

**«ФИЗИКА-ҚУЁШ» ИЛМИЙ ИШЛАБ ЧИҚАРИШ БИРЛАШМАСИ
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ҒМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**«ФИЗИКА-ҚУЁШ» ИЛМИЙ ИШЛАБ ЧИҚАРИШ БИРЛАШМАСИ
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ**

РАХМАТОВ АХМАД ЗАЙНИДИНОВИЧ

**ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ ЮҚОРИ ЧАСТОТАЛИ ВА ЧЕКЛАГИЧ
ДИОДЛАР ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ,
УЛАРНИНГ ПАРАМЕТРЛАРИНИ ТЕРМО- ВА РАДИАЦИОН
ТАЪСИРДА ОПТИМАЛЛАШТИРИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси
(техника фанлари)**

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2014

Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской диссертации
Content of the abstract of doctoral dissertation

Рахматов Ахмад Зайнидинович Яримўтказгичли юқори частотали ва чеклагич диодлар тайёрлаш технологиясини ишлаб чиқиш, уларнинг параметрларини термо- ва радиацион таъсирда оптималлаштириш.....	3
Рахматов Ахмад Зайнидинович Разработка технологии изготовления полупроводниковых высокочас- тотных и ограничительных диодов, оптимизация их параметров при термо- и радиационном воздействии.....	29
Rakhmatov Akhmad Zaynidinovich Development of semiconductor high-frequency and suppressor diodes manufacturing technology, optimisation of their parameters under thermal and radiation influence.....	55
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works	77

**«ФИЗИКА-ҚУЁШ» ИЛМИЙ ИШЛАБ ЧИҚАРИШ БИРЛАШМАСИ
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ҒМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**«ФИЗИКА-ҚУЁШ» ИЛМИЙ ИШЛАБ ЧИҚАРИШ БИРЛАШМАСИ
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ**

РАХМАТОВ АХМАД ЗАЙНИДИНОВИЧ

**ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ ЮҚОРИ ЧАСТОТАЛИ ВА ЧЕКЛАГИЧ
ДИОДЛАР ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ,
УЛАРНИНГ ПАРАМЕТРЛАРИНИ ТЕРМО- ВА РАДИАЦИОН
ТАЪСИРДА ОПТИМАЛЛАШТИРИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси
(техника фанлари)**

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2014

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида 30.09.2014/В2014.5.Т 266 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси ЎЗР ФА Физика-техника институти ва ОАЖ «FOTON»да бажарилган.

Докторлик диссертациясининг тўла матни ЎЗР ФА Физика-техника институти, Ион плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 рақамли фан доктори илмий даражасини берувчи Илмий кенгаш веб-саҳифасига (kengash.fti.uz) жойлаштирилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) илмий кенгашнинг веб-саҳифасига (kengash.fti.uz) ва “ZiyoNet” Ахборот-таълим порталига (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Каримов Абдулазиз Вахитович

физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Улимов Виктор Николаевич

техника фанлари доктори, профессор

Касымахунова Анора Мамасадыковна

техника фанлари доктори, профессор

Тагаев Марат Баймуратович

техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Тошкент давлат техника университети

Диссертация ҳимояси ЎЗР ФА Физика-техника институти, Ион плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 рақамли Илмий кенгаш асосида 01.04.10 ихтисослиги бўйича (техника фанлари) тузилган бир марталик илмий кенгаш нинг «___»_____2014 й. соат ____даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100084, Тошкент, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net).

Докторлик диссертацияси ЎЗР ФА Физика-техника институти Ахборот-ресурс марказида 01 рақами билан рўйхатга олинган, диссертация билан АРМ да танишиш мумкин (Манзил: 100084, Тошкент, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-30-41).

Диссертация автореферати 2014 йил «___»_____да тарқатилди.

(2014 йил _____даги _____ рақамли реестр баённомаси).

С.Л. Лутпуллаев

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор

М.Н. Турсунов

Фан доктори илмий даражасини берувчи
бир марталик илмий кенгаш илмий котиби
т.ф.д.

И.Г. Атабаев

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси
ф.-м.ф.д., профессор

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АННОТАЦИЯСИ

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ-1442–сонли «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги қарорига асосан саноат ишлаб чиқаришининг самарадорлигини ошириш биринчи навбатдаги масалалардан ҳисобланади. Шунинг учун «FOTON» ОАЖ ишлаб чиқарилаётган кучланиш чеклагичлари, юқори частотали тўғрилагич диодлар ишлаб чиқариш таннархини ва харажатларини пасайтириш уларнинг параметрларини яхшилаш ва ишончлилигини ошириш ҳамда улар технологиясини оптималлаштириш каби мақсадли ишларни олиб боришни кўзда тутди. Бу эса махсулот рақобатбардошлигини оширишнинг муҳим омили бўлиб, эришилган бозор эҳтиёжларини сақлаш ва янги харидорлар топиш манбаи ҳисобланади.

АҚШ, Канада, Голландия, Хитой ва Япония чет мамлакатлари олимлари томонидан қўйилган импульсли кучланишларнинг ошиб кетиши натижасида электрик ва радиоэлектрон асбобларнинг ишдан чиқишининг олдини олиш соҳасида юқори вольтли кучланиш чеклагичлари ва улар асосида барқарорлаштирувчи қурилмалар ишлаб чиқиш ва тадқиқ қилиш масалалари талабга сазовор.

Бу қувватли диодлар электр энергиясини ўзгартгич қурилмаларида, истеъмол тизимлари ва технологик жараёнларни бошқаришда кенг қўлланилади. Уларни тайёрлашда юқори кучланишли диодлар учун кенг қўлланилувчи кремнийни бор ва фосфор билан легирлаш диффузион технологиялари ишлатилади. Аммо кичик кучланишли чеклагичларга нисбатан кичик дифференциал қаршилиқ олишга имкон бермайди, бунга эса *p-n*-ўтиш чегарасида ток ташувчилар концентрациясининг кес-кин фарқини таъминловчи киритма ишлатиш орқали эришиш мумкин. Бу муаммони ечиш, юқори концентрацияли манба – маргимуш ишлатиш йўли билан тайёрлаш мумкин бўлган диффузант олишга имкон берувчи, янги физик ёндашишни талаб қилади. Бундан ташқари, қувватли диодларнинг ишлаш самарадорлиги чеклагичларнинг номинал коэффиценти, тешилиш кучланиши характеристикаларининг кескинлиги билан аниқланади. Ишчи режимда қувватли диодлар кучли импульслар таъсирида иссиқлик ажратади ва уларни оптималлаштириш контакт соҳалари билан бирга бутун тизим узунлигида иссиқлик ўтказувчанликнинг физик анализи асосида амалга ошириш мумкин.

Диссертациянинг бажарилишига зарурият қувватли диодларнинг технологик бузилишини камайтириш ва мустаҳкамлигини ошириш, қўлланиш соҳасини кенгайтириш ҳамда қувватлар динамик исрофгарчилигини камайтириш муаммоларига мақсадга мувофиқ ёндашувни талаб қилувчи масалаларга боғлиқ бўлган қувватли импульсга чидамлилигини оширилиши, радиоэлектрон асбобларни ҳимоялаш ва саралаш қурилмаларини ҳамда такомиллаштирилган технологияларни жорий қилиш кераклигидан келиб чиқади.

Шу билан бирга, баъзи ҳолатларда асбобни занжирдан узиш натижасида кутилмаганда ток қиймати ошиб кетишидан сақлаш муаммоси пайдо бўлиши, ток импульси таъсиридан сўнг қайтувчи параметрли ток чеклагичларини яратиш лозимлигини тақозо этади.

Юқорида айтилганлардан келиб чиқадики, танланган объект параметрларининг комплекс тадқиқоти ва уларни яратиш технологиясининг физик аспекти (масалан, диффузия ва радиацион усуллар билан), конструкцияни оптималлаштиришга йўналтирилган ва текшириш учун танлаб олинган объектларни яратиш технологияси ва шу асосда асбоб параметрларини ўзгартиришга эришиш, шунингдек, уларнинг радиацион барқарор бўлишини ҳам эътибордан четда қолдирмаслик ўта долзарб ҳисобланади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Ушбу тадқиқот Ўзбекистон Республикасининг фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мос ҳолда АТД-3 – «Энергетика, энергоресурсларни тежаш, транспорт, машина ва асбобсозлик; электрон асбобсозлик ва фотоника, микроэлектроника, замонавий электроникани ривожлантириш» дастури асосида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи. Ҳар хил турдаги (кучланиш чеклагичлари, стабилитронлар, тиристорлар, юқори частотали тўғриловчи чеклагич) қувватли яримўтказгичли диодлар ишчи параметрлари ва уларни олиниш технологияси тадқиқотлари АҚШ, Канада, Англия, Голландия, Хитой, Россия каби мамлакатларда радиоэлектроника ҳамда автомобиль саноатидаги талабларни ҳисобга олган ҳолда изчиллашяпти ва аниқ муваффақиятларга эришилган.

Philips Semiconductors, STMicroelectronics, Littelfuse, Moeser Electronics, ON Semiconductor, SGS-Thomson, Центр «СЭЛТ» ва бошқа йирик компанияларнинг мақолаларида олиб борилаётган тадқиқотлар параметрлари яхшиланган, ортиб бораётган талабларни қондирувчи қувватли диодлар ишлаб чиқишга йўналтирилганлиги қайд қилинган. Тадқиқотларда қувватли яримўтказгичли диодларнинг ишчи параметрларини оптималлаштириш ва мустаҳкамлигини оширишга бағишланган ишларнинг зарурлиги ва долзарблигига эътибор қаратилган.

Шу муносабат билан катта қувватли диодларни тайёрлашнинг янги технологияларини ишлаб чиқиш ва жорий технологияларни такомиллаштириш етакчи илмий тадқиқот марказларининг диққат марказида турибди. Хусусан, диффузион технология асосида тайёрланган аналоглар параметрларидан афзал кўрсаткичга эга бўлган кичик вольтли кучланиш чеклагичларини тайёрлаш эпитаксиал технологияни қўллаш орқали амалга оширилиши мумкинлиги Sigetronics Inc. фирма тадқиқотчилари томонидан кўрсатилган. Қувватли диодлар параметрларига радиацион таъсирни ўрганиш тадқиқотларнинг бошқа бир йўналиши бўлиб, технологик жараёнлар ниҳоясига етгандан сўнг диодларнинг параметрларини оптималлаштириш имконини беради. Масалан, швейцариялик олимлар томонидан кремнийли кучли қувватли диодларнинг базасини палладий билан

радиацион легирлаш йўли орқали платина билан легирланган диодларга нисбатан кам яшаш даври олинган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги кунда кремний асосида юқори частотали диод ва кучланиш чеклагичларини яратиш технологияси ва уларнинг параметрларини оптималлаштиришга бағишланган бир қатор назарий ва экспериментал ишлар олиб борилмоқда. Уларнинг кўпчилиги кучли қувватли диодларнинг эксплуатацион параметрларини конструктив ва схемотехник усуллар билан оптималлаштиришга ёки комбинацион технологиялар қўллашга (диффузия билан биргаликда лазер технологияси, радиация билан биргаликда ион имплантация) бағишланган. Бироқ, қўлланилаётган диффузия технологиясини юқори частотали диод ва кучланиш чеклагичларига нисбатан модернизациялаш ва оптимал арматурасини яратиш диққатга сазовордир. Муаммони муваффақиятли ҳал бўлиши ишлаб чиқаришни деярли ҳеч қандай реконструкциясиз нафақат маҳсулот параметрларини яхшилаши, балки кремний $p^+ - n^+$, $p^+ p - n^+$ ва $p^+ p - nn^+$ -тузилмаларнинг техник иқтисодий кўрсаткичлари ҳам яхшиланишига олиб келади.

Шу билан бирга, аксарият ҳолатларда биргина электрон схемада икки жуфт, баъзида бир нечта кучланиш чеклагичларининг параметрлари мутлақо бир хил бўлиши лозим. Бироқ, асбоб тузилмалар яратишдаги технологик операциялар натижасида нуқсонлар, эксплуатацион характеристикаларида эса фарқлар ҳосил бўлади. Шу сабабли юқори частотали диод ва кучланиш чеклагичларини маълум белгиланган параметрлар билан яратиш технологиясидан фойдаланилади.

Бугунги кунда долзарб муаммо бўлган тўғриловчи ўтишида ташувчилар концентрацияси градиентли бўлган яримўтказгичли юқори частотали ва чеклагич диодларни тайёрлаш диффузион технологияси ҳамда уларнинг эксплуатацион параметрларини оптималлаштириш ва идентификациялаш методлари тўғрисида ҳозиргача мавжуд ишларда маълумотлар йўқ.

Радиацион-технологик жараёнларни қўллаш қувватли диодларнинг тезкорлиги ва ишончилигини оширишни таъминлайди. Бироқ, гап шундаки, ҳар сафар радиацион таъсирни танлашда маҳсулот параметрларининг оптимал мослашиш муаммоларини ҳал қилиш керак бўлади. Натижада $p - n$ -ўтиш соҳаси турли технологик усуллар билан яратилган (планар технология, мезадиффузион усул ва б.) диоднинг параметрларини оптимал мослаш учун у ёки бу радиацион таъсирни қўллашнинг умумий йўл-йўриқларини ишлаб чиқиш лозим. Шунинг учун барқарорликни кўтариш ҳисоблари долзарб муҳандислик муаммоси бўлиб, унинг ечилиши бу синфга тегишли асбобларнинг қўлланиш соҳасини (ва, албатта, маҳсулотни сотиш имконини ҳам) кенгайтиради.

Яна бошқа бир муаммо шундаки, қувватли асбобларни – кучланиш чеклагичларини, юқори частотали диод тўғрилагичларини характерлайдиган параметрларни ўрганишнинг бизга маълум усуллари аниқлик нуқтаи

назаридан қониктирмайди. Яъни стабилитрон параметрларини аниқлаш учун ишлатилаётган усуллар корректив эмас.

Шундай қилиб, яримўтказгич асосли юқори частотали диод ва кучланиш чеклагичларининг оптимал технологияси ва параметрларини оптималлаштириш долзарб муаммо бўлиб, ҳозирга қадар олиб борилган илмий ишларда бу соҳа тўлиқ ёритилмаган.

Диссертация тадқиқотининг илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги: тақдим этилаётган иш «Физика-Қуёш» ИИЧБ Физика-техника институтининг АЗ-ФА-0-10-440 «Яримўтказгичли асбоблар камёб гуруҳларини ишлаб чиқаришда яроқли чиқишини ошириш учун термик ва электримпульсли ишлов бериш усулларини яратиш (ОАЖ «FOTON»))» давлат дастури асосида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади дифференциал қаршилиги кичрайтирилган кремний диоди тузилмаларини ишлаб чиқаришнинг оптимал диффузион технологиясини ишлаб чиқиш ва юқори частотали тўғрилагич диод ва кучланишни чеклагичларнинг сифатини яхшилаш, ишончилигини радиация таъсирида кўтаришдан иборат.

Мақсадга эришиш учун ишда қуйидаги **тадқиқот вазифалари** қўйилди:

қисқа вақтли кучланиш ошиб кетишининг қувватли импульслари таъсирига бардош берувчи *p-n*-ўтиш чегарасида қоришмалар концентрацияси катта градиентли бўлган кичик вольтли структуралар тайёрлаш учун кремнийга фосфор билан легирлашга нисбатан чекланмаган манбадан юқори концентрацияли маргимушни диффузия қилиш технологиясини ишлаб чиқиш;

жараёндан жараёнга кремнийли кичик вольтли *p-n*-ўтишлар олинимида асосий электр параметрлари фарқланишининг камайишини таъминловчи иссиқлик таъсири шароитларини ишлаб чиқиш;

контакт материали билан яримўтказгич чегарасида ўтказиш эффекти минимал бўлган омик контакт олиш усулини ишлаб чиқиш;

кучланиш чеклагичларининг функционал параметрларини ўлчашнинг физикавий асосланган универсал усулларини ишлаб чиқиш. Бу ҳолатда кучланиш чеклагичларининг эффективлик коэффициенти ва ўлчаш режимини ҳисобга олиб, чекланиш кучланишини аниқлашнинг такомиллашган усулини ишлаб чиқиш талаб қилинади;

диод конструкциясининг қисмларида, уланиш режимига боғлиқ бўлган, импульс қувватининг ажралиш ва ютилиш механизминини тушунтирувчи кучланиш чек-лагичининг иссиқлик моделини ишлаб чиқиш;

p-n-ўтиши турли усуллар билан тайёрланган кучли тўғриловчи диодлар учун оптимал шароитлар ва радиацион таъсир технологик режимларини аниқлаш;

эксплуатация параметрларини таққослаш учун кучланиш чеклагичининг кучланиш тешилишига радиация таъсирини ўрганиш;

кучланиш чеклагичини муҳофазалаш учун арсенид галлий асосидаги ток чеклагичини ишлаб чиқиш.

Тадқиқот объекти: p^+n^+ , p^+-n-n^+ , шунингдек, $p^+-p-n-n^+$ -тузилмали, кичик ва юқори вольтли кремний асосида кучланиш чеклагичлари, юқори частотали тўғрилагич диодлар ва арсенид галлий асосида яратилган ток чеклагичлар.

Тадқиқот предмети – кремнийни маргимуш билан легирлаш жараёни, юқори частотали диодлар ва кучланиш чеклагичларини радиацион нурланиш таъсирида эксплуатацион параметрларини идентификациялаш модели, яримўтказгич сиртида адгезияси яхшиланган омик контакт олиш.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот жараёнида вольтампер ва вольтфарад характеристика усуллари, радиация таъсири, сиртий қаршилиқни аниқлашнинг зондли ўлчаш усуллари, дифференциал ўтказувчанлик усуллари, моделлаш усулларида фойдаланилган.

Диссертация тадқиқотининг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

илк бор маргимуш билан легирланган кремний p^+-n^+ -структураси асосида манба блоклари муҳофазаси учун кичик вольтли (< 7 В) кучланиш чеклагичлари олиш технологияси яратилган;

илк бор кремний $p^+-p-n-n^+$ -структураси асосида эффектив иссиқлик тарқатувчи контактли қувватли (10А) тўғрилагич-чеклагич диодлар олиш усули ишлаб чиқилган;

илк бор қувватли $p^+-p-n-n^+$ -ўтишли диодларга 450°C да қотадиган икки қаватли кумуш ва ванадий асосида уч қатламдан иборат омик контакт олиш усули ишлаб чиқилди, иссиқлик узатувчи компенсатор сифатида гальваник усулда кумуш билан қопланган мис қатлами танланган;

кучланиш чеклагичи параметрларини ўлчайдиган – универсал икки генераторли, хатолиги бир генераторли усулга нисбатан уч марта кам бўлган янги усул ишлаб чиқилган;

илк бор арсенид галлий асосида, омик контактли, биринчи тип таглик, бири иккинчисидан маълум масофада жойлашган иккита омик контактли, иккинчи тип ўтказувчан юпка қатламдан ва омик контактга уланган электродлардан иборат ярим ўтказгич асбоб ишлаб чиқилган;

кучланиш чеклагичи самарадорлигини қаршилиқ билан ток зичлиги орасидаги боғлиқлик асосида, кенг тешилиш токи соҳасида аниқлаш усули ишлаб чиқилган;

харорат потенциали ва иссиқлик оқими генераторлар сифатида уланиш ва импульсли кучланиш бериш шароитида, иссиқликни узатиш ва $p-n$ -ўтишни қизиш температурасини ҳисоблашга асосланган, иссиқлик моделлари ишлаб чиқилган;

кучланиш чеклагичи ва юқори частотали диодлар параметрларининг оптимал мослашишини таъминлайдиган радиацион технологик таъсирлар турини аниқлашнинг муҳандислик услуби ишлаб чиқилган;

илк бор кучланиш чеклагичининг ишдан чиқиш фурсатини қайд қилувчи радиоэлектрон аппаратурани ҳимоя этувчи қурилма ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

металл ўтказгичга яқин бўлган, кучли легирланган соҳали кичик вольтли кучланиш чеклагичлари олишнинг технологик шарт-шароитлари, легирлашда маргимушни кремнийга ноанъанавий тарзда диффузиялаш технологик шароитлари ишлаб чиқилган;

кучланиш чеклагичининг импульс характеристикаларини текширишнинг такомиллашган компенсацион усули, шунингдек, уларнинг дифференциал қаршилигини ток билан боғланиш хоссасига асосланган кучланишни чеклаш самарадорлик коэффициентини аниқлашнинг янги усули таклиф қилинган;

қувватга чидамлилигини оширишни таъминловчи кучли тўғриловчи-чеклагичли қуршаб олувчи диодлар тайёрлашнинг технологик ва конструктив аспекти ишлаб чиқилган;

юқори частотали ва чекловчи диодлар параметрларининг оптимизацияси ва радиоэлектрон аппаратураларни ток ва кучланиш бўйича муҳофазалаш қурилмаси таклиф қилинган;

оптимал материаллар ва кучланиш чеклагичларининг истеъмол бозори талабларига мос рақобатбардошлигини ошириш сари йўналган конструкторлик ечимларини очиб берувчи муҳандислик ҳисоблашлар ишлаб чиқилган;

кучланиш чеклагичлари, юқори частотали диодларнинг параметрларини оптималлаштирувчи радиация тури ва дозаларини қимматбаҳо изланишлар ўтказмасдан аниқлаб берувчи муҳандислик усуллари таклиф қилинган;

технологик радиацион жараёндан сўнг маҳсулот параметрларини башорат қилишни, нурланишнинг оптимал дозасини аниқлашни ва шу билан бирга технологик жараённинг ишлаб чиқариш маҳсулотдорлигини ва сифатли маҳсулот чиқишини ошириб берувчи юқори частотали тўғрилагич диодларнинг асосий параметрларини ҳисоблашнинг муҳандислик усуллари ишлаб чиқилган.

Олинган натижаларнинг ишончлилиги физик жараёнларни тадқиқ қилишда умумқабул қилинган илмий услублар, стандартлашган ва завод шароитида апробациядан ўтган тадқиқот услубларининг қўлланилиши билан тасдиқланган. Хулосалар назарий ҳисоблашларга мос келувчи экспериментал натижаларга асосланган.

Тадқиқот натижаларининг назарий ва амалий аҳамияти. Ишлаб чиқилган кучланиш чеклагичлари ва тўғриловчи-чеклагич қуршаб олувчи диодлар радиоэлектрон аппаратураларни электр занжирларда кучланиш ортиб кетишидан сақлаш учун, юқори частотали диодлар эса қурилмаларда энергияни ўзгартириш ҳамда тўғрилаш учун қўлланилади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Тадқиқотлар натижаси асосида қилинган ихтироларга 3та Ўзбекистон Республикаси патенти (№ IAP 04599 04.10.2012й., № IAP 04721 03.05.2013й., № IAP 04571 22.08.2012й.) ва 1та Россия патенти (№ 2522786 21.05.2014й.) олинган. Тадқиқотлар натижасида кичик вольтли кучланиш чеклагичлари ва юқори

частотали тўғриловчи-чеклагич диодлар технологияси ишлаб чиқилган ҳамда кучланиш чеклагичларининг характеристикаларини оптималлаштириш услублари ОАЖ «FOTON» да ишлаб чиқаришга жорий этилиб, йиллик иқтисодий самара 78 млн сўмни ташкил этган («Ўзэлтехсаноат» Ассоциациясининг 12.12.2013 йилдаги жорий қилинганлик далолатномаси).

Ишнинг апробацияси. Диссертация иши натижалари 11 та илмий-амалий анжуман ва конференцияларда, жумладан, «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, 2011; 2013); «Физиканинг фундаментал ва амалий масалалари» (Ташкент, 2010); «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, 2010; 2013); «Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Mater. Sci. SPO-2010» (Kyiv, 2010); «Современные техники и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития» (Навои, 2010); II Международная конференция по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и нано структурах» (Фергана, 2011), «International Conference Nuclear science and its application» (Samarkand (Uzbekistan) September 25-28, 2012) муҳокама қилинган.

Диссертация ишининг асосий натижалари ЎзР ФА «Физика-Қуёш» ИИЧБ Физика-техника институти яримўтказгичлар йўналиши бўйича кенгайтирилган семинарида (2014йил май) ҳамда Физика-техника институти, Ион плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети хузуридаги 16.07.2013.FM/T.12.01 рақамли Илмий кенгаш асосида 01.04.10 ихтисослиги бўйича (техника фанлари) тузилган бир марталик илмий кенгаш қошидаги илмий семинарда (2014йил август) муҳокама қилинган.

Натижаларнинг эълон қилинганлиги. Олинган натижалар 35 та илмий ишларда акс эттирилган бўлиб, улардан 18та мақола чет эл ва 2та республика журналларида, 4 патентда, 11 халқаро ва республика конференцияларида чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса ва 139 та фойдаланилган адабиётлар рўйхати 203 саҳифа матн, 88 та расм, 12 та жадвалдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида муаммонинг ва диссертация мавзусининг долзарблиги асосланган, мақсад ва вазифалар ёритилган, ишнинг илмий ва амалий аҳамияти, ҳимояга олиб чиқиладиган асосий ҳолатлар келтириб ўтилган.

Биринчи бобда юқори частотали диод ва кучланиш чеклагичларининг асосий параметрлари ва уларни оптималлаштириш муаммолари бўйича адабиётларда шу кунга қадар бўлган маълумотлар келтирилган. Параметрларни оптималлаштиришнинг конструктив ва схемотехник усуллари кўриб чиқилган ва $p^+ - n^+$ -ўтишли кичик вольт қувватли диодларни олиш технологияси таҳлил қилинган. Параметрларни ўлчашнинг маълум усуллари ва чеклагичларнинг самарадорлигини ошириш, шунингдек,

яримўтказгич асбобларнинг параметрларини радиацион оптималлаш-тириш усуллари таҳлил қилинган. Хулосага кўра, маргимушни кремнийга юқори концентрацион диффузиялаш йўли билан кичик вольтли p^+-n^+ -ўтишли тузилмаларни олиш фосфор билан легирланган тузилмаларга нисбатан яхши электр параметрларга эга бўлишига олиб келиши таъкидланган. Радиацион нурланиш билан юқори частотали диод ва кучланиш чеклагичларининг тешилиш кучланиши, тезкор ишлаши каби параметрларини оптималлаштириш мумкинлиги таъкидланган.

Иккинчи бобда кичик вольтли чеклагичларни маргимушни кремнийга чекланмаган манбадан диффузиялаш билан яратишнинг физик-технологик шароитлари, қувватли тўғирловчи-чеклагич диодларни олиш технологияси, яримўтказгич сиртига яхши адгезияли омик контактларни олиш усуллари, кремнийли p^+-n^+ , p^+-n-n^+ ва p^+p-n-n^+ -тузилмалар асосида яратилган қувватли диодларнинг асосий характерис-тикалари келтирилган. Кичик вольтли кучланиш чеклагичларининг маргимушни кремнийга ампула ёрдамида диффузия қилиш усулида яратишнинг физик-технологик афзалликларини ўрганиш асосида, илк бор диффузияланувчининг таркиби (450 мг As, 5 г Si) топилган. Ушбу таркиб, анъанавий фосфор диффузиясидан фарқли ўлароқ, кичик вольтли p^+-n^+ -ўтишда юқори сиртий концентрация ва тешилиш кучланиши кам фарқланишини таъминлайди (1-жадвал).

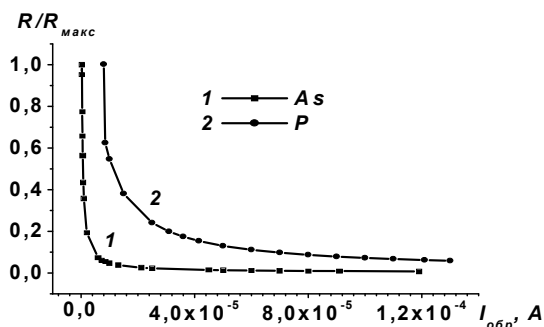
1-жадвал

Турли диффузия манбалари учун $p-n$ ўтишлар тешилиш кучланишининг ўртача квадратик ўзгариши

$\rho_{\text{база}},$ Ом·см	150 мг As <i>U, B</i>	200 мг As <i>U, B</i>	350 мг As <i>U, B</i>	Лигату- ра* <i>U, B</i>	250 мг As, 5 г Si <i>U, B</i>	450 мг As, 5 г Si <i>U, B</i>
0.001	1.23	0.67	0.54	0.25	0.10	0.08
0.002	1.17	0.50	0.83	0.37	0.15	0.18
0.003	0.81	0.28	0.35	0.30	0.18	0.16
0.005	0.30	0.23	0.37	0.32	0.23	0.18
0.008	0.54	0.40	0.41	0.47	0.33	0.24
*–лигатура – вакуумда 1000 °C да 48 с давомида куйдирилган p -тип кремнийнинг маргимуш билан ховончада майдаланган кукуни						

Кичик вольтли кучланиш чеклагичи маргимуш ва фосфор билан легирланган. Шунингдек, чет эл аналоглари кучланиш чеклагичларнинг тешилиш характеристикаларини солиштириш шуни кўрсатадики, маргимуш диффузияси билан тайёрланган кучланиш чеклагичида қуйи ўтказувчанлик соҳасидан юқори ўтказувчанлик соҳасига ўтиш кузатилади (1-расм). Диодларда контакт мукамал бўлмаганлиги сабабли, қувват йўқоли-шини камайтириш учун, омик контакт материали сифатида никель ва олтин ўрнига ваннадий билан икки қатлам кумуш ўтказиш тавсия этилади.

Тавсия этилган материалнинг адгезия ва иссиқлик хоссалари яхшилиги сабабли, ундан тўғриловчи-чеклагич диодлар тайёрлашда ҳам фойдаланилган. Илк бор ишлаб чиқилган қувватли тўғриловчи-чеклагичли қуршаб олувчи p^+p-n-n^+ -тузилмали диодлар тайёрлаш технологиясида p -тип ўтказув-



1-расм. Кучланиш чеклагичи дифференциал қаршилигининг тескари токга боғлиқлиги

чанлик соҳаси ва кучли легирланган n^+ - ва p^+ - тип ўтказувчанлик соҳалари диффузия усулида олинади, иккала сиртига юпка ($0.1 \div 0.3$ мкм) ванадий ва кумуш қатламлар пуркалади ҳамда вольфрам диски кумушланган мис қатламига алмаштирилади. Таклиф қилинган диодларнинг аналогдан фарқи шундаки, ишлаб чиқилган диоднинг иссиқлик ўтказувчанлик хоссаси яхшиланганлиги туфайли 10 А гача токда диод кизиб кетмайди, тескари тоқлар ҳарорат таъсирига анча чидамлироқ ва p - n -ўтиш тешилиши қайтар табиатлидир.

Юқори вольтли p^+ - n - n^+ -тузилмали кучланиш чеклагичларида n -тип кремнийга бор ва фосфор диффузиялаб олинган, тешилиш кучланиши лавина табиатли бўлиб, талабдаги тешилиш кучланишини, база соҳаси қаршилигини танлаб ёки кичик вольтли ва юқори вольтли кучланиш чеклагичларини комбинациялаш орқали, уларни параллель улаш билан ҳосил қилиш мумкин.

Учинчи боб қувватли диод параметрларини ўрганишнинг янги усуллари ва радиоэлектрон аппаратураларни муҳофаза қилиш қурилмаларига бағишланган. Диод тузилмалари кучланиш чеклагичи самарадорлигини аниқлаш усулининг тавсифи, кучланиш чеклагичлари параметрларини ўлчаш қурилмасининг такомиллашган техник тавсифи ҳамда таклиф этилган майдоний диод ва ишлаб чиқилган радиоэлектрон аппаратурани муҳофаза қилиш қурилмасининг ишлаш принципи келтирилган.

Кирилган чекланиш коэффицентини импульсли режимда аниқланувчи самарадорлик коэффиценти $K_{имп.чек} = U_{имп.чек} / U_{теш}$ билан биргаликда ўрганиш асосида, берилган тоқларда талабга жавоб бермайдиган кичик вольтли кучланиш чеклагичларини корпусга ўрнатишдан аввал саралаш таклиф қилинган. Самарадорлик коэффиценти тескари ток ўзгарганда кучланиш чеклагичида кучланишнинг ўзгариш даражасини белгилайди

$$Z = \frac{\ln(R_D / R_{max,чек}) - \ln(R_D / R_{max,теш})}{\ln I_{чек} - \ln I_{теш}}, \quad (1)$$

яъни, берилган ток интервалида кучланиш ўзгариши қанчалик кам бўлса, кучланиш чеклагичи шунча сифатлидир. Ҳақиқатан ҳам, кучланиш чеклагичининг характеристик параметрларини легирловчи киришмаларни турига кўра, фосфор киришмали намуналарга нисбатан маргимуш

киришмали намуналар учун тешилиш кучланишининг четлашиши камроқ бўлиб, каттароқ қувватли импульсга чидамлилиги 2-жадвалда кўрсатилган.

2-жадвал

Кучланиш чеклагичи характеристик параметрларини легиранган киришма турига боғлиқлиги

Нам уна тарт иби	$U_{теи} \text{ , В}$		Z	$K_{имп.чек}$	$P_{и},$ $кВт$	$U_{теи} \text{ , В}$		Z	$K_{имп.чек}$	$P_{и},$ $кВт$
	1 мА	4 мА				1 мА	4 мА			
7.5 вольтли кучланиш чеклагичи маргимуш билан легирланган						8 вольтли кучланиш чеклагичи фосфор билан легирланган				
1	7.35	7.52	0.99	1.19	1.85	8.35	9.0	0.87	1.4	1.5
2	7.39	7.53	0.99	1.18	1.9	8.35	8.8	0.9	1.5	1.6
3	7.38	7.58	0.98	1.21	1.85	8.14	8.9	0.86	1.38	1.5
4	7.4	7.6	0.9	1.18	1.85	7.7	8.7	0.84	1.42	1.6
5	7.44	7.62	0.99	1.24	1.85	7.9	8.6	0.86	1.39	1.6
6	7.4	7.65	0.99	1.22	1.78	8	8.8	0.85	1.4	1.58
7	7.6	7.75	0.98	1.22	1.8	8.2	8.9	0.87	1.38	1.5

Таъкидлаш жоизки, қувватли кучланиш чеклагичларининг параметрлари маълум бўлган бевосита усулга нисбатан кичик хатоликка эга бўлган такомиллашган икки генераторли усул билан ўлчанган. Бевосита ўлчаш усули эса, хатолиги абсолют қийматининг ток зичлигига боғлиқлиги туфайли, талаб этиладиган хатоликни таъминлай олмайди. Икки генераторли усул кучланиш чеклагичининг математик моделига асосланган:

$$U_{чек} = U_{теи} + r_d \cdot I_{max}, \quad (2)$$

бу ерда r_d —тешилиш соҳасининг дифференциал қаршилиги.

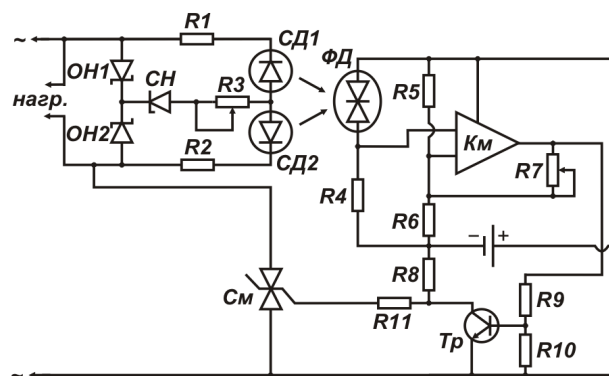
Барча чеклагич диодлар учун, чекланиш кучланишининг ўзгарувчи ташкил этувчиси 20% $U_{чек}$ қийматдан ошмаслиги туфайли, ўлчашнинг таклиф этилган усулида $U_{чек}$ доимий тескари тешилиш кучланиши $U_{теи}$ ва кичик импульс ташкил этувчиси кучланишни $U_{\wedge} = r_d \cdot I_{max}$ ни ўлчаш билан алмаштирилади. $U_{теи}$ -тешилиш кучланишини доимий ток вольтметри ёрдамида (хатолиги 1% дан ортиқ бўлмаган асбоб) аниқланади. Ток манбаи БП1 I_{max} максимал импульсли ток ва чиқиш кучланишни таъминлайди

$$U_{БП1} = (U_{чек} - U_{теи}) + (R_0 + R_{ўлчан}) I_{max} \leq \frac{1}{5} U_{чек} + (R_0 + R_{ўлчан}) I_{max} \quad (3)$$

Ток манбаидаги зарур бўлган қувват $\Delta P_{БП1} = 0.8 U_{чек} \cdot I_{max}$ бевосита ўлчаш усулидаги ток манбаидагидан кам. БП2 блок доимий тескари кучланиш ва тешилиш $U_{БП2} = U_{проб}$ кучланишини 2% дан ошмаган хатоликда ўлчайди ва доимий кучланиш вольтметри (V_{II}) $\delta_{VII} = 1\%$ билан назорат қилиб турилади. Натижада янги усул билан ўлчашдаги умумий кучланишни ўлчаш хатолиги 2% гача қадар камаяди.

Ишлаб чиқилган кучланиш чеклагичининг қўлланиш соҳаларидан бири — бу мухофазаланаётган занжир киришида белгиланган кучланишни таъминлашдир. Бироқ, мумкин бўлган тешилиш кучланиши ортиб кетганида

Радиоэлектрон аппаратура ишлаб чиқилган муҳофаза модулига симистор занжирда кучланиш кескин ўзгарганида ёнадиган ёруғлик диодлари орқали уланади (2-расм). Унинг ишлаш принципи шундаки, светодиод ёруғлиги икки барьерли фотодиодга тушади, фотодиоднинг фототоки симисторнинг ёпилишига сабаб бўлади ва радиоэлектрон аппаратура кучланиш манбаини узади. Импульс тугагач, аппаратура яна манбага уланади.



2-расм. Радиоэлектрон аппаратурани муҳофаза қилиш модули

Илк бор яратилган арсенид галлий асосидаги яримўтказгичли майдоний диод ток характеристикасининг ўзига хос хусусияти шундаки, кучланишнинг тўйиниш соҳасидан то тешилишигача бўлган кенг интервалда ток қийматининг ўзгармаслиги унга ток стабилизатори хусусиятини беради. Бу хусусият кичик вольтли кучланиш чеклагичида қайтмас тешилишни олдини олади. Яратилган майдоний диоднинг ишлаш принципи майдоний транзисторнинг ишлаш принципига ўхшаш, исток электроди затворга уланган. Кучланиш чеклагичи кетма-кет уланган икки қутбли асбоб ҳисобланади. Ток қиймати тўйиниш кучланишининг кенг интервалида ёруғлик нурланиши билан бошқарилади.

Тўртинчи бобда вақтли характеристикалар, стационар ҳолатда иссиқлик узатиш жараёни, динамик ҳолатда импульсли қувватнинг ажралиш ва ютилиши каби масалалар кўриб чиқилган.

Стационар режимдаги тешилишда кучланиш чеклагичида ҳажмий заряддан контактлар томон тарқалаётган иссиқлик аксиал ташкил этувчиси бўйлаб тарқалиши муносабати билан иссиқлик узатилиш жараёнини бир ўлчамли модель билан тушунтирилиб, қуйидаги дифференциал тенглама билан ифодаланади:

$$\rho' c_v \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{dP(t)}{dV} \quad (4)$$

бу ерда λ – солиштирма иссиқлик ўтказувчанлиги; c_v – солиштирма ис-
сиқлик сифими; ρ – модда зичлиги; $P(t)$ – қувват; V – текширилаётган соҳа
ҳажми.

Чегеравий қийматларда $T(D/2) = T_{корпус}$ p - n -ўтиш ҳарорати иссиқлик узатиш юзасига эмас, балки унинг массасига боғлиқ:

$$\Delta T \approx P \left(R_{uc} + \frac{t_{имп}}{C'} \right), \quad (5)$$

бу ерда $t_{имп}$ – импульс узунлиги; C' – корпуснинг иссиқлик сиғими, R_{uc} – иссиқлик қаршилиги.

Кучланиш чеклагичига кескин ўсувчи тескари ток импульси берилганида чеклагичдан сиғимий ток ўтади ва кучланиш тешилишга етганида у уланади. Унинг тўлиқ уланишига зарур бўлган вақт қуйидаги ифодадан аниқланади:

$$t_{улан} = \gamma \frac{\epsilon_s \epsilon_0 E_{max}}{j} + \frac{q W_{p-n} N_B}{2j} + t_e \quad (6)$$

Бу уланиш вақти p - n -ўтишнинг барьер сиғимини зарядланиш вақтидан

$$t_{RC} = \frac{C_V (U_{mesh} - U_{max})}{I} = \gamma \frac{\epsilon_s \epsilon_0 S_{p-n}}{W_{p-n}} \frac{E_{max} W_{p-n}}{2} \frac{1}{j S_{p-n}} = \gamma \frac{\epsilon_s \epsilon_0 E_{max}}{j} \quad (7)$$

ва зарбий тўлқин тарқалиш вақтидан ($t_{зарб.тарк}$) ҳамда уларга қўшилган энергиянинг релаксация вақтидан иборат, $t_e \sim 10^{-12}$ сек

$$t_{зарб.тарк} = \frac{W_{p-n}}{2v_{зарб.тарк}} = \frac{q W_{p-n} N_B}{2j} \quad (8)$$

бу ерда $v_{зарб.тарк}$ – зарбий тўлқин тарқалиш тезлиги; N_B – ток ташувчилар концентрацияси; W_{p-n} – p - n -ўтиш қалинлиги; j – ток зичлиги.

Стандарт импульс берилганида кучланиш чеклагичи берилган қувват ва уланиш вақтига боғлиқ иссиқлик энергияси ажратиб уланади.

$$Q_W = \frac{P t_{улан}}{2} = \frac{I^2 R_0 t_{улан}}{2} = \frac{1}{2} I R_0 q_{улан} \quad (9)$$

Шу пайтда камбағаллашган соҳада ажралаётган иссиқлик энергияси (Q_W):

$$Q_W = (T_W - T_{ext=0}) \cdot c_v \rho V_W \quad (10)$$

Ҳароратнинг ортиши солиштирма иссиқлик сиғими, яримўтказгич зичлиги ва камбағаллашган соҳа ҳажмига (V_W) пропорционал p - n -ўтишнинг камбағаллашган соҳа ҳарорати диод уланганидан сўнг ток, ўтиш қаршилиги ва заряд миқдорининг кўпайтмасини камбағаллашган соҳа иссиқлик сиғими нисбатига тенг.

$$T_W - T_{атроф} = \frac{I^2 R t_{улан}}{2\rho c_v V_W} = \frac{I^2 R_0 t_{улан}}{2C_{T_W}} = \frac{IRq_{улан}}{2C_{T_W}} \quad (11)$$

Кучланиш чеклагичида ҳосил бўлган ҳарорат потенциали (T_p) қуйидаги ифодадан аниқланади:

$$T_p - T_{атроф} = \frac{\Delta T_{\max} \tau_{имп}}{2q_{улан}} I_{\max} e^{-\frac{2t}{\tau_{имп}}} \quad (12)$$

Ҳарорат ортишининг чизиқли қисмида ҳарорат потенциали қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$\Delta T = T_i - T_0 = \frac{I(t)R_0 q_w}{2C_{T_W}} = \frac{\beta R_0 q_w}{2C_{T_W}} t \quad (13)$$

Уланиш жараёни тугагач, p - n -ўтишнинг камбағаллашган соҳаси ҳарорати максимал қийматга эришади ва қуйидаги формула билан аниқланади:

$$\Delta T_m = T_w - T_0 = \frac{I_m R_0 q_w}{2C_{T_W}} \quad (14)$$

Диоднинг уланиш режимида p - n -ўтишнинг ҳарорати ток камайишига нисбатан тезроқ пасаяди, шунинг учун p - n -ўтиш ҳарорат потенциалининг генератори каби бўлади.

Динамик режимда иссиқлик энергиясини ифодаловчи (9) формулага асосан, иссиқлик оқими максимал токнинг иссиқлик қаршилигига кўпайтмасининг уланиш вақтига нисбати билан аниқланади:

$$\Phi_1 = \frac{dQ}{dt} = \frac{I_{\max}^2 R t}{t_{улан}} \quad (15)$$

ва вақт бўйича чизиқлик ўзгариб, $t=t_{улан}$ вақтда максимал қийматга эришади:

$$\Phi_{\max} = I_{\max}^2 \cdot R = P. \quad (16)$$

Импульснинг камайиш соҳасида токнинг камайишини экспоненциал деб қабул қилиб $I = I_{\max} e^{-\frac{t}{\tau_{имп}}}$ ва иссиқлик энергиясини $Q = R I_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{имп}}}$ га тенг деб, иссиқлик оқими учун қуйидагига эга бўламиз:

$$\Phi_2 = \frac{dQ}{dt} = R I_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{имп}}} - \frac{2t}{\tau_{имп}} R I_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{имп}}} = R I_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{имп}}} \left(1 - \frac{2t}{\tau_{имп}} \right)$$

ёки

$$\Phi_2 = R I_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{имп}}} = P e^{-\frac{2t}{\tau_{имп}}}. \quad (17)$$

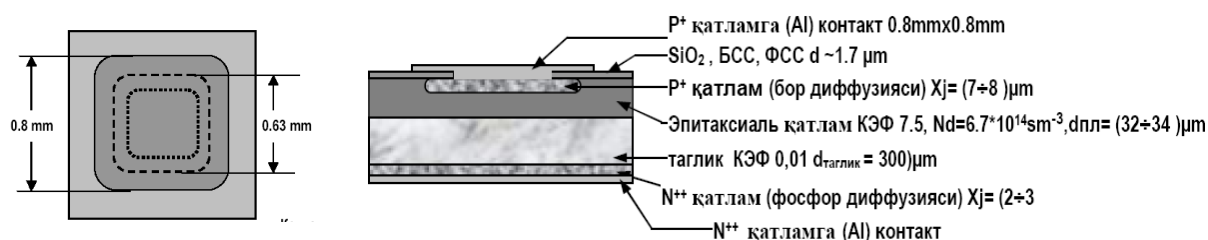
Иссиқлик жараёнининг иссиқлик доимийси $\tau_T = R_{T_W}^1 C_{T_W}$ ($R_{T_W}^1 = \frac{R q_{улан}}{2C_{T_W} U_{меи}}$)

билан содир бўлиши туфайли, иссиқлик оқими қуйидаги ифодадан аниқланади:

$$\Phi_2 = Pe^{-\frac{2t}{\tau_T}} \quad (18)$$

Шундай қилиб, кучланиш чеклагичи *p-n*-ўтишининг камбағаллашган соҳаси стандарт импульс таъсирида иссиқлик оқими генератори сифатида қаралиши мумкин. Иссиқлик оқими унинг чегараларидан ўтаётган импульс фронти ва уланганда берилаётган қувватига тенг максимал қийматга эришади.

Бешинчи бобда юқори частотали тўғрилагич диодлар ва кучланиш чеклагичларининг функционал характеристикаларига радиацион нурланишнинг таъсирини ўрганиш натижалари келтирилган. Юқори частотали планар ва диффузион диодларга радиацион нурланиш таъсир эттирилган. Диодларнинг геометрик кесимлари 3–4-расмларда келтирилган.



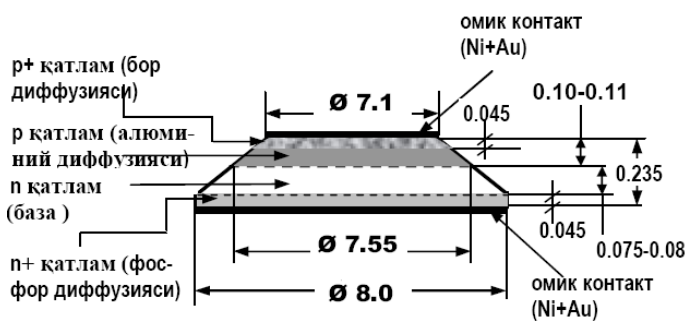
а) тепадан кўриниши

б) диод структурасининг кўндаланг кесими

3-расм. Юқори частотали планар диоднинг геометрик кесими

Тадқиқ этиш учун танланган намуналар кучланиш тушишининг минимал қийматга эгаллиги билан фарқланади. Тўғри ва тескари ток, тескари кучланиш, шунингдек, тескари токни ўз қийматига қайтиш вақти бўйича (U_F , I_F , I_R , U_R , t_{rr}), бу ерда $U_F = (0.92 \div 0.93)$ В ($I_F = 1$ А да, $I_R = (15 \pm 2)$ нА, $U_R = 200$ В); $t_{rr} \leq (150 \pm 10) 10^{-9}$ сек ($I_F/I_R = 1$ да ва ҳисоб даражаси 0.1 А).

Намуналарни гамма-квантлар билан нурлаш ЎЗР ФА ЯФИ гамма қурилмасида, электронлар билан эса ОАЖдаги У-003 «FOTON» электрон тезлатгичда ўтказилган. Диодларни нурлантиришда гамма-квантнинг ўртача энергияси гамма қурилмада Co^{60} (~ 1.25 МэВ) нинг гамма нурлашига мос келиб, интенсивлиги $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$.



4-расм. Юқори частотали диффузияли диоднинг геометрик кесими

Диодлар нурлантирилган гамма-квант оқимининг (Φ_γ) аниқлиги 5 % ни ташкил этади. Диодлар нурлантирилган электронларнинг ўртача энергия-

си $4\div 4.5$ МэВни ташкил этган, интенсивлиги эса $\sim (2.5\div 3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$. Электронлар флюенсининг (Φ_e) аниқлиги $\sim 15\%$ ни ташкил этган.

Юқори частотали планар тузилмалар учун $\Delta(1/t_p)$ катталиқ гамма-квантлар оқими (Φ_γ) тўғри пропорционал ва электронлар флюенси (Φ_e) $\Delta(1/\tau_p)_\gamma = Kt_\gamma \cdot \Phi_\gamma$ ва $\Delta(1/\tau_p)_e = Kt_e \cdot \Phi_e$. Шунга ўхшаш боғланиш, шикастланиш доимийсининг нурланиш дозаси билан ўзгариши Шокли-Рид рекомбинация назариясига кўра, ўтказувчанлик соҳасидан 0.17 эВ масофада жойлашган А-марказ билан боғлиқ. Тажрибалар асосида ҳисобланган шикастланиш доимийсининг қийматлари $Kt_\gamma = 3.35 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ ва $Kt_e = 2.5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ адабиётларда келтирилган қийматларга жуда яқин.

Тажрибада аниқланган тескари $I_{r0l\gamma}$ ва I_{r0le} тоқларнинг қийматлари $3.7 \cdot 10^{-8} \text{ А}$ дан $5 \cdot 10^{-8} \text{ А}$ гача бўлиб, ҳисобланган максимал қийматлар $I_{rs \max} = 50 \cdot 10^{-9} \text{ А}$ га яқин. Тескари тоқнинг ($15\div 20\%$ га ортиши) гамма нурланиш дозаси $\Phi_\gamma = (2\div 14) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ва электронлар оқими $\Phi_e = (2.5\div 20) \cdot 10^{14} \text{ е/см}^2$ билан заиф боғланганлигини ($15\%\div 20\%$ га ортишини) E_g ўтказувчанлик соҳасидан $E_m = -0.4 \text{ еВ}$ масофада жойлашган марказ ҳосил бўлгани билан боғлаш мумкин. Гамма-квантлар Co^{60} билан нурлангандан сўнг тескари тоқнинг қиймати, $4\div 4.5$ МэВ энергияли электронлар билан нурланганларга нисбатан $15\%\div 20\%$ кам, яъни гамма-нурланишнинг электрон нурланишга нисбатан таъсири оптималроқ эканлиги аниқланган.

Кучланиш тушишининг тескари қаршиликнинг қайта тикланиш вақтига боғлиқлиги $U_F = f(t_{rr})$ иккала тур нурланиш учун мос келади, яъни иккала тур нурланиш (гамма-квантлар билан Co^{60} ва $4\div 4.5$ МэВ энергияли электронлар билан t_{rr} ва U_F ларнинг ўзаро муносабатлари нуқтаи назардан) бир хил. Нурланиш дозаси ортган сари кучланиш тушиши 1.2В гача ортади. Тескари қаршиликнинг қайта тикланиш вақти эса 150 нс дан 10 нс гача камаяди ва юқори частотали диоднинг тезкорлиги ошади. Гамма ва электрон нурланиш таъсири берилаётган юқори частотали диффузион диодлар текширилган параметрлар бўйича минимал фарққа эга.

Тўғри тоқи $I_F = 10\text{А}$ бўлганда тўғри кучланишнинг тушуви $U_F = 0.75\div 0.8\text{В}$ тескари кучла-нишлар $U_R = 100 \text{ В}$ ва 200 В бўлганда тескари тоқлар $I_R \sim 0.5\div 0.7 \text{ мкА}$ ва $0.7\div 1.0 \text{ мкА}$ тенг. Тўғри тоқ $I_F = 1\text{А}$, $I_F/I_R = 1$ бўлганида, тоқнинг 0.1 А га тенг бўлгандаги участкадан ҳисоб-ланган, тескари қаршиликнинг қайта тикланиш вақти $\tau_{tr} \leq 2.8 \pm 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ га}$ тенг.

$\Delta(1/t_p)$ нинг Φ_γ ва Φ_e ларга боғлиқлиги тўйиниш табиатига эга эканлиги нурланиш оқими ортиши билан шикастланиш доимийсининг гамма-квантлар ҳамда электронларнинг нурланиш дозаси ортиши билан камайишини кўрсатади. Кучланиш тушуви нурланиш дозасига чизиғий боғланишда бўлиб, қуйидаги ифодадан аниқланади:

$$U_\delta = U_{\delta ro} \cdot \left(1 - \frac{2L_p}{d} L_n \frac{\frac{bn_0}{(b+1) \cdot p(0)} + 1}{\frac{bn_0}{(b+1) \cdot p(0)} + e^{-d/2L}} \right), \quad (19)$$

бу ерда $U_{\delta ro} = (I_f \rho \cdot \delta \cdot d) / S_{pn}$.

Бу ифодада p - n -ўтишдаги киришмалар тақсимои ҳисобга олинган.

$$\Delta p(x) \approx \Delta p(0) \cdot \exp(-x/L_p) \quad (20)$$

ва

$$\Delta p(x) \approx \Delta p(d) \cdot \exp[(x-d)/L_p]. \quad (21)$$

Тажрибаларга кўра, кучланиш тушувининг нурланиш дозасига боғлиқлиги гамма нурланиш учун $\Phi_\gamma = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ гача ва электронлар учун $\Phi_e = 9 \cdot 10^{14} \text{ е/см}^2$ га қадар чизикли тарзда 0.77 дан 0.9 В гача ортади ва ҳисобланган қийматлар билан қониқарли даражада мос тушади.

Юқори частотали диффузион диодлар тескари токининг доза билан боғлиқлиги гамма ва электрон нурланишлар учун $1.2 \cdot 10^{-18} \text{ мкА} \cdot \text{см}^2$ ва $1.6 \cdot 10^{-15} \text{ мкА} \cdot \text{см}^2$ га тенг бўлган радиацион ўзгариш коэффицентлари билан чизикли ўзгаради ва қуйида келтирилган боғлиқлик билан ифодаланади:

$$I_r = K_{I\gamma(e)} \cdot \Phi_{\gamma(e)} + I_{ro} \quad (22)$$

бу ерда I_{ro} – нурланишга қадар тескари ток.

Тескари токнинг радиацион ўзгариш коэффиценти қиймати қуйидаги ифода ёрдамида ҳисобланган ва 3- жадвалда келтирилган:

$$K_t = \frac{(1 + \Delta n / n_0)}{(1 + V_p \sigma_p / V_n \sigma_n) \cdot \Delta n / n_0 + n_1 / n_0} \cdot V_p \sigma_p \cdot \frac{dM}{d\Phi} \quad (23)$$

3-жадвал

Тескари токнинг радиацион ўзгариш коэффицентлари

$K_{I\gamma} \cdot 10^{18}, \text{ мкА} \cdot \text{см}^2$			$K_{Ire} \cdot 10^{15}, \text{ мкА} \cdot \text{см}^2$		
$N_o = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$N_o = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	Экспериментал қийматлар	$N_o = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$N_o = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	Экспериментал қийматлар
1.4	0.7	1.2	1.7	0.4	1.6

Жадвалдан кўриниб турибдики, тескари токнинг радиацион ўзгариш коэффицентининг экспериментал қиймати кислород концентрацияси билан аниқланиши мумкин бўлган диапазонда жойлашган бўлиб, диффузион диодларнинг тескари ток қийматларини, уларга гамма-квант оқимлари (Φ_γ) ва электрон флюенс (Φ_e) таъсирдан сўнг, Е-центр шакллантиради.

Шундай қилиб, қувватли кремний диффузион диодларнинг тескари қаршилигининг қайта тикланиш вақти, тўғри кучланиш тушуви ва тескари тоқларига гамма ва электрон нурлари таъсири ўзаро эквивалентлиги тажрибада кўрсатилган.

Нейтронлар флюенси ($3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ гача) таъсирида бўлган кучланиш чеклагичли диодларнинг характеристик параметрларини ўрганиш асосида ноасосий заряд ташувчиларнинг яшаш даври, ҳажмий заряд қатлам қалинлиги ва уларни оптималлаштириш йўллари ҳамда ўзига хос хусусиятлари аниқланган. Шунингдек, диффузион технология билан олинган

p^+pn^+ -тузилмали 50 вольтли ва 200 вольтли бўлган кучланиш чеклагичлари ўрганилган. Намуналар тадқиқот реактори ИИН-3Мда нурлантирилган. Энергияси $E > 3$ МэВ бўлган нейтронлар флюенси S^{32} олтингугурт индикатори билан баҳоланган ва кейинчалик $E \geq 100$ кэВ энергияли нейтронлар флюенсига келтирилган (ИИН-3М реакторнинг маълум спектри бўйича). Нейтронларнинг ўртача энергияси ~ 1.5 МэВни ташкил этади. Дозиметрия хатолиги $\pm 20\%$. Радиацион нурлантириш ва юқорида келтирилган параметрларни ўлчаш ишлари ҳар бир тури 20 кучланиш чеклагичидан ташкил топган танламаларда ўтказилган. Яъни биринчи турда 50 вольтли ва иккинчи турда 200 вольтлилар. Танланмалар 5÷6 қисмга бўлиниб (ҳар бир қисмда 3÷4 кучланиш чеклагичи), ҳар бир қисм икки этапда нурлантирилган (нейтронларнинг 2-оқимида) ва ҳар бир нурлантиришдан сўнг кучланиш чеклагичларининг параметрлари ўлчанган.

Диффузия усулида олинган 50 вольтли ва 200 вольтли кучланиш чеклагичларига нейтронлар флюенсининг таъсирини ўрганиш натижасида ҳар иккала тур кучланиш чеклагичларида $U_{теу}(\Phi)/U_{теу}(0)$ ва $U_{чек}(\Phi)/U_{чек}(0)$ нисбатларнинг нейтронлар флюенси билан экспоненциал боғланишда эканлиги топилган:

$$U_{теу}(\Phi) = U_{теу}(0) \exp(K_1 \Phi) \quad (24)$$

$$U_{чек}(\Phi) = U_{чек}(0) \exp(K_2 \Phi). \quad (25)$$

Уларда экспонента даражасидаги K_1 коэффицент қиймати тешилиш кучланиши учун ўзаро яқин, кучланиш чекловчи коэффиценти K_2 1.5 баравардан кўпроқ фарқ қилади (4-жадвал). Коэффицентлар қийматидаги бундай фарқнинг сабабини аниқлаш учун, тешилиш кучланишининг концентрация градиентига, ҳажмий заряд қатлам қалинлигининг нейтронлар флюенсига боғлиқлиги, вольтфарад характеристикалардан концентрация градиенти ва ҳажмий зарядлар қалинлиги аниқланган.

4-жадвал

K_1 ва K_2 коэффицентлар қиймати

$K_1, \text{см}^2/\text{n}$		$K_2, \text{см}^2/\text{n}$	
$U_{чек} = 50 \text{ В}$	$U_{чек} = 200 \text{ В}$	$U_{чек} = 50 \text{ В}$	$U_{чек} = 200 \text{ В}$
$6.3 \cdot 10^{-17}$	$7.0 \cdot 10^{-17}$	$7.1 \cdot 10^{-17}$	$1.1 \cdot 10^{-16}$

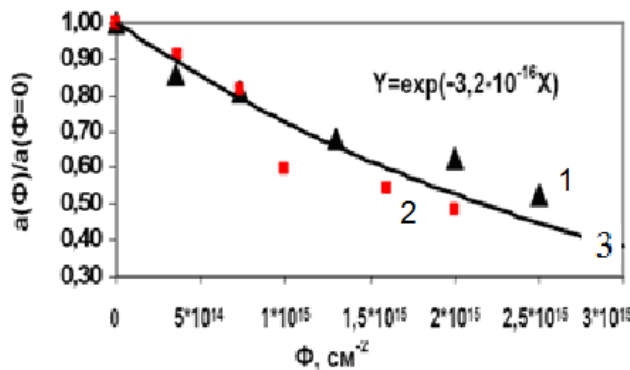
Нейтронларнинг турли флюенслари учун сигим билан тескари кучланиш киришмалар тақсимооти чизикли бўлган p - n -ўтишга хос кубли боғланиш билан ифодаланади

$$C^3 = [12(U + U_{эстр})] / [qa(\epsilon\epsilon_0)^2(S_{p-n})^3], \quad (26)$$

бу ерда « a » концентрация градиенти бўлиб, $N(x) = a \cdot x$ тенглама билан аниқланади ва нейтрон флюенси дозаси билан экспоненциал боғланишда

$$a = a(\Phi=0) \cdot \exp(-B\Phi). \quad (27)$$

Вольтфарад характеристикалар асосида ҳисобланган кучланиш чеклагичларнинг солиштирма қаршиликларидаги катта фарқдан қатъи назар, иккала тур кучланиш чеклагичлари учун кучланиш ва экспонента даражаси B нинг қиймати бир-бирига яқин $2.6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ва $3.8 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, улар ўртача қийматдан ($3.2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$) 30 % дан ортиқ фарқ қилмайди. $a(\Phi)/a(\Phi=0)$ градиентлар нисбатининг нейтронлар флюенси Φ га боғлиқлиги экспериментал (нуқталар) ва ҳисобланган ($B=3.2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$) учун $\exp(-B \cdot \Phi)$ эгри чизик 5-расмда келтирилганидек, ўзаро мос тушади.



1-50 вольтти кучланиш чеклагичи;
2-200 вольтти кучланиш чеклагичи;
3- узлуксиз чизик ҳисоблаш натижаси

**5-расм. Градиент
концентрациясининг
нурлантириш дозасига
боғлиқлиги**

Тешилиш кучланишининг нейтрон флюенси (Φ) билан экспоненциал боғланиши

$$U_{теи}(\Phi) / U_{теи}(\Phi = 0) = \exp(6.6 \cdot 10^{-17} \cdot \Phi) \quad (28)$$

билан эффектив концентрация градиенти билан нейтронлар флюенсиининг экспоненциал боғланишини таққослаш натижасида p - n -ўтиш тузилмасида доза таъсиригача a нинг қийматидан қатъи назар, бу боғланишнинг универсал эканлигини топамиз:

$$a(\Phi)/a(\Phi=0)=\exp(-3.2 \cdot 10^{-16} \cdot \Phi) \quad (29)$$

Чекланиш кучланиши ва тешилиш кучланишининг концентрация градиенти билан дозали ўзаро боғланиши нейтронлар флюенси билан чекланиш кучланишининг тўғри чизикли боғланишида $a(\Phi)/a(\Phi=0)$ нисбати экспериментал нуқталарининг нейтрон флюенси Φ билан боғлиқлиги ва $B=3.2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ да ҳисобланган $\exp(-B \cdot \Phi)$ эгри чизиги қониқарли тарзда мос тушган. Кучланишни чеклаш режимида дифференциал қаршиликлар жуда кичик ва кучланиш тушуви 100 мВ дан кам, шунинг учун чекланиш кучланиши шаклланишида

$$U_{чек}=U_{теи}+I_{чек}R_{кетма-кет} \quad (30)$$

базанинг кетма-кет қаршилиги муҳим роль ўйнайди

$$R_{кетма-кет}=R_{база}+R_{уч.ўтиши} \quad (31)$$

Ўз ўрнида

$$R_{база}=\rho_{\phi}[(d_{мб}-W)/S], \quad (32)$$

бу ерда ρ_6 – нейтрал базанинг солиштирма қаршилиги; $d_{мб}$ – металлургик p - n -ўтишдан то nn^+ контактгача бўлган масофа.

Электр майдони унча катта бўлмаган ҳажмий зарядлар соҳасининг қарши-лиги қуйидаги муносабатдан аниқланади:

$$R_{уч, \dot{y}_{мин}} = (W - W_m)^2 / (2 \cdot \epsilon \epsilon_0 \cdot S \cdot V_{тўйин}), \quad (33)$$

бу ерда W_m – зарбли ионланиш содир бўладиган ҳажмий зарядлар соҳасининг кенглиги, $V_{тўйин}$ – тўйиниш кучланиши.

Бунда $R_{баз}(\Phi)$ боғланишни ҳисоблаш учун $\rho_6(\Phi)$ ва $W(\Phi)$ боғланишни билиш зарур. Қатлам қалинлигининг флюенсга боғлиқлигини текис p - n -ўтиш кенглигини ҳажмий заряд билан боғлиқлигининг классик ифодасидан фойдаланган ҳолда ҳисоблаш мумкин

$$W(\Phi, U_{теу}) = [(12 \epsilon \epsilon_0 \cdot U_{теу}) / (q \cdot a)]^{1/3}. \quad (34)$$

Тешилиш кучланишини ҳисоблаш ҳажмий заряд соҳасининг қалинлиги ва нейтрон нурланиш таъсирида заряд ташувчиларнинг узоқлашиш коэффиценти орқали амалга оширилади:

$$K_p = 1 / k_n n_0 (\Phi = 0)^{0.77}. \quad (35)$$

Узоқлашиш коэффиценти қийматлари n -тип кремний учун $-k_n = 851$, p -тип кремний учун $-k_p = 444$ ни ташкил этади. Тешилиш ва чекловчи кучланиш ҳажмий заряд қатлами қалинлиги W_m ва солиштирма қаршилиқнинг ўзгариш домийлари K_p ҳисобланган қийматлари 5-жадвалда келтирилган.

5-жадвал

Турли кучланиш чеклагичлари учун характеристик параметрларнинг ҳисобланган қийматлари

КЧ типи	$U_{теу}$, В	$U_{чек}$, В	W , 10^{-4} см	W_m , 10^{-4} см	$K_p \cdot 10^{-16}$ см ²
КЧ 50 В	48.9	50.2	2.67·	1.09·	3.8·
КЧ 200 В	224.4	229.8	0.17·	8.4·	0.154

Нейтрон нурланишнинг чизиқли p - n -ўтиш структурасига таъсирини ўрганиш нуқтаи назаридан, нурланиш натижасида p - n -ўтиш соҳаси яқинида ҳосил бўладиган i -соҳа ўлчами ўзига хос аҳамият касб этади. Концентрация градиенти билан нейтрон дозаси $a(\Phi)$ орасидаги боғланишнинг эмпирик ифодаси (27) формулада келтирилган.

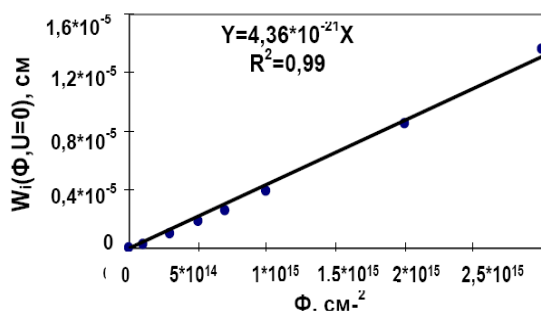
i -соҳа ўлчамини қуйидаги муносабатдан аниқлаш мумкин: $W_i = W_c W_a$;

$$W_c(\Phi, U) = \epsilon \epsilon_0 \cdot S_{p-n} / C_{p-n}(\Phi, U); \quad W_a(\Phi, U) = [12 \cdot \epsilon \epsilon_0 \cdot (U + U_d) / q \cdot a(\Phi)]^{1/3}. \quad (36)$$

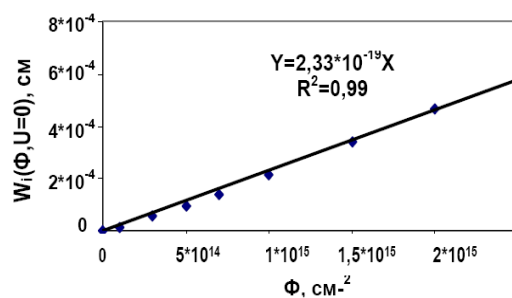
Ҳажмий зарядларнинг нейтронлар флюенсига боғлиқ ўзгариши қуйидаги формула орқали ҳисобланган ва 6-расмда келтирилган.

$$W_i(\Phi, U = 0) = [0.053 / a(\Phi = 0)^{0.94}] \cdot \Phi. \quad (37)$$

Шундай қилиб, қатлам қалинлигининг нейтрон флюенси ва кучланишга боғлиқлигини баҳолаш учун ифода аниқланган. Бу эса p^+nn^+ -тузилманинг



а) 50 вольтли кучланиш чеклагичи

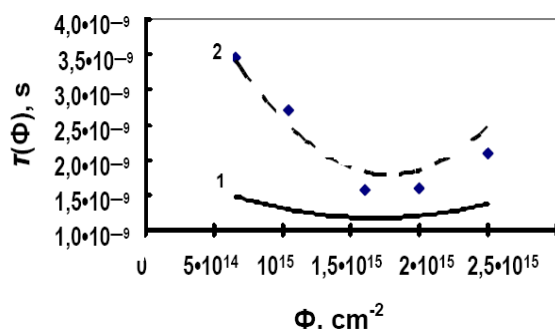


б) 200 вольтли кучланиш чеклагичи

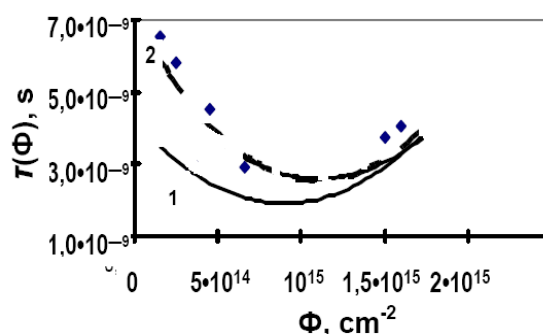
6-расм. $W_i = F(\Phi, U=0)$ нинг ҳисоби боғланишлари

ҳажмий заряд соҳасида юз бериши мумкин бўлган ўзгаришлар тўғрисида маълумот олиш имконини беради. Бунда базада киришма концентрацияси градиенти ўзгариши билан бир қаторда, диод тузилманинг тезкорлигини белгиловчи ноасосий заряд ташувчиларнинг яшаш даври ҳам ўзгаради. Яшаш даври қанча қисқа бўлса, шунча яхши. Иккала турдаги (50В ва 200В) кучланиш чеклагичлари учун ноасосий заряд ташувчилари яшаш даврининг нурланиш дозасига боғлиқлиги рекомбинация маркази таъсирига боғлиқ бўлиб, минимал қийматга эга.

7-расмга кўра, юқорида башорат қилинганидек, $\Phi = 1/b$ формула билан аниқланадиган $\tau(\Phi)$ боғланишнинг минимум нуқтаси ҳақиқатан ҳам мавжуд.



а) 50 вольтли кучланиш чеклагичи



б) 200 вольтли кучланиш чеклагичи

1- ҳисоб натижаси; 2- экспериментал натижалар

7-расм. Кучланиш чеклагичлар учун $\tau(\Phi)$ боғланишлари

Бунда $K_\tau(\Phi)$ боғланишдаги минимум нуқтаси экспоненциал кўпайтма билан аниқланади. Фикримизча, бу ҳолат яшаш даврини ҳисоблаш учун ($1/\tau(0)$ ҳисобга олмаганда) Мессенджер моделидан фойдаланиш мумкинлигидан далолат беради.

$$K_\tau(\Phi) = A \exp(-b \cdot \Phi) \quad (38)$$

ва

$$1/\tau(\Phi) = 1/\tau(0) + K_\tau(\Phi) \quad (39)$$

яъни

$$\tau(\Phi) = [\exp(b \cdot \Phi)] / (A \cdot \Phi). \quad (40)$$

Кўриниб турибдики, (40) ифода

$$\Phi = 1/b \quad (41)$$

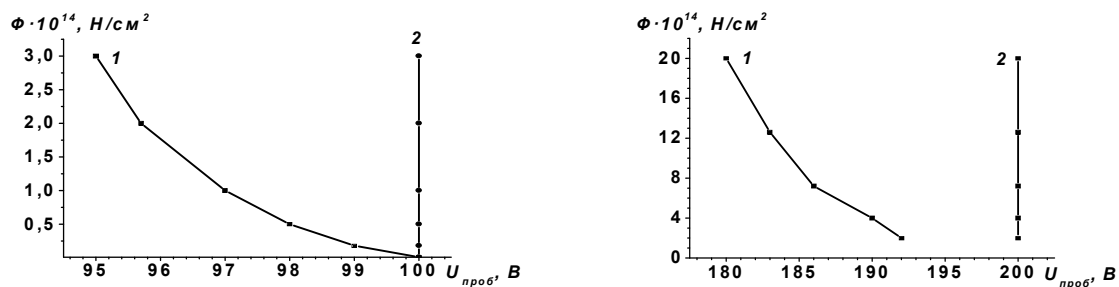
нуқтада экстремум (минимум) га эга.

Шуни таъкидлаш жоизки, ноасосий заряд ташувчилар яшаш даврининг нурланиш дозасига боғланиш эгри чизигида қайрилиш пайдо бўлиши нейтрон нурлантириш жараёнида рекомбинацион марказларнинг пайдо бўлиш қонуниятида ўзгаришлар содир бўлганидан далолат беради. Яъни чизикли боғланишдан экспоненциал боғланишга ўтиш содир бўлади.

Текширишлар натижасига кўра, бошланғич тешилиш кучланиши қандай бўлишидан қатъи назар, нурланиш дозаси ортиши билан тешилиш кучланиши ортади. Бундай ҳолат тешилиш кучланишини зарурий номинал кучланишга етказиб олишга асос бўлади ва тешилиш кучланишини бошқаришдан фойдаланиб, ишлаб чиқарилаётган кучланиш чеклагичларни номенклатурали кучланишлар 100 вольтли ва 200 вольтлига мос равишга келтириб, яхшилашга олиб келади.

Табиийки, кучланиш чеклагичлари учун номинал кучланишдан фарқ қилувчи (100В ва 200В) тешилиш кучланишининг флюенсга боғланишини аниқлаш лозим. Жумладан, 100 вольтли кучланиш чеклагичлари учун тешилиш кучланишлари 95 В, 96 В, 97 В, 98 В, 99 В бўлган намуналар ва ҳар бирида 3÷4 намунадан ташкил топган 5 та гуруҳ ташкил қилинган. Шундай аналогик намуналар гуруҳи 200 вольтли кучланиш чеклагичлари учун ҳам ташкил қилинган.

8-расмда бу намуналар учун тешилиш кучланишини нейтронлар флюенсига боғлиқлик графиклари келтирилган. Уларга асосан тешилиш кучланиши номинал қийматдан қанча катта бўлса, намунани номинал кучланишга етказиш учун шунча катта нейтронлар флюенси талаб этилади.



а) 100 вольтли кучланиш чеклагичлари б) 200 вольтли кучланиш чеклагичлари

1— берилган тешилиш кучланишига тегишли кучланиш чеклагичларни нурлантириш дозаси; 2— кучланиш чеклагичларни нурлантиргандан сўнгги тешилиш кучланишлари

8-расм. Кучланиш чеклагичларининг оптимал нурлантириш дозасининг бошланғич тешилиш кучланишига боғлиқлиги

Бошқача қилиб айтганда, бу ерда вольтли кучланиш чеклагичларини номинал кучланишга келтирувчи нейтронлар флюенслари қийматлари билан боғлиқлиги келтирилган. Ушбу тешилиш кучланишларини нурланиш дозасига боғлиқлигини керакли тешилиш кучланишига келтирувчи калибровка чи-

зиғи сифатида фойдаланиш мумкин.

Шундай қилиб, кремний асосидаги кучланиш чеклагичларини ва юқори частотали диодларнинг технологиясини модернизация қилиш ва параметрларини радиация таъсирида оптималлаштириш уларнинг эксплуатацион параметрлари технологик фарқланишини, статистик қувват йўқолишини камайтиришга ва яроқли диодлар чиқишини ошишига олиб келади.

ХУЛОСА

1. Кичик дифференциал қаршилиқ ва кам фарқли тешилиш кучланишини таъминловчи кичик вольтли кучланиш чеклагичини олиш технологияси маргимушни юқори концентрацияли манбадан ампулаларни диффузия қилиш ёрдамида ишлаб чиқилган.

2. Кремнийли қувватли диодларга юқори адгезияли ва иссиқликни самарали тарқатиш қобилияти билан фарқланадиган омик контакт олиш усули ишлаб чиқилган. Бу усул *p-n*-ўтишли пластиналарнинг ҳар иккала юзасига ванадий ва кумушнинг юпқа ($0.1 \div 0.3$ мкм) қатламларини сепишни ва уларнинг кумушланган мисли иссиқлик компенсатори билан қотиштиришни ўз ичига олади. Бундай контакт қувватли яримўтказгичли қуршаб оловчи диодларда қўлланилади.

3. Тешилиш режимида кучланиш чеклагичлари қаршилигининг ток билан боғлиқлигига асосланган илк бор киритилган «самарадорлик коэффиценти» орқали уларни корпусга ўрнатишдан аввал саралаш усули ишлаб чиқилган.

4. Кристалл ва иссиқлик компенсаторларининг оптимал ўлчамларини ҳисоб-лаш ва жойлаштириш, шунингдек, ҳарорат потенциали генератори ва иссиқлик оқими генератори сифатида номоён бўлиши хоссаларини тушунтирувчи кучланиш чеклагичининг иссиқлик модели ишлаб чиқилган.

5. Чекланган кучланишни ўлчашнинг икки генераторли такомиллашган усули ишлаб чиқилган, унинг ёрдамида тескари кучланиш ва генератор ҳосил қилган токнинг импульс ташкил этувчисини ўлчаш таклиф қилинади. Ўлчашнинг умумий хатолиги $\sim 2\%$ бўлиб, маълум бўлган бир генераторли усул хатолигидан уч марта кам.

6. Занжирда кучланиш ортиб кеганида истеъмолчини автоматик тарзда уланиши ва узилишини таъминловчи, кучланиш чеклагичи асосида радиоэлектрон аппаратураларнинг муҳофаза модули ишлаб чиқилган.

7. Юқори частотали тўғрилагич диодлар ва кучланиш чеклагичларининг тешилиш кучланишини, ноасосий ток ташувчилари яшаш вақтини ва тескари қаршилиқнинг тикланиш вақтини, оптималлашни таъминловчи радиацион технология ишлаб чиқилган.

8. Гамма ва электрон нурланишлари таъсирида бўлган юқори частотали диодларда оптимал ўтиш характеристикаларини аниқлаб берувчи, тескари ток ва тўғри кучланиш тушувини, ҳажмий заряд қалинлигини ҳисоблашнинг муҳандислик услублари ишлаб чиқилган.

9. Қайтар тешилиши 14 В гача бўлган кичик вольтли кучланиш чеклагичларини муҳофазалаш учун арсенид галлий асосида ток чекловчи ишлаб чиқилган.

10. Кучланиш чеклагичларини ва юқори частотали диодларни олиш технологияси, уларнинг функционал параметрларини текшириш усуллари бўйича олинган натижалар ОАЖ «FOTON» ишлаб чиқаришида қўлланилмоқда.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 при ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ
ИНСТИТУТЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ
«ФИЗИКА-СОЛНЦЕ», ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И САМАРКАНДСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ФИЗИКА-СОЛНЦЕ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

РАХМАТОВ АХМАД ЗАЙНИДИНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИ-
КОВЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ И ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ,
ОПТИМИЗАЦИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ТЕРМО- И
РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**01.04.10 – Физика полупроводников
(технические науки)**

АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Ташкент – 2014

Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан, за номером 30.09.2014/B2014.5.T 266

Докторская диссертация выполнена в Физико-техническом институте АН РУз и ОАО «FOTON».

Полный текст докторской диссертации размещен на веб-сайте Научного совета 16.07.2013.FM/T.12.01 при Физико-техническом институте, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий и Самаркандском государственном университете по адресу kengash.fti.uz

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице научного совета по адресу kengash.fti.uz и Информационно-образовательном портале “ZiyoNet” по адресу www.ziyo.net

Научный консультант: **Каримов Абдулазиз Вахитович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Улимов Виктор Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Касымахунова Анора Мамасадыковна
доктор технических наук, профессор

Тагаев Марат Баймуратович
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: Ташкентский государственный технический университет

Защита состоится «___» _____ 2014 г. в ___ часов на заседании одноразового научного совета по специальности 01.04.10 (технические науки) на основе научного совета 16.07.2013.FM/T.12.01 при Физико-техническом институте, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий и Самаркандском государственном университете по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули - 26. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net.

Докторская диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института, за № 01, с которой можно ознакомиться в ИРЦ по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули - 26. Тел./Факс: (+99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2014 года
(протокол рассылки ___ от _____ 2014 г.).

С.Л. Лутпуллаев

Председатель научного совета по присуждению
учёной степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

М.Н. Турсунов

Учёный секретарь одноразового научного совета по присуждению
учёной степени доктора наук, д.т.н.

И.Г. Атабаев

Председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению учёной степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

АННОТАЦИЯ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность и востребованность темы диссертации. Согласно постановления Президента Республики Узбекистан ПП-1442 «О приоритетах развития промышленности республики Узбекистан в 2011 - 2015 годах» от 15 декабря 2010 года повышение эффективности промышленного производства является первостепенной задачей. В связи с этим последовательное снижение производственных затрат и себестоимости полупроводниковых силовых диодов (ограничители напряжения, высокочастотные выпрямительные диоды), производимых ОАО «FOTON», предусматривает проведение целенаправленных работ по улучшению их параметров и надёжности, а также по оптимизации их технологии, что является важнейшей предпосылкой для повышения конкурентоспособности выпускаемых приборов, а также сохранения существующих и завоевания новых рынков сбыта.

В области защиты радиоэлектронной аппаратуры и предотвращения выхода из строя электрических оборудования импульсными перенапряжениями, поставленные учеными ведущих зарубежных стран США, Канады, Голландии, Китая и Японии задачи разработки и исследования высоковольтных ограничителей напряжения, а также стабилизирующих устройств на основе силовых диодов являются востребованными.

Эти силовые диоды широко применяются в устройствах преобразования электроэнергии, системах питания и управления технологическими процессами. Для их изготовления используется диффузионная технология легирования кремния примесями бора и фосфора, которая широко используется для изготовления высоковольтных диодов. Однако применительно к низковольтным ограничителям напряжения не позволяет получить низкие дифференциальные сопротивления, которое можно получить применением примеси, обеспечивающей резкое различие концентрации носителей на границе *p-n*-перехода. Решение этой проблемы требует новых физических подходов, позволяющих получить высококонцентрированный источник – диффузант, который можно изготовить путем использования мышьяка. Кроме того эффективность работы силовых диодов определяется резкостью характеристик при пробойных напряжениях и номинальным коэффициентом ограничения. В рабочем режиме силовые диоды под воздействием мощных импульсов выделяют тепло и их оптимизация возможна на основе физического анализа теплопереноса по всей длине структуры, включая контактные области.

Востребованность диссертации вытекает из необходимости внедрения усовершенствованных технологий, устройств разбраковки и защиты радиоэлектронной аппаратуры, повышения выдерживаемой импульсной мощности, что связано с задачами, требующими целенаправленного подхода к проблемам снижения технологического брака и повышения надежности, расширения области применения силовых диодов, а также снижения динамических потерь мощности.

Данная диссертационная работа направлена на разработку технологии получения низковольтных ограничителей напряжения с малым разбросом

пробивных напряжений и низким дифференциальным сопротивлением, как в прямом, так и в обратном направлениях, разработке радиационной технологии обеспечивающей оптимизацию пробивного напряжения, повышение быстродействия и улучшение качества высокочастотных диодов.

Вместе с тем, в ряде случаев становится необходимым защита самих приборов от непредсказуемого превышения токов в цепи, что требует разработки ограничителей токов, с параметрами обратимыми после прохождения через них импульса тока.

Исходя из выше приведенного, комплексное изучение, как параметров ограничителей напряжения и высокочастотных диодов, так и физических аспектов технологии их изготовления (например, диффузией и радиационными способами), направленных на оптимизацию конструкций и технологии изготовления силовых диодов и получение на этой основе оптимального сочетания их параметров, в том числе с учётом требований к их радиационной стойкости, является своевременной и актуальной.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Настоящая работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан ППИ-3-«Энергетика, энерго- ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации. Исследования технологии получения и эксплуатационных параметров силовых полупроводниковых диодов различного вида (ограничителей напряжения, стабилитронов, тиристоров, высокочастотных выпрямительно-ограничительных диодов) с учетом потребности в радиоэлектронике, автомобильной промышленности, набирают темпы и достигнуты определенные успехи в США, Канаде, Англии, Голландии, Китае и России и др.

В публикациях ряда крупнейших компаний, таких как Philips Semiconductors, STMicroelectronics, Littelfuse, Moeser Electronics, ON Semiconductor, SGS-Thomson, Центр «СЭЛТ» и др. отмечено, что проводимые исследования направлены на разработку силовых диодов с улучшенными параметрами, удовлетворяющими постоянно возрастающие требования потребительского рынка. В исследованиях большое внимание уделяется актуальности и востребованности работ, посвященных повышению надежности и оптимизации эксплуатационных параметров, силовых полупроводниковых приборов.

В связи с этим, разработка новых технологий изготовления силовых приборов и модернизация существующих технологий находится в поле внимания ведущих научно-исследовательских центров, в частности, разработчиками фирмы Sigetronics Inc. показано, что применение эпитаксиальной технологии позволяет получить низковольтные ограничители напряжения с параметрами, превосходящими параметры аналогов на основе диффузионной технологии. Другим направлением исследований является изучение влияния радиационного воздействия на параметры силовых диодов, которое позволя-

ет оптимизировать параметры диодов после завершения технологических процессов. Например, учеными Швейцарии путем радиационного легирования базовой области кремниевого силового диода палладием получено меньшее значение времени жизни неосновных носителей, чем при легировании платиной.

Степень изученности проблемы. В последнее время интенсивно проводятся экспериментальные и теоретические работы, посвященные технологии создания и оптимизации параметров высокочастотных и ограничительных диодов на основе кремния. Большинство из них направлено на оптимизацию эксплуатационных параметров за счет конструктивных и схемотехнических решений, либо за счет использования комбинированных технологий (лазерной технологии совместно с диффузионной, ионной имплантации с радиационной). Однако вопросы модернизации существующей диффузионной технологии и конструирования оптимальной арматуры, высокочастотных и ограничительных диодов остаются без должного внимания. Успешное решение этой проблемы позволит без существенной реконструкции производства улучшить не только параметры изделий, но и технико-экономические показатели производства кремниевых $p^+ - n^+$ -, $p^+ p - n^+$ - и $p^+ p - nn^+$ -структур.

Вместе с тем условия эксплуатации силовых высокочастотных и ограничительных диодов налагают жесткие требования к их параметрам. Зачастую в одной электронной схеме приходится использовать две пары, а то и больше ограничителей напряжения, где их параметры должны быть строго идентичными. Однако при проведении технологических операций по изготовлению приборных структур могут создаваться дефекты, приводящие к разбросу их эксплуатационных характеристик. В связи с этим возникает необходимость разработки технологии получения высокочастотных и ограничительных диодов с заданными параметрами.

Известные к настоящему времени работы не содержат сведений о технологии изготовления полупроводниковых высокочастотных и ограничительных диодов с градиентом концентрации носителей в выпрямляющем переходе на базе диффузионной технологии и методах идентификации и оптимизации их эксплуатационных параметров, что является актуальной проблемой на сегодня.

Применение радиационно-технологических процессов, может повысить быстродействие, обеспечить надежность исходных структур силовых приборов. В тоже время, каждый раз при выборе радиационного воздействия, приходится решать проблему оптимального сочетания параметров изделий, подвергшихся радиационной обработке. В результате возникает проблема разработки общих подходов к выбору того или иного радиационного воздействия, которое обеспечит оптимальное сочетание параметров для диодов, чей $p - n$ переход изготовлен различными технологическими методами (планарная технология, меза-диффузионная и т.п.). Поэтому разработка таких методов также является актуальной инженерной задачей, решение которой позволит расширить область применения приборов этого класса (и, соответственно,

расширить рынки сбыта) не прибегая к дорогостоящим экспериментам с использованием не всегда доступных источников радиации.

Другой проблемой является то, что известные методы, предназначенные для исследования силовых приборов - ограничителей напряжения, высокочастотных выпрямительных диодов не удовлетворяют по точности, а использование известных методов определения параметров стабилитронов является некорректным.

Таким образом, известные к настоящему времени работы не содержат сведений об оптимальной технологии и оптимизации параметров полупроводниковых высокочастотных и ограничительных диодов, что является актуальной проблемой на сегодня.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ. Работа выполнена в рамках Государственной программы НИР ФТИ НПО «Физика-Солнце» АЗ-ФА-0-10-440 «Разработка методов термической и электроимпульсной обработки для увеличения выхода при производстве дефицитных групп полупроводниковых приборов (ОАО «FOTON»)).

Целью исследования является разработка оптимизированной диффузионной технологии получения кремниевых диодных структур с уменьшенными значениями дифференциального сопротивления и улучшение качества, повышение надежности высокочастотных выпрямительных диодов и ограничителей напряжения при радиационном воздействии.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи исследования:**

разработать технологию высоко концентрационной диффузии мышьяка в кремний из неограниченного источника для изготовления низковольтных структур с большим градиентом концентрации примесей на границе *p-n*-перехода, чем при легировании фосфором, выдерживающих воздействие кратковременных мощных импульсов перенапряжения;

разработать условия термо воздействия, обеспечивающие снижение разброса основного электрического параметра, получаемых низковольтных *p-n*-переходов в кремнии от процесса к процессу;

разработать метод получения омического контакта с минимальным эффектом переноса на границе материала контакта с полупроводником;

разработать универсальный, физически обоснованный метод измерения функциональных параметров ограничителей напряжения. В данном случае требуется разработать усовершенствованную методику определения напряжения ограничения с учетом режимов измерения и коэффициента эффективности ограничителей напряжения;

разработать тепловую модель ограничителя напряжения, объясняющую процессы выделения и поглощения импульсной мощности в соответствующих областях конструкции диода в зависимости от его режима включения;

определить оптимальные условия и режимы технологического радиационного воздействия на силовые выпрямительные диоды, *p-n*-переход кото-

рых изготовлен различными методами;

изучить влияние радиационного воздействия на напряжение пробоя и ограничения ограничителей напряжения для идентификации их эксплуатационных параметров;

разработать ограничители тока на основе арсенида галлия для защиты ограничителей напряжения.

Объектом исследования являются низковольтные и высоковольтные ограничители напряжения с p^+n^+ , p^+-n-n^+ , а также $p^+-p-n-n^+$ -структурами, высокочастотные выпрямительные диоды, изготавливаемые на основе кремния и ограничители тока на основе арсенида галлия.

Предмет исследования - процессы диффузионного легирования кремния мышьяком, модели идентификации эксплуатационных параметров высокочастотных диодов и ограничителей напряжения при воздействии радиационного излучения, способы получения омических контактов с улучшенной адгезией к поверхности полупроводника.

Методы исследования. В процессе исследования применены методы вольтамперных и вольтемкостных характеристик; метод радиационного воздействия, зондовые методики определения поверхностного сопротивления, методы дифференциальной проводимости, методы моделирования.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

впервые разработана технология получения низковольтных ограничителей напряжения (меньше 7 В) на основе легированных мышьяком кремниевых p^+-n^+ -структур для защиты блоков питания;

впервые разработан способ получения мощных кремниевых выпрямительно-ограничительных диодов (10А) на основе кремниевых $p^+-p-n-n^+$ -структур с эффективными теплоотводящими контактами, предназначенные для использования в качестве выпрямителя, ограничителя и блокирующих диодов;

разработан способ получения омического контакта к силовому диоду с $p^+-p-n-n^+$ - переходом из трех слоев на основе ванадия и двух слоев серебра, которые сплавляются при 450 °С, в качестве теплоотводящего компенсатора выбрана медная прослойка гальванически покрытая серебром;

разработан новый двухгенераторный метод измерения напряжения ограничения в три раза меньшей погрешностью измерения по сравнению с известным одногенераторным методом;

впервые разработан полупроводниковый прибор на основе арсенида галлия, содержащий полупроводниковую подложку первого типа проводимости с омическим контактом, тонкий слой второго типа проводимости с двумя омическими контактами отстоящими друг от друга на определенном расстоянии, выводной электрод, присоединенный к омическому контакту;

разработана методика определения эффективности ограничения напряжения из зависимости сопротивления диода от плотности тока в области пробоя в широком диапазоне напряжений;

разработаны тепловые модели, основанные на расчете теплопередачи и температуры перегрева *p-n*-перехода в режиме включения и подаче импульсного напряжения в виде генератора температурного потенциала и генератора теплового потока;

разработана инженерная методика определения соответствующего вида радиационного технологического воздействия, которая позволяет получить оптимальное сочетание параметров ограничителей напряжения и высокочастотных диодов;

впервые разработано устройство защиты радиоэлектронной аппаратуры с индикацией момента выхода из строя ограничителей напряжения.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны технологические условия получения низковольтных ограничителей напряжения с близкой к металлической проводимости сильнолегированными областями, включающие оригинальные операции диффузии мышьяка в кремний;

предложен усовершенствованный компенсационный метод исследования импульсных характеристик ограничителей напряжения, а также новый метод определения их коэффициента эффективности ограничения напряжения, основанный на токовой зависимости дифференциального сопротивления;

разработаны технологические и конструктивные аспекты изготовления мощных выпрямительно-ограничительных блокирующих диодов, обеспечивающие повышение выдерживаемой мощности;

предложены методы оптимизации параметров высокочастотных и ограничительных диодов и устройства защиты радиоэлектронной аппаратуры по току и напряжению;

разработаны инженерные расчёты позволяющие находить оптимальные материалы и конструкторские решения для ограничителей напряжения согласно требованиям потребительского рынка, направленные на расширение их сбыта и увеличение конкурентоспособности;

предложены методы инженерного расчёта эксплуатационных параметров ограничительных диодов, которые дали возможность прогнозирования временных характеристик ограничителей напряжения под воздействием нейтронного облучения;

разработаны инженерные методы расчёта основных параметров высокочастотных выпрямительных диодов позволяющие прогнозировать параметры изделий после радиационного воздействия, подбирать оптимальную дозу облучения и тем самым повысить воспроизводимость технологического процесса и выход годных приборов.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением при изучении физических процессов общепринятых научных методов, стандартных и апробированных в заводских условиях методики исследования. Выводы основаны на экспериментальных данных, согласующихся с теоретическими расчетами.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования. Разработанные ограничители напряжения, выпрямительно-ограничительные блокирующие диоды используются для защиты радиоэлектронной аппаратуры от перенапряжений, в электрических цепях постоянного и переменного тока, а высокочастотные диоды используются в устройствах выпрямления и преобразования энергии.

Внедрение результатов исследования. В ходе выполнения диссертационной работы получены 3 патента Республики Узбекистан (№ IAP 04599 04.10.2012г., № IAP 04721 03.05.2013г., № IAP 04571 22.08.2012г.) и Патент Российской Федерации (№ 2522786 21.05.2014г.). По результатам исследований разработаны технологии изготовления высокочастотных выпрямительно-ограничительных диодов и низковольтных ограничителей напряжения, а также методы оптимизации характеристик ограничителей напряжения и внедрены в производство в ОАО «FOTON», годовой экономический эффект которого составил 78 млн. сумм. (Акт внедрения от 12.12.2013г. Ассоциации «Узэлтехсаноат»).

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и республиканских конференциях: «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, 2011); (Одесса, 2013); «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (Ташкент, 2010); «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, 2010, 2013); «Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Mater. Sci. SPO-2010 (Kyiv, 2010); «Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития» (Навои, 2010); II-Международная конференция по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и нано структурах» (Фергана, 2011). «International Conference Nuclear science and its application» (Samarkand (Uzbekistan) September 25-28, 2012).

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены (май 2014) на расширенном семинаре по направлению физики полупроводников при Физико-техническом институте НПО «Физика-Солнце» АН РУз, а также в одноразовом Научном семинаре (август 2014) при Научном совете 16.07.2013.FM/T.12.01 при Физико-техническом институте АН РУз, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз и Самаркандском государственном университете по присуждению ученой степени доктора наук по специальности 01.04.10-Физика полупроводников (технические науки).

Опубликованность результатов. Полученные результаты отражены в 35 научных трудах, которые полностью отражают ее содержание. В том числе 18 статей опубликованы в реферируемых зарубежных и 2 в республиканских журналах, а 11 в трудах международных и республиканских конференций, получены 4 патента.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы. Она изложена на 203 страницах машинописного текста, содержит 88 рисунка, 12 таблиц, включая цитированную литературу из 139 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность проблемы и темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор литературных данных по состоянию и проблемам оптимизации параметров высокочастотных диодов и ограничителей напряжения. Рассмотрены конструктивные и схемотехнические пути оптимизации параметров силовых диодов, проанализированы технологии получения низковольтных силовых диодов с p^+-n^+ -переходом. Проанализированы известные методы измерения параметров и повышения эффективности ограничителей напряжения, а также радиационные методы оптимизации параметров полупроводниковых приборов. Сделано заключение, что разработка высококонцентрационной диффузии мышьяка в кремний позволит получить лучшие электрические параметры низковольтных структур с p^+-n^+ -переходом, чем при легировании фосфором. Такие параметры как напряжение пробоя, быстродействие высокочастотных диодов и ограничителей напряжения могут быть оптимизированы путем воздействия радиационным излучением.

Во второй главе приводятся физико-технологические аспекты создания низковольтных ограничителей напряжения диффузией мышьяка в кремний из неограниченного источника, технология изготовления мощных выпрямительно-ограничительных диодов, способ получения омического контакта с улучшенной адгезией к поверхности полупроводника, основные характеристики силовых диодов на основе кремниевых p^+-n^+ , p^+-n-n^+ и p^+p-n-n^+ -структур.

На основе изучения физико-технологических аспектов создания низковольтных ограничителей напряжения методом ампульной диффузии мышьяка в кремний впервые подобран состав диффузанта (450 мг *As*, 5 г *Si*) обеспечивающий, в отличие от традиционной диффузии фосфора, высокую поверхностную концентрацию и малый разброс напряжения пробоя низковольтных p^+-n^+ -переходов, как приведено в таблице 1.

Сравнение пробойных характеристик низковольтных ограничителей напряжения легированных мышьяком, фосфором, а также зарубежного аналога показало, что для ограничителя напряжения изготовленного диффузией мышьяка наблюдается свойственный эффективным ограничителям напряжения резкий переход из низкопроводящего состояния в высокопроводящее, (рис. 1).

Для снижения потерь мощности исследуемых диодов связанных с контактами, в качестве материала омического контакта вместо никеля и золота предложено использовать ванадий с двухслойным нанесением серебра. Благодаря лучшим адгезионным и тепловым свойствам предлагаемого материала контакта его также использовали при изготовлении выпрямительно-ограничительных блокирующих диодов.

Таблица 1

**Средние квадратичные отклонения напряжений пробоя
 p - n - переходов для разных источников диффузии**

$\rho_{\text{базы}},$ Ом·см	150 мг As	200 мг As	350 мг As	Лигату- ра*	250 мг As, 5 г Si	450 мг As, 5 г Si
	U, B	U, B	U, B	U, B	U, B	U, B
0.001	1.23	0.67	0.54	0.25	0.10	0.08
0.002	1.17	0.50	0.83	0.37	0.15	0.18
0.003	0.81	0.28	0.35	0.30	0.18	0.16
0.005	0.30	0.23	0.37	0.32	0.23	0.18
0.008	0.54	0.40	0.41	0.47	0.33	0.24
*лигатура представляет собой порошок кремния p -типа отожженный в вакууме в присутствии мышьяка при 1000 °С в течение 48 ч. и затем измельчен в ступке						

Впервые разработанная технология изготовления выпрямительно-ограничительного блокирующего диода с p^+p - n - n^+ -структурой включает в себя получение области p -типа проводимости и сильнолегированных областей n^+ - и p^+ -типа проводимости методом диффузии, напыление на обе поверхности

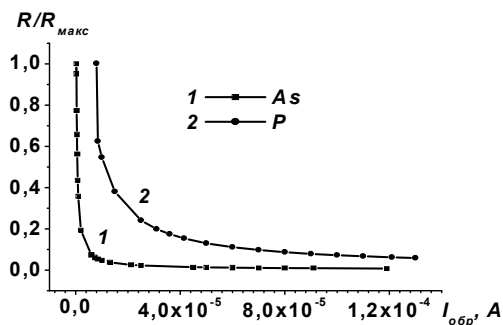


Рис. 1. Зависимости дифференциального сопротивления ограничителя напряжения от обратного тока

тонких слоев (0.1÷0.3 мкм) ванадия и серебра, а также их сплавление с посеребренным медным диском вместо вольфрамового диска. В отличие от аналога улучшенные теплоотводящие свойства разработанного диода при токах до 10А предотвращают разогрев диода, а обратные токи более устойчивы температурным воздействиям и пробой p - n -перехода является обратимым. В высоковольтных ограничителях напряжения с p^+-n - n^+ -структурой полученных диффузией бора и фосфора в кремний n -типа проводимости напряжения пробоя носят лавинный характер, а требуемые напряжения пробоя можно получить, подбирая удельное сопротивление базовой области или путем комбинации низковольтного и высоковольтного ограничителей напряжения, мощности можно изменять за счет их параллельного соединения.

Третья глава посвящена новым методам исследования основных параметров силовых диодов и устройствам защиты радиоэлектронной аппаратуры. Описана предложенная методика определения эффективности ограничения напряжения диодных структур, приведено техническое описание усовершенствованной установки измерения основных параметров ограничителей напряжения, а также изложены принципы действия предлагаемого полевого диода и разработанного устройства защиты радиоэлектронной аппаратуры.

На основе изучения взаимосвязи коэффициента ограничения определяемого в импульсном режиме $K_{огр.имп} = U_{огр.имп} / U_{проб}$ с введенным коэффициентом эффективности при заданных токах предложено осуществлять отбраковку низковольтных ограничителей напряжения не отвечающих технологическим нормам параметров в ранней стадии до установки на корпуса. Коэффициент эффективности представляет собой степень изменения напряжения на ограничителе напряжения при изменении обратного тока

$$Z = \frac{\ln(R_D / R_{\max огр}) - \ln(R_D / R_{\max проб})}{\ln I_{огр} - \ln I_{проб}}, \quad (1)$$

то есть чем меньше изменение напряжения для заданного интервала тока, тем качественнее ограничитель напряжения. Действительно сравнение данных характеристических параметров ограничителя напряжения в зависимости от легирующей примеси показали, что образцы, изготовленные путем легирования мышьяком, имеют меньший разброс по напряжению пробоя и выдерживают большую импульсную мощность, чем образцы легированные фосфором, (табл. 2).

Таблица 2

**Данные характеристических параметров ограничителей напряжения
в зависимости от легирующей примеси**

№ об раз- ца	$U_{проб}$, В		Z	$K_{огр.и}$	$P_{и,}$ $кВт$	$U_{проб}$, В		Z	$K_{огр.и}$	$P_{и,}$ $кВт$
	1 мА	4 мА				1 мА	4 мА			
7.5 В ограничители напряжения легированные мышьяком						8 В ограничители напряжения легиро- ванные фосфором				
1	7.35	7.52	0.99	1.19	1.85	8.35	9.0	0.87	1.4	1.5
2	7.39	7.53	0.99	1.18	1.9	8.35	8.8	0.9	1.5	1.6
3	7.38	7.58	0.98	1.21	1.85	8.14	8.9	0.86	1.38	1.5
4	7.4	7.6	0.9	1.18	1.85	7.7	8.7	0.84	1.42	1.6
5	7.44	7.62	0.99	1.24	1.85	7.9	8.6	0.86	1.39	1.6
6	7.4	7.65	0.99	1.22	1.78	8	8.8	0.85	1.4	1.58
7	7.6	7.75	0.98	1.22	1.8	8.2	8.9	0.87	1.38	1.5

Следует отметить, что измерения параметров мощных ограничителей напряжения проводили усовершенствованным двухгенераторным методом с меньшей погрешностью, по сравнению с известным прямым методом, который не обеспечивает требуемую погрешность измерения из-за зависимости абсолютной величины погрешности измерения от плотности тока.

Двухгенераторный метод основан на математической модели определения напряжения ограничения

$$U_{огр} = U_{проб} + r_d I_{max}, \quad (2)$$

где r_d – дифференциальное сопротивление в области пробоя. Так как переменная составляющая напряжения ограничения для всех ограничительных диодов не превышает $20\% U_{огр}$, то в предлагаемом методе измерение $U_{огр}$

заменяется измерением постоянного обратного напряжения $U_{проб}$ и малой импульсной составляющей $U_{\wedge} = r_d \cdot I_{max}$.

Измерение $U_{проб}$ производят с помощью вольтметра постоянного тока (комбинированный прибор Щ-300 с погрешностью не более 1%). Блок питания БП1 обеспечивает максимальный импульсный ток I_{max} и выходное напряжение

$$U_{БП1} = (U_{озр} - U_{проб}) + (R_0 + R_{из}) I_{max} \leq \frac{1}{5} U_{озр} + (R_0 + R_{из}) I_{max}. \quad (3)$$

Необходимая мощность на блоке питания $\Delta P_{БП} = 0,8 U_{озр} \cdot I_{max}$ меньше, чем у блока питания прямого метода измерения. Блок питания БП2 обеспечивает постоянное обратное напряжение и напряжение пробоя $U_{БП2} = U_{проб}$ с погрешностью не более 2%, которое измеряется и контролируется вольтметром постоянного напряжения (V_{II}), $\delta_{VII} = 1\%$. В результате общая погрешность измерения в новом методе напряжения ограничения составляет до 2%.

Одним из назначений разрабатываемых ограничителей напряжения является обеспечение заданного напряжения на входе защищаемой цепи. Однако при превышении допустимого порогового напряжения пробоя ограничитель напряжения может выйти из строя за счет необратимого пробоя. Поэтому для его защиты требуются ограничители тока, обеспечивающие заданный ограниченный ток. Эти условия могут быть удовлетворены с помощью модуля защиты и ограничителя тока.

Впервые разработанный модуль защиты радиоэлектронной аппаратуры предназначен для предотвращения выхода из строя различной техники (компьютер, телевизор и т.д.) и входящего в его состав ограничителя напряжения. Радиоэлектронная аппаратура подключается к разработанному модулю защиты через симистор, управляемый светодиодами, светящимися при скачке напряжения в сети, как приведено на рис. 2.

Принцип его работы состоит в том, что излучение от светодиода будет поступать на двухбарьерный фотодиод, фототок которого приведет к запирающему симистора и отключению питания радиоэлектронной аппаратуры. По окончании импульса напряжения аппаратура опять включается. Особенность токовой характеристики впервые разработанного полупроводникового полевого диода, то есть неизменность тока в широком диапазоне напряжений от участка насыщения до пробойного придает ему свойства стабилизатора тока.

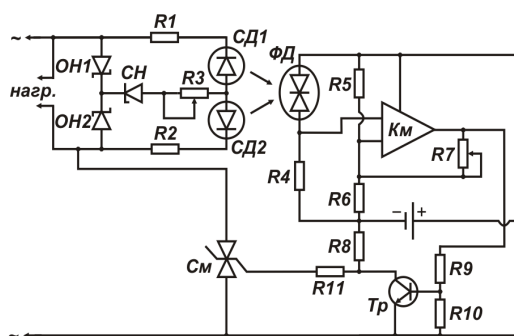


Рис. 2. Модуль защиты радиоэлектронной аппаратуры

Это свойство используется для предотвращения от необратимого пробоя низковольтного ограничителя напряжения. Принцип работы предлагаемого полевого диода идентичен действию полевого транзистора, исток которого закорочен на затвор. То есть является двухполюсником, последовательно соединяемым к ограничителю напряжения.

Величина тока в широком диапазоне напряжений на участке насыщения управляется световым излучением.

В четвертой главе рассмотрены временные характеристики, процессы теплопереноса в стационарном режиме, выделения и поглощения импульсной мощности в динамическом режиме.

В стационарном режиме пробоя теплоперенос в ограничителе напряжения объясняется одномерной моделью благодаря распространению выделяемого в области объемного заряда тепла по аксиальной составляющей к контактам и описывается дифференциальным уравнением

$$\rho' c_v \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{dP(t)}{dV} \quad (4)$$

где: λ – удельная теплопроводность; c_v – удельная теплоемкость;

ρ' – плотность вещества; $P(t)$ – мощность; V – объем рассматриваемой области. При граничных значениях $T(D/2) = T_{\text{корпус}}$ температура перехода не зависит от площади теплоотвода, а зависит от его массы

$$\Delta T \approx P \left(R_T + \frac{t_{\text{имп}}}{C'} \right) \quad (5)$$

где $t_{\text{имп}}$ – длительность импульса, C' – теплоемкость корпуса.

При подаче резко растущего импульса обратного тока на ограничитель напряжения через него будет протекать емкостной ток и при достижении напряжения пробоя он включается. Время необходимое для его полного включения будет определяться выражением

$$t_{\text{вкл}} = \gamma \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 E_{\text{max}}}{j} + \frac{q W_{p-n} N_B}{2j} + t_e \quad (6)$$

состоящем из времени заряда барьерной емкости p - n -перехода

$$t_{RC} = \frac{C_V (U_{\text{проб}} - U_{\text{max}})}{I} = \gamma \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 S_{p-n}}{W_{p-n}} \frac{E_{\text{max}} W_{p-n}}{2} \frac{1}{j S_{p-n}} = \gamma \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 E_{\text{max}}}{j} \quad (7)$$

и времени распространения ударной волны

$$t_{y0} = \frac{W_{p-n}}{2v_{y0}} = \frac{q W_{p-n} N_B}{2j} \quad (8)$$

плюс времени релаксации энергии $t_e \sim 10^{-12} \text{ сек}$

От подаваемого стандартного импульса ограничитель напряжения включается, выделяя тепловую энергию, определяемую прилагаемой мощностью и временем включения

$$Q_W = \frac{P t_{\text{вкл}}}{2} = \frac{I^2 R_0 t_{\text{вкл}}}{2} = \frac{1}{2} I R_0 q_{\text{вкл}} \quad (9)$$

В то же время тепловая энергия, выделяемая в обедненной области пропорциональна приращению температуры, удельной теплоемкости, плотности полупроводника и объема обедненной области

$$Q_W = (T_W - T_{ext=0}) \cdot c_v \rho V_W, \quad (10)$$

При этом температура обедненной области p - n -перехода после включения определяется отношением произведения тока, сопротивления перехода, количества заряда к теплоемкости обедненной области

$$T_W - T_{окр} = \frac{I^2 R t_{вкл}}{2 \rho c_v V_W} = \frac{I^2 R_0 t_{вкл}}{2 C_{T_W}} = \frac{I R q_{вкл}}{2 C_{T_W}} \quad (11)$$

Температурный потенциал (T_p) создаваемый в ограничителе напряжения определяется соотношением

$$T_p - T_{окр} = \frac{\Delta T_{max} \tau_{имп}}{2 q_{вкл}} I_{max} e^{-\frac{2t}{\tau_{имп}}} \quad (12)$$

На линейном участке нарастания температуры температурный потенциал определяется следующим выражением:

$$\Delta T = T_i - T_0 = \frac{I(t) R_0 q_w}{2 C_{T_W}} = \frac{\beta R_0 q_w}{2 C_{T_W}} t \quad (13)$$

После окончания процесса включения температура обедненной области p - n -перехода принимает максимальное значение и определяется следующей формулой:

$$\Delta T_m = T_w - T_0 = \frac{I_m R_0 q_w}{2 C_{T_W}} \quad (14)$$

В режиме включения диода температура p - n -перехода уменьшается быстрее, чем уменьшение тока, поэтому p - n -переход выступает как генератор температурного потенциала. Согласно формулы (9), описывающей тепловую энергию в динамическом режиме, тепловой поток определяется отношением к времени включения произведения максимального тока к тепловому сопротивлению:

$$\Phi_1 = \frac{dQ}{dt} = \frac{I_{max}^2 R t}{t_{вкл}} \quad (15)$$

и линейно зависит от времени, принимая максимальное значение при $t=t_{вкл}$:

$$\Phi_{max} = I_{max}^2 \cdot R = P. \quad (16)$$

Принимая уменьшение тока на участке спада импульса экспоненциальной $I = I_{max} e^{-\frac{t}{\tau_{имп}}}$, а тепловую энергию равной $Q = R t I_{max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{имп}}}$, для теплового потока имеем

$$\Phi_2 = \frac{dQ}{dt} = RI_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{имп}}}} - \frac{2t}{\tau_{\text{имп}}} RI_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{имп}}}} = RI_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{имп}}}} \left(1 - \frac{2t}{\tau_{\text{имп}}} \right)$$

или

$$\Phi_2 = RI_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{имп}}}} = Pe^{-\frac{2t}{\tau_{\text{имп}}}}. \quad (17)$$

Так как тепловой процесс должен идти с тепловой постоянной $\tau_T = R_{Tw}^1 C_{Tw}$, ($R_{Tw}^1 = \frac{Rq_{\text{вкл}}}{2C_{Tw}U_{\text{проб}}}$) поэтому тепловой поток определяется выражением

$$\Phi_2 = Pe^{-\frac{2t}{\tau_T}}. \quad (18)$$

Таким образом, обедненная область p - n -перехода ограничительного диода при воздействии стандартного импульса рассматривается как генератор теплового потока, который проходит через ее границы на фронте импульса и при включении достигает максимального значения равного подводимой мощности.

В пятой главе приведены результаты исследования влияния радиационного облучения на функциональные характеристики высокочастотных выпрямительных диодов и ограничителей напряжения.



Рис. 3. Геометрический разрез планарного высокочастотного диода

Радиационному воздействию подвергались высокочастотные планарные диоды, а также диффузионные диоды, геометрический разрез которых приведен на рис. 3 и 4. Образцы, выбранные для исследований, отличались

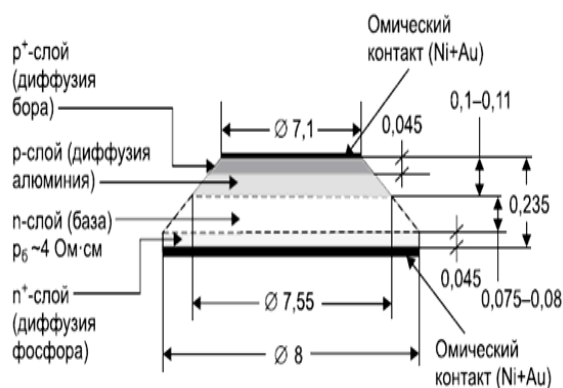


Рис. 4. Геометрический разрез диффузионного высокочастотного диода

минимальным разбросом по падению напряжения, прямому и обратному току, обратному напряжению, а также по времени восстановления обратного тока (U_F , I_F , I_R , U_R , t_{rr}), где $U_F = (0.92 \div 0.93)$ В (при $I_F = 1$ А, $I_R = (15 \pm 2)$ нА, $U_R = 200$ В); $t_{rr} \leq (150 \pm 10) \cdot 10^{-9}$ сек (при $I_F/I_R = 1$ и уровне отсчета 0.1 А). Облучение образцов гамма-квантами проводилось на гамма установке ИЯФ АН Республики Узбекистан, а облучение электронами на ускорителе электронов типа У-003 в ОАО «FOTON». Средняя энергия гамма-квантов при облучении диодов на гамма установке соответствовала гамма-излучению Co^{60} (~ 1.25 МэВ) с интенсивностью $\sim 10^{12}$ см⁻²сек⁻¹. Точность определения потока гамма-квантов (Φ_γ), которым облучались диоды, составляла 5 %. Средняя энергия электронов при облучении диодов электронами составляла ($4 \div 4.5$) МэВ с интенсивностью $\sim (2.5 \div 3) \cdot 10^{11}$ см⁻²сек⁻¹. Точность определения флюенса электронов (Φ_e), которым облучались диоды, составляла $\sim 15\%$.

Для высокочастотных планарных структур величина $\Delta(1/t_p)$ пропорциональна потоку гамма-квантов (Φ_γ) и флюенсу электронов (Φ_e) $\Delta(1/\tau_p)_\gamma = Kt_\gamma \cdot \Phi_\gamma$ и $\Delta(1/\tau_p)_e = Kt_e \cdot \Phi_e$. Подобная зависимость константы повреждаемости от дозы облучения согласно теории рекомбинации Шокли-Рида связана с А-центром, расположенным на расстоянии ~ 0.17 эВ от дна зоны проводимости. Рассчитанные на основе экспериментальных данных величины констант повреждаемости имеют значения $Kt_\gamma = 3.35 \cdot 10^{-11}$ см²/с и $Kt_e = 2.5 \cdot 10^{-8}$ см²/с очень близкие к литературным данным.

Величины экспериментально наблюдаемых значений обратных токов $I_{r0l\gamma}$ и I_{r0le} лежат в интервале от $3.7 \cdot 10^{-8}$ А до $5 \cdot 10^{-8}$ А, что весьма близки к вычисленным максимальным значениям $I_{rs\max} = 50 \cdot 10^{-9}$ А. Слабую зависимость обратного тока (увеличение на $15 \div 20\%$) от дозы (флюенса) гамма излучения $\Phi_\gamma = (2-14) \cdot 10^{17}$ см⁻² и электронов $\Phi_e = (2.5 \div 20) \cdot 10^{14}$ е/см² можно связать с образованными Е-центрами, расположенными на расстоянии $E_m = -0.4$ еВ от дна зоны проводимости. Величина обратного тока после облучения гамма-квантами Co^{60} на $15\% \div 20\%$ меньше, чем при облучении их электронами с энергией $4 \div 4.5$ МэВ, то есть гамма-облучение является более оптимальным воздействием, чем облучение электронами. При этом зависимости падения напряжения от времени восстановления обратного сопротивления $U_F = f(t_{rr})$ для обоих видов облучения полностью совпадают друг с другом, соответственно оба вида облучения (гамма-квантами Co^{60} и электронами с энергией $4 \div 4.5$ МэВ) идентичны с точки зрения соотношения между t_{rr} и U_F . По мере увеличения дозы облучения падение напряжения увеличивается до 1.2В, а время восстановления обратного сопротивления уменьшается со 150нс до 10 нс, повышая быстродействие ограничительных диодов. Высокочастотные диффузионные диоды, подвергаемые гамма и электронному воздействию имеют минимальный разброс по исследуемым параметрам. Прямое падение напряжения $U_F = 0.75 \div 0.8$ В при прямом токе $I_F = 10$ А, обратный ток $I_R \sim 0.5 \div 0.7$ мкА и $0.7 \div 1.0$ мкА при обратном напряжении $U_R = 100$ В и 200 В соответственно, время восстановления обратного сопротивления $\tau_{\text{т}} \leq 2.8 \pm 0.2 \cdot 10^{-6}$ с при $I_F = 1$ А, $I_F/I_R = 1$ и обратном токе 0.1 А.

Зависимости $\Delta(1/t_p)$ от Φ_γ и Φ_e имеют насыщающийся характер, что свидетельствует об уменьшении констант повреждаемости с ростом потока облучения как гамма-квантами, так и электронами. Падения напряжения от дозы облучения увеличиваются линейно и описываются формулой

$$U_\sigma = U_{\sigma ro} \cdot \left(1 - \frac{2L_p}{d} L_n \frac{\frac{bn_0}{(b+1) \cdot p(0)} + 1}{\frac{bn_0}{(b+1) \cdot p(0)} + e^{-d/2L}}\right), \quad (19)$$

полученной с учетом распределения примесей в p - n -переходе

$$\Delta p(x) \approx \Delta p(0) \cdot \exp(-x/L_p) \quad (20)$$

и

$$\Delta p(x) \approx \Delta p(d) \cdot \exp[(x-d)/L_p], \quad (21)$$

где $U_{\sigma ro} = (I_f \rho \cdot b \cdot d) / S_{pn}$.

Экспериментальные зависимости падения напряжения от дозы (флюенса) гамма излучения Φ_γ до $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ и электронов до $\Phi_e = 9 \cdot 10^{14} \text{ е/см}^2$ линейно увеличиваются от 0.77 до 0.9В и удовлетворительно совпадают с расчетными данными.

Дозовые зависимости обратного тока высокочастотных диффузионных диодов для гамма- и электронного облучения меняются линейно с коэффициентами радиационного изменения обратного тока равными $1.2 \cdot 10^{-18} \text{ мкА} \cdot \text{см}^2$ и $1.6 \cdot 10^{-15} \text{ мкА} \cdot \text{см}^2$ и описываются ниже приведенной зависимостью:

$$I_r = K_{Ir\gamma(e)} \cdot \Phi_{\gamma(e)} + I_{ro} \quad (22)$$

где I_{ro} - обратный ток до облучения.

Экспериментальные значения коэффициентов радиационного изменения обратного тока рассчитаны с помощью следующей формулы и приведены в таблице 3.

$$K_t = \frac{(1 + \Delta n / n_0)}{(1 + V_p \sigma_p / V_n \sigma_n) \cdot \Delta n / n_0 + n_1 / n_0} \cdot V_p \sigma_p \cdot \frac{dM}{d\Phi} \quad (23)$$

Из таблицы следует, что экспериментальное значение величины коэффициента радиационного изменения обратного тока находится внутри диапазона возможных его значений, определяемых концентрацией кислорода.

Таблица 3

Данные коэффициентов радиационного изменения обратного тока

$K_{Ir\gamma} \cdot 10^{18}, \text{ мкА} \cdot \text{см}^2$			$K_{Ire} \cdot 10^{15}, \text{ мкА} \cdot \text{см}^2$		
$N_o = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$N_o = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	Значение из эксперимента	$N_o = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$N_o = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	Значение из эксперимента
1.4	0.7	1.2	1.7	0.4	1.6

Это свидетельствует о том, что величину обратного тока кремниевых диффузионных диодов после воздействия на них потока гамма-квантов (Φ_γ) и флюенса электронного потока (Φ_e) формирует Е-центр.

Таким образом, экспериментально показано, что воздействие гамма- и электронного облучения на время восстановления обратного сопротивления, прямого падения напряжения и обратного тока кремниевых мощных диффузионных диодов эквивалентно.

На основе изучения характеристических параметров ограничителей напряжения при радиационном воздействии флюенсами нейтронов (до $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) выявлены особенности поведения времени жизни неосновных носителей, падения напряжения и пробоя, толщины слоя объемного заряда и пути их оптимизации. А также исследованы ограничители напряжения, имеющие p^+pn^+ -структуру, полученные диффузионной технологией с напряжением ограничения $U_{огр}=50 \text{ В}$ и напряжением ограничения $U_{огр}=200 \text{ В}$.

Облучение образцов нейтронами осуществлялось на исследовательском реакторе ИИН-3М. Оценка флюенса нейтронов с энергией $E > 3 \text{ МэВ}$ осуществлялась по серным индикаторам S^{32} с последующим приведением (по известному спектру реактора ИИН-3М) к флюенсу нейтронов с энергией $E \geq 100 \text{ кэВ}$. Средняя энергия нейтронов при этом составляла $\sim 1.5 \text{ МэВ}$, а погрешность дозиметрии $\pm 20\%$.

Радиационному воздействию, с последующим измерением вышеуказанных параметров подвергались выборки, состоящие из 20 ограничителей напряжения каждого типа. То есть, первого типа 50 вольтовые и второго типа 200 вольтовые. Выборки были разделены на 5÷6 частей (по 3÷4 ограничителя напряжения в каждой части), каждая из которых облучалась в два этапа (двумя потоками нейтронов) с измерением параметров ограничителей напряжения после каждого этапа облучения.

На основе исследования влияния флюенса нейтронов на ограничители напряжения с напряжениями ограничения 50 В и 200 В, полученных диффузией, обнаружено, что для обоих ограничителей напряжения отношения $U_{проб}(\Phi)/U_{проб}(0)$ и $U_{огр}(\Phi)/U_{огр}(0)$ экспоненциально зависят от флюенса нейтронов

$$U_{проб}(\Phi) = U_{проб}(0) \exp(K_1 \Phi) \quad (24)$$

$$U_{огр}(\Phi) = U_{огр}(0) \exp(K_2 \Phi) \quad (25)$$

В них значения коэффициентов в показателе экспоненты для напряжения пробоя K_1 имеют близкие значения, а для напряжения ограничения K_2 отличаются в более чем в 1.5 раза (табл. 4).

Таблица 4

Данные значения коэффициентов K_1 и K_2 .

$K_1, \text{см}^2/\text{n}$		$K_2, \text{см}^2/\text{n}$	
$U_{огр} = 50 \text{ В}$	$U_{огр} = 200 \text{ В}$	$U_{огр} = 50 \text{ В}$	$U_{огр} = 200 \text{ В}$
$6.3 \cdot 10^{-17}$	$7.0 \cdot 10^{-17}$	$7.1 \cdot 10^{-17}$	$1.1 \cdot 10^{-16}$

Для выяснения причин подобного расхождения в величине коэффициента, при радиационном воздействии рассмотрены зависимости напряжения пробоя от градиента концентрации, толщины слоя объемного заряда от флюенса нейтронов, а из вольтемкостных характеристик определены градиенты концентрации и толщины слоев объемного заряда.

Зависимости емкости от запирающего напряжения при различных флюенсах нейтронов описываются кубической зависимостью емкости от напряжения, характерной для p - n -перехода с линейным распределением примеси

$$C^{-3} = [12(U + U_{\text{экстр}})] / [qa(\epsilon\epsilon_0)^2(S_{p-n})^3], \quad (26)$$

где величина « a » являясь истинным градиентом концентрации, описывается уравнением $N(x) = a \cdot x$ и от дозы облучения флюенсами нейтронов описывается экспоненциальной зависимостью

$$a = a(\Phi=0) \cdot \exp(-B\Phi). \quad (27)$$

Эти значения, вычисленные на основе вольтфардных характеристик независимо от большого различия удельного сопротивления обоих ограничителей напряжения и величины B в показателе экспоненты для обоих ОН близки друг к другу $2.6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ и $3.8 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, которые отличаются от среднего значения ($3.2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$) не более чем на 30 %. Экспериментальные зависимости (точки) отношения градиента $a(\Phi)/a(\Phi=0)$ от флюенса нейтронов Φ и расчётная кривая $\exp(-B \cdot \Phi)$ при $B = 3.2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, как приведено на рис. 5, находятся в хорошем согласии.

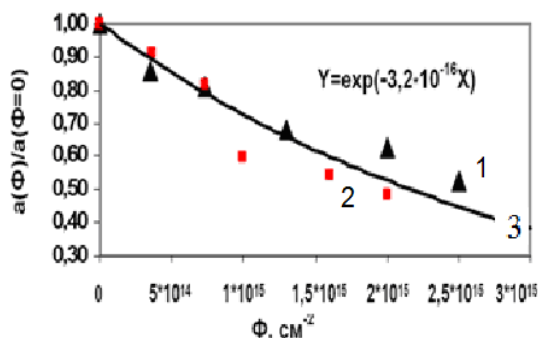
Сравнивая экспоненциальную зависимость пробивного напряжения от флюенса нейтронов (Φ),

$$U_{\text{проб}}(\Phi) / U_{\text{проб}}(\Phi=0) = \exp(6.6 \cdot 10^{-17} \cdot \Phi) \quad (28)$$

с экспоненциальной зависимостью эффективного градиента концентрации от флюенса нейтронов

$$a(\Phi)/a(\Phi=0) = \exp(-3.2 \cdot 10^{-16} \cdot \Phi) \quad (29)$$

обнаруживаем ее универсальность независимо от структуры p - n -перехода и величины a до облучения.



1-50 вольтный ограничитель напряжения;
2-200 вольтный ограничитель напряжения;
3- сплошная линия расчётная

Рис. 5. Зависимости градиента концентрации от дозы облучения

Взаимосвязь напряжения ограничения и напряжения пробоя от градиента концентрации с дозовой зависимостью заключается в линейности зависимо-

сти напряжения ограничения от флюенса нейтронов. Экспериментальные точки зависимости отношения $a(\Phi)/a(\Phi=0)$ от флюенса нейтронов Φ и расчётная кривая $\exp(-B \cdot \Phi)$ при $B=3.2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ удовлетворительно согласуются.

В режиме ограничения напряжения дифференциальные сопротивления являются очень низкими, а падения напряжения составляют меньше 100 мВ, поэтому в формировании напряжении ограничения

$$U_{огр} = U_{проб} + I_{огр} R_{посл} \quad (30)$$

важную роль играет последовательное сопротивление базы

$$R_{посл} = R_{посл \text{ базы}} + R_{посл \text{ прол.}} \quad (31)$$

В свою очередь

$$R_{посл \text{ базы}} = \rho_{\delta} [(d_{мб} - W)/S], \quad (32)$$

где, ρ_{δ} – удельное сопротивление нейтральной базы; $d_{мб}$ – расстояние от металлургического p - n -перехода до nn^+ контакта.

Сопротивление области объемного заряда, где поле не столь велико, определяется соотношением

$$R_{посл \text{ прол.}} = (W - W_m)^2 / (2 \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot S \cdot V_{нас}), \quad (33)$$

где, W_m – ширина области объемного заряда, где происходит ударная ионизация; $V_{нас}$ – напряжение насыщения.

При этом для вычисления зависимости $R_{посл. \text{ базы}}(\Phi)$ необходимо знать зависимости $\rho_{\delta}(\Phi)$ и $W(\Phi)$, где зависимость толщины от флюенса можно вычислить, используя классическую формулу для ширины области объемного заряда плавного p - n -перехода

$$W(\Phi, U_{проб}) = [(12 \varepsilon \varepsilon_0 \cdot U_{проб}) / (q \cdot a)]^{1/3}. \quad (34)$$

А вычисление значения напряжения пробоя осуществляется через толщину области объёмного заряда и коэффициента удаления носителей под действием нейтронного облучения

$$K_{\rho} = 1/k_n n_0 (\Phi=0)^{0.77}. \quad (35)$$

Значения коэффициента удаления для n -кремния составляют $k_n=851$, а для p -типа кремния $k_p=444$. Расчётные значения напряжения пробоя и напряжения ограничения, толщины слоя объемного заряда W_m и константы изменения удельного сопротивления K_{ρ} , приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Расчётные значения характеристических параметров
в зависимости от типа ограничителя напряжения**

Тип ОН	$U_{проб}$, В	$U_{огр}$, В	W , 10^{-4} см	W_m , 10^{-4} см	K_{ρ} , 10^{-16} см ²
ОН 50 В	48.9	50.2	2.67·	1.09·	3.8·
ОН 200 В	224.4	229.8	0.17·	8.4·	0.154

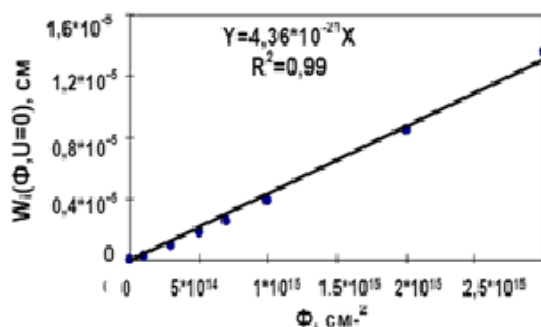
С точки зрения исследования влияния нейтронного облучения на структуру линейного p - n -перехода, представляют интерес размеры i -области, которая образуется вблизи p - n -перехода в результате облучения. Эмпирическое выражение для зависимости градиента концентрации от дозы $a(\Phi)$ представляется формулой (27).

Размеры i -области можно определить с помощью формулы $W_i = W_c W_a$;

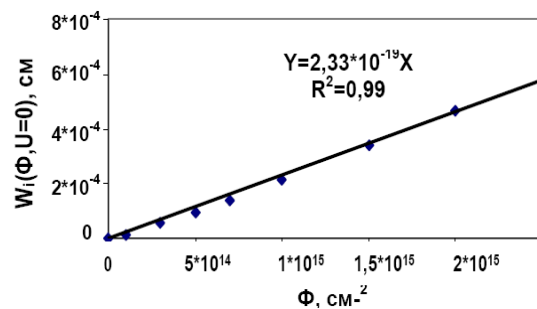
$$W_c(\Phi, U) = \varepsilon \varepsilon_0 S_{p-n} / C_{p-n}(\Phi, U), W_a(\Phi, U) = [12 \cdot \varepsilon \varepsilon_0 (U + U_d) / q \cdot a(\Phi)]^{1/3}. \quad (36)$$

Зависимости толщины слоя объемного заряда от флюенса нейтронов рассчитаны по нижеприведенной формуле и представлены на рис. 6.

$$W_i(\Phi, U=0) = [0,053/a(\Phi=0)^{0.94}] \cdot \Phi. \quad (37)$$



а) 50 вольтный ограничитель напряжения



б) 200 вольтный ограничитель напряжения

Рис. 6. Расчётная зависимость $W_i = F(\Phi, U=0)$

Таким образом, получены выражения для оценки толщины слоя объемного заряда от флюенса нейтронов и приложенного напряжения, которые позволяют предсказать возможные изменения области объемного заряда p^+nn^+ -структуры. При этом вместе с изменением градиента концентрации примесей базы также изменяются времена жизни неосновных носителей, определяющие быстродействие диодных структур, чем меньше время жизни, тем лучше.

В ограничителях напряжения обоих типов (50 В) и (200 В) зависимости времени жизни неосновных носителей от дозы облучения имеют минимум (оптимальную дозу), связанный с влиянием рекомбинационных центров.

Как приведено на рис. 7, спрогнозированный выше вид зависимости $\tau(\Phi)$ с точкой минимума, определяемой формулой $\Phi=1/b$, действительно имеет место. При этом, точка этого минимума определяется экспоненциальным множителем в зависимости $K_\tau(\Phi)$. Это обстоятельство, по нашему мнению, является ещё одним доводом в пользу возможности использования модели Мессенджера для расчёта зависимости времени жизни от дозы облучения с помощью формулы

$$K_\tau(\Phi) = A \exp(-b \cdot \Phi) \quad (38)$$

и

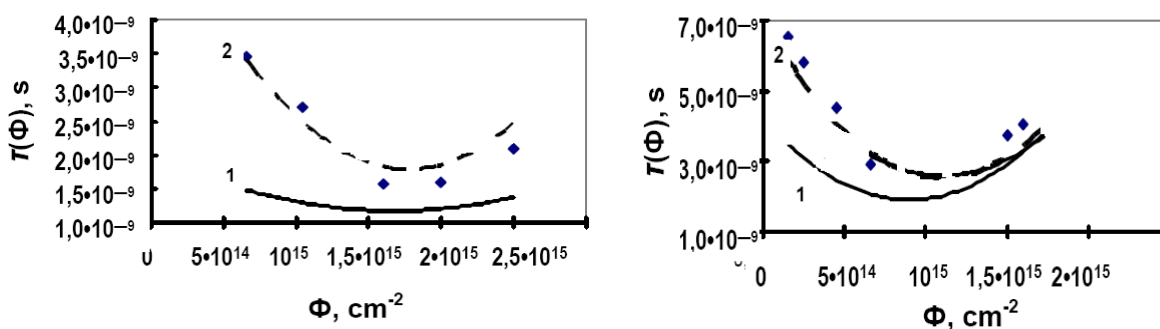
$$1/\tau(\Phi) = 1/\tau(0) + K_\tau(\Phi), \quad (39)$$

или пренебрегая величиной $1/\tau(0)$ имеем

$$\tau(\Phi) = [\exp(b \cdot \Phi)] / (A \cdot \Phi). \quad (40)$$

Нетрудно видеть, что выражение (40) имеет экстремум (минимум) в точке

$$\Phi = 1/b \quad (41)$$



а) 50 вольтный ограничитель напряжения

б) 200 вольтный ограничитель напряжения

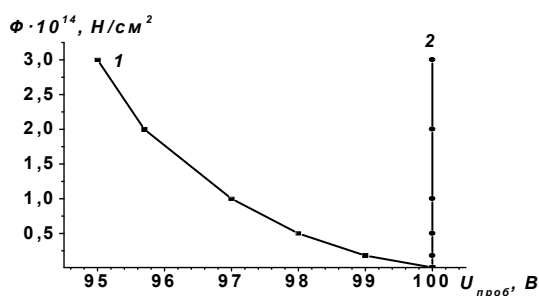
Сплошные - расчетные, пунктирные - экспериментальные данные

Рис. 7. Зависимости $\tau(\Phi)$ для ограничителей напряжения

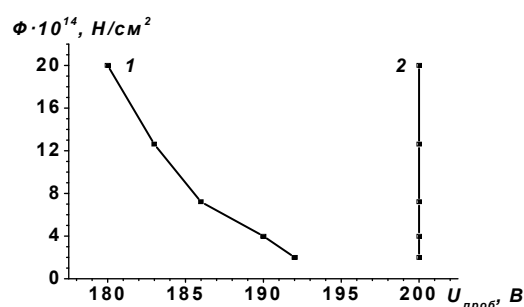
Следует отметить, что появление излома в зависимости времени жизни неосновных носителей от дозы облучения объясняется сменой закономерности образования рекомбинационных центров в процессе нейтронного облучения, то есть переход от линейной зависимости к экспоненциальной.

В результате проведенных исследований выяснено, что напряжения пробоя увеличиваются с повышением дозы облучения независимо от исходного напряжения пробоя. Эти обстоятельства приняты за основу для доводки напряжения пробоя до требуемого номинального напряжения, как инструмент управления напряжением пробоя. Естественно, что для этого исследования необходимо было установить зависимость напряжения пробоя от флюенса для ограничителей напряжения, имеющих отклонения от номинального напряжения пробоя (100 В и 200 В). В частности, для сто вольтовых ограничителей напряжения было сформировано 5 групп образцов с напряжением пробоя 95 В, 96 В, 97 В, 98 В, 99 В по 3÷4 образца в каждой группе. Аналогичные группы образцов были сформированы и для двести вольтовых ограничителей напряжения. На рис. 8 показаны зависимости пробивного напряжения этих образцов от флюенса нейтронов, из которых следует что, чем больше отклонение напряжения пробоя от номинального значения, тем больший флюенс нейтронов требуется, чтобы довести образец до номинального напряжения пробоя. То есть, приведены зависимости флюенса нейтронов, которым необходимо облучить ограничители напряжения с заданным напряжением пробоя, чтобы это напряжение приблизить к его номинальному значению. Эти зависимости напряжения пробоя от дозы облучения можно использовать как калибровочные кривые для определения флюенса нейтронов, необходимого для «доводки» напряжения пробоя до номинального нап-

ряжения.



а) диоды 100 вольтовые



б) диоды 200 вольтовые

1- дозы облучения ограничителей напряжения для заданных напряжений пробоя;
2- напряжения пробоя ограничителей напряжения после облучения

Рис. 8. Зависимости оптимальной дозы облучения от исходного пробивного напряжения ограничителей напряжения

Таким образом, модернизация диффузионной технологии изготовления и оптимизация параметров радиационным воздействием кремниевых высокочастотных диодов и ограничителей напряжения позволяет снизить технологический разброс эксплуатационных параметров, потери статической мощности и повысить выход годных приборов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана технология получения низковольтных ограничителей напряжения ампульной диффузией из высококонцентрированного источника мышьяка, обеспечивающая малый разброс пробивного напряжения и низкое дифференциальное сопротивление.

2. Разработан способ получения омического контакта к кремниевым силовым диодам, отличающийся высокой адгезией и эффективным рассеянием тепла. Способ включает напыление на обе поверхности пластины с *p-n*-переходом тонких слоев (0,1÷0,3 мкм) ванадия и серебра, и последующее их сплавление с посеребренным медным тепловым компенсатором. Этот контакт используется в разработанном блокирующем диоде.

3. Разработана методика отбраковки ограничителей напряжения на ранней стадии до установки их на корпуса согласно впервые введенного параметра «коэффициента эффективности», основанная на зависимости сопротивления ограничителя напряжения от тока в режиме пробоя.

4. Разработана тепловая модель ограничителя напряжения, позволяющая рассчитать и реализовать оптимальные размеры кристалла и тепловых компенсаторов, а также объясняющая проявление его свойств как генератора температурного потенциала и генератора теплового потока.

5. Разработан усовершенствованный двухгенераторный метод измерения напряжения ограничения мощных ограничителей напряжения, в котором предлагается измерить обратное напряжение и импульсную составляющую,

создаваемую от генератора тока. Общая погрешность измерения составляет $\sim 2\%$, что в три раза меньше по сравнению с известной одnogенераторной методикой.

6. Разработан модуль защиты радиоэлектронной аппаратуры на основе ограничителя напряжения, обеспечивающий автоматическое включение-выключение потребителя при перенапряжениях в цепи.

7. Разработана радиационная технология обеспечивающая оптимизацию времени жизни неосновных носителей и времени восстановления обратного сопротивления, напряжения пробоя высокочастотных выпрямительных диодов и ограничителей напряжения.

8. Разработаны инженерные методы расчета обратного тока и прямого падения напряжения, толщины слоя объемного заряда, позволяющие определить оптимальные переходные характеристики высокочастотных диодов при воздействии гамма и электронного облучения.

9. Разработан ограничитель тока на основе арсенида галлия для защиты низковольтных ограничителей напряжения с обратимым пробоем до 14 В.

10. Результаты по технологии получения и исследования ограничителей напряжения и высокочастотных диодов, методики исследования их функциональных параметров внедрены в производство ОАО "FOTON".

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREE OF
DOCTOR OF SCIENCES 16.07.2013.FM/T.12.01 at PHYSICAL-
TECHNICAL INSTITUTE OF SCIENTIFIC-PRODUCTION ASSOCIA-
TION «PHYSICS-SUN», INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER
TECHNOLOGIES AND SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

SCIENTIFIC-PRODUCTION ASSOCIATION «PHYSICS-SUN»

PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE

RAKHMATOV AKHMAD ZAYNIDINOVICH

**DEVELOPMENT OF SEMICONDUCTOR HIGH-FREQUENCY AND
SUPPRESSOR DIODES MANUFACTURING TECHNOLOGY, OPTIMI-
SATION OF THEIR PARAMETERS UNDER THERMAL AND RADIA-
TION INFLUENCE**

**01.04.10 – Physics of semiconductors
(technical sciences)**

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Tashkent – 2014

The subject of doctoral dissertation is registered at Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number 30.09.2014/B2014.5.T 266

Doctoral dissertation is carried out at the Physical - Technical Institute of Academy of Sciences of Republic Uzbekistan and JSC «FOTON».

The full text of doctoral dissertation is placed on web page of Scientific council 16.07.2013.FM/T.12.01 at Physical - Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies and Samarkand State University to the address kengash.fti.uz.

Abstract of dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English) is placed on web page to address kengash.fti.uz and on Information-educational portal “ZiyoNet” to address www.ziynet.uz.

Scientific Consultant: **Karimov Abdulaziz Vakhitovich**
doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Official opponents: **Ulimov Viktor Nikolaevich**
doctor of sciences in technics, professor

Kasimakhunova Anora Mamasadikovna
doctor of sciences in technics, professor

Tagaev Marat Baymuratovich
doctor of sciences in technics, professor

Leading organization: Tashkent State Technical University

Defense will take place on «__» _____ 2014 at _____ at the meeting of one-off scientific council on specialty 01.04.10 (technical sciences) on the base of scientific council 16.07.2013.FM/T.12.01 at Physical Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies and Samarkand State University at the following address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net.

Doctoral dissertation is registered in Library at Physical Technical Institute № 01, it is possible to review it in Library (100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor street. Phone/fax: (+99871) 235-30-41.

Abstract of dissertation sent out on «__» _____ 2014 year.
(mailing report _____ on «__» _____ 2014 year).

S.L. Lutpullayev
Chairman of Scientific council
on award of scientific degree of doctor of sciences
doctor of sciences in physics and mathematics, professor

M.N. Tursunov
Scientific secretary of Scientific council
on award of scientific degree of doctor of sciences
doctor of sciences in technics

I.G. Atabayev
Chairman of Scientific seminar at Scientific council
on award of scientific degree of doctor of sciences
doctor of sciences in physics and mathematics, professor

ANNOTATION OF DOCTORAL DISSERTATION

Topicality and demand of the subject of dissertation. According to the Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan PQ-1442 «On the priorities of development of industry of Uzbekistan in 2011-2015» from December 15, 2010 rising of industrial manufacturing efficiency is overriding problem. Thereby, the consistent decrease of manufacturing costs and the cost value of semiconductor high-power devices (voltage suppressors, high-frequency rectifier diodes) which are manufactured by JSC «FOTON», provides for studies, aimed at improvement of their parameters and reliability as well as technological optimization, are the most important pre-requisites facilitating increase in competitiveness of manufactured devices and ensuring existing markets and new markets.

In the field of the protection of electronic equipment and prevention of failure of electrical equipments by pulse overvoltages among scientists of leading foreign countries USA, Canada, Holland and Japan tasks of research and development of high-voltage suppressors, as well as stabilizing devices based on power diodes are demanded.

These power diodes are widely used in power conversion devices, power supply systems and industrial process control systems. For their manufacturing diffusion technology of doping of silicon with boron and phosphorus is used, which is widely used for the manufacture of high-voltage diodes. However regarding the low-voltage voltage suppressors does not allow to get low differential resistance which can be obtained using the impurity providing a dramatic difference of the carriers concentration at the boundary of the p-n junction. Solving this problem requires new physical approaches that enable to obtain the high-concentration source – diffusant, which can be manufactured by use of arsenic. Moreover the efficiency of the power diodes is determined by the sharpness of the characteristics at breakdown voltages and nominal coefficient of suppression. In operating mode, power diodes under the influence of powerful pulses generate heat and their optimization is possible based on the physical analysis of heat transfer throughout the length of the structure, including the contact areas.

The demand of dissertation is derived from the need to implement advanced technologies, devices for grading and protection of electronic equipment, improve withstand impulse power that is associated with tasks requiring a focused approach to problems of reduction the technological failures and increase reliability, extend the scope of applications of power diodes, and reduce dynamic power losses.

This dissertation aimed at development of the manufacturing technology of low-voltage voltage suppressors with small scatter of the breakdown voltages and low differential resistance in both forward and reverse directions, development of radiation technology providing optimization of the breakdown voltage, increasing performance and improvement of quality of high-frequency diode.

At the same time, in a number of cases, these devices themselves need in protection from unexpected increase of current in circuit, which requires development of current limiters with characteristics reversible after influence of pulse of current. Based on the abovementioned, it is timely and actual to study in a compre-

hensive way both parameters of selected samples under research, and physical aspects of the production technology (for example, diffusion and radiation methods), aimed at design and technology optimization at manufacturing of the selected objects under research and, hence, obtaining optimal combination of their parameters, including those related to radiation hardness requirements.

Conformity of research to priority directions of development of science and technologies of the Republic of Uzbekistan. This work was performed in accordance with the priority directions of development of science and technology of the Republic of Uzbekistan PAS-3 – «Power engineering, energy-saving and resource-saving, transport, machine engineering and instruments industry; the development of modern electronics, microelectronics, photonics and electronic devices».

Review of international scientific researches on the subject of dissertation. Research of manufacturing technology and operational parameters of the power semiconductor diodes of various types (voltage suppressors, stabilitrans, thyristors, high frequency rectifying-suppressing diodes) considering requirements in electronics, automotive industry, are gaining momentum and some success are achieved in the USA, Canada, England, Holland, China and Russia, and others.

In publications of some major companies such as Philips Semiconductors, STMicroelectronics, Littelfuse, Moeser Electronics, ON Semiconductor, SGS-Thomson, Centre «СЭИТ» and etc., it is noted that ongoing research are aimed at development of power diodes with improved parameters that satisfy the overgrowing demands of the consumer market. In research much attention is given to relevance and demand in increasing the reliability and optimization of operating parameters of power semiconductor devices.

In this regard, the development of new manufacturing technologies of power devices and modernization of existing technologies are in the attention of the leading research centers, in particular, by the developers of the company Sigetronics Inc. is shown that the applying of epitaxial technology provides a low-voltage suppressors with parameters exceeding the parameters of analogues based on the diffusion technology. Another field of research is the study of the effect of radiation exposure on the parameters of power diodes, which allows optimizing the parameters of diodes after technological processes. For example, by scientists from Switzerland through the radiational doping palladium to the base region of a silicon power diode the lower values of the minority carrier lifetime were obtained than by doping platinum.

Degree of study of problem. Recently, experimental and theoretical works dedicated to optimization of silicon-based high-frequency and suppressor diodes parameters and production technology have been carried out. Majority of them aims at operation parameters optimization either by means of design and circuit concepts, or by means of combined technologies (laser technologies in combination with diffusion technologies, ion implantation with radiation technologies). However, upgrade of existing diffusion technology and design of optimal fixing, high-frequency and voltage suppressor diodes remain disregarded. Successful upgrade of existing technology and optimization of semiconductor device parameters will allow improvement of both device parameters, and feasibility of silicon p^+ -

n^+ , p^+p-n^+ - and p^+p-nn^+ -structure production without significant changes in their manufacturing.

Hence, requirement to their reliable and failure-free operation becomes higher. Besides, one electronic circuit often uses two pairs of voltage suppressors, or even more, provided that their parameters are identical. However, during technological production of structures, defects can be formed resulting in deviation of their operational characteristics. In this connection, it is important to develop a technology for production of high-frequency and voltage suppressor diodes with specified parameters.

Studies available at present do not contain information related to production technology of high-frequency and voltage suppressor semiconductor diodes with charge carrier concentration gradient in rectifying junction by diffusion technology and related to identification and optimization methods of their operational parameters which is actual problem to research.

Response time can be decreased and original structure of power devices can be made more reliable by application of radiation-technological processes. At the same time, when radiation influence is selected, one has to determine the optimal combination of parameters for pieces of irradiated equipment. As a result, the main challenge is to develop general approaches to selection of irradiation, which provides optimal combination of parameters for diodes with $p-n$ junction manufactured by using various technological methods (planar technology, mesa-diffusion etc.).

Based on their physical essence, voltage suppressors are expected to be highly radiation-resistant. However, this topic is not studied well in the available references dedicated to technological approaches to calculation of radiation resistance. Therefore, development of such methods is also important technological task, that when solved allows wide application of these devices (and, respectively, expansion to targeted markets) without expensive experiments involving irradiation sources that are not always available.

Another problem is that known methods designed for studies of high-power devices – voltage suppressors, high-frequency rectifier diodes, do not satisfy accuracy requirements, whereas application of known methods to determine parameters of semiconductor devices are incorrect.

Thus, presently known studies do not contain information about optimal technologies and optimization of high-frequency and voltage suppressor diode parameters, which is important problem to study at present.

Connection of dissertational research with the plans of scientific-research works is reflected in following project: A3-FA-0-10-440 «Development of thermal and electric pulse processing methods aimed at increase of yield at production of lacking groups of semiconductor instrumentation (JSC «FOTON»)» Research and Development State program at the PTI SPA «Physics-Sun».

Purpose of research is development of optimized diffusion technology aimed at obtaining silicon diode structure with reduced differential resistance and

enhancement of quality and reliability of high-frequency rectifier diodes and voltage suppressors under radiation.

To achieve this goal the following **tasks of research** are formulated:

to develop technology of arsenic high-concentration diffusion in silicon in order to produce low-voltage structures with high gradient of impurity concentration at the edge of p - n -junction, so that these structures can stand short-term high-power overvoltage pulses, than those doped with phosphorus;

to develop method for obtaining of heat-resistant ohmic contact with minimal transfer effect at the edge between material contact with semiconductor;

to develop a universal physically-feasible method aimed at voltage suppressor operation characteristics measurement and advanced methodology for voltage limitation determination with taking into account measurement modes and voltage suppressor efficiency coefficient;

to develop a voltage suppressor heat model taking into account pulse power output and power absorption processes taking place in relevant parts of diode depending on its connection mode;

to determine optimal technological irradiation environment and modes in order to provide operation characteristics optimization for power rectifier and suppressor diodes, in which p - n -junctions are manufactured by different methods;

to study effects of irradiation on breakdown voltage and limitations of voltage suppressors for identification of their operation characteristics;

to develop gallium arsenide based current suppressors designed for voltage suppressor protection.

Objects of research are low- and high-voltage suppressors with p^+n^+ , p^+-n-n^+ , and $p^+-p-n-n^+$ -structures, silicon-based high-frequency rectifier diodes and gallium arsenide based current limiters.

Subject of research - technology for manufacturing of high-frequency diodes and voltage suppressors with improved characteristics, studies of radiation influence on their operation characteristics.

Methods of research. In the process of research were used methods for current-voltage and capacity-voltage characteristics; probing methods for surface resistance determination, differential conductivity methods, and simulations.

Scientific novelty of dissertational research consists in the following:

for the first time, technology is developed for manufacturing of low-voltage suppressor (less than 7 V) based on silicon p^+-n^+ - structures doped with arsenic to apply for protection of power supply units;

for the first time, the method was developed for obtaining high-power silicon rectifier-suppressor diodes (10A) based on silicon $p^+-p-n-n^+$ -structures with effective heat-removing contacts, which can be applied as rectifier, suppressor and blocker diodes;

the method is developed for obtaining stable to temperature ohmic contact to high-power diode with $p^+-p-n-n^+$ -junction composed of three layers, one of which is tungsten and two others are silver layers, annealed at 450 °C, and copper disk galvanically covered with silver is selected as a heat-removing compensator;

universal double-generator method is developed to measure voltage suppressor characteristics with three times lower errors compared to those for single-generator method;

for the first time, current limiter with controlled operation current is designed based on gallium arsenide and contains first type conductivity semiconductor base, second type conductivity thin layer with two ohmic contacts located at some certain distance from each other and supplied with output electrodes;

the method is developed to determine voltage limitation efficiency via diode's resistance dependence on reversed current density in the region of breakdown in a wide range of voltage values;

heat models are developed based on heat transfer and heating of p - n -junction when it is connected and pulse voltage is applied, assuming that the junction is heat potential and heat flow generator;

technological method is developed aimed at determination of appropriate irradiation mode, allowing optimal combination of voltage suppressor and high-frequency diodes parameters;

for the first time, protection device for electronic equipment is designed with option to indicate instant of voltage suppressor failure.

Practical results of research consist in the following:

specifications for manufacturing of low-voltage suppressors with conductivity close to that of metal conductivity at highly-doped regions, including pioneering process of arsenic diffusion in silicon;

advanced compensation method to study voltage suppressor pulse characteristics, and new method to determine their voltage limitation efficiency based on dependence of current on differential resistance;

technological and design aspects for manufacturing of high-power rectifier-suppressor blocking diodes, that can provide optimal withstand power;

methods for optimization of high-frequency and suppressor diodes parameters, and electronics protection devices characteristics by current and voltage;

technological calculations allowing determination of the most appropriate materials and design concepts for voltage suppressors in conformance with consumer demands, aimed at expansion of distribution and enhancement of competitiveness;

application of gamma- and electron irradiation results in high-frequency rectifier diodes production allows selection of optimal irradiation mode for each type of diodes and, thus, allows decrease in duration of technological process and increase in rate of yielded worthy products;

technological method to calculate main parameters of high-frequency rectifier diodes after irradiation allows one to predict parameter of product after irradiation, to select optimal radiation dose and, thus, to increase reproducibility of technological process and worthy devices yield.

Reliability of obtained results is confirmed by the use of well-known scientific methods at investigation of physical processes, standard and tested in the manufacturing factory techniques and research. Results and conclusions are justified on physical representations based on theoretical and experimental data. The

reliability of the experimental data is provided by using modern tools, measuring and processing techniques.

Theoretical and practical value of results of research. The obtained scientific results facilitate in-depth physical understanding of temporal and heat processes taking place in silicon $p^+ - n^+ - p^+ - nn^+$ and $p^+ p - nn^+$ structures under influence of electric pulse and irradiation. The developed voltage suppressors, rectifier-suppressor blocking diodes are used for electronics protection from overvoltage, in direct and alternating electric current circuits, whereas high-frequency diodes are used in equipment designed for rectifying and energy transformation.

Realization of results of research. During performing the dissertation were obtained 3 patents of the Republic of Uzbekistan (№ IAP 04599 from 04.10.2012 y., № IAP 04721 from 03.05.2013 y., № IAP 04571 from 22.08.2012 y.) and patent of the Russian Federation (№ 2522786 from 21.05.2014y.). The results of research manufacturing technologies of the high-frequency rectifier-suppressor diodes and low-voltage voltage suppressors, as well as methods for optimizing the characteristics of voltage suppressors are developed and implemented in serial production at SJC «FOTON» with the economic effect 78 million Uzbek Sums per year (Implementation act of «Uzeltechsanoat» Association from 12.12.2013 y.).

Approbation of work. Main results of the dissertation were presented and discussed at the 15 International and Republican Conferences, including: Modern Information and Electronics Technologies (Odessa, 2011); (Odessa, 2013); «Fundamental and applied Topics of Physics» (Tashkent, 2010); «Modern Information and Electronics Technologies» (Odessa, 2010, 2013); «Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Matter. Sci. SPO-2010 (Kyiv, 2010); «Modern mining techniques and technologies and strategies for their development» (Navoi, 2010); II-nd International Conference on optical and photovoltaic phenomena in semiconductor micro- and nanostructures» (Fergana, 2011); «International Conference Nuclear science and its application» (Samarkand, September 25-28, 2012).

Main results of the dissertation were presented and discussed at the enlarged seminar (May 2014) on speciality of physics of semiconductors at the Physical-Technical Institute SPA «Physics-Sun» AS RU.

Publication of results. Obtained results are presented in 35 scientific publications, of them 17 papers are published in international journals and 4 papers are in Republican journals, 4 patents, 13 proceedings of International and Republican conferences.

Structure and volume of dissertation. Dissertation consists of introduction, five chapters, conclusions and list of references. It is presented on 203 printed pages, containing 88 figures, 12 tables, including 139 items of references.

MAIN CONTENTS OF DISSERTATION

In the introduction importance of the topic and title of the dissertation are substantiated, objectives and tasks, scientific novelty and application value of the work are formulated, main points to defend are outlined.

In the first chapter, status and problems related to optimization of high-frequency diode and voltage suppressor parameters are reviewed based on the data accumulated in literature. Design and circuit concepts are analyzed to find ways for high-power diode parameter optimization, and low-voltage high-power p^+-n^+ -junction diode manufacturing. Known methods to measure parameters of voltage suppressors and optimize their efficiency, as well as radiation methods to optimize parameters of semiconductor devices are investigated. Conclusion is drawn that development of high-concentrated arsenic diffusion in silicon will make it possible to enhance electric characteristics of low-voltage structures with p^+-n^+ -junction, compared to those doped with phosphorus. Such characteristics of high-frequency diodes and voltage suppressors as breakdown voltage, response time can be optimized by irradiation.

In the second chapter the physical and technical aspects of low-voltage suppressors manufacturing by arsenic diffusion from an infinite source to silicon, high-power rectifier-suppressor diodes manufacturing technology, method for obtaining of ohmic contact with improved adhesion to semiconductor's surface, main characteristics of high-power diodes based on silicon p^+-n^+ , p^+-n-n^+ and p^+p-n-n^+ structures are presented.

Based on physical and technological aspects of low-voltage suppressors manufacturing by means of tube diffusion of arsenic to silicon, the diffusant composition (450 mg *As*, 5 g *Si*) is selected for the first time to provide higher surface concentration and smaller deviation in breakdown voltage of low-voltage p^+-n^+ -junctions, on the contrary to the traditional phosphorus diffusion, as shown in the Table 1.

Table 1

Root-mean square deviations in p - n junction breakdown voltage for different diffusion sources

ρ_{base} , Ohm·cm	150 mg <i>As</i> U, V	200 mg <i>As</i> U, V	350 mg <i>As</i> U, V	Additional alloy* U, V	250 mg <i>As</i> , 5 g <i>Si</i> U, V	450 mg <i>As</i> , 5 g <i>Si</i> U, V
0.001	1.23	0.67	0.54	0.25	0.10	0.08
0.002	1.17	0.50	0.83	0.37	0.15	0.18
0.003	0.81	0.28	0.35	0.30	0.18	0.16
0.005	0.30	0.23	0.37	0.32	0.23	0.18
0.008	0.54	0.40	0.41	0.47	0.33	0.24
*additional alloy is a powder of p-type silicon annealed in vacuum with arsenic at 1000 °C for 48 hours and consequently crushed in powder						

Comparison of breakdown characteristics for low-voltage suppressors doped with arsenic, phosphorus, as well as those of foreign units demonstrated that for voltage suppressor manufactured by arsenic diffusion one can observe a sharp transition from low-conductive to high-conductive state (Fig. 1), which is peculiar to effective voltage suppressors. In order to reduce power losses in studied diode samples related to contacts, it is suggested to use tungsten with double-layered sprayed silver as an ohmic contact instead of nickel and gold. Because of better adhesion and thermal properties of the suggested materials it can also be used in production of

rectifier-suppressor blocking diodes. The newly developed technology for production of rectifier-suppressor blocking diode with p^+p-n-n^+ -structure involves manufacturing of p -type conductivity region and n^+ - and p^+ -type conductivity

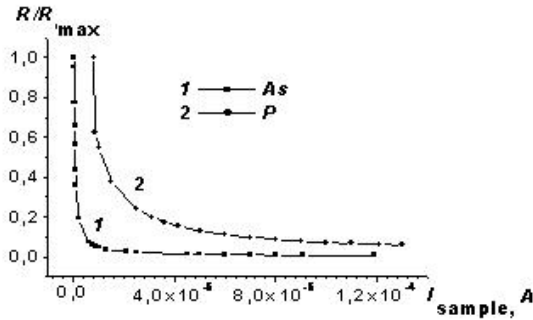


Fig. 1. Dependence of differential resistance of voltage suppressor on reverse current

highly-doped regions by means of diffusion, spraying to both surfaces of thin tungsten and silver layers ($0.1 \div 0.3 \mu\text{m}$), annealing them with silver plated copper disk instead of tungsten disk in the well-studied diode. On the contrary to the similar model, improved heat-removing characteristics of the developed diode at currents up to 10 A prevents diode heating, whereas reverse currents are more heat-resistant and p - n -junction breakdown is reversible. In high-voltage suppressors with p^+-n-n^+ -structure obtained by boron and phosphorus diffusion in n -type conductivity silicon a breakdown voltage is shower-like, and required breakdown values can be obtained either by selecting specific resistance of the base region or by combining voltage in low- and high-voltage suppressor, whereas power can be measured by their parallel connection.

Third chapter is dedicated to novel methods to study main characteristics of high-power diode and electronic equipment. Proposed method of voltage limitation efficiency determination for diode structures is described, technical design report of improved installation designed for measurement of voltage suppressor's main characteristics is presented, and proposed field-effect diode and electronic equipment protection device operation is described in details.

Based on the relation of limitation coefficient, which can be determined in pulse mode as $\hat{E}_{lim} = U_{pulselim} / U_{br}$ with introduced efficiency coefficient at given currents it is proposed to reject low-voltage suppressors (VS), which do not match technological requirements at an early stage before putting it in casing. Efficiency coefficient shows voltage change rate in VS at reverse current change as

$$Z = \frac{\ln(R_D / R_{maxlim}) - \ln(R_D / R_{maxbr})}{\ln I_{lim} - \ln I_{br}}, \quad (1)$$

that is the less voltage changes in certain range of current, the higher quality of VS. Indeed (Table 2), comparison of VS's characteristics depending on doped impurity demonstrates that samples manufactured by arsenic doping have less deviation in breakdown voltage values and withstand higher pulse power, than phosphorus-doped samples.

It is worth of mentioning that parameters of high-power voltage suppressors are measured by means of improved double-generator method with lower error compared to the known direct method that does not provide required level of error

Table 2

Parameters of VS's depending on doped impurity

№ of sample	U_{br}, V		Z	K_{lim}	$P_{u, kW}$	U_{br}, V		Z	K_{lim}	$P_{u, kW}$
	1 mA	4 mA				1 mA	4 mA			
7.5 V arsenic-doped VS						8 V phosphorus-doped VS				
1	7.35	7.52	0.99	1.19	1.85	8.35	9.0	0.87	1.4	1.5
2	7.39	7.53	0.99	1.18	1.9	8.35	8.8	0.9	1.5	1.6
3	7.38	7.58	0.98	1.21	1.85	8.14	8.9	0.86	1.38	1.5
4	7.4	7.6	0.9	1.18	1.85	7.7	8.7	0.84	1.42	1.6
5	7.44	7.62	0.99	1.24	1.85	7.9	8.6	0.86	1.39	1.6
6	7.4	7.65	0.99	1.22	1.78	8	8.8	0.85	1.4	1.58
7	7.6	7.75	0.98	1.22	1.8	8.2	8.9	0.87	1.38	1.5

measurement because of absolute error dependence on current density.

Double-generator method is based on voltage limitation determination mathematical model

$$U_{lim} = U_{br} + r_d \cdot I_{max}, \quad (2)$$

where r_d – differential resistance at breakdown region. Since variable component of voltage limitation for all suppressor diodes does not exceed $20\%U_{lim}$, the U_{lim} parameter in the proposed measurement method is replaced by measurement of direct reverse voltage U_{br} and low pulse component of $U_{br} = r_d \cdot I_{max}$.

U_{br} is measured by direct current voltmeter (combined SH-300 unit with error not higher than 1%). Power supply unit PSU1 provides maximal pulse current I_{max} and output voltage

$$U_{PSU1} = (U_{lim} - U_{br}) + (R_0 + R_{measur})I_{max} \leq \frac{1}{5}U_{lim} + (R_0 + R_{measur})I_{max} \quad (3)$$

Required power at power supply unit $\Delta P_{PSU} = 0.8U_{lim} \cdot I_{max}$ is less than that of direct measurement method power supply unit. Power supply unit PSU2 provides direct reverse voltage and breakdown voltage $U_{PSU2} = U_{br}$ with error not higher than 2%, which can be measured and controlled by direct voltage voltmeter (V_D), $\delta_{VD} = 1\%$. As a result, total error of measurement for voltage limiting novel method is up to 2%.

One of the purposes of developed VS's is to provide certain level of voltage at the input of protected circuit. However, when permissible threshold voltage (breakdown) is exceeded voltage suppressor can fail to operate due to irreversible breakdown. Therefore, current limiter is required for its protection to provide certain limited current. These requirements can be met by using protection unit and current limiter.

The electronic equipment protection unit is developed for the first time and is designed to prevent different electronic equipment (computers, TV and others) and its components like voltage suppressors from operation failure. Electronic equipment is connected to the developed unit via symistor controlled by light-emitting diodes giving light when voltage jumps in circuit, as shown in Fig. 2.

Its operation is based on the principle that light from light-emitting diode is directed to double-barrier photodiode, photoelectric current in which causes blan-

king of symistor and electronic equipment switching off. The equipment will be switched on again as soon as the pulse finishes. The semiconductor field-effect diode, developed for the first time, is peculiar with electric current characteristics and is able to provide current invariability in a wide range of voltage values from saturation region to breakdown region, which makes it to be a current stabilizer.

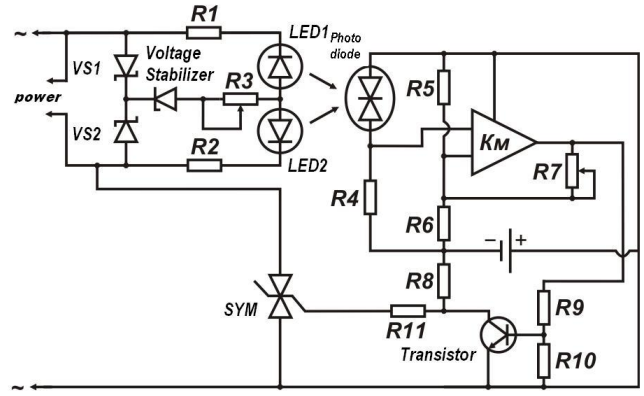


Fig. 2. Electronic equipment protection unit

This feature can be applied to prevent low-voltage suppressor irreversible breakdown. Proposed field-effect diode operation is identical to that of field-effect transistor, source of which is bridged to transistor's gate. That is it can be considered as a two-terminal device connected in series to voltage suppressor. Electric current value in a wide range of voltage values at the saturation region is controlled by light emission.

In the forth chapter temporal characteristics, heat transfer in stationary mode, pulse power emission and absorption in dynamic mode are analyzed.

In stationary breakdown mode, heat transfer in VS can be explained by one-dimensional model due to propagation of heat released in the volume charge region (VCR) along the axial component to contacts and is described by the following differential equation

$$\rho' c_v \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{dP(t)}{dV} \quad (4)$$

where: λ – specific heat conductivity; c_v – specific heat capacity; ρ' – matter density; $P(t)$ – power; V – volume of studied region. For threshold values of $\dot{O}(D/2) = \dot{O}_{casin g}$ the junction temperature does not depend on area of heat-removing unit, but depends on its mass

$$\Delta T \approx P \left(R_T + \frac{t_{pulse}}{C'} \right) \quad (5)$$

where t_{pulse} - pulse width, C' - heat capacity of casing.

At sharply increasing pulse of reverse current applied to voltage suppressor it has a capacitive current running though and, as soon breakdown voltage is reached it is connected. The time required for its complete connection is determined by the following expression

$$t_{connect} = \gamma \frac{\epsilon_s \epsilon_0 E_{max}}{j} + \frac{q W_{p-n} N_B}{2j} + t_e \quad (6)$$

which contains the terms as p - n -junction barrier capacitance charging time

$$t_{RC} = \frac{C_V (U_{br} - U_{\max})}{I} = \gamma \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 S_{p-n}}{W_{p-n}} \frac{E_{\max} W_{p-n}}{2} \frac{1}{j S_{p-n}} = \gamma \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 E_{\max}}{j} \quad (7)$$

shockwave propagation time

$$t_{shock} = \frac{W_{p-n}}{2v_{shock}} = \frac{q W_{p-n} N_B}{2j} \quad (8)$$

and energy relaxation time $t_e \sim 10^{-12}$ sec.

VS connects as soon as the standard pulse is applied, emits heat energy, which is determined by applied power and time of switching

$$Q_W = \frac{Pt_{connect}}{2} = \frac{I^2 R_0 t_{connect}}{2} = \frac{1}{2} I R_0 q_{connect} \quad (9)$$

At the same time, the heat energy, emitted in depleted region is proportional to increment of temperature, specific heat capacity, semiconductor density and depleted region volume

$$Q_W = (T_W - T_{ext=0}) \cdot c_v \rho V_W, \quad (10)$$

The temperature of the p - n -junction depleted region after connection is determined by the current, resistance of junction and charge product ratio to heat capacity of the depleted region

$$T_W - T_{i\dot{e}d} = \frac{I^2 R t_{connect}}{2 \rho \tilde{n}_v V_W} = \frac{I^2 R_0 t_{connect}}{2 C_{T_W}} = \frac{I R q_{connect}}{2 C_{T_W}} \quad (11)$$

The temperature voltage (T_p) generated by the VS is determined by the following expression

$$T_p - T_{okp} = \frac{\Delta T_{\max} \tau_{pulse}}{2 q_{connect}} I_{\max} e^{-\frac{2t}{\tau_{pulse}}} \quad (12)$$

The temperature potential at the linear part of temperature growth is determined by following expression:

$$\Delta T = T_i - T_0 = \frac{I(t) R_0 q_w}{2 C_{T_W}} = \frac{\beta R_0 q_w}{2 C_{T_W}} t \quad (13)$$

Temperature of the depleted region in the p - n -junction becomes maximal after accomplishment of the process with values determined by following expression:

$$\Delta T_m = T_w - T_0 = \frac{I_m R_0 q_w}{2 C_{T_W}} \quad (14)$$

The temperature of p - n -junction falls faster than decreasing current when diode is in connected mode, that is why, the p - n -junction can be considered as temperature voltage generator. According expression (9) which described the heat en-

ergy in dynamic mode the heat current determined by ratio of current to heat resistivity:

$$\Phi_1 = \frac{dQ}{dt} = \frac{I_{\max}^2 R t}{t_{\text{connect}}} \quad (15)$$

and linearly dependent from connected time and reaches its maximal value at $t=t_{\text{connect}}$:

$$\Phi_{\max} = I_{\max}^2 \cdot R = P. \quad (16)$$

By assuming that the current decreases exponentially with decrease of pulse $I = I_{\max} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{pulse}}}}$, and heat energy $Q = R I_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{pulse}}}}$, one can have for heat flow the following expressions

$$\begin{aligned} \Phi_2 = \frac{dQ}{dt} &= R I_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{pulse}}}} - \frac{2t}{\tau_{\text{pulse}}} R I_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{pulse}}}} = R I_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{pulse}}}} \left(1 - \frac{2t}{\tau_{\text{pulse}}} \right) \text{ or} \\ \Phi_2 &= R I_{\max}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{pulse}}}} = P e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{pulse}}}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Since the heat process is determined by thermal constant $\tau_T = R_{T_w}^1 C_{T_w}$, where $R_{T_w}^1 = \frac{R q_{\text{connect}}}{2 C_{T_w} U_{br}}$ then the heat flow can be determined by the following expression

$$\Phi_2 = P e^{-\frac{2t}{\tau_T}}. \quad (18)$$

Thus, under influence of standard pulse the depleted region in p - n -junction of suppressor diode can be considered as generator of heat flow, which passes through its edge at wave-front of pulse and when connected reaches maximal value equal to the applied power.

In the fifth chapter influence of radiation on rectifier diode and voltage suppressor operation characteristics are analyzed. Fig. 3 and 4 show section of irradiated high-frequency planar diode and diffused-junction diode. Samples selected for studies had minimal deviation in voltage drop, direct and reverse current, reverse voltage, as well as in reverse current recovery (U_F , I_F , I_R , U_R , t_{rr}), where $U_F = (0.92 \div 0.93)$ V (for $I_F = 1$ A, $I_R = (15 \pm 2)$ nA, $U_R = 200$ V); $t_{rr} \leq (150 \pm 10) 10^{-9}$ sec (for $I_F/I_R = 1$ and at count start at 0.1 A).

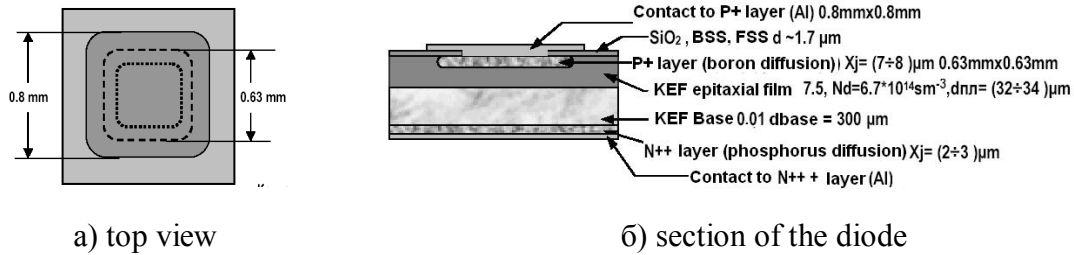


Fig. 3. Section of planar high-frequency diode

very time $\tau_{rr} \leq 2.8 \pm 0.2 \cdot 10^{-6}$ sec at $I_F = 1$ A, $I_F/I_R = 1$ and reverse current count start at 0.1A.

Dependence of $\Delta(1/t_p)$ on Φ_γ and Φ_e has saturation, which is the evidence that damageability constant decreases with increasing flow of both gamma- and electron radiation. Such dependence can be qualitatively explained by increasing Frenkel defects annihilation on structure defects at high-intensity radiation flows. Caused by radiation dose growth, the voltage drop increases linearly and can be described by the following expression

$$U_{\bar{o}} = U_{\bar{o}ro} \cdot \left(1 - \frac{2L_p}{d} L_n \frac{\frac{bn_0}{(b+1) \cdot p(0)} + 1}{\frac{bn_0}{(b+1) \cdot p(0)} + e^{-d/2L}}\right), \quad (19)$$

obtained with accounted distribution of impurities in p - n -junction

$$\Delta p(x) \approx \Delta p(0) \cdot \exp(-x/L_p) \quad (20)$$

and

$$\Delta p(x) \approx \Delta p(d) \cdot \exp[(x-d)/L_p], \quad (21)$$

where $U_{\bar{o}ro} = (I_f \rho \cdot \bar{\sigma} \cdot d) / S_{pn}$.

The experimental dependence of voltage drops on gamma-radiation dose (fluence) up to $\Phi_\gamma = 1.5 \cdot 10^{18}$ cm⁻² and electron radiation dose (fluence) up to $\Phi_e = 9 \cdot 10^{14}$ e/cm² grows linearly from 0.77 to 0.9 V and is in good agreement with calculated data. Reverse current dose dependence of high-frequency diffuse-junction diodes for gamma- and electron irradiation changes linearly

$$I_r = K_{I_{r\gamma(e)}} \cdot \Phi_{\gamma(e)} + I_{ro} \quad (22)$$

with the coefficient of reverse current radiation-caused change equal to $1.2 \cdot 10^{-18}$ $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^2$ and $1.6 \cdot 10^{-15}$ $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^2$ for gamma- and electron irradiation, respectively, I_{ro} – reverse current before irradiation. The experimental values of the coefficient of reverse current radiation-caused change and data calculated by means of the following expression

$$K_t = \frac{(1 + \Delta n / n_0)}{(1 + V_p \sigma_p / V_n \sigma_n) \cdot \Delta n / n_0 + n_1 / n_0} \cdot V_p \sigma_p \cdot \frac{dM}{d\Phi} \quad (23)$$

as shown in the Table 3, are within the range of its possible values, determined by concentration of oxygen. These results support assumption that the E-centre determines with sufficient probability the value of reverse current in silicon diffuse-junction diodes irradiated with gamma-radiation (Φ_γ) and electron fluence (Φ_e).

Table 3

Coefficients of reverse current radiation-caused change

$K_{I_{r\gamma}} \cdot 10^{18}, \mu\text{A} \cdot \text{cm}^2$			$K_{I_{re}} \cdot 10^{15}, \mu\text{A} \cdot \text{cm}^2$		
$N_o = 5 \cdot 10^{17}$ cm ⁻³	$N_o = 1 \cdot 10^{18}$ cm ⁻³	Experimental value	$N_o = 5 \cdot 10^{17}$ cm ⁻³	$N_o = 1 \cdot 10^{18}$ cm ⁻³	Experimental value
1.4	0.7	1.2	1.7	0.4	1.6

It is demonstrated that gamma- and electron irradiation of high-power silicon diffused-junction diodes are equivalent in terms of relation between reverse resistance recovery time, direct voltage drop and reverse current.

Based on studied characteristic parameters of VS's irradiated with neutron fluences (up to $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) peculiarities are discovered in life-times of minority charge carriers, in drops of voltage and breakdown, in decrease of volume charge layer thickness and in the ways for their optimization. Voltage suppressors with voltage limitation $U_{lim} = 50 \text{ V}$ and 200 V containing p^+pn^+ -structure manufactured by means of diffusion technology are also studied. Samples are irradiated with neutrons in the IIN-3M Research Reactor. Neutron fluence with energies $E > 3 \text{ MeV}$ is estimated by means of S^{32} sulphur indicators with consequent normalization to (based on known IIN-3M reactor's spectrum) neutron fluence with energies $E \geq 100 \text{ keV}$. Average energy of neutrons occurred to be $\sim 1.5 \text{ MeV}$, and dose measurement error occurred to be $\pm 20\%$. Collection of samples consisted of 20 VS's of each type are irradiated with consequently measured parameters mentioned above. These collections of samples are divided into 5÷6 batches (3÷4 VS's in each batch), and each of the batches is irradiated in two stages (by two flows of neutrons) with consequent measurement of VS's parameters after every irradiation stage.

Based on the studied influence of neutron fluence on voltage suppressor with voltage limiting of 50 V and 200 V manufactured by means of diffusion, it is discovered that for both VS's the ratios $U_{br}(\Phi)/U_{br}(0)$ and $U_{lim}(\Phi)/U_{lim}(0)$ depend exponentially on fluence of neutrons

$$U_{br}(\Phi) = U_{br}(0) \exp(K_1 \Phi) \quad (24)$$

$$U_{lim}(\Phi) = U_{lim}(0) \exp(K_2 \Phi) \quad (25)$$

In these expressions, coefficients in exponent have close values for breakdown voltage K_1 , and differ more than 1.5 times for breakdown voltage K_2 (Table 4). In order to understand the reasons for such deviation in the values of the coefficients under irradiation, dependence of breakdown voltage on concentration gradient, dependence of volume charge layer thickness on neutron fluence are analyzed and the following capacity-voltage characteristics, like concentration gradients and volume charge layer thicknesses are determined.

Dependences of capacity on blanking voltage at different neutron fluences are described by known relation which is described cubic dependence of capacitance from voltage peculiar for p - n -junction with linear distribution of impurities

$$C^3 = [12(U + U_{ext})] / [qa(\epsilon\epsilon_0)^2 (S_{p-n})^3], \quad (26)$$

Table 4

Values of K_1 and K_2 coefficients

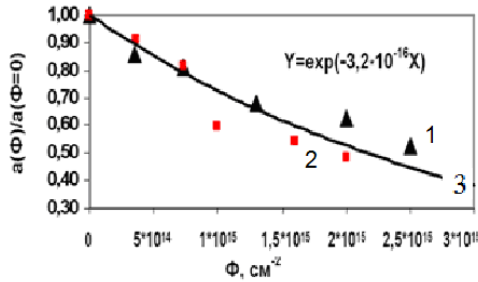
$K_1, \text{cm}^2/\text{n}$		$K_2, \text{cm}^2/\text{n}$	
$U_{lim} = 50 \text{ V}$	$U_{lim} = 200 \text{ V}$	$U_{lim} = 50 \text{ V}$	$U_{lim} = 200 \text{ V}$
$6.3 \cdot 10^{-17}$	$7.0 \cdot 10^{-17}$	$7.1 \cdot 10^{-17}$	$1.1 \cdot 10^{-16}$

where « a » is a true concentration gradient, which is described by expression $N(x)=a \cdot x$, and depends exponentially on neutron fluence irradiation dose

$$a = a(\Phi=0) \cdot \exp(-B\Phi). \quad (27)$$

These values calculated based on voltage-capacity characteristics for the both VS's and, despite significant difference in their specific resistances and values of B in exponent occurred to be close to each other as follows $2.6 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ and $3.8 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$, differed only by not more than 30 % from average ($3.2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$).

As it is shown in Fig. 5, the experimental dependences (data points) of gradient ratio $a(\Phi)/a(\Phi=0)$ on neutron fluence Φ and calculated curve $\exp(-B \cdot \Phi)$ at $B=3.2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ are in good agreement.



- 1- voltage suppressor for 50 V;
- 2- voltage suppressor for 200 V;
- 3- solid line – calculated data

Fig. 5. Dependence of concentration gradient on dose of radiation

By comparing the exponential dependence of breakdown voltage on neutron fluence (Φ),

$$U_{br}(\Phi)/U_{br}(\Phi=0) = \exp(6.6 \cdot 10^{-17} \cdot \Phi) \quad (28)$$

with the exponential dependence of the effective concentration gradient on neutron fluence

$$a(\Phi)/a(\Phi=0) = \exp(-3.2 \cdot 10^{-16} \cdot \Phi) \quad (29)$$

one can observe its universality regardless of p - n -junction structure and value of a before irradiation. Relation of voltage limitation and breakdown voltage to concentration gradient with dose dependence is reflected in linear dependence of limitation voltage on neutron fluence. The experimental points of $a(\Phi)/a(\Phi=0)$ ratio dependence on neutron fluence Φ and calculated curve $\exp(-B \cdot \Phi)$ at $B=3.2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ are in good agreement. In the voltage limitation mode the differential resistance is very low, and voltage drop occurs to be less than 100 mV, therefore for the voltage limitation

$$U_{lim} = U_{br} + I_{lim} R_{series} \quad (30)$$

a base series resistance plays important role

$$R_{series} = R_{series \text{ neutral base}} + R_{series \text{ path base}} \quad (31)$$

In its turn

$$R_{series \text{ neutral base}} = \rho_b [(d_{mb} - W)/S], \quad (32)$$

where, ρ_b – specific resistance of neutral base; d_{mb} – distance from metallurgical

p - n -junction to nn^+ contact. Resistance of some region in the VCR, where the field is weak, can be determined by the following expression

$$R_{series\ path\ base} = (W - W_m)^2 / (2 \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot S \cdot V_{sat}), \quad (33)$$

where, W_m —width of some region in the VCR in which shockwave ionization takes place.

In order to calculate $R_{series\ neutral\ base}(\Phi)$ dependence one should know $\rho_b(\Phi)$ и $W(\Phi)$ dependence, where width dependence on fluence can be calculated by using traditional expression for VCR width in graded p - n -junction

$$W(\Phi, U_{br}) = [(12 \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot U_{br}) / (q \cdot a)]^{1/3}. \quad (34)$$

Whereas, breakdown voltage can be calculated via VCR's thickness and charge carriers removal under neutron radiation as follows

$$K_p = 1/k_n n_0 (\Phi=0)^{0.77}. \quad (35)$$

Their values for n -type and p -type silicon are $k_n=851$ and $k_p=444$, respectively. Calculated voltage breakdown and limitation values, volume charge layer width values W_m and specific resistance change coefficient K_p are shown in the Table 5

Table 5

Calculated values of characteristic parameters for different VS type

VS type	U_{br} , V	U_{lim} , V	W , 10^{-4} cm	W_m , 10^{-4} cm	K_p , 10^{-16} cm ²
VS 50 V	48.9	50.2	2.67·	1.09·	3.8·
VS 200 V	224.4	229.8	0.17·	8.4·	0.154

Within investigation of neutron-irradiation influence on linear p - n -junction structure, it is interesting to study sizes of i -region, which is formed next to the p - n -junction as a result of radiation. Empirical expression for concentration gradient dependence on dose $a(\Phi)$ is presented in formula (27). The sizes of i -region can be determined by the following expression $W_i = W_c W_a$:

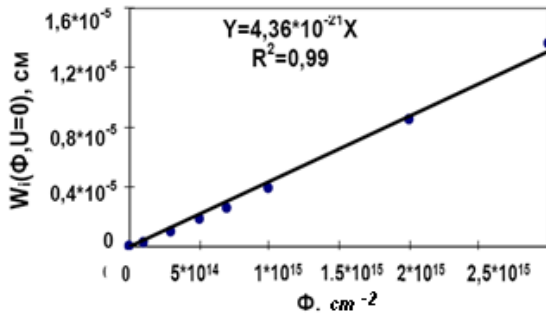
$$W_c(\Phi, U) = \varepsilon \varepsilon_0 \cdot S_{p-n} / C_{p-n}(\Phi, U), \quad W_a(\Phi, U) = [12 \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot (U + U_d) / q \cdot a(\Phi)]^{1/3}. \quad (36)$$

Dependences of volume charge layer thickness on neutron fluence calculated by means of formula (37) are presented in Fig. 6.

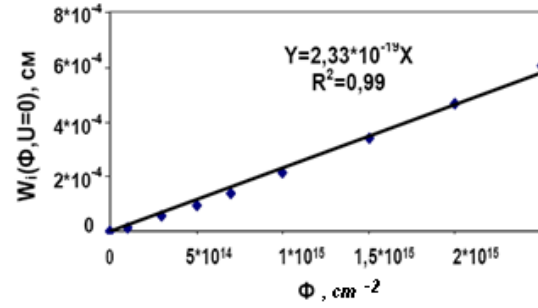
$$W_i(\Phi, U=0) = [0,053/a(\Phi=0)^{0.94}] \cdot \Phi, \quad \dots\dots\dots (37)$$

Thus, expressions are obtained to estimate dependence of volume charge layer thickness on neutron fluence and voltage applied, allowing prediction of possible changes in volume charge region in p^+nn^+ -structure. Along with impurity concentration gradient changes in the base, the life-times of some minority charge carriers that determine response time of diode structure also change showing that the shorter life-time, the better.

In both types of voltage suppressors (50 V) and (200 V) minority charge carriers life-times dependence on irradiation dose is minimal (optimal dose), which is related to influence of recombination centers.



a) voltage suppressor for 50 V



б) voltage suppressor for 200 V

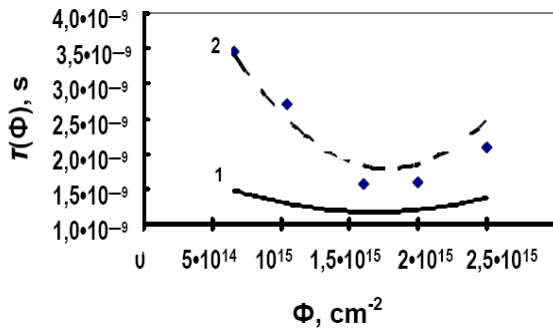
Fig. 6. $W_i = F(\Phi, U=0)$ calculated dependence

It follows from Fig. 7, that dependence predicted above $\tau(\Phi)$ with minimal point determined by expression $\Phi=1/b$ exists indeed. The location of this minimal point is determined by exponential factor $K_\tau(\Phi)$. In our opinion, this fact is another evidence supporting possibility to apply the model of Messenger to life-time dependence calculation by using the following expression

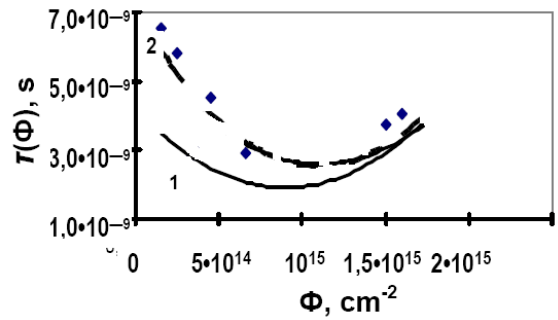
$$K_\tau(\Phi) = A \exp(-b \cdot \Phi) \quad (38)$$

and

$$1/\tau(\Phi) = 1/\tau(0) + K_\tau(\Phi) \quad (39)$$



a) voltage suppressor for 50 V



б) voltage suppressor for 200 V

Solid line – calculated data, dotted – experimental data

Рис. 7. Dependences of $\tau(\Phi)$ for voltage suppressors

By neglecting $1/\tau(0)$ one can obtain the following

$$\tau(\Phi) = [\exp(b \cdot \Phi)] / (A \cdot \Phi). \quad (40)$$

One can see that expression (40) has extremum (minimum) at

$$\Phi = 1/b \quad (41)$$

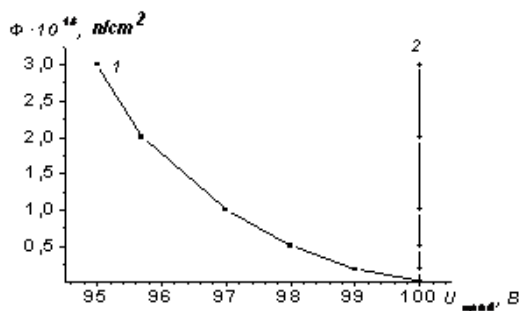
It is worth of mentioning that knee in minority charge-carriers life-time dependence on irradiation dose points on change in recombination center formation mechanisms under neutron radiation, i.e. transition from linear dependence to exponential dependence.

In the research it is discovered that breakdown voltage increases with irradiation dose regardless of initial breakdown voltage.

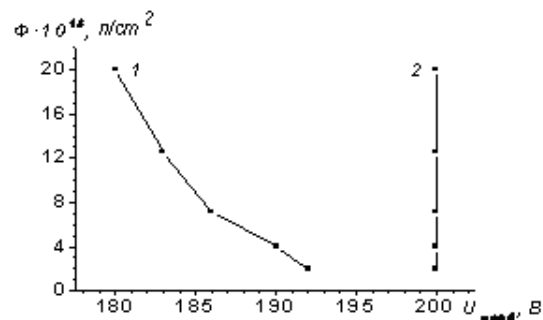
These facts are taken as grounds in bringing breakdown voltage values to the required rated voltage value, as a tool in breakdown voltage control and distribution range improvement of VS manufactured for breakdown voltage values of 100 and 200 V, respectively. Naturally, for this research it was important to determine dependence of breakdown voltage on fluence for VS with deviation from rated values (100 V и 200 V). In particular, for 100V VS's the studied samples were divided into 5 groups with breakdown voltage of 95 V, 96 V, 97 V, 98 V, 99 V with 3÷4 samples in each group. Similarly, the samples were divided for 200V VS's.

Fig. 8 presents breakdown voltage dependence for these samples on neutron fluence showing that the larger breakdown voltage deviation from rated value, the higher fluence of neutrons is required to bring the sample to the rated breakdown voltage value.

It means that the dependences of neutron fluence required for irradiation are shown for VS's with given breakdown voltage values, which reach that of rated after irradiation. These breakdown voltage dependences on irradiation dose can be used as calibration curves when one needs to determine the neutron fluence applied in «bringing» breakdown voltage to the rated value of voltage.



a) 5VS100 type diodes



б) 2.5VS200.1 type diodes

- 1- irradiation dose of voltage suppressors for given breakdown voltages;
2- breakdown voltages of voltage suppressors after irradiation

Fig. 8. Dependence of optimal irradiation dose on initial breakdown voltage in voltage suppressors

Thus, modernization of production technology diffusion and optimization of the parameters of high radiation exposure of silicon diodes and voltage limiters to reduce the spread of Technology operating parameters, static power loss and improve device yield.

CONCLUSION

1. Low-voltage suppressors manufacturing technology is developed based on tube diffusion from high-concentrated arsenic source ensuring low deviation in breakdown voltage and low differential resistance.
2. The method is developed to obtain high-adhesive and heat dissipating oh-

mic contact to silicon high-power diodes. This methods includes spraying of tungsten and silver thin ($0.1\div 0.3\text{ }\mu\text{m}$) layers on both surfaces of p - n -junction plate, and their consequent alloying with silver-plated copper heat compensator. This contact is used in developed blocking diode, which prevents failure of occasionally blocked unit of power station.

3. The method is developed for early stage rejection of voltage suppressors before installing them in casing by means of newly introduced parameter «efficiency coefficient», which is based on voltage suppressor resistance dependence on current in the breakdown mode.

4. The voltage suppressor heat model is developed to calculate and implement optimal sizes of crystal heat-removing compensators, to determine location of its active region relatively to the ohmic contacts, and, based on its characteristics, to describe it as temperature voltage generator and heat flow generator.

5. The improved double-generator method is developed to measure voltage limitation in high-power (pulse currents exceed dozens of Amperes) voltage suppressors, which can be used in measurements of reverse voltage and pulse component formed by current generator. Total measurement error occurs to be $\sim 2\%$, which is three times less than that of known single-generator method.

6. The unit for electronic equipment protection is developed based on voltage suppressor, providing automatic connection-disconnection of consumers in case of circuit overload.

7. The radiation technology is developed to optimize life-time of minority charge carriers and reverse resistance recovery time, breakdown voltage in high-frequency rectifier diodes and voltage suppressors.

8. Technological methods for calculation of reverse current and direct voltage drop, as well as volume charge layer thickness are developed to allow determination of optimal junction characteristics of high-frequency diodes related to gamma and electron irradiation dose.

9. Gallium arsenide based current suppressor is designed for low-voltage suppressor protection with reversible breakdown up to 14 V.

10. Results obtained in this dissertation related to voltage suppressor manufacturing technology and pulse parameters study methods are implemented in production at JS “FOTON”.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Rakhmatov A. Z. Effect of Neutron Irradiation on the Structure of Silicon $p-n$ Junctions of Voltage Limiters. // Semiconductors © Pleiades Publishing, Ltd., 2014 -Vol. 48, No 7 -P.935-941.
2. Rahmatov A.Z., Abdulkhaev O.A., Karimov A.V., and Yodgorova D.M. Features of the Performance of a Transient Voltage Suppressor in the Pulsed Mode // Semiconductors © Pleiades Publishing, Ltd., 2013 -Vol. 47, No 3 -P.387-391.
3. Рахматов А.З. Влияние нейтронного облучения на процессы модуляции базовой области кремниевой $p^{+}nn^{+}$ -структуры // Физическая Инженерия Поверхности – Харьков, 2013 – Том 11, № 1 -С. 4-7.
4. Рахматов А.З., Каримов А.В., Сандлер Л.С., Ёдгорова Д.М., Скорняков С.П. Влияние гамма- и электронного облучения на ключевые параметры мощных высокочастотных диффузионных диодов // Компоненты и технологии -Санкт-Петербург, 2013. -№ 10 -С.140-142.
5. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Рахматов А.З., Скорняков С.Л., Петров Д.А., Абдулхаев О.А. Исследование импульсных характеристик ограничителей напряжения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре - Одесса, 2012 - № 3 - С.26-31.
6. Рахматов А.З., Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А. Исследование влияния нейтронного облучения на характеристические параметры кремниевых ограничителей напряжения // Компоненты и технологии - Санкт-Петербург, 2012 - № 5 - С.52-54.
7. Рахматов А.З., Абдулхаев О.А., Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Скорняков С.П. Приборные характеристики силовых диодов на основе кремниевых $p^{+}n^{+}$, $p^{+}n-n^{+}$ и $p^{+}p-n-n^{+}$ структур // Компоненты и технологии, -Санкт-Петербург, 2012. -№ 4. -С.38-41.
8. Rahmatov A. Z., Abdulkhaev O. A., Karimov A. V., Yodgorova D. M. Thermal model of the limiter diode // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2012 Springer Science+Business Media Inc, Vol. 85 -No. 4 –P. 836-844.
9. Rahmatov A. Z., Karimov A.V., Yodgorova D.M., Abdulkhaev O.A. Features of producing an ohmic contact to frontal surfaces of photoconversion structures // Applied Solar Energy. Allerton Press, Inc. 2012, -Vol. 48. -No. 2. -pp. 92-93.
10. Rahmatov A. Z., Petrov D.A., Karimov A.V., Yodgorova D.M., Abdulkhaev O.A. Influence of neutron radiation on breakdown voltage of silicon voltage limiter // Radioelectronics and Communication Systems -New York, 2012, - Vol.55, -Issie 7, -pp.332-334.
11. Рахматов А.З., Каримов А.В. Анализ переходных процессов в радиационно-облученных кремниевых $p^{+}nn^{+}$ структурах // Физическая Инженерия Поверхности – Харьков, 2012 - Том. 10. -№4/ -С. 308-312.

12. Рахматов А.З. Влияние нейтронного излучения на емкостные характеристики кремниевого ограничительного диода // Петербургский журнал электроники –Санкт-Петербург, 2012/ - № 4. - С. 53-55.
13. Rahmatov A.Z., Tashmetov M.Yu., Sandler L.S. Neutron irradiation influence on the silicon voltage limiter parameters // Вопросы Атомной Науки и техники - Киев, 2012. - №5(81) - С. 81-87.
14. Karimov A.V., Yodgorova D.M., Rahmatov A.Z., Abdulkhaev O.A. Methods to Decrease Losses of Energy Generated by Solar Electrical Modules // Applied Solar Energy. Allerton Press, Inc. 2011, -Vol. 47. -No. 3. -pp. 166-168.
15. 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.
16. Рахматов А.З., Каримов А.В., Скорняков С.П., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А. Малогабаритные бескорпусные ограничители напряжения // Компоненты и технологии - Санкт-Петербург, – 2011. – №9. – С. 54-55.
17. Рахматов А.З., Абдулхаев О.А., Каримов А.В., Кахоров А.А., Каландаров Ж.Ж., Скорняков С.П. Определение эффективности ограничения напряжения диодных структур // Компоненты и технологии - Санкт-Петербург, – 2011. – № 4 – С. 46-48.
18. Рахматов А.З., Ищенко О.П., Каримов А.В. Полупроводниковые ограничители напряжения на основе кремниевых структур в электронных схемах // Узбекский физический журнал –Ташкент, 2011.- № 6- С. 421-429.
19. Рахматов А.З., Скорняков С.Л., Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Бузруков У.М. Физико-технологические аспекты создания низковольтных ограничителей напряжения на основе кремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – Одесса, 2010. – № 5-6. – С. 30-35.
20. Каримов А.В., Рахматов А.З., Кахоров А.А., Каландаров Ж.Ж. Анализ работы ограничителей напряжения для защиты радиоэлектронной аппаратуры // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2010. – № 3. – С. 19-21.
21. № 2522786 Патент Российской Федерации от 21.05.2014г. "Конструкция кварцевой ампулы для диффузии легирующих примесей в кремний методом закрытой трубы с встроенным приспособлением для управления скоростью после диффузионного охлаждения кремниевых р-п-структур". Авторы: Глухов А.В., Скорняков С.П., Перов Г.В., Масловский В.М., Рахматов А.З., Сеница А.В.
22. Патент РУз № IAP 04599 от 04.10.2012г. Бюл. №11. 30.11.2012 г. Модуль защиты радиоэлектронной аппаратуры. Рахматов А.З., Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Каландаров Ж.Ж., Каххоров А.А.
23. Патент РУз № IAP 04721 от 03.05.2013г. Бюлл. №6. 30.08.2013г. Полупроводниковый полевой диод. Рахматов А.З., Каримов А.В., Ёдгорова Д.М.
24. Патент РУз. № IAP 04571 от 22.08.2012г. Бюл., №9 28.09.2012г. Полупроводниковый блокирующий диод. Рахматов А.З., Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Бузруков У.М., Каландаров Ж.Ж.

II бўлим (II часть; II part)

25. Рахматов А.З., Ташметов М.Ю., Сандлер Л.С., Исматов Н.Б. Влияние нейтронного облучения на параметры кремниевых ограничителей напряжения и метод прогнозирования их радиационной стойкости. / Препринт. ИЯФ. Р-9-700. Ташкент – 2013. 19 стр.
26. Рахматов А.З. Разновидности диффузионной технологии получения кремниевых силовых диодов // Современные информационные и электронные технологии: Труды международной научно-практической конференции. 27-31 мая 2013. –Одесса, 2013. -Т. 2. –С. 227-229.
27. Лутпуллаев С.Л., Рахматов А.З. О некоторых особенностях воздействия гамма- и электронного облучения на мощные кремниевые диффузионные диоды / «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 24-25 ноября 2013 г. –Ташкент. -С. 173-175.
28. Рахматов А.З., А.В.Каримов, М.Ю.Ташметов, Л.С.Сандлер, Н.Б.Исмамов. Влияние нейтронного облучения на время жизни неосновных носителей заряда кремниевых ограничителей напряжения / «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 14-15 ноября 2013 г. –Ташкент. -С. 215-218
29. Рахматов А.З., Сандлер Л.С., Скорняков С.П., Каримов А.В. Влияние нейтронного облучения на структуру кремниевых диффузионных р-п-переходов ограничителей напряжения / «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 14-15 ноября 2013 г. –Ташкент. -С. 218-221.
30. Rahmatov A.Z. Influence of neutron irradiation on the life time of free carriers in silicon restrictive diodes / International Conference on Nuclear science and its application: Samarkand, Uzbekistan. September 25-28, 2012. pp. 231-232.
31. Каримов А.В., Рахматов А.З., Мирзаев А., Уринов Н.Н., Бойматов О.И., Эржонов М.О., Петров Д.А. Модуль защиты радиоэлектронной аппаратуры / Труды международной научно-практической конференции. // Современные информационные и электронные технологии: 23-27 мая 2011. – Одесса, 2011. -Т. 2. –С. 167.
32. Ishenko O.P., Rahmatov A.Z., Karimov A.V. The operation conditions of the restrictive diode in quieting mode / Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Mater. Sci. SPO-2010 October 21-24 – Kyiv, 2010, P. 198-200.
33. Рахматов А.З., Каримов А.В., Ёдгорова Д.М. Методика определения напряжения ограничения // Современные информационные и электронные технологии: Труды международной научно-практической конференции. 24-28 мая 2010. –Одесса, 2010. -Т. 2. –С. 147.
34. Рахматов А.З., Бузруков У.М. Особенности работы ограничителя напряжения в импульсном режиме // Международная конференция посвященная 80-летию академика Саидова М.С. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 24-25 ноября 2010 г. –Ташкент. -С. 187-189.
35. Рахматов А.З., Асроров Ш.А., Назаров Ж.Т. Одномерная модель конструкции ограничительного диода / Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития // Материалы международной научно-технической конференции 12-14 мая 2010.-Навои-2010. -С.230-231.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида
тахрирдан ўтказилди (22.10.2014 йил)

Босишга рухсат этилди: 07.11.2014
Ҳажми: 1,5. Адади: 100. Буюртма: № 67
“Top Image Media” босмахонасида босилди.
Тошкент шаҳри, Я.Ғуломов кўчаси, 74-уй

