончлилигини ва стабиллигини ошириш, уларнинг хизмат муддатини кўпайтириш мақсадида, 0.3А ва 1А, 1А дан 10А гача бўлган ишчи тоқларига мўлжалланган Намуна-типоминалга боғлиқ равишда, турли конструкциялардаги кенг талабга эга бўлган тўғриловчи-чекловчи ва тўғриловчи диодлар тайёрланган.

Бошланғич ҳарорат ва диффузия жараёнининг давомийлиги диффузия қилинаётган элементнинг танланган аралашмасига мос ҳолда берилади. Бундан ташқари, шакллантирилаётган диоднинг структурасига қараб диффузия босқичларининг кетма-кетлиги танланади. Диффузия қилиш учун $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ тезлик билан исийдиган СДО 125/13-15 печи ишлатилади. Сўнгра, олинаётган қатламларга боғлиқ равишда диффузия қилинаётган материалнинг диффузия режими танланади. Типоминалларга мувофиқ ҳолда, ҳар бир диоднинг тайёрлаш технологиялари ўзига хос ва аниқ технологик шартларга эгадир. **А гуруҳида** кремнийли $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структура асосидаги эпитаксиал-диффузияли диодлар, 0,01 Ом·см солиштирма қаршиликли ва 380 мкм қалинликдаги кремний тагликда 4 Ом·см солиштирма қаршиликли ва 22 мкм қалин-

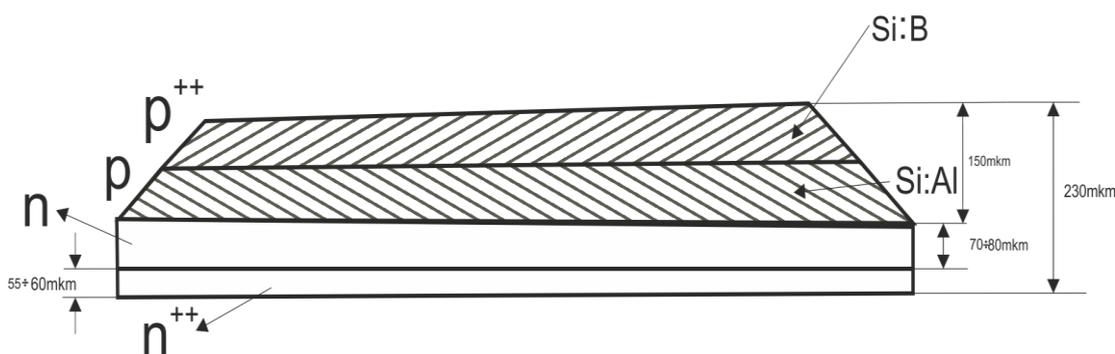
ликдаги n -тип эпитаксиал қатламини ўстириш билан тайёрланган. Сўнгра қатлам юзасида ва тагликнинг тескари томонига, мос равишда, бор ва фосфор диффузия қилиниб, юқори легирланган соҳалар олинган ва шулар асосида $16 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ юзали диод структуралари тайёрланган (1а-расм).



а) кремнийли $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структура б) кремнийли $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структура
1-расм. Кремнийли эпитаксиал-диффузияли А гуруҳ (а) ва Б гуруҳ (б) диодларнинг кўндаланг кесими

Б гуруҳидаги текширилаётган $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структуралар солиштира қаршилиги $7,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, қалинлиги 35 мкм ва юзаси $36 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ бўлган n -тип фосфор билан легирланган қатламни эпитаксиал ўстириш билан олинган. Қалинлиги $6,5 \div 7,5 \text{ мкм}$ бўлган бор билан легирланган p -тип диффузияли қатлам, солиштира қаршилиги $0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ва қалинлиги 380 мкм бўлган $n\text{Si}$ тагликнинг сурьма билан шундай юқори легирланган бир юзасида 1250°C ҳароратда диффузия билан амалган оширилган (1б-расм).

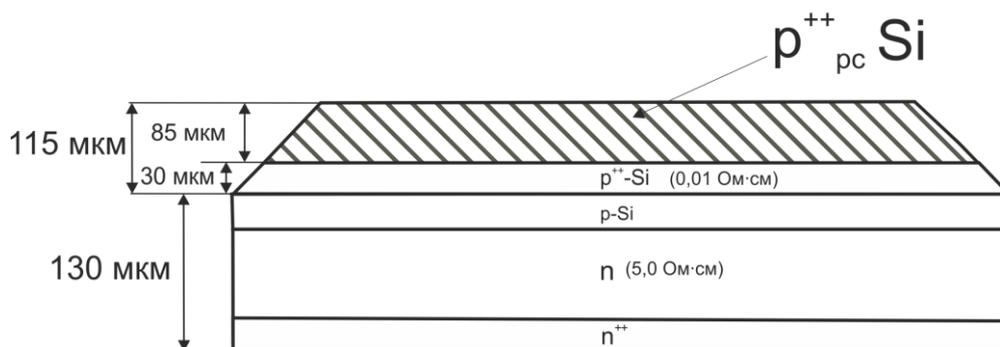
Кремний асосидаги $p^{++}p$ соҳали $p^{++}pnn^{++}$ -структуралар алюминий ва борни 115 мкм ва 50 мкм га диффузиялаш билан (2-расм), шунингдек, n^{++} -соҳалар фосфорни тагликнинг остки томонига фосфорни 45 мкм га диффузия қилиб олинган.



2-расм. Кремнийли $p^{++}pnn^{++}$ -структура асосидаги диффузияли диодларнинг кўндаланг кесими

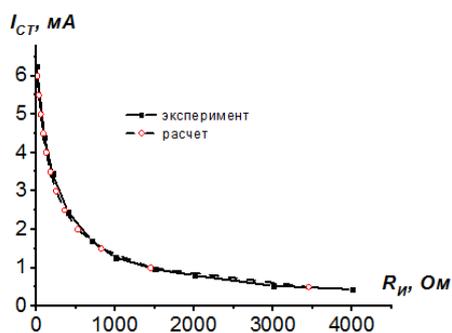
$p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ -структуралар (3-расм), 30 мкм қалинликдаги монокристалл қатламни ва 85 мкм қалинликдаги поликристалл қатламни солиштира қаршилиги мос равишда $5,0 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ бўлган n -тип тагликда ўстириш билан олинган. Сўнгра, фосфорни $3,0 \text{ мкм}$ диффузия қилиш жараёнида p^{++} -қатламдан бор-

нинг диффузияси ҳисобига p-соха олинган. Кейин остки томонга фосфорни $2\div 3$ мкм чуқурликга диффузия қилиб юқори легирланган n^+ - соха олиниб, уларнинг асосида бир хил $0,54 \text{ см}^2$ юзали диодли структуралар тайёрланган.

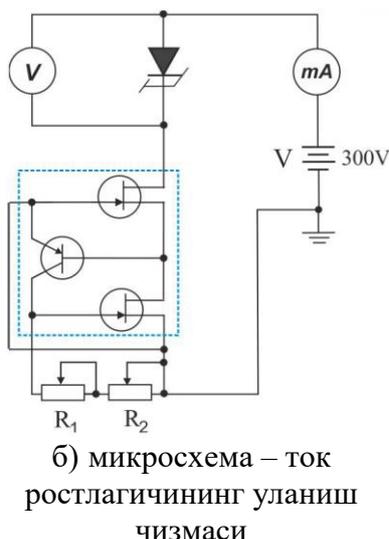


3-расм. Поликристалл p_{pc}^{++} -қатламли кремнийли диффузион $p_{pc}^{++} p^{++} p^+ n n^+$ -структураларнинг кўндаланг кесими

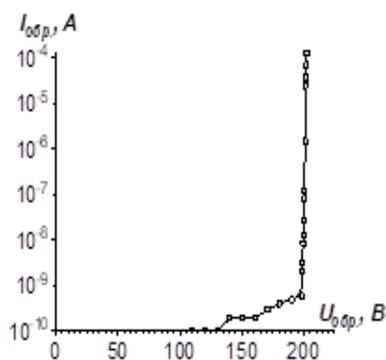
Тўғриловчи-чекловчи диодларнинг токли характеристикаларини ва дифференциал қаршиликларини текшириш учун майдонли транзистор асосида динамик юклагали микросхема⁸ асосида ўлчов стенди ишлаб чиқилди. Ўлчов стенди майдон транзистори стабилизация токининг ўзгарувчи қаршиликда тушадиган белгилаб қўйилган бошқарувчи кучланишга боғланишига асосланган (4а-расм).



а) майдон транзистори стабилизация токининг исток қаршилигига боғлиқлиги



б) микросхема – ток ростлагичининг уланиш чизмаси



в) кремнийли $p^{++} n n^+ n^{++}$ -структуранинг вольтапер характеристикаси

4-расм. Микросхема-ток тартиблштиргичининг ишлаш принципи ва унинг ёрдамида ўлчанган ВАХ

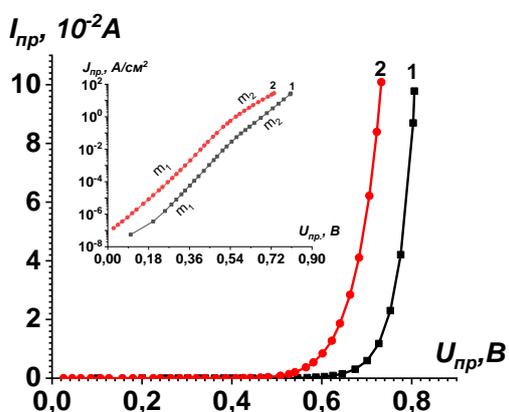
Унда (4б-расм) токни структура орқали тартиблштириш ҳар бир тартибда ўнта нуқтадан кам бўлмаган қадам билан амалга оширилади (мкА $1\div 10$ қадам билан, $10\div 100$ мА $1\div 10$ қадам билан). Бу токнинг кескин кўтарилиши ҳамда токнинг кучланишга ночизиқли боғланишда бўлган диодлар (стабили-

⁸ Патент на изобретение № IAP 05540 Бюл., №2 от 28.02.2018г. «Универсальная микросхема» / Лутпуллаев С.Л., Сайдумаров М.А., Каримов А.В., Рахматов А.З., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Кулиев Ш.М.

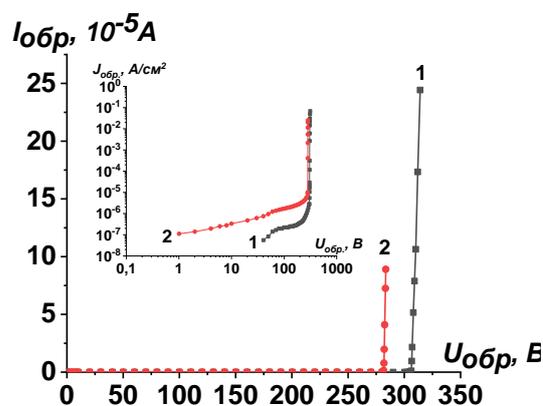
тронлар, кўчгкили диодлар, тиристорлар ва бошқалар) нинг вольтампер характеристикаларини ўлчашда юқори аниқликни таъминлаб беради. 4в-расмда динамик юкли ўртача қувватли $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структурали ва тешиб ўтишнинг турли кучланишларидаги тўғирловчи диоднинг каскад ёрдамида олинган вольтампер характеристикаси келтирилган.

«Радиацион таъсирларнинг кремнийли диодларнинг вольтампер характеристикаларига ва ток узатилиши механизмларига таъсири» номли учинчи бобда гамма-нурлантириш таъсири остидаги металлшишали ва пластмасс корпусларга ўрнатилган кремнийли эпитаксиал-диффузион $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -диодларнинг вольт-фарада ва статик характеристикаларини, шунингдек, кучланишнинг тўғри тушиши ва тескари тоқларини текшириш натижалари келтирилган.

Пластмасс корпусга ўрнатилган диодларнинг $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^2$ дозали гамма нурлантиришдан олдинги ва кейинги вольтампер характеристикаларини ўрганиш асосида, кучланишнинг тўғри тушиши 0,8В дан 0,72В гача камайиши исботланди (5а-расм). Токнинг кучланишга боғлиқлиги экспоненциал боғланишда бўлиб, ноидеалик коэффициентининг бошланғич участкадаги $m_1=1.14$ қиймати ток ташишнинг диффузион механизмга мос келиб кейинчалик $m_2=1,5$ га тенг кўрсаткичга алмашади. Кучланиш тўғри тушишининг 10% га камайиши ток ташувчилар яшаш вақтининг камайиши ва аралашма концентрацияси градиентининг арзимас ўзгаришига боғлиқ.



а) қўшимчада: тўғри вольтампер характеристика ярим логарифмик масштабда



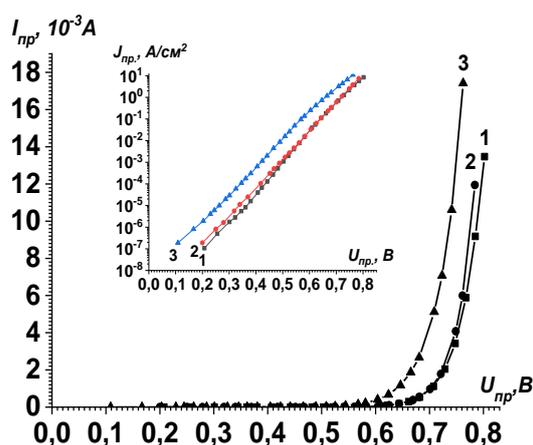
б) қўшимчада: тескари вольтампер характеристика иккиланган логарифмик масштабда

5-расм. Пластмасс корпусда ўрнатилган $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -диодларнинг гамма-нурлантиришдан олдинги (1-чизиқ) ва кейинги (2-чизиқ) вольтампер характеристикалари

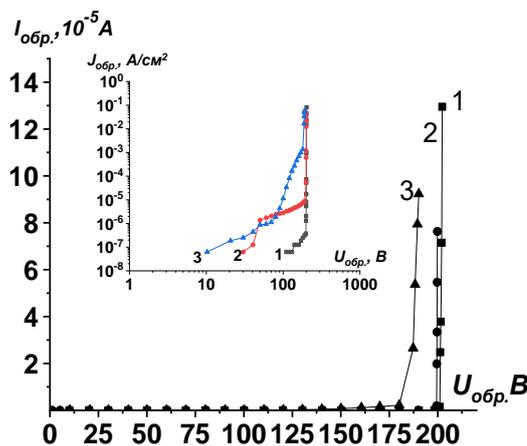
p - n -ўтишнинг тўсувчи режимида, гамма-нурлантиришдан сўнг, тескари тоқлар, тешиб ўтишнинг кўчккили механизмини сақлаган ҳолда, бироқ катталаниши тажрибавий исботлаб берилди (5б-расм). Бунда ток ташиш ҳамда тешиб ўтиш механизмлари гамма нурлантиришдан олдин ва кейин ўзгармай қолаверади. Кучланиш тўғри тушишининг пасайиши, диоднинг стабил иш режимини сақлаган ҳолда, қувват йўқолишига имкон бермайди.

Металлшишали корпусга ўрнатиб текширилаётган диодларнинг вольт-ампер характеристикаларини ўрганиш (ба-расм) асосида, улардаги корпусга ўрнатишдан олдинги ва кейинги тўғри кучланиш тушиши, 10 мА гача бўлган токларда, 0.8В атрофидаги қийматларга эга бўлиши аниқланган. Кейинчалик эса, гамма нурлантиришдан ва корпусга ўрнатилнагдан сўнг, U_{np} нинг қиймати 10%га камаяди. Кузатилаётган кучланиш тушишининг берилган ток қиймати 10мА да 0.8В дан 0.74В гача пасайишини ($\Phi_\gamma = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ дозали гамма нурлантириш натижасида), асосий ташувчилар концентрацияси градиентининг ўзгаришига олиб келадиган, худди кучли диодларни ва $p-i-n$ -структураларни $(2 \div 8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ дозали тез электронлар билан нурлантирилгандаги каби, радиацион марказларнинг пайдо бўлиши билан тушунтириш мумкин.

Гамма нурлантиришдан кейинги ток ташиш механизми 1,28 га тенг но-идеаллик коэффициентига эга бўлган диффузион жараёнлар устунлиги билан аниқланади. Бунда тешиб ўтиш кучланишлари деярли ўзгармай қолаверади. Бирок, тешиб ўтишдан олдинги соҳада токнинг кучланишга чизиқли боғланишдаги сизиб чиқиш токи ҳосил бўлади (бб-расм). Тескари токнинг кучланишга боғлиқлиги кремнийли $p^+nn^+n^{++}$ -структурада ўзига хос хусусиятларга эга (бб-расм).



а) қўшимчада: тўғри вольтамперная характеристика яримлогарифмик масштабда



б) қўшимчада: тескари вольтамперная характеристика иккиланган логарифмик масштабда

Рис.6. Кремнийли $p^+nn^+n^{++}$ -структурадаги токнинг кучланишга боғланиши.

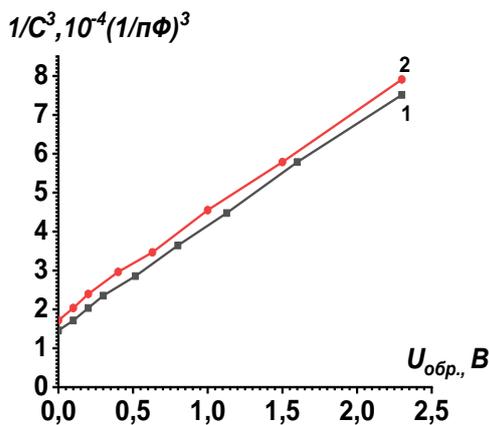
Металлшишали корпусга ўрнатилган асбоб тайёрлигининг турли босқичларидаги токнинг кучланишга боғланишлари: 1-бошланғич; 2-корпусга ўрнатилган; 3-нурлантиришдан сўнг

Корпусга ўрнатилганидан сўнг изолятордан оқиб ўтадиган сизиб чиқиш токи пайдо бўлади. Изоляторнинг ўзи корпус ва чиқиш электроди орасига қўйилган бўлиб, тўғриловчи ўтишга параллел уланган металл-изолятор-металл ўтишини ҳосил қилади.

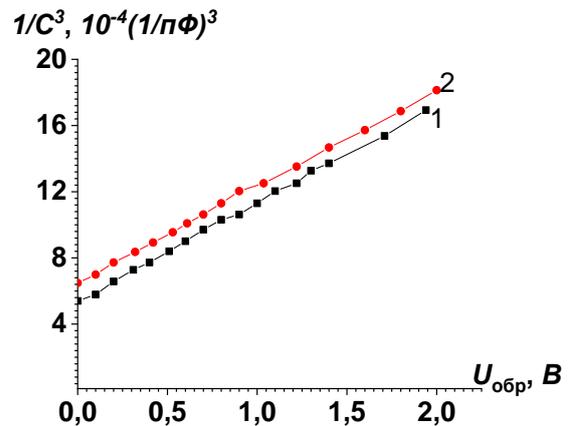
Шу билан бирга, тешиб ўтишга яқин режимда даражаси 8 кўрсаткичли қўшимча участканинг пайдо бўлиши ва тешиб ўтиш кучланишининг арзимас камайишини радиацион ишлов берилган изолятор орқали тешиб ўтиш ҳодисалари билан боғлаш мумкин, ушбу ҳолатда изоляторда микроплазмали те-

шиб ўтиш бўлиши мумкин. Бундан шундай асосли хулоса чиқадики, диодли структураларга радиацион ишлов беришни корпусга ўрнатишдан олдин ўтказишни тавсия қиламиз.

Сигимнинг тўсувчи кучланишга боғланиши $1/C^3 \sim U$ координаталарда, кремнийли $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структуранинг база соҳасидаги заряд ташувчилар концентрацияси градиентига боғлиқ бўлган p - n -ўтишнинг силлиқлигини тасдиқлайдиган тўғри чизиқни беради (7-расм). Аралашма концентрациясининг градиенти гамма-нурлантиришдан олдин ва кейин, конструкцияси пластмассали (гамма-нурлантиришдан олдин $a=5,25 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$, кейин $a=5,07 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$) ёки металлшишали (гамма-нурлантиришдан олдин $a=6,3028 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$, кейин $a=6,165 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$) корпус бўлишидан қатъий назар, жуда кам фарқ қилади.



а) пластмассали корпусга ўрнатилган
($S=36 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$)



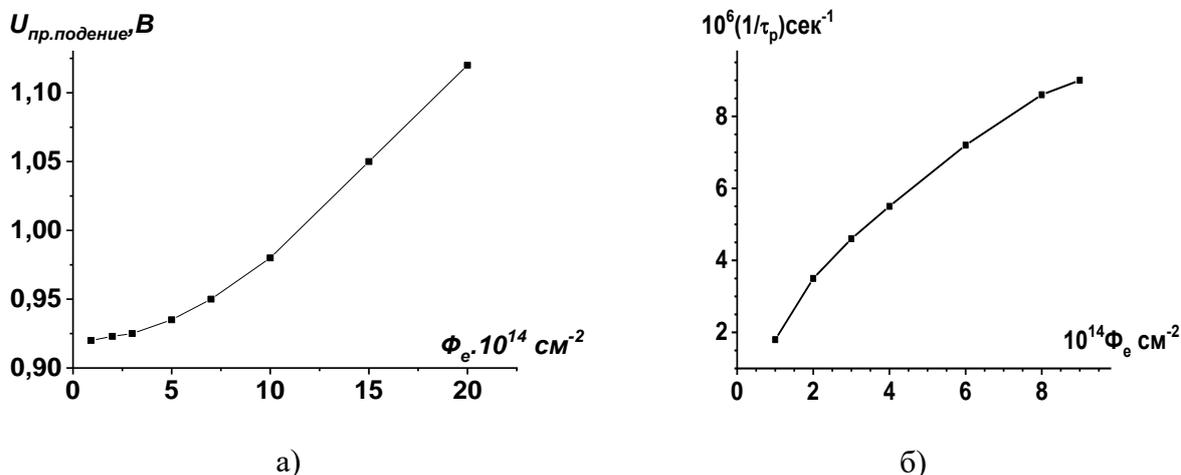
б) металлшишали корпусга ўрнатилган
($S=16 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$)

7-расм. Ҳар хил юзали кремнийли диодли $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структурада сигимнинг тўсувчи кучланишга боғланиши

Шундай қилиб, ўтказилган тадқиқотлар натижасида, $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ дозали гамма-нурлантирилган кремнийли диодли $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структурада, аралашма градиентининг арзимаган ўзгаришида, ноасосий ташувчилар яшаш вақтининг яхшигина камайиши ҳисобига, тўғри кучланиш тушишлари 10% гача камайиши исботлаб берилди. Диодли структура p - n -ўтишининг металл-изолятор-металл ўтиш билан шунтланиши тешиб ўтиш кучланишининг арзимаган пасайишига, радиацион таъсирдан кейин эса изоляторда тешиб ўтиш ҳодисаларига олиб келади.

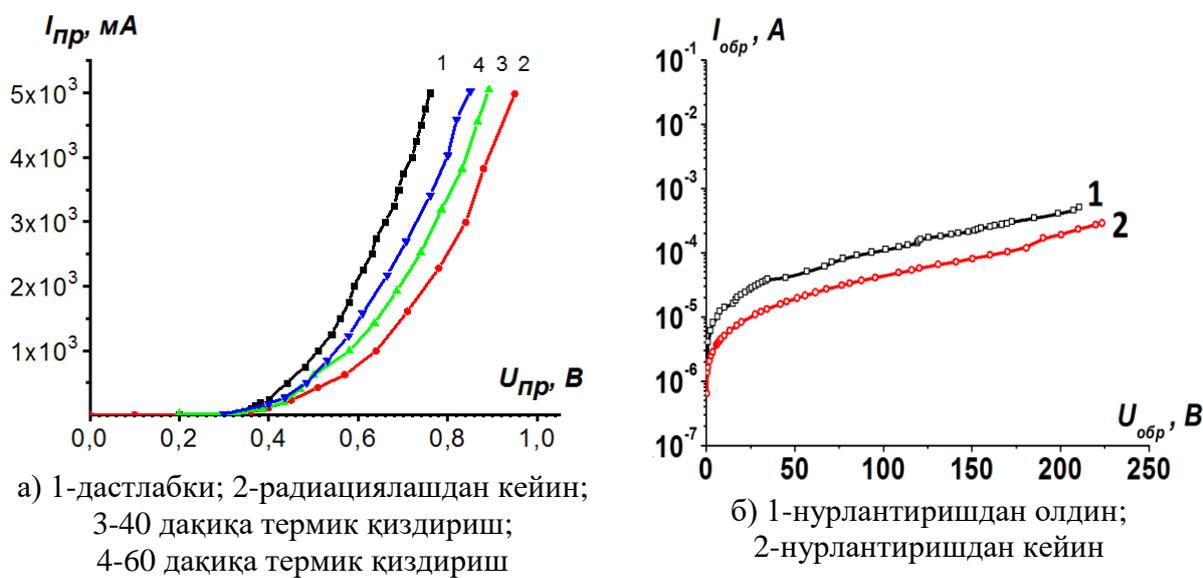
«Кремнийли ўртача қувватли диодлар функционал параметрларини бошқариш усуллари» деб номланган тўртинчи бобда $p^{+}rnp^{+}$ -структурали кремнийли диоднинг статик характеристикаларига ва радиацияга сезгирлиги механизмларига электрон нурланиш ва термик ишлов беришнинг таъсирини ўрганиш натижалари келтирилган. Шунингдек, қиёсий таҳлиллаш учун диффузияли $p^{++}pnn^{++}$ - ва поликристалл қатламли эпитаксиал-диффузияли $p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ -структуралар гамма-нурлантирилиб, уларнинг вольтампер характеристикалари кўриб чиқилган.

Дозаси $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ дан $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ гача бўлган кенг интервалда электрон нурлантириш таъсирида диффузияли диодларда ўтказилган тадқиқот натижаларидан исботлаб берилдики, кучланишнинг тўғри тушишлари, текширилаётган структураларнинг база соҳаларида радиацияли марказларнинг пайдо бўлиши ҳисобидан $0,92 \div 0,98 \text{ В}$ гача монотон ўсиб боради (8а-расм). Бунда ноасосий аралашмаларнинг яшаш вақти ўн баробарга камаяди (8б-расм).



8-расм. Кремнийли $p^{++} pnn^{++}$ -структурада кучланиш тўғри тушишининг (а) ва ноасосий аралашмалар яшаш вақтининг (б) электронлар оқимиغا боғланиши

Бошқа томондан, диффузияли диодларни белигланган $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ доза-ли электронлар билан нурлантириш кучланишнинг тўғри тушишининг 0.9 В гача ортишига олиб келади. Бу ҳолда, маҳсус камерадаги E27 маркали галоген лампа билан $90 \text{ }^\circ\text{С}$ да, 40 дақиқа вақт давомида текширилаётган диодли структурада ўтказилган навбатдаги термик ишлов бериш, кучланиш тўғри тушишини 0.84 В гача, ва яна 60 дақиқадан кейин эса 0.82 В гача пасайишига олиб келади (9а-расм).



а) 1-дастлабки; 2-радиациялашдан кейин; 3-40 дақиқа термик қиздириш; 4-60 дақиқа термик қиздириш

б) 1-нурлантиришдан олдин; 2-нурлантиришдан кейин

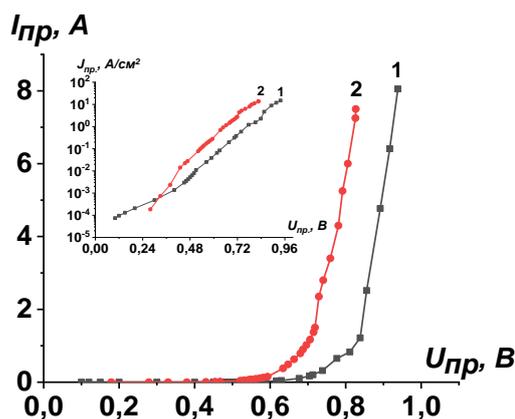
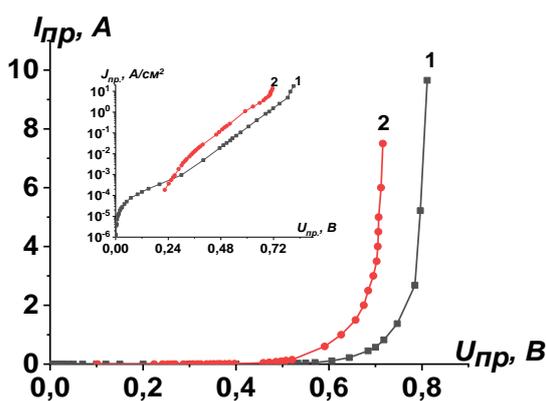
9-расм. Кремнийли $p^{++} pnn^{++}$ -структурали диоднинг вольтампер характеристикаси

Кузатилаётган кучланиш тўғри тушишининг камайиши текширилаётган структуралар база соҳаларидаги нотурғун радиация марказларининг нейтралашуви билан тушунтирилади. Худди шу тариқа, тўғри тушиш режимида, кремнийли $p^{++}pnn^{++}$ -диодда, махсус камерадаги галоген лампа билан 90 °С да 5 соат давомида ўтказилган термик ишловдан олдин ва кейин, вольт-ампер характеристиканинг кичик кучланишлар томонида силжиши, тескари тоқларнинг эса ярим тартибга камайиши кузатилади (9б-расм). Шунини таъкидлаш жоизки, ноидеаллик коэффиценти (m) яримлогарифмик масштабда чизилган вольтампер характеристикасининг қиялигидан топилади:

$$m = \frac{q}{kT} \frac{\Delta \log I_{np}}{\Delta U_{np}} \quad (1)$$

Бунда, электрон нурлантиришдан сўнг, тўйиниш тоқлари катталашади, тоқнинг кучланишга боғлиқлиги эса, тоқ ташишининг диффузияли механизмига мос келадиган, ноидеаллик коэффиценти 1.08 га тенг бўлган экспоненциал боғланишда тасвирланади, кучланиш тўғри тушишининг камайиши эса импульс қувватига бардошлиликни кўтаришга шароит яратади.

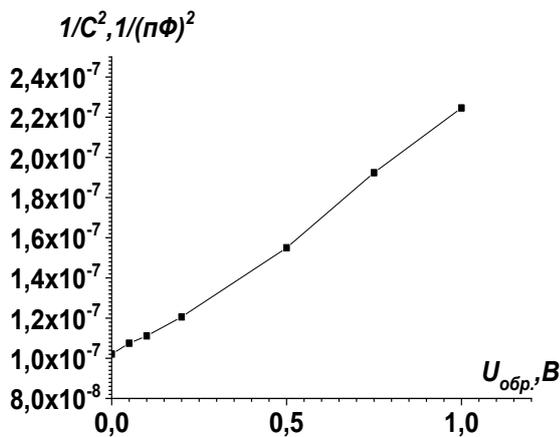
Диффузияли тўғриловчи-чекловчи $p^{++}pnn^{++}$ и $p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ -структурали диодларда гамма-нурлантириш таъсирини текшириш асосида, тўғри вольтампер характеристикалари нурлантиришдан сўнг, кучланишнинг тўғри тушишини 0,8 дан 0,72В гача (10а-расм) ва 0,89 дан 0,78В гача (10б-расм), мос ҳолда, кичик кучланишлар соҳаси томонига силжиши кўрасатилди. Вольтампер характеристикаларда кузатилаётган бундай силжиш $p^{++}pnn^{++}$ -структурада аралашма градинтининг ўзгариши ва ноасосий ташувчилар яшаш вақтининг бир тартибга (ўн баробар) ўзгариши билан боғланган.



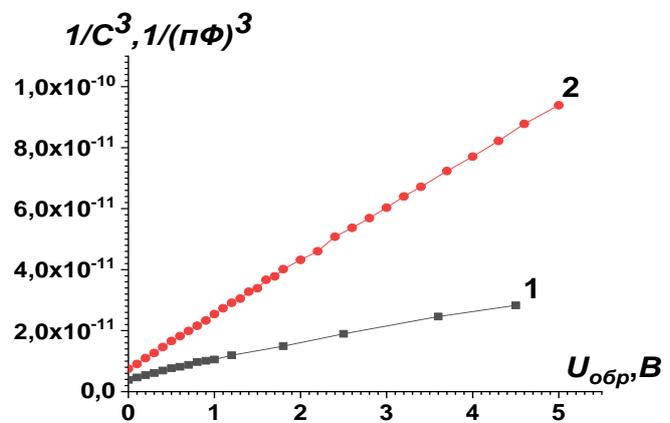
- а) қўшимчада: $p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ - структуралар учун яримлогарифмик масштабда ВАХ
10-расм. Кремнийли $p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ - ва $p^{++}pnn^{++}$ -структураларнинг тўғри вольтампер характеристикалари: 1-нурлантиришдан олдин, 2-нурлантиришдан кейин
- б) қўшимчада: $p^{++}pnn^{++}$ - структуралар учун яримлогарифмик масштабда ВАХ

Токнинг кучланишга боғланишлари ноидеаллик коэффициентлари мос равишда 2.0 ва 1.8 га тенг бўлган ва ток ташишнинг рекомбинацияли механизмини тасдиқловчи экспоненциал боғланиш билан таъсифланади. Тўйиниш токлари, гамма-нурлантириш таъсиридан сўнг, пасайишга мойил бўлади.

Кремнийли поликристалл қатламли $p_{pc}^{++} p^{++} p^{+} nn^{+}$ - структура асосидаги диффузион диодлар учун сиғимнинг кучланишга боғлиқлиги, $1/C^2 \sim V$, координаталарда тўғри чизикни беради, 11а-расм. Бу р-п-ўтишнинг кескинлигини кўрсатади, диффузион $p^{++} pnn^{++}$ -структурада эса, нурлантиришдан олдин ва кейин, вольт-фарада характеристикада $1/C^3 \sim V$, координаталарда тўғри чизикли боғланиш, р-п-ўтишнинг силлиқлигини тасдиқлаган ҳолда сақланиб қолади, 11б-расм. Бунда $p^{++} pnn^{++}$ -структурадаги аралашмалар градиенти $8,58 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4}$ дан $2,384 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4}$ гача камаяди.



а) гамма-нурлантиришдан кейин



б) 1-нурлантиришдан олдин,
2-нурлантиришдан кейин

11-расм. Кремний диодли (а) $p_{pc}^{++} p^{++} p^{+} nn^{+}$ ва (б) $p^{++} pnn^{++}$ -структураларда сиғимнинг тўсувчи кучланишга боғланишлари

Шундай қилиб, тез электронлар флюидлари билан олдиндан нурлантирилган кремнийли диодли $p^{++} pnn^{++}$ -структуранинг вольтампер характеристикаларини текшириш натижаларидан кўриндики, термик ишловдан сўнг, диодлардаги кучланишнинг тўғри тушиши ҳам, сизиб чиқиш токлари каби, импульс қувватига бардошлиликни орттиришга шароит яратган ҳолда, камаяди. Шунингдек, стабиллаштирувчи термик ишлов бериш усулини, (электронлар билан) нурлантириш жараёни билан қўшиб амалга ошириш усули таклиф этилди. Ушбу усул кремнийли диодларнинг нурлантириш дозалари ва термик экспозициялар вақти билан, тўғри кучланиш тушиши ва тескари токларни оптимал бириктириш (тўғри дифференциал қаршиликни ва тескари сизиб чиқиш тоқларини камайитириш) ни таъминлашга имкон берди.

ХУЛОСА

Ўртача қувватли кремнийли диодларнинг функционал параметрларини терморрадиациялаш таъсирида бошқариш ва коррекциялаш усулларини ишлаб чиқиш асосида қуйидаги хулосалар қилинган:

1. Илк бор, стабиллаштирилган ток билан таъминлаш учун, шунингдек, ток кескин ошадиган ярим ўтказгичли структураларнинг статик характеристикаларини ўлчаш учун, майдоний транзистордаги динамик юкламали каскад асосида универсал микросхема ишлаб чиқилган.

2. Кремнийли диодли $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структурага гамма-нурлантиришнинг таъсири кучланиш тўғри тушишининг 10%гача камайишига олиб келиши, бунда ток ташилишининг диффузияли механизми 0.55В гача сақланиши ва ундан сўнг кетма-кет қаршиликка таъсир кўрсата бошлаб, ноидеаллик коэффициентининг 1.5 гача ортишига олиб келиши аниқланган.

3. Дастлабки $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структурада сизиб чиқиш тоқларининг бўлиши оксидли қатлам остида ортиқча мусбат зарядлар ҳосил бўлиши ва тўғриловчи ўтишга, шунтлаш таъсири тешиб ўтиш кучланишининг 202В дан 188В гача камайишига олиб келадиган металл-изолятор-металл ўтишнинг параллел уланиши билан боғлиқлиги, $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ дозали радиацияли таъсирлашдан сўнг эса, радиацияли ишловланган изолятордаги микроплазмали тешиб ўтиш ҳисобига 8 даражали кўрсаткичга эга бўлган тешиб-ўтишолди соҳасида қўшимча участканинг пайдо бўлишига олиб келиши исботланган.

4. Тез электронлар билан олдиндан нурлантирилган кремнийли диодли $p^{++}pnn^{++}$ -структуранинг вольтампер характеристикаларини ўрганиш, термик ишловдан сўнг, кучланишнинг тўғри тушиши ($U_{\text{прям}}$), шунингдек, диодларнинг сизиб чиқиш тоқлари, импульс қувватига бардошлиликни оширишга шароит яратган ҳолда камайиши кўрсатиб берилган.

5. Радиацияли таъсирлантирилган ўрта қувватли диффузион диодда кузатилаётган дифференциал қаршиликнинг ва кучланиш тўғри тушишининг камайишини, навбатдаги термик таъсирлантиришда радиация марказларининг нейтраллашуви содир бўлиши, яъни, термик ишлов бериш вақтини танлаган ҳолда, дифференциал қаршилик ва радиацияли таъсирлантирилган диоддаги кучланиш тушувини бошқариш мумкинлиги билан тушунтирилган.

6. Диффузияли диод параметраларини оптималлаштириш жараёни кучланиш тушиши вольтампер характеристикаларининг ва сизим характеристикаларининг ўзгаришлари, радиацияли таъсирланганда кучланиш тушиши бўйича дастлабки ҳолатига қайтиши, вақт характеристикалари эса термик ишловнинг маълум вақтидан сўнг бир тартибгача яхшиланиши ноасосий ташувчилар яшаш вақтининг камайишига асосланганлиги кўрсатилган.

7. $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ дозада гамма-нурлантирилган кремнийли диодли $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структурада, кучланишнинг тўғри тушишлари, кичик кучланишларда асосий ташувчилар концентрацияси градиентининг ўзгариши ҳисобидан 10% гача камайиши, ток ташилиши эса барча ҳолатларда диффузияли механизмда қолиши исботлаб берилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.08.2019. FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕК-
ТРОНИКИ НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА УЗБЕКИСТАНА**

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

КУЛИЕВ ШУКУРУЛЛО МУСТАФАЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ КРЕМНИЕВЫХ
ДИОДОВ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (Doctor of Philosophy) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2018.3. PhD/Т.843

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте АН РУз НПО «Физика-Солнце»

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.ispm.uz) и Информационно-образовательном портале “ZiyoNet” (www.ziyo.net).

Научный руководитель:

Рахматов Ахмад Зайнидинович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Алиев Райимжон
доктор технических наук, профессор

Рахманов Анваржон Таджибаевич
доктор технических наук, доцент

Ведущая организация:

Ферганский политехнический институт

Защита диссертации состоится «___» «_____» 2020 г. в ___ часов на заседании Научного совета DSc.30.08.2019.FM/Т.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г.Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20.

Тел: (+99871) 248-79-94, факс: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за №_____) по адресу: 100057, Узбекистан, г.Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-59

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2019 г.
(реестер протокола рассылки № _____ от _____ 2019 г.).

Ш.Б. Утамурадова,
Председатель Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф-м.н., профессор

С.С.Насриддинов,
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.т.н., доцент

А.Т.Мамадалимов,
Председатель Научного семинара
Научном совете по присуждению
ученых степеней,
д.ф-м.н., академик.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире на сегодня в бурно развивающейся области силовой электроники одним из перспективных направлений является оптимизация функциональных параметров высокочастотных диодов средней мощности, предназначенных для выпрямления, инвертирования, регулирования переменного и постоянного токов, стабилизации питающих сетей, защиты радиоэлектронной аппаратуры от импульсных перенапряжений. В этом аспекте с целью повышения быстродействия и снижения потерь полезного сигнала кремниевых высокочастотных диодных структур, выявление путей уменьшения дифференциального сопротивления, времени жизни неосновных носителей, а также токов утечки и сохранение заданных пробивных напряжений является одним из важнейших задач.

На сегодняшний день в мире большое внимание уделяется разработке способов управления ключевыми параметрами высокочастотных силовых диодов. В этом плане осуществление целевых исследований, в частности, реализация нижеприведенных направлений считаются одними из важных задач: установление зависимости механизмов токопереноса от параметров базовой области при воздействии радиации, определение физических критериев обеспечивающих заданную закономерность динамики изменения дифференциального сопротивления, выяснение взаимосвязи токовых характеристик с процессами падения напряжения и пробоя, установление механизмов и причин увеличения токов утечки и выработка путей их устранения.

В Республике большое внимание уделяется прикладным исследованиям, приоритетным направлениям развития науки, внедрению результатов научных исследований. В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы¹ особое внимание уделяется вопросам стимулирования научно-исследовательской и инновационной деятельности, созданию эффективных механизмов прикладного применения достижений научно - инновационной деятельности, особенно, вопросам разработки импортозамещающих полупроводниковых приборов различного назначения. Особо следует отметить, что данная деятельность осуществляется в рамках поддержки активного предпринимательства, инновационных идей и технологий, нацеленного на получение научных результатов, отвечающих современным требованиям научного развития. В этом плане особое внимание уделяется вопросам исследования физических процессов, определяющих функциональные свойства и стабильность рабочих режимов полупроводниковых структур. В свою очередь, для электротехнической отрасли разработка методов управления ключевыми параметрами высокочастотных кремниевых диодов, предназначенных для использования в устройствах управления технологическими процессами и защиты радиоэлектронной

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

аппаратуры имеет важное значение, в том числе для повышения их конкурентоспособности.

Данное диссертационное исследование в определённой степени служит выполнению задач, обозначенных в постановлениях Президента Республики Узбекистан ПП-4348 «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала отрасли» от 30 мая 2019 года, ПП-3855 «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности» от 14 июля 2018 года и ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

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

Степень изученности проблемы. Возрастающая из года в год потребность в диодах, предназначенных для выпрямления высокочастотного переменного тока, стабилизации рабочего напряжения, защиты электротехнического оборудования от выбросов импульсных мощностей, не может быть удовлетворена применением производимых промышленностью кремниевых выпрямительных и выпрямительно - ограничительных диодов, так как они имеют сравнительно большие времена переключения ($10^{-6} \div 10^{-4}$ сек.), а также низкое быстродействие. Для придания им требуемых электрических параметров их подвергают радиационному и термическому воздействию определенной дозой и временем экспозиции в зависимости от конструкции и конкретной структуры.

Ученые из США² Douglas Jones B.Sc. и Douglas Schumacher B.S. (Университет Вашингтон) путем воздействия на промышленные диоды марки 1N2482 электронами дозой 6, 8, 12 и 18 MeV установили, что оптимальной дозой, обеспечивающей наилучшие параметры, является 8 MeV (0,5 Mrad), а повышение энергии до 18 MeV приводило ухудшению параметров

Учеными из Китая³ Jia Yun-Peng, Zhao Xuan, Yang Fei и другими для повышения быстродействия кремниевых диодов с быстрым восстановлением осуществлялось радиационное воздействие электронами и на основе измере-

² Douglas Jones B. Sc. Douglas Schumacher B. S. Technical innovation and note Stabilization of radiation damage in a silicon diode radiation detector. Inter-national Journal of Radiation Oncology Biology Physics. Volume 6, Issue 1, January 1980, Pages 109-110.

³ Jia Yun-Peng, Zhao Bao, Yang Fei, Wu Yu, Zhou Xuan, Li Zhe and Tan Jian Effekt of combined platinum and electron on the temperature dependence of forward voltage in fast recovery diode // Chinese Physical Society B 2015, Volume 24 Namber (12): 126104

ний (DLTS) характеристик найден глубокий уровень E_d ($E_c-0.376$ эВ), который ответственен за повышение быстродействия.

С целью снижения прямого падения напряжения до расчетных значений $\sim 1,0$ В под руководством профессора Института Физики полупроводников НАН Украины Р.В. Конаковой⁴ совместно с каракалпакскими учеными во главе с профессором К. А. Исмайловым диффузионные кремниевые диоды облучались гамма – квантами дозой $5 \cdot 10^5$ Gy. В результате в диодах были получены ВАХ с коэффициентом неидеальности, равным 1.17, что, практически соответствует теоретическому значению.

Профессором из Узбекистана А.В. Каримовым⁵ ведутся научные изыскания по изучению тепловых процессов в высокочастотных силовых диодах при импульсном воздействии. А под руководством профессора А.З. Рахматова^{6,7} разработаны инженерные методы расчёта основных параметров ограничителей напряжения и мощных высокочастотных диодов, позволяющие прогнозировать параметры изделий после радиационного воздействия, подбирать оптимальную дозу облучения и, тем самым, повысить воспроизводимость технологического процесса и выход годных приборов. Также проведены сравнительные исследования эксплуатационных параметров кремниевых p^+-n-n^+ - структур при воздействии гамма и электронного облучения и установлено, что они являются взаимозаменяемыми и путем подбора условий воздействия можно повысить быстродействие p^+-n-n^+ -структур на порядок (до 50 н сек.)

К настоящему времени стали применяться различные подходы улучшения характеристических параметров выпрямительно-ограничительных диодов, в частности, радиационное облучение, легирование примесями, создающими рекомбинационные центры, конструктивно-технологические подходы.

Однако процесс оптимизации функциональных параметров требует выбора условий и режимов воздействующих факторов с учетом конструкции и конкретной структуры диода, в частности, применительно к кремниевым диодам средней мощности.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно исследовательских работ фундаментальных и прикладных проектов Физико-технического института АН РУз по теме под номером ФА-А3-Ф026 «Разработка

⁴ Болтовец, К.А. Исмайлов, Р.В. Конакова, М.Б. Тагаев Кремниевые диффузионные диоды с вольт-амперными характеристиками, близкими к идеальным // Журнал технической физики Санкт - Петербург 1998 том 68 №10 С. 131-132

⁵ Каримов А.В., Каримов А.А., Рахматов А.З., Дадаматова К.Т. Моделирование тепловых процессов высокочастотного кремниевого $p-i-n$ -диода // Физическая инженерия поверхности, Харьков. 2014. Т.12. № 1. –С.14-19

⁶ Рахматов А.З., Ташметов М.Ю. Каримов А.В. Технология изготовления полупроводниковых высокочастотных и ограничительных диодов // под редакцией академика Р.А.Муминова. Изд-во: «Фан ва технология», Ташкент 2018. С.210

⁷ Рахматов А.З., Ташметов М.Ю., Сандлер Л.С. Влияние проникающей радиации на параметры кремниевого планарного высокочастотного высоковольтного выпрямительного диода. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. (98) – Киев, 2011.-№4.-С. 26-33.

способов оптимизации эксплуатационных параметров кремниевых силовых полупроводниковых приборов» (2015-2017 гг.) и ФА-Атех-2018-225 «Разработка безкорпусных выпрямительно-ограничительных диодов для электронных блоков защиты электротехнических приборов» (2018-2020 гг.).

Целью исследования является разработка способов управления и корректировки функциональных параметров кремниевых диодов средней мощности путем терморadiационного воздействия.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие **задачи**:

разработать пути управления параметрами планарных кремниевых диодов средней мощности;

изучить влияние внешних воздействий (радиации, температуры) на токи утечки кремниевых планарных диодов и определить механизмы токопереноса;

исследовать влияние границы металlostеклянных спаев кремниевых планарных диодных структур на токовые характеристики;

разработать и осуществить монтаж измерительного стенда токовых характеристик выпрямительно-ограничительных диодов;

изучить вольтамперные характеристики в режиме покоя и пробоя исследуемых кремниевых диодов.

Объектом исследования являются кремниевые эпитаксиально-диффузионные диоды средней мощности на основе $p^{++}nn^{+}n^{++}$ и диффузионные диоды на основе $p^{++}pnn^{++}$ -структуры, а также диффузионные диоды с поверхностным поликристаллическим слоем на основе $p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ -структуры.

Предметом исследования являются физические процессы при воздействии радиационного и теплового воздействия, механизмы формирования токовых характеристик.

Методы исследований. В процессе выполнения диссертационной работы применялись технологические методы радиационного воздействия и термической обработки, методы измерения электрических и тепловых параметров, как вольтамперные, вольтфарадные, временные характеристики (температура, напряжение, токи, емкости, время жизни неосновных носителей и время восстановления обратного тока).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлено, что появление токов утечки через окисные прослойки связано с увеличением концентрации электронов под окисным слоем за счет избыточных положительных зарядов, которые нейтрализуются путем радиационного облучения гамма - квантами;

предложен способ совмещения стабилизирующего отжига с процессом облучения гамма квантами и электронами, позволяющее обеспечить оптимальное сочетание (уменьшение прямого дифференциального сопротивления и обратных токов утечки) вольтамперных характеристик кремниевых диодов с быстродействием;

экспериментально показано, что при облучении эпитаксиально-диффузионных диодов средней мощности гамма - квантами дозой $\Phi_\gamma = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ вольтамперные характеристики образуют два участка, обусловленные преобладанием диффузионного механизма токопереноса ($m_1=1.1$) и влиянием последовательного сопротивления ($m_1=1.5$), а падения прямого напряжения уменьшается до 10%, что связано с преимущественным уменьшением времени жизни неосновных носителей при незначительном изменении градиента примесей (с $5,25 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$ до $5,07 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$);

впервые установлено, что при облучении электронами диффузионных диодов падение напряжения на начальном участке роста тока уменьшается (на 0.15В), а при напряжениях свыше 0.45В увеличивается за счет влияния сопротивления базы, при этом времена жизни неосновных носителей уменьшаются на порядок, повышая быстродействие;

впервые разработана универсальная микросхема на основе каскада с динамической нагрузкой на полевом транзисторе, предназначенная для питания стабилизированным током, а также для измерения статических характеристик полупроводниковых структур с резко нарастающим током.

Практические результаты исследования. Разработаны способы управления функциональными параметрами кремниевых диодов средней мощности путем терморadiационного воздействия, которые представляют интерес для улучшения эксплуатационных параметров производимых кремниевых диодов средней мощности.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением современных научных и технологических методов контроля параметров и характеристик полупроводниковых приборов. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием комплекса независимых и взаимодополняющих методов измерения и обработки данных.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они способствуют расширению физических представлений о процессах, протекающих в высокочастотных силовых диодах при воздействии радиации и термической обработки.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что применение разработанных методов и режимов термической обработки диодных структур позволит снизить разброс параметров и повысить эффективность работы.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов разработки способов управления функциональными параметрами кремниевых диодов средней мощности:

по расширению функциональных возможностей каскада с динамической нагрузкой на полевом транзисторе получен патент на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан: «Универсальная микросхема» (№ IAP 05540 от 31.01.2018). Использование полученных результатов позволило разработать прецизионный регулятор тока

обеспечивающий измерение статических характеристик полупроводниковых структур с резко нарастающим током.

результаты по облучению гамма-квантами кремниевых диодов использованы в АО «Новосибирский завод полупроводниковых приборов с ОКБ» при производстве диодов средней мощности с p^+n-n^+ -структурой (Справка АО «НЗПП с ОКБ» № 04/401-188/3158 от 25 апреля 2019 года.). Использование научных результатов позволило снизить токи утечки диодов до одного порядка.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации обсуждались на 2 международных и 3 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 13 научных трудов, из них 7 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Текст диссертации состоит из 113 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, показана степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимости, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также дана информация об объеме и структуре диссертации.

В первой главе под названием **«Выпрямительно-ограничительные диоды: современное состояние и тенденции развития»**, рассмотрены конструкции выпрямительно-ограничительных и выпрямительных диодов и их основные электрические характеристики, проанализированы различные подходы улучшения характеристических параметров выпрямительно-ограничительных диодов, а также выявлены некоторые особенности обеспечения выдерживаемой мощности ограничительного диода. На основе анализа имеющихся литературных данных сформулирована постановка задачи.

Во второй главе **«Технико-технологические особенности объектов исследования, а также методики их исследования»** приведены технико-технологические особенности процессов изготовления выпрямительно-ограничительного и выпрямительного диодов, методы исследования их ключевых параметров до и после радиационного облучения, а также описаны основы принципа создания микросхемы-регулятора тока, предназначенного для измерения вольтамперных характеристик исследуемых кремниевых структур.

На основе анализа существующих технологий в АО «FOTON» с целью разработки способов управления функциональными параметрами кремниевых диодов средней мощности, повышения надежности и стабильности рабочего режима, увеличения их срока службы были изготовлены наиболее широко востребованные выпрямительно-ограничительные и выпрямительные диоды различной конструкции в зависимости от типономинала, рассчитанные на рабочие токи 0.3 А и 1А, от 1А до 10А.

В зависимости от выбранной примеси диффундируемого элемента задается начальная температура и длительность процесса диффузии. Кроме того, в зависимости от структуры формируемого диода выбирается последовательность этапов диффузии. Для проведения диффузии используется печь СДО 125/13-15, нагреваемая со скоростью 5 °С/мин. Далее, в зависимости от получаемых слоев выбирается требуемый режим диффузии диффундируемого материала. Технологии изготовления каждого диода в соответствии с типономиналами имеют свои особенности и конкретные технологические условия. В **группе А** эпитаксиально-диффузионные диоды на основе кремниевой $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структуры изготовлены на подложке кремния с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см толщиной 380 мкм с выращенным слоем n -типа с удельным сопротивлением 4 Ом·см и толщиной 22 мкм. (Следует отметить

что, кремниевые структуры с готовыми выращенными эпитаксиальными слоями получены у организации соисполнителя). Далее на поверхности слоя и к тыльной поверхности подложки диффузией бора и фосфора, соответственно, получены сильнолегированные области, на основе которых изготовлены диодные структуры с площадями $16 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, рис.1а.

В группе Б исследуемые $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структуры получены эпитаксиальным наращиванием слоя, легированного фосфором n -типа с удельным сопротивлением $7,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ толщиной слоя 35 мкм и с площадью $36 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$. Получение диффузионного слоя p -типа с толщиной $6,5 \div 7,5 \text{ мкм}$, легированного бором, осуществилось диффузией при $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ на одной поверхности также сильнолегированной сурьмой подложки $n\text{Si}$ с удельным сопротивлением $0.01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ толщиной 380 мкм . Далее, диффузией фосфора на тыльные поверхности на глубине 4.5 мкм получены сильнолегированные области n^{++} типа, $2-3 \text{ мкм}$ рис.1б.

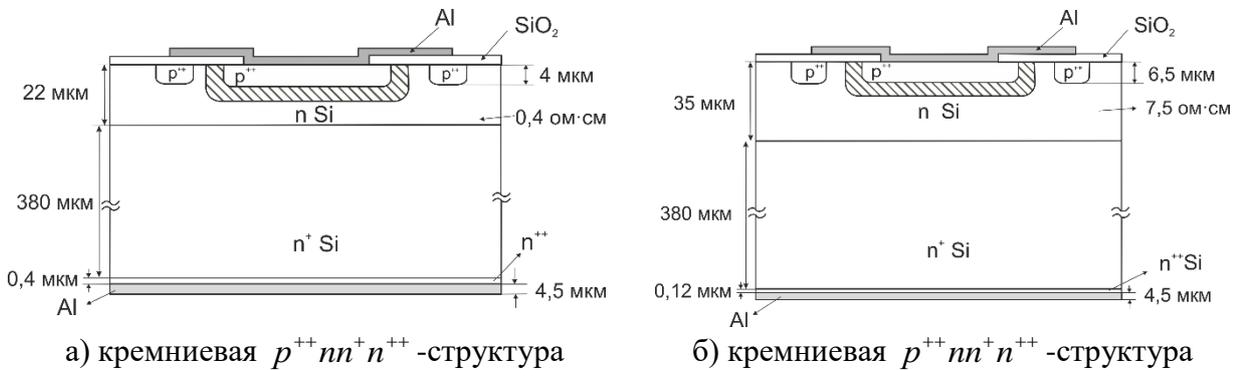


Рис.1. Поперечный разрез кремниевых эпитаксиально-диффузионных диодов группы А (а) и группы Б (б)

Диффузионные диоды на основе кремниевой $p^{++}pnn^{++}$ -структуры с $p^{++}p$ областями получены диффузией алюминия и бора на глубину 115 мкм , а диффузией бора на глубину 50 мкм получена область p^{++} , рис. 2. Далее, диффузией фосфора на тыльные поверхности на глубине 45 мкм получены сильнолегированные области n^{++} типа.

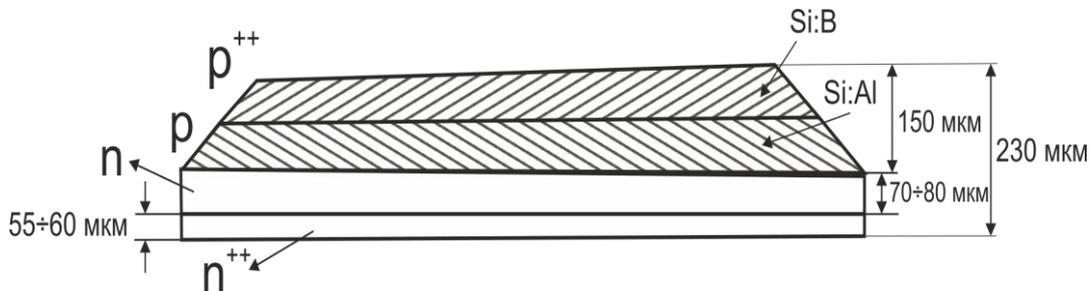


Рис.2. Поперечный разрез диффузионных диодов на основе кремниевых $p^{++}pnn^{++}$ -структур

Диодные $p_{pc}^{++} p^{++} p^{+} nn^{+}$ -структуры, рис. 3, получены выращиванием монокристаллического слоя толщиной 30 мкм и поликристаллического слоя толщиной 85 мкм с удельными сопротивлениями 0.01 Ом·см на подложке n -типа с удельными сопротивлениями 5,0 Ом·см. Далее, в процессе диффузии фосфора на тыльную поверхность подложки на глубину 2-3 мкм за счет диффузии бора из эпитаксиального слоя p^{++} -типа получена область p -типа. Затем диффузией фосфора на тыльную поверхность на глубину 3.0 мкм получена сильнолегированная область n^{+} типа, на основе которых изготовлены диодные структуры с одинаковыми площадями 0,54 см².

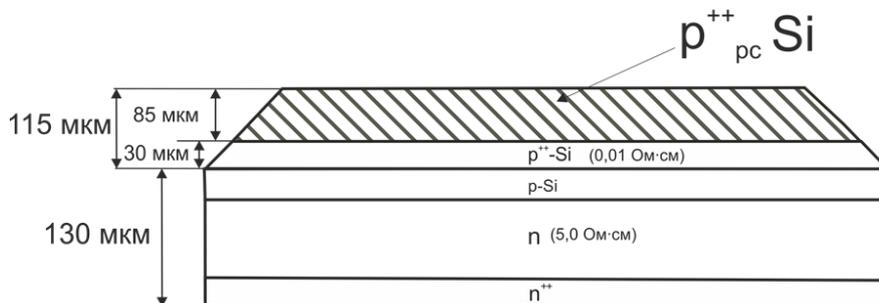


Рис.3. Поперечный разрез диффузионных кремниевых $p_{pc}^{++} p^{++} p^{+} nn^{+}$ -структур с поликристаллическим p_{pc}^{++} слоем

Для исследования токовых характеристик и дифференциального сопротивления выпрямительно-ограничительных диодов разработан измерительный стенд на основе микросхемы⁸ с динамической нагрузкой на полевом транзисторе. Измерительный стенд основан на установленной зависимости тока стабилизации полевого транзистора от управляющего напряжения, падающего на смещающем резисторе, рис. 4а.

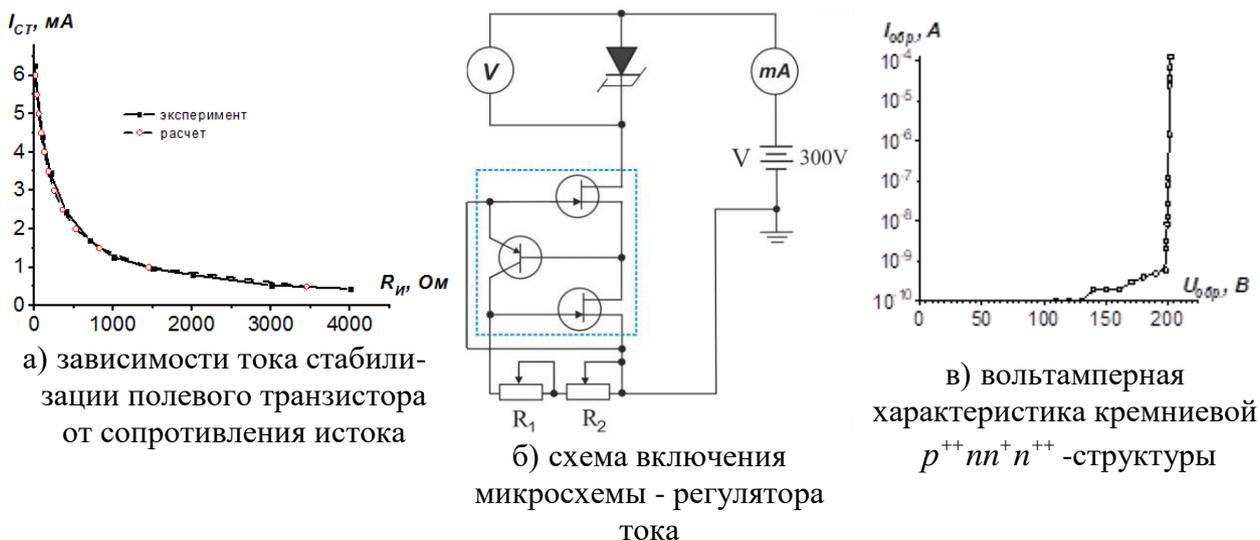


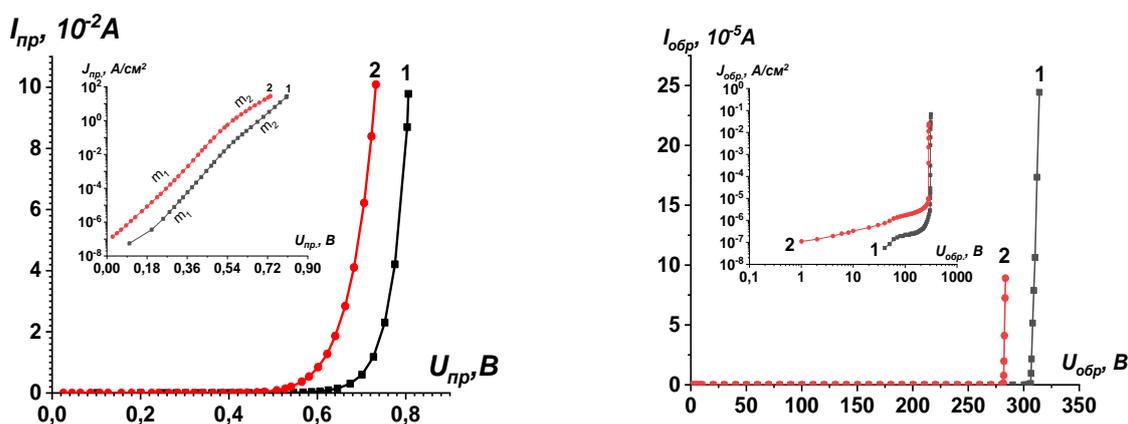
Рис.4. Основы принцип работы микросхемы-регулятора тока и ВАХ измеренная с его помощи

⁸ Патент на изобретение № IAP 05540 Бюл., №2 от 28.02.2018г. «Универсальная микросхема» / Лутпуллаев С.Л., Сайдумаров М.А., Каримов А.В., Рахматов А.З., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Кулиев Ш.М.

В нем (рис. 4б) регулировка тока через структуру осуществляется с шагом не менее десяти точек на каждом порядке, что обеспечивает высокую точность измерения вольтамперных характеристик приборов с резким подъемом тока и нелинейной зависимостью тока от напряжения (например, стабилитронов, лавинных диодов, тиристоров и диодов). На рис. 4в приведена снятая с помощью каскада с динамической нагрузкой вольтамперная характеристика выпрямительного диода средней мощности с $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структурой и с различным напряжением пробоя.

В третьей главе под названием «Влияние радиационных воздействий на вольтамперные характеристики и механизмы токопереноса кремниевых диодов» приведены результаты исследования вольт-фарадных и статических характеристик, а также прямого падения напряжения и обратных токов кремниевых эпитаксиально-диффузионных $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -диодов, установленных в металлостеклянный и пластмассовый корпусы под воздействием гамма облучения, с целью выявления действующих факторов в зависимости от типа корпусирования.

На основе изучения вольтамперной характеристики диодов, установленных в пластмассовый корпус до и после гамма облучения с дозой 510^{16}см^2 установлено, что прямые падения напряжения уменьшаются от 0,8В до 0,72В (рис. 5а). Зависимости тока от напряжения описываются экспоненциальной зависимостью с коэффициентом неидеальности на начальном участке равным $m_1=1.14$, соответствующим диффузионному механизму токопереноса и далее сменяется показателем равным $m_2=1.5$. Наблюдаемое уменьшение прямого падения напряжения на 10%, связано с уменьшением времени жизни и незначительным изменением градиента концентрации примеси.



а) в вставке: прямая вольтамперная характеристика в полулогорифмическом масштабе

б) в вставке: обратная вольтамперная характеристика в двойном логорифмическом масштабе

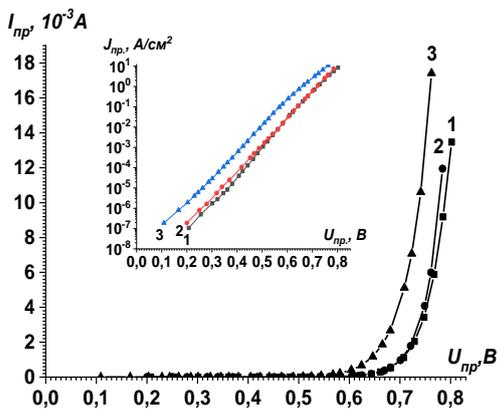
Рис.5. Вольтамперная характеристика $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -диодов, установленных в пластмассовый корпус до (кривая 1) и после гамма облучения (кривая 2)

Экспериментально показано, что в режиме запираания p - n -перехода после гаммы облучения обратные токи несколько увеличивается, сохраняя ла-

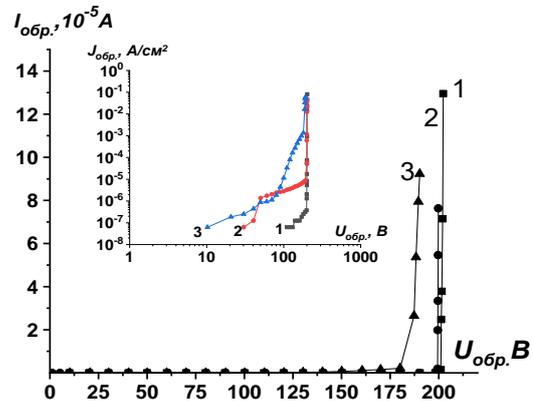
винный механизм пробоя, рис.5б. При этом механизм токопереноса так и пробоя до и после гаммы облучения остается неизменными. Снижение прямого падения напряжения исключает потери мощности, обеспечивая стабильный режим работы диода.

Из исследований вольтамперной характеристики исследуемых диодов, (рис.6а) установленных в металлостеклянный корпус выявлены, что падения прямого напряжения в них до размещения и после установки в корпуса для рабочих токов до 10 мА имеют близкие значения порядка 0.8 В. В дальнейшем, после гамма облучения и размещения диодных структур в корпуса, значения $U_{пр.}$ уменьшаются на 10%. Наблюдаемое уменьшение падения напряжения (в результате гамма облучения дозой свыше $\Phi_\gamma = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) для заданного тока 10 мА от 0.8В до 0.74В можно объяснить образованием радиационных центров, как и в случае облучения, быстрыми электронами дозой $(2 \div 8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, силовых диодов и $p-i-n$ -структур, которые приводят к изменению градиента концентрации основных носителей.

Механизм токопереноса до и после гаммы облучения определяется преобладанием диффузионных процессов с показателем коэффициента неидеальности равным 1,28. При этом пробойные напряжения уменьшаются незначительно. Однако в предпробойной области появляется токи утечки с линейной зависимостью тока от напряжения, рис. 6б. Зависимости обратного тока от напряжения в кремниевой $p^+nn^+n^{++}$ -структуре имеет свои особенности, рис. 6б. После установки в корпус появляется участок тока утечки, связанный с протеканием тока через изолятор, залитый между корпусом и выводным электродом, который образует параллельно соединенный к выпрямляющему переходу переход металл-изолятор-металл.



а) в вставке: прямая вольтамперная характеристика в полулогорифмическом масштабе



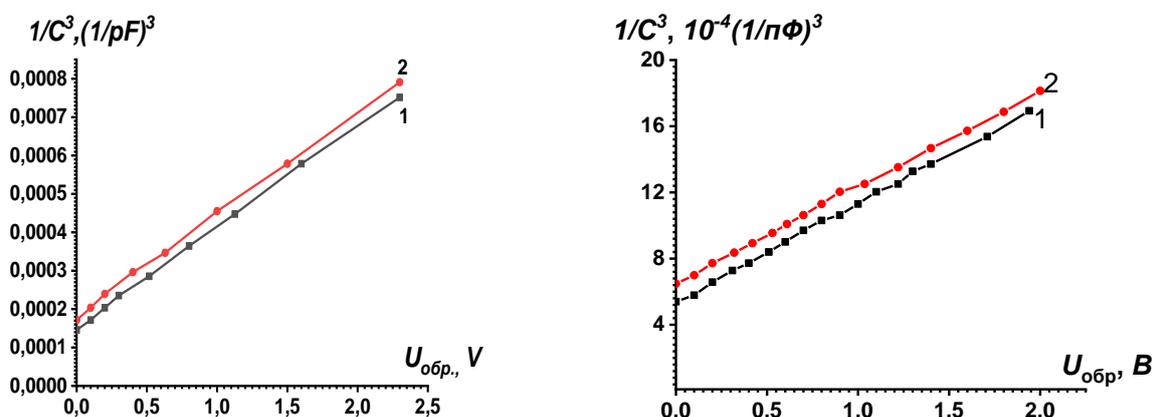
б) в вставке: обратная вольтамперная характеристика в двойном логорифмическом масштабе

Рис.6. Зависимости тока от напряжения в кремниевой $p^+nn^+n^{++}$ -структуре установленной в металлостеклянный корпус на различных этапах готовности прибора: 1-исходная; 2-установлен в корпус; 3-после облучения

Вместе с тем в режиме близком к пробойному появление дополнительного участка с показателем степени равным 8 и незначительное уменьшение

напряжения пробоя можно связать с пробойными явлениями через радиационно-обработанный изолятор, в данном случае возможен микроплазменный пробой в изоляторе. Такая тенденция наблюдается во всех исследованных структурах. Откуда следует основополагающий вывод, что радиационную обработку диодных структур рекомендуется проводить до установки в корпус, так как, при облучении структуры в готовом корпусе происходят процессы образования избыточных носителей, которые до облучения находятся в электрически неактивном состоянии.

Зависимости емкости от запирающего напряжения в координатах $1/C^3 \sim U$ дает прямую линию (рис.7), подтверждая плавность $p-n$ -перехода, обусловленного градиентом концентрации носителей заряда в базовой области в кремниевой $p^{++}nn^+n^{++}$ -структуре. Градиент концентрации примеси до и после гамма облучения имеет незначительное различие не зависимо от конструкции пластмассового (до облучения $a=5,25 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$, после гамма облучения $a=5,07 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$) или металлического (до облучения $a=6,3028 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$, после гамма облучения $a=6,165 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-4}$) корпуса.



а) установлен в пластмассовый корпус ($S=36 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$)

б) установлен в металлостеклянный корпус ($S=16 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$)

Рис.7. Зависимости емкости от запирающего напряжения кремниевых диодных $p^{++}nn^+n^{++}$ -структур с различной площадью

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что в кремниевой диодной $p^{++}nn^+n^{++}$ -структуре, подвергнутой гамма-облучению дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, падения прямого напряжения уменьшаются до 10% за счет преимущественного уменьшения времени жизни неосновных носителей при незначительном изменении градиента примесей. Шунтирование $p-n$ -перехода диодной структуры переходом металл-изолятор-металл приводит к незначительному снижению напряжения пробоя, а после радиационного воздействия пробойным явлениям в изоляторе.

В четвертой главе под названием «Способы управления функциональными параметрами кремниевых диодов средней мощности», приведены результаты изучения влияния электронного облучения и термической обработки на статические характеристики и механизмы радиационной чувст-

вительности кремниевого диффузионного диода с $p^{++}pnn^{++}$ -структурой, а также для проведения сравнительного анализа диффузионная $p^{++}pnn^{++}$ -и эпитаксиально-диффузионная $p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ -структура с поликристаллическим слоем подвержены гамма облучению и рассмотрены их вольтамперные и вольтемкостные характеристики.

На основе исследования влияния электронного облучения в широком интервале доз от $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ на диффузионные диоды установлено, что падения прямого напряжения монотонно увеличиваются от $0,92 \div 0,98 \text{ В}$ за счет образования радиационных центров в базовой области исследуемых структур (рис. 8а). При этом времена жизни неосновных носителей уменьшаются на порядок (рис. 8б).

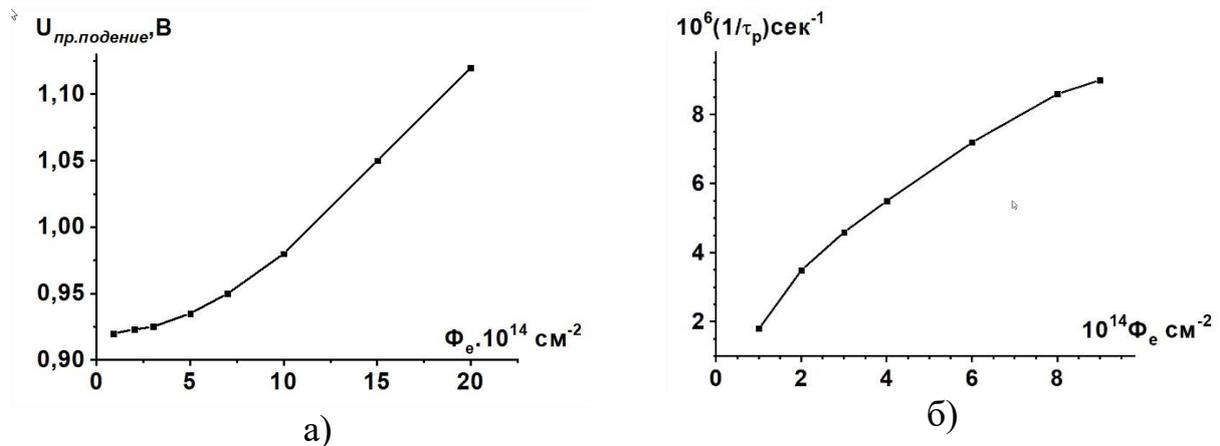
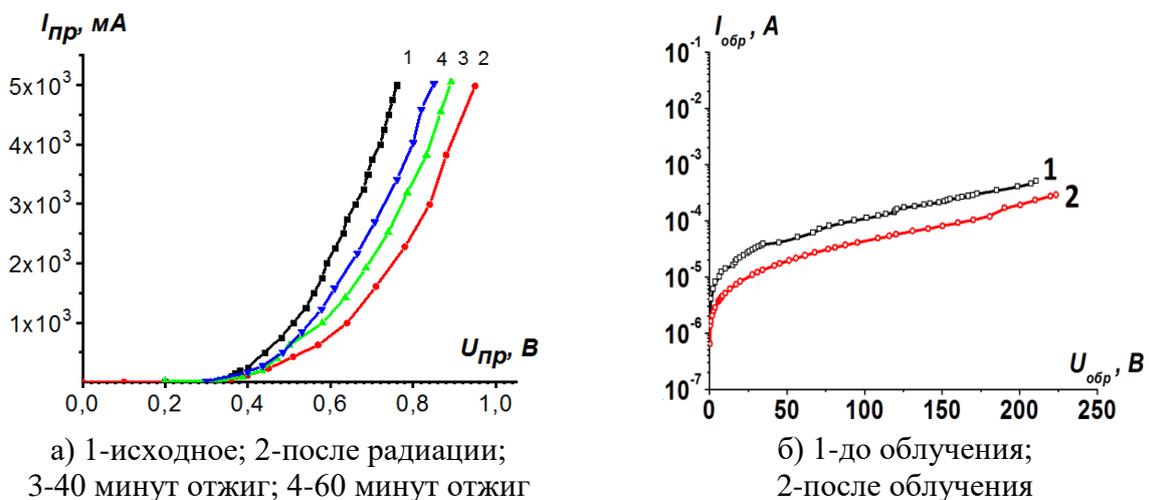


Рис.8. Зависимости прямого падения напряжения (а) и времени жизни неосновных носителей (б) от потока электронов в кремневой $p^{++}pnn^{++}$ -структуре

С другой стороны, облучение диффузионных диодов электронами с фиксированной дозой $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ приводит к увеличению прямого падения напряжения до $0,9 \text{ В}$, рис. 9. При этом последующий термический отжиг, про-



а) 1-исходное; 2-после радиации; 3-40 минут отжиг; 4-60 минут отжиг

б) 1-до облучения; 2-после облучения

Рис.9. Вольтамперная характеристика кремневой диодной $p^{++}pnn^{++}$ -структуры

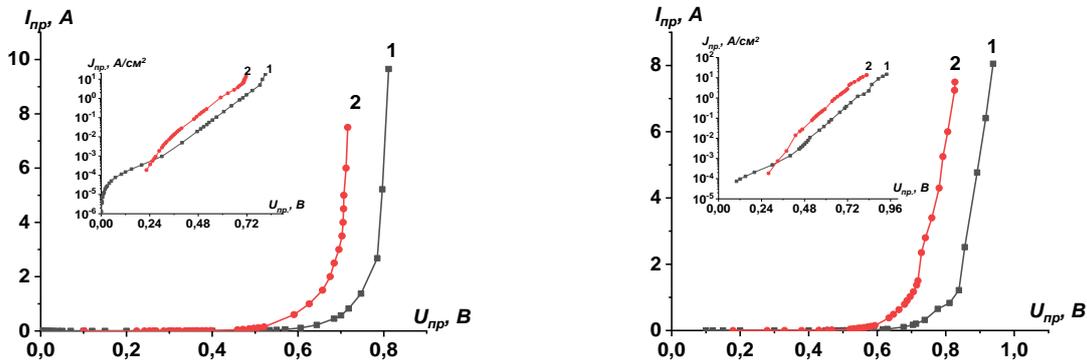
веденный галогенной лампой при 90°C в специальной камере, исследуемой диодной структуры в течение 40 минут приводит к снижению прямого падения напряжения до 0.84В и далее после 60 минут уменьшается до 0.82 В.

Наблюдаемое уменьшение прямого падения напряжения объясняется нейтрализацией неустойчивых радиационных центров в базовой области исследуемых структур.

Аналогично в режиме прямого смещения кремниевого $p^{++}pnn^{++}$ -диода до и после термической обработки галогенной лампой, маркой E27, в специальной камере в течение 5 часов при 90 °С, наблюдается смещение вольтамперной характеристики в область меньших напряжений, а обратные токи уменьшаются на полпорядка, рис. 9б. При этом после электронного облучения токи насыщения увеличиваются, а зависимости тока от напряжения описываются экспоненциальной зависимостью с коэффициентом неидеальности равным 1.08, что соответствует диффузионному механизму токопереноса, а уменьшение прямого падения напряжения создает условия для увеличения выдерживаемой импульсной мощности. Здесь следует отметить что, значения коэффициента неидеальности (m) найдены из наклона вольтамперной характеристики в полулогорифмическом масштабе:

$$m = \frac{q}{kT} \frac{\Delta \log I_{np}}{\Delta U_{np}} \quad (1)$$

На основе исследования влияния гамма облучения на диффузионные выпрямительно-ограничительные диоды с $p^{++}pnn^{++}$ и $p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ -структурой установлено, что прямые вольтамперные характеристики после облучения смещаются в область меньших напряжений, приводя к уменьшению падения прямого напряжения с 0,8 до 0,72 В, (рис.10а,б) и 0,89 до 0,78 В) соответственно. Наблюдаемая зависимость вольтамперной характеристики обусловлена уменьшением времени жизни неосновных носителей на порядок, а также за счет изменения градиента примеси в $p^{++}pnn^{++}$ -структуре.



а) в вставке: прямая вольтамперная характеристика в полулогорифмическом масштабе для $p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ -структуры

б) в вставке: прямая вольтамперная характеристика в полулогорифмическом масштабе для $p^{++}pnn^{++}$ -структуры

Рис.10. Прямая вольтамперная характеристика кремниевой $p_{pc}^{++}p^{++}p^{+}nn^{+}$ - и $p^{++}pnn^{++}$ -структуры: 1-до облучения, 2-после облучения

Зависимости тока от напряжения описываются экспоненциальной зависимостью с коэффициентом неидеальности равным 2.0 и 1.8, соответственно, что подтверждает рекомбинационный механизм токопереноса. Токи насыщения после воздействия гамма-излучением имеют тенденцию к снижению.

Зависимость емкости от запирающего напряжения для кремниевых диффузионных диодов с поликристаллической прослойкой на основе $p_{sc}^{++} p^{++} pnn^{+}$ структуры в координатах $1/C^2 \sim V$, рис.11а, дает прямую линию, свидетельствуя о резкости р-п перехода, а в диффузионной $p^{++} pnn^{++}$ -структуре до и после облучения вольтфарадная характеристика сохраняет линейную зависимость в координатах $1/C^3 \sim V$, рис.11б, подтверждая плавность р-п-перехода. При этом градиент примесей в $p^{++} pnn^{++}$ -структуре уменьшается от $8,58 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4}$ до $2,384 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4}$.

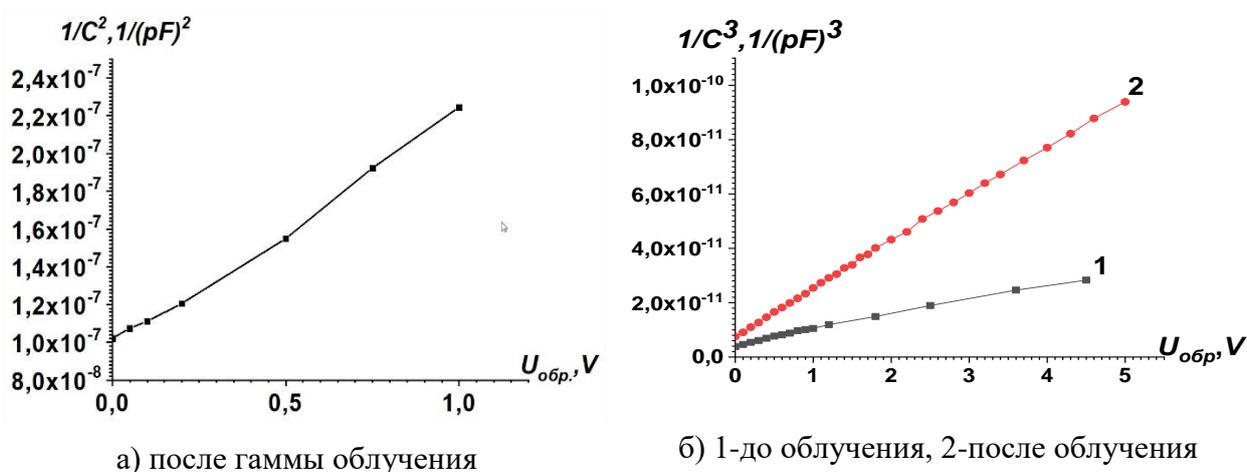


Рис. 11. Зависимости емкости от запирающего напряжения кремниевых диодных $p_{sc}^{++} p^{++} pnn^{+}$ (а)- и $p^{++} pnn^{++}$ -структуры (б)

Таким образом, результаты исследования вольтамперных характеристик кремниевой диодной $p^{++} pnn^{++}$ -структуры предварительно облученной флюенсами быстрых электронов показали, что после термической обработки как прямое падение напряжения, так и токи утечки диодов уменьшаются, создавая условия для увеличения выдерживаемой импульсной мощности. Также предложен способ совмещения стабилизирующего отжига с процессом облучения (электронами), который позволил обеспечить оптимальное сочетание (уменьшение прямого дифференциального сопротивления и обратных токов утечки) падения прямого напряжения и обратных токов с дозой облучения и временем термической экспозиции кремниевых диодов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработки способов управления и корректировки функциональных параметров кремниевых диодов средней мощности путем терморadiационного воздействия сделаны следующие выводы:

1. Впервые разработана универсальная микросхема на основе каскада с динамической нагрузкой на ПТ, предназначенная для питания стабилизированным током, а также для измерения статических характеристик полупроводниковых структур с резко нарастающим током.

2. Выявлено, что воздействие гамма-излучения на кремниевую диодную $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структуру приводит к уменьшению прямого падения напряжения до 10% с сохранением диффузионного механизма токопереноса до напряжения 0.55В и далее начинает влиять последовательное сопротивление приводя к увеличению коэффициента неидеальности до 1.5.

3. Установлено, что наличие токов утечки в исходной $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структуре обусловлено образованием избыточных положительных зарядов под окисным слоем и параллельным соединением перехода металл-изолятор-металл к выпрямляющему переходу, приводя к уменьшению напряжения пробоя с 202 В до 188 В, а после радиационного воздействия дозой $5 \cdot 10^{16}$ см⁻², приводит к появлению дополнительного участка в предпробойной области с показателем степени равным 8 за счет микроплазменного пробоя в радиационно-обработанном изоляторе.

4. Результаты изучения вольтамперных характеристик кремниевой диодной $p^{++}pnn^{++}$ -структуры, предварительно облученной быстрыми электронами показали, что после термической обработки прямое падение напряжения ($U_{\text{прям}}$), а также токи утечки диодов уменьшаются, создавая условия для увеличения выдерживаемой импульсной мощности.

5. Наблюдаемое уменьшение дифференциального сопротивления и падения прямого напряжения диффузионного диода средней мощности, подвергнутого радиационному воздействию, можно объяснить тем, что при последующем термическом воздействии происходит нейтрализация радиационных центров. То есть, подбирая время экспозиции термического отжига можно управлять дифференциальным сопротивлением и падением напряжения диода, подвергнутого радиационному воздействию.

6. Процесс оптимизации параметров диффузионного диода заключается в том, что изменения падения прямого напряжения и емкостных характеристик при воздействии радиации возвращаются к исходным значениям по падению напряжения, а временные характеристики улучшаются до одного порядка (уменьшение времени жизни неосновных носителей) после соответствующего времени экспозиции термической обработки.

7. Установлено, что в кремниевой диодной $p^{++}nn^{+}n^{++}$ -структуре, подвергнутой гамма-облучению дозой $5 \cdot 10^{16}$ см⁻² падения прямого напряжения уменьшаются до 10% за счет изменения градиента концентрации основных носителей при малых напряжениях, а механизмы токопереноса во всех случаях остаются диффузионными.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc. 30.08.2019. FM / T.01.12 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND
MICROELECTRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE

KULIEV SHUKURULLO MUSTAFAEVICH

**THE DEVELOPMENT OF THE METHODS OF CONTROL OF FUNCTIONAL
PARAMETERS OF THE SILICON AVARABE POWER DIODES**

01.04.10-Physics of semiconductors

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

TASHKENT-2019

The subject of doctoral dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number B2018.3. PhD/T.843

The Dissertation was implemented at the Physical-Technical Institute.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.ispm.uz and on the website of “ZiyoNet” Information and Educational Portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor: **Rakhmatov Akhmad Zaynidinovich**
doctor of sciences in technics, professor

Official opponents: **Aliev Rayimjon**
doctor of sciences in technics, professor

Rakhmanov Anvarzhon Tajibaevich
doctor of sciences in technics, Associate Professor

Leading organization: **Ferghana Polytechnical institute**

The defense of the doctoral dissertation will be held on “____” _____ 2020, at _____ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.30.08.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, Conference Hall of the SRIPSM under the NUU).

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No.____). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

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

Sh.B. Utamuradova
Chairman of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Professor

S.S. Nasriddinov
Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees, Doctor of
Technical Sciences, Associate Professor

A.T. Mamadalimov
Chairman of the Scientific Seminar of the
Scientific Council on Award of Scientific
Degrees, Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Academician

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The purpose of the research is the development of methods of management and adjustment of functional parameters of silicon diodes of medium power by thermoradiative effect.

The objects of the research are silicon planar and diffusion diodes of medium power based on $p^{++}nn^{+}n^{++}$, $p^{++}pnn^{++} - p_{pc}^{++}p^{++}pnn^{+}$ -structures of various designs and functional purposes.

The scientific novelty of the research consists of the following results:

It was established that the appearance of leakage currents through the oxide interlayers is associated with an increase in the electron concentration under the oxide layer due to positive positive charges that are neutralized by radiation radiation with gamma quanta;

a method for combining stabilizing annealing with the process of irradiation with gamma quanta and electrons is proposed, which made it possible to provide an optimal combination (reduction of the direct differential resistance and reverse leakage currents) of the current-voltage characteristics of silicon diodes with speed;

It was experimentally shown that upon irradiation of mediumpower gamma-ray epitaxial-diffusion diodes with quanta with a dose of $\Phi\gamma = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, the current-voltage characteristics form two sections due to the predominance of the diffusion mechanism of current transfer ($n_1=1.1$) and the influence of the series resistance ($n_1=1.5$), and the direct voltage drop decreases to 10%, which is associated with the predominant decrease in the lifetime of minority carriers with a slight change in the impurity gradient ($5.25 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-4}$ to $5.07 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-4}$);

it was found for the first time that when electrons are irradiated with diffusion diodes, the voltage drop in the initial portion of the current increase decreases (by 0.15V), and at voltages above 0.45V it increases due to the influence of the base resistance, while the lifetimes of minority carriers decrease by an order of magnitude, increasing speed;

For the first time, a universal microcircuit based on a cascade with a dynamic load on a field-effect transistor was developed, designed to supply with stabilized current, as well as to measure the static characteristics of semiconductor structures with a sharply increasing current.

Implementation of research results. Based on the results of the development of control methods and adjustment of the functional parameters of medium-power silicon diodes by means of thermal radiation exposure:

there were studied ways of expansion of functionality of the cascade with dynamic loading on the field transistor the patent for the invention of the Agency of intellectual property of the Republic Uzbekistan is taken out: "A universal chip" (No. IAP 05540 of 31.01.2018). Use of the received results allowed to develop the precision regulator of current providing measurement of static characteristics of semiconductor structures with sharply accruing current.

the results obtained from γ gamma-ray irradiation of silicon diodes were used at JSC “Novosibirsk Plant of Semiconductor Devices with Design Bureau” in the production of medium-power diodes with a p^+n-n^+ -structure (Certificate of JSC “NPSD with EDB” No. 04 / 401-188 of April 25, 2019.). The use of scientific results allowed to reduce the leakage currents of diodes to one order.

Approbation of results of a research. The main results of the dissertation were discussed at 2 international and 3 republican conferences.

Publishing results. On the topic of the dissertation, 13 scientific papers were published, of which 7 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of the dissertation, 1 patent for the invention was obtained.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and applications. The text of the dissertation consists of 113 pages.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1-часть

1. Патент на изобретение № IAP 05540. Бюл., №2 от 28.02.2018г. «Универсальная микросхема» / С.Л. Лутпуллаев, М.А. Сайдумаров, А.В. Каримов, А.З. Рахматов, Д.М. Ёдгорова, О.А. Абдулхаев, Ш.М. Кулиев.
2. А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова, А.З. Рахматов, А.А. Хакимов, А.А. Каримов, Ш.М. Кулиев. Влияние гамма облучения на прямое падение напряжения и обратные токи выпрямительного диода средней мощности // Вопросы атомной науки и техники. *Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*, 2019.- №3. С. 28-31 (01.00.00, № 17)
3. А.В. Каримов, А.З. Рахматов, Ш.М. Кулиев, А.А. Каримов, Б.М. Каманов. Исследование влияния нейтронного облучения на функциональные характеристики кремниевых p^+nn^+ -диодов // Вопросы атомной науки и техники. *Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*, 2019. - Вып. 1. С. 14-19. (01.00.00, № 17)
4. A. V. Karimov, A. Z. Rahmatov, D. M. Yodgorova, Sh.M. Kuliev, R. R. Bebitov. The Effect of Radiation On Fundamental Parameters Of A Silicon-Based Semiconductor Structure. // *World Journal of Engineering Research and Technology*, 2018, Vol. 4, Issue 1, 78-81. (№ 23, SJIF, IF = 0.326).
5. А.З. Рахматов, Ф.А. Гиясова, Ш.М. Кулиев, Р.Г. Закиров. Прецизионный регулятор тока на полевом транзисторе // *Computational Nanotechnology*. г. Москва № 3, 2018 г.с.53-58. (01.00.00, № 60).
6. А.В. Каримов, А.З. Рахматов, О.А. Абдулхаев, А.Ю. Хидирназарова, Ш.М. Кулиев, У.Х. Арипова. Управление падением напряжения кремниевого диода способом геттерирования // *Технология конструирования в электронной аппаратуре*. 2018, № 4. –С. 33-37. (01.00.00, №46)
7. А.З. Рахматов, А.Ю. Хидирназарова, Ш.М. Кулиев. Радиационно-термический способ управления дифференциального сопротивления кремниевого p^+pnn^+ -диода. // *Научно-технический журнал ФерПИ*, 2018. - Т22, С. 138-140. (05.00.00, № 20).
8. Karimov, A.Z. Rakhmatov, S.P. Skorniakov, D.M. Yodgorova, A.A. Karimov, Sh.M. Kuliev. On mechanism of radiative sensitivity of power diode direct voltage drop // *Radioelectronics and Communication Systems*, 2017, - Vol.60, - Issue 6, - pp 272-274. (№1, Web of Science IF=0.167)

2-часть

9. А.В. Каримов, А.З. Рахматов, Ш.М. Кулиев, О.А. Абдулхаев. Особенности микросхемы на основе каскада с динамической нагрузкой на полевом транзисторе / 4-я Международная конференция «Актуальные проблемы развития мировой науки». Киев. 30 март 2018. С.52-56.
10. А.В.Каримов, А.З.Рахматов, О.А. Абдулхаев, Ш.М. Кулиев, У.Х.Арипова. Прецизионный регулятор на полевом транзисторе / *Сборник научных*

статей «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» посвященный к 90-летию Национальной академии наук Беларуси и 25-летию МААН СНГ. Минск 2018, С. 284-290

11. Ш.М. Кулиев. Исследование зависимости электрических характеристик контактного материала от состава / Материалы конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах», НУУз, Ташкент, 1-2 февраль, 2017г, С.150-152
12. Ш.М. Кулиев. О параметрах силовых диодов / Республиканская научная конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния» Бухара 12-14 апреля 2016 г. С.179-180.
13. А.В. Каримов, А.З. Рахматов, Ш.М. Кулиев. Влияние термоотжига на падение напряжения в высокочастотном диоде / Материалы конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», Физико-технический институт АН РУз, Ташкент, 6-7 ноябрь, 2014г, С.84-86.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб,
ўзбек ва рус тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди. (16.12.2019йил).

