

**«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.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

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

ЁДГОРОВА ДИЛБАРА МУСТАФАЕВНА

**ГАЛЛИЙ АРСЕНИДИ АСОСИДАГИ ФОТОСЕЗГИР КЎПҚАТЛАМЛИ
ТУЗИЛМАЛАРНИ ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИНИ ИШЛАБ
ЧИҚИШ**

01.04.10 – Ярим ўтказгичлар физикаси (техника фанлари)

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2015 йил

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

Ёдгорова Дилбара Мустафаевна Галлий арсениди асосидаги фотосезгир кўпқатламли тузилмаларни тайёрлаш технологиясини ишлаб чиқиш.....	3
Ёдгорова Дилбара Мустафаевна Разработка технологии изготовления фоточувствительных многослойных структур на основе арсенида галлия.....	29
Yodgorova Dilbara Mustafaevna Development of photosensitive multilayer structures manufacturing technology on the basis of gallium arsenide.....	55
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works.....	78

**«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.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

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

ЁДГОРОВА ДИЛБАРА МУСТАФАЕВНА

**ГАЛЛИЙ АРСЕНИДИ АСОСИДАГИ ФОТОСЕЗГИР КЎПҚАТЛАМЛИ
ТУЗИЛМАЛАРНИ ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИНИ ИШЛАБ
ЧИҚИШ**

01.04.10 – Ярим ўтказгичлар физикаси (техника фанлари)

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2015 йил

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий Аттестация комиссиясида 30.09.2014/В2014.5Т265 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Физика-техника институтида бажарилган.
Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) Илмий кенгашнинг веб-саҳифага (fi-kengash.uz) ва “ZiyoNet” Ахборот-таълим порталига (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи: **Каримов Абдулазиз Вахитович**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Абдукадыров Мухитдин Абдурашитович**
техника фанлари доктори, профессор

Алиев Райимжон
техника фанлари доктори, профессор

Тагаев Марат Баймуратович
техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: Тошкент давлат техника университети

Диссертация ҳимояси 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 кенгашнинг «___» _____ 2015 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 Физика-техника институти Ахборот-ресурс марказида № 04 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 2015 йил «___» _____ да тарқатилди.

(2015 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

Кириш (Докторлик диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги кунда жаҳонда динамикали ривожланаётган микро ва оптоэлектроника йўналишида муҳим физик-технологик муаммолардан бири функционал характеристикалари яхшиланган кўп қатламли яримўтказгичли материаллар асосида фотоқабулқилгичлар ишлаб чиқариш ҳисобланади. Арсенидгаллийли фотосезгир тузилмалар актив соҳанинг электрофизик параметрлари билан уларнинг эксплуатацион параметрлари ўзаро боғлиқлигини тадқиқ қилиш кўпқатламли фотосезгир тузилмаларнинг олдин маълум бўлмаган имкониятларини очиб берувчи янги техник ечимлар олиш имконини беради. Майдоний транзисторнинг канал соҳасини мукамаллаштириш, энергия тежамкорлиги муаммоларини ечиш, *p-n*-ўтишли майдоний транзисторларни ишлаб чиқиш ҳамда сирти текстурланган фотосезгир тузилмалар тайёрлаш технологияси бўйича олиб борилаётган тадқиқотлар устувор йўналишлардан ҳисобланади.

Кўп қатламли яримўтказгичли асбоблар жумласига кирувчи фотодиод ва транзисторларни телекоммуникация ва автомобил саноатида татбиқ қилиш уларнинг ишчи частотасини ошириш, узатиш характеристикаларини тўғри чизикқа келтириш, кучайтириш коэффициентларини ошириш ва улашиш схемаларини тадқиқ қилишни талаб қилади. Шунинг учун майдонли транзисторларнинг конструктив параметрларини оптималлаштириш мақсадида эпитаксиал тузилмалар параметрларини майдонли транзисторларнинг хусусиятига таъсири устида олиб бориладиган тадқиқотлар долзарб ҳисобланади.

Ушбу тадқиқот эритма-қоришмаларни қўшиб бориш йули билан яримўтказгичли материалларни эпитаксиал ўстириш усулини яратишга ҳамда киришмалари тақсимотининг градиенти ва ҳаракатчанлиги бошқариладиган, галлий арсенидли кўпқатламли фотосезгир тузилмаларни, шунингдек, бўлинишнинг микрорельефли чегерасига эга фотодиод тузилмаларни олишга йўналтирилган. Бундай тузилмаларнинг функционал характеристикаларини яхшилаш, тайёрлаш технологияси хусусиятларига ўзаро боғлиқ равишда фотосезгир майдоний транзисторлар олиш ва уларнинг энергия тежамкор режимда ишлашини таъминлаш диссертациянинг зарурати ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ-1442 – сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарорида белгиланган вазифаларни, жумладан электрон техника маҳсулотларининг рақобатбардошлигини ошириш вазифасини муайян даражада бажаришга мазкур диссертация хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари равожланишининг асосий устувор йўналишларига боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг АТД-3 «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши»нинг устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи.

Майдонли транзисторлар бўйича илмий тадқиқотлар етакчи илмий марказлар ва университетлар томонидан, жумладан, Беркли (АҚШ) ва Монтпелие (Франция) университетларида ҳамда Mitsubishi Electric (Япония) фирмасида Шоттки тўсиқли ва *p-n*-ўтишли транзисторлар, «Полюс» илмий ишлаб чиқариш корхонасида (Россия) арсенид галлий асосида юқори частотали майдонли транзисторлар, Калифорния университетида (АҚШ) эса графен асосида майдонли транзисторлар олиш технологиялари устида изланишлар олиб борилмоқда.

Жахон миқёсида бир қанча долзарб масалалар ечилган бўлиб, жумладан, янги яримўтказгичли материаллар асосида ички кучайтиришга эга бўлган асбоблар олиш соҳасида муҳим илмий натижалар олинган: ўта ўтказувчанлик эффекти асосида ёруғлик билан бошқарилувчи майдонли транзистор барпо қилинган - (Япониянинг Табиий фанлар Миллий университетида); юқори частотали диапазонда ишловчи икки ўлчамли электрон каналли майдоний транзистор ишлаб чиқилган - (Франциянинг Монтпелие университетида); статик индукцияли вертикал каналли майдоний транзисторлар ишлаб чиқилган - (Япониянинг Sony фирмасида); Si (111) кремний тагликда юқори сифатли AlGaIn/GaN алюминий-нитрид галлийли эпитаксиал қатламлар ўстириш технологияси асосида юқори хароратга чидамли майдоний транзисторлар олинган - (АҚШнинг Nitronex компаниясида).

Бугунги кунда сирти текстураланган ва киришмалар тақсимоти профили бошқариладиган эпитаксиал қатламлар асосида тайёрланадиган фотосезгир тузилмаларни ишлаб чиқиш ҳамда уларнинг функционал хусусиятларини кенгайтириш каби техник муаммоларни ҳал қилишга бағишланган илмий-тадқиқот ишлари устувор олиб борилмоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. А.Г. Милехин томонидан майдонли транзистор уланиш турлари комбинацияларининг кўп сонлилиги туфайли унинг турли мақсадлар учун ишлатилиши кўриб чиқилган. Аммо, бу режимларда параметрларининг барқарорсизлиги ва узатиш характеристикаларини тўғри чизикқа келтириш усулларини йўқлиги туфайли, кучайтириш коэффициентининг паст бўлиши уларга хосдир. АҚШ олими Pucel R.A. томонидан ишлатилган майдонли транзисторлар канал узунлигини камайтириш ҳисобига уларнинг параметрларини яхшилашнинг технологик усуллари, бир томондан, каналдаги киришмаларнинг тақсимоти характериға боғлиқ равишда узатиш характеристикаларини тўғри чизикқа келтириш ҳисобига транзисторнинг кучайтириш хусусияти яхшиланса, бошқа томондан, ишчи токнинг ортиши ҳисобига тарқаладиган қуввати ошиб кетади. Бу вазият бундай майдонли транзисторлар каналининг ёпилишига яқин режимда ишлашининг имкони йўқлиги туфайли, уларнинг иқтисодий жиҳатдан эффективлиги камлигидан дарак беради.

Айни пайтда таниқли олим R.N. Noyse исток йўналиши томон ток ташувчиларнинг сони камайиб бориб, канал узунлиги бўйлаб киришмалар бўйлама градиентининг ҳосил бўлиши, фақатгина канал қаршилиги модуляцияси эффективлигини оширишини, лекин, канал қалинлиги бўйича эркин

ток ташувчилар тақсимоти текис бўлганлиги учун ҳеч қачон транзисторнинг узатиш характеристикаларига таъсир қилмаслигини кўрсатди. Бунда канал қалинлиги бўйича ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги ва киришмаларнинг градиентли ҳолатлари қараб чиқилмаган.

Суюқ эпитаксия соҳаси мутахассиси, Россия олими В.М. Андреев томонидан легирловчи киришмалар тақсимоти коэффицентининг ҳароратга боғлиқлиги ҳисобидан мажбурий совутиладиган қотишма-эритмалардан олинган эпитаксиал қатламларда, танланган легирловчи киришмага хос технологик бошқарилмайдиган киришмалар тақсимоти градиентини олиш мумкинлиги кўрсатилган. Суюқ эпитаксия қурилмалари конструкциясини мақсадли ўзгартириш имконияти яримўтказгичли асбоблар базасида киришмалар тақсимотининг турли градиентини таъминлаш ва уларнинг диод ва транзистор хоссаларига таъсирини аниқлайдиган технологик усул ва услубларни модернизациялаш учун асос бўлаолади.

Бугунги кунга қадар суюқ эпитаксия технологиясининг ривожланишига академик Ж.И. Алферов яратган мактаб, профессор Ю.П. Яковлев, академик М.С. Саидов, фан докторлари М.Н. Турсунов, М.А. Абдукадыров ва А.В. Каримов ҳамда бошқалар ўз ҳиссаларини қўшдилар, мақсад ва вазифаларига қараб бу технологиянинг қирраларни ривожлантирдилар. Хусусан, А.В. Каримов группаси томонидан совутиш тезлиги камайиб борувчи қотишма-эритмадан кескин *p-n*-ўтиш олиш услуби ҳамда изотермик шароитларда асосий қоришма-эритмага таркиби фарқли қоришма-эритмаларни қўшиш йўли билан варизон эпитаксиал қатламлар олиш технологияси ишлаб чиқилган.

Юқорида баён қилинганлардан шундай маъно келиб чиқадики, канал қалинлиги бўйича ҳаракатчанлик ва киришмаларнинг талаб қилинган градиентини олишнинг технологияси ишлаб чиқилмаган. Узатиш характеристикасини тўғри чизикқа келтириш усули янгича ёндашувни талаб қилади. Фотодиод тузилмалари структураларининг электрик характеристикаларини яхшилаш имкониятлари ва кўп қатламли транзисторли тузилма каналига ҳаракатчан ва биржинсли бўлмаган киришмалар тақсимоти киритилганида ҳамда ноанъанавий улаш режимларида, уларни тайёрлаш технологик шароитлари билан боғлиқ характеристик параметрларига нобиржинслилик таъсирини комплекс ўрганишни талаб қилган электрик ва функционал параметрларини яхшилашнинг илмий-техник муаммолари ечилмай қолмоқда.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган илмий-тадқиқот муассасанинг илмий тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация Физика-техника институтида №А-6-049 «Танланган фотосезгирликка эга яримўтказгич фотоэлектрик ўзгарткичларни тайёрлаш технологиясини ишлаб чиқиш» (2006-2008йй.) мавзусидаги лойиҳа ва ФА17-Ф-100 «Фотоэлектрик ўзгарткичлар асосида кучсиз оптик сигналларнинг фотоқабулқилгичини ишлаб чиқиш» (2009-2011йй.) лойиҳаси, шунингдек АЗ-ФА-0-10-440 «Яримўтказгичли асбоблар камёб гуруҳларини ишлаб чиқаришда яроқли чиқишини ошириш учун термик ва электримпульсли ишлов бериш усуллари яратиш (ОАЖ «FOTON»))» (2012-2014 йй.) ЎЗР илмий тадқиқот ишлари Давлат дастури доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади сирти текстураланган ва киришмалар тақсимоти профили олдиндан берилган эпитаксиал қатламлар асосида галлий арсенидли кўп қатламли фотосезгир тузилмаларни ишлаб чиқиш ҳамда уларнинг функционал характеристикаларини яхшилаш ва янги уланиш режимларини тадқиқ этишдан иборат.

Мақсадга эришиш учун қуйидаги **тадқиқот вазифалари** қўйилган:

суюқлик эпитаксияси усулида сирти текстурланган кўп қатламли галлий арсенидли тузилмаларни олиш технологиясини ишлаб чиқиш;

сирти текстурланган ярим ўтказгичда киришмалар диффузияси жараёнларини моделлаштириш;

киришмаларнинг қалинлик бўйича ночизикли (мусбат, манфий, даражали) тақсимоти градиентига эга эпитаксиал қатламларни ўстириш технологиясини ишлаб чиқиш;

қотишма-эритма ҳажми ортиши билан бирга кечадиган, ўзгарувчан таркибга эга бўлган қотишма-эритмадан эпитаксиал қатламни ўстиришнинг ноизотермик жараёнини моделлаштириш;

киришмаларнинг қалинлик бўйича нотекис (мусбат, манфий, даражали) тақсимоти профилига эга галлий арсениди асосида майдоний транзистор ишлаб чиқиш ва уларнинг электрофизик ва фотоэлектрик характеристикаларини тадқиқот қилиш;

канал қалинлиги бўйича ташувчилар ҳаракатчанлиги ва киришмаларнинг нотекис тақсимоти профилига эга майдоний транзисторлардаги электрон жараёнларни моделлаштириш;

майдоний транзисторни улашда, унинг функционал имкониятларини кенгайтирадиган (автоматик тўсиш, сток-затвор кучланиши билан бошқариладиган максимал ўтказувчанлик) оптимал режимларини ишлаб чиқиш;

битта ёруғлик нурлаткичи ва майдоний транзистор асосидаги кириш каскади ёрдамида объектни тезкор алмаштирилишига эга масофавий бошқариладиган оптоэлектрон калитни ишлаб чиқиш;

арсенидгаллийли майдонли транзистор ва кремнийли назорат намуналари учун олинган натижаларнинг солиштириш анализи асосида асбобли янги уланиш режимларни ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти бўлиб базадаги ташувчилар ҳаракатчанлиги ва киришмалар тақсимотининг турли профилларига ҳамда бошқариладиган $p^+GaAs-pGaAs-nGaAs$ -ўтишли фотосезгир кўп қатламли майдонли транзисторлар ва кремний асосидаги контрол намуналар, шунингдек бўлинишнинг изотип гетеро ва микрорельефли чегарасига эга бўлган галлий арсениди тузилмалари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг предмети – тузилмавий ва морфологик нобиржинсликларга эга бўлган кўпқатламли галлий арсенидли тузилмаларни олишнинг диффузион ва эпитаксиал технологияларини ишлаб чиқиш услублари ва жараёнлари ҳамда транзистор структураларини функционал уланиш режимлари ва ток ўтиш жараёнларидир.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида экспериментал физиканинг комплексли информатив усуллари: $p-n$ -ўтишли структураларни ўрганиш-

нинг вольтампер, вольтфарад методлари; турли ишчи кучланишлардаги спектрал фотосезгирликни ўлчаш усуллари, бўлиниш чегараси ва сиртнинг морфологик тадқиқотлари, шунингдек, назарий физиканинг физик-математик ва компьютер моделлаштириш усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги куйидагилардан иборат:

илк бор қотишма-эритмага қўшимча қотишма-эритмани қўшиш тезлиги билан аниқланадиган киришмаларнинг тақсимот профилли A^3B^5 ярим ўтказгич бирикмалари эпитаксиал қатламини ўстиришнинг ноизотермик усули таклиф қилинган ва ўстириладиган эпитаксиал қатлам қалинлиги бўйича киришмалар тақсимоти физик-технологик моделлаштирилган;

текстурланган сиртли галлий арсенидига 80 дақиқа давомида рух киришмаси $800\text{ }^\circ\text{C}$ да диффузия қилиниб, кейинчалик бир дақиқада бир градус совитиш тезлиги билан $813\text{ }^\circ\text{C}$ дан $809\text{ }^\circ\text{C}$ гача ҳарорат оралиғида ягона жараёнда эпитаксиал гетероқатлам ўстириш технологияси ишлаб чиқилган;

$nGaAs$ -таглик билан $nGa_{0.8}In_{0.2}As$ -гетероэпитаксиал қатлам панжаралари параметри фарқи $\sim 1.4\%$ бўлиши ҳисобига юзаси гофрли бўлган икки тўсиқли $Ag - nGa_{0.8}In_{0.2}As - nGaAs - Ag$ -фотодиод олиш ва $nGaAs$ -тагликдаги $pGa_{0.94}In_{0.06}As$ -гетероэпитаксиал қатлам устида германий киришмаси миқдори $3.1\text{ моль.}\%$ бўлганда, сиртида пирамидалар (асоси $40\div 60\text{ мкм}$, баландлиги $8\div 10\text{ мкм}$) ҳосил қилувчи технологик текстурланган $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As$ фронтал гетероқатламли фотовольтаик $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As - pGa_{0.94}In_{0.06}As - nGaAs$ -тузилмалар олиш технологиялари ишлаб чиқилган;

илк бор каналидаги киришмалар градиенти мусбат бўлган арсенид-галлийли майдонли транзисторга нисбатан фотосезгирлиги икки марта, маълум аналогларига нисбатан эса кучайтириш коэффициенти 3.5 марта катта эга бўлган, каналидаги киришмаларнинг градиенти манфий (сирт томон камаювчи) бўлган арсенидгаллийли фотосезгир майдонли транзистор тайёрланган;

майдонли транзисторнинг максимал сезгирликка эга фотоқабулқилгич, кичик инерцияга эга фоторезистор ва катта қувват қайта улагичи сифатида ишлашини таъминлайдиган, уланиш режимлари ва усуллари таклиф қилинган;

илк бор галлий арсенидили майдоний транзисторлар узатиш характеристикаларининг тўғри чизиққа келтириш имконияти кўрсатилиб, сирт ҳолатлари таъсири ва ток ташувчилар ҳаракатчанлигининг градиентини ҳисобга олган ҳолда, бошқариладиган $p-n$ -ўтишга эга узун каналли майдонли транзисторлардаги ток ташувчанликнинг физик-математик ҳисоби қилинган;

каналнинг ёпилишига яқин режимда кучайтириш коэффициентини (70) бир тартибга катта бўлишини таъминлайдиган, синхрон модуляцияланадиган каналларга эга иккитранзисторли схема асосида тўрт чиқишли универсал микросхема ишлаб чиқилган;

затвор ва исток қаршилиги ўртасига икки тўсиқли тузилма асосидаги фотоқабулқилгич киритилган, майдоний транзистор асосида кучайтиргич

кириш каскадидан иборат электросбоблар ва технологик жиҳозларнинг уланиш-узилишини таъминлайдиган масофадан битта ёруғлик зонди билан бошқариладиган оптоэлектрон калит ишлаб чиқилган;

кириш сигнали истокка бериладиган икки биполяр транзистор ўрнига калит ва ток манбаи функциясини бажарувчи битта майдонли транзистордан ва ярим ўтказгичли ёруғлик нурлатгичдан иборат яримўтказгичли ёғду тарқатувчи асбобларнинг ишлаш режимини стабиллаштириш имконини берадиган оптик сигналларнинг модулятори ишлаб чиқилган;

стабилитрон, кучланиш чеклагичи ва S-диодлар типигаги токи кескин ортадиган яримўтказгич асбобларнинг вольтампер характеристикасини ўлчашни таъминлайдиган, кичик қадамли прецизион мослаштириладиган токни бериш учун мўлжалланган каналлари синхрон модуляцияланадиган икки транзисторли схема асосида стабиллашган тоқлар генератори ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси куйидагилардан иборат:

калинлиги бўйича бошқарилиб борилувчи тақсимотли галлий арсениди эпитаксиал қатламларини ўстиришнинг ноизотермик усули ишлаб чиқилган ва унинг асосида база соҳаси биржинсли бўлмаган кўпқатламли фотосезгир тузилмани, унинг асосий параметрларини оптималлаштириш орқали, энергиятежамкор режимида ишлашини таъминлайдиган технология ишлаб чиқилган;

оптикавий йўқотишларни камайтириш ҳисобига кўпқатламли тузилмаларнинг фотосезгирлиги ортишини таъминлайдиган индий ва алюмий таркибли гетероструктуралар тайёрлашнинг такомиллаштирилган технологияси ишлаб чиқилган;

доимий ва ўзгарувчан сигналларни кучайтиришга мўлжалланган, электрон схемада галлий арсениди асосидаги ва кремний назорат намунаси асосидаги майдоний транзисторларнинг функционал имкониятларини очиб берадиган техникавий ечимлар ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги физик жараёнларни тадқиқ қилишда умумқабул қилинган илмий ва технологик услублар, яримўтказгичли асбобларнинг характеристикаларини ва параметрларини текширишда стандарт ва кенг қўлланиладиган тадқиқот усулларида фойдаланилганлиги билан тасдиқланган. Натижа ва хулосалар замонавий назарий ва экспериментал маълумотларга, яримўтказгичлар ва улар асосидаги материалларнинг физикавий тасаввурларга асосланган экспериментал маълумотларнинг ишончлилиги синовдан ўтган комплекс ўлчаш услубларидан ва маълумотларга назарий ишлов беришда фойдаланилганлик билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқотда олинган илмий натижалар базаси градиентли бўлган кўп қатламли юқори фотосезгир тузилмалар ишлаш физикасини очиб беради.

Олинган амалий натижалар телекоммуникациялар ва оптик сигналларни узатиш ва қабул қилиш тизимларида фойдаланиладиган турли майдоний транзисторли электрон схемаларнинг режим уланишларини оптималлаштириш учун муҳим ҳисобланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Электрон қурилмаларда яримўтказгичли структураларнинг иш режимини оптималлаштириш ва функционал параметрларини яхшиловчи қуйидаги 4 та ихтирога Ўзбекистон Республикаси патенти олинган: «Оптик сигналлар модулятори», (IAP № 04854, 21.02.2014й.); «Масофадан бошқариладиган оптоэлектрон калит», (IAP №04600, 25.04.2012й.); «Эритма-қоришмаларни аралаштириб қўшиб бориш йўли билан яримўтказгичли материалларни эпитаксиал ўстириш усули», (IAP № 04053, 09.10.2009й.); «Майдонли фотосезгир транзистор», (IAP № 03832, 21.11.2008й.);

яримўтказгичли асбобларнинг ишдан чиқиш сабабларини ва қабул қилинган регламентдан четлашишини аниқлаб берувчи «Кичик тоқлар генератори» қурилмаси «FOTON» АЖда амалиётга жорий этилиб, унинг натижасида тайёр яримўтказгичли асбобларнинг ярқкли чиқиш процентини 10 фоизга оширилиб йиллик иқтисодий самарадорлик 20 млн. сўмни ташкил этган («Ўзэлтехсаноат» Ассоциациясининг 10.04.2014 йилдаги маълумотномаси).

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Илмий натижалар республика ва халқаро конференцияларда маъруза ва муҳокама қилинган: жумладан 14-«International Young Scientists Conferece» SPO 2013, Kyiv, «Problems of Optics and High Technology Material Science». (Kyiv, 2013); «Яримўтказгичлар физикаси ва қурилмалари ҳамда уларни ўқитишнинг муаммолари» (Наманган, 2013); «Актуальные проблемы физики» (Баку, 2008); «Неравновесные процессы в полупроводниках» (Ташкент, 2007); «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики» (Ташкент, 2007); V-International Young Scientists Conferece SPO 2006, Kyiv, Problems of Optics and High Technology Material Science. (Kyiv, 2006); «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (Ташкент, 2006); «Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе», МЭПП (Баку-Сумгаит, 2005); RIO 5 «World Climate & Energy Event» (Braziliya, 2005); Scanning probe microscopy - 2003 International Workshop, Nizhny Novgorod (Russia, 2003). Диссертация ишининг асосий натижалари ЎзР ФА «Физика-Қуёш» ИИЧБ Физика-техника институти яримўтказгичлар йўналиши бўйича кенгайтирилган семинарида (2015й. 3-июн) ҳамда Физика-техника институти, Ион плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 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 (2015й. 25-ноябр) муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича 43 та илмий иш, жумладан 23 та мақола, шулардан 8 таси инглиз тилида халқаро журналларда эълон қилинган, 1 та китоб, конференцияларда мавзу бўйича 15 та тезис чоп этилган, ихтиро учун 4 та патент олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, ва 129 номдаги фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 2 та илова, 200 саҳифа матн, 89 та расм ва 28 та жадвалдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устивор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи, муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

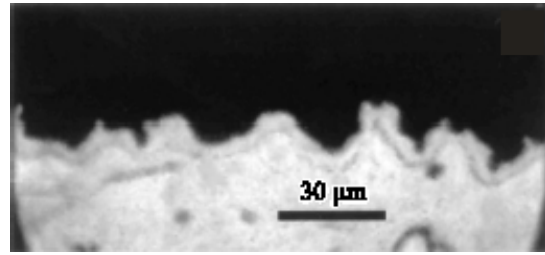
Биринчи боб «**Муаммонинг ҳолати ва морфологик нобиржинслиликларга боғлиқ равишда кўпқатламли яримўтказгичли тузилмаларнинг функционал характеристикаларини яхшилаш тенденциялари**»га бағишланган бўлиб, муаммонинг ҳолати ва морфологик нобиржинслиликларга боғлиқ равишда кўпқатламли яримўтказгич тузилмаларнинг функционал характеристикаларини яхшилаш тенденциялари бўйича адабиётлар маълумотининг шарҳи келтирилган ҳамда майдоний транзисторлар конструктив хусусиятларини уларнинг функционал хоссаларига таъсири, шунингдек майдонли транзисторларнинг электрик параметрларини яхшилаш йўллари кўриб чиқилган. Мавжуд маълумотларнинг назарий ва экспериментал таҳлили натижасида вазифаларнинг қўйилиши шакллантирилган.

Иккинчи боб «**Юзаси текстурланган сиртли кўпқатламли тузилмаларни олиш технологиясини ишлаб чиқиш**»да муаммоларининг ечими, яъни, диффузия ва суюқлик эпитақсияси усуллари билан текстурланган сиртли кўпқатламли тузилмаларни яратишнинг технологик босқичлари, уларнинг спектрал характеристикалари, гетеротузилманинг кучайтириш ва фотоэлектрик хоссалари, унинг асосидаги масофадан бошқариладиган оптоэлектрон калитнинг хусусиятларини ўрганиш билан ҳал этилган.

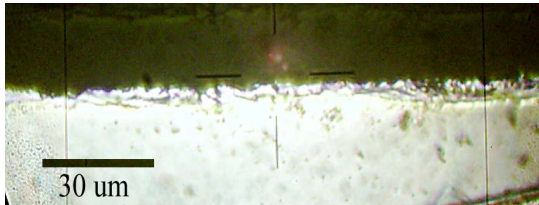
Галлий арсениди буфер қатламининг текстурланган сиртига рух киришмасининг босқичма-босқич диффузиясини таъминлайдиган, микро-рельефли сиртга эга кўпқатламли тузилмани комбинирланган усулда олиш техно-логияси ва кейинчалик унинг устидан бир жараённинг ўзида чекланган қотишма-эритмадан эпитақсиал гетероқатлам алюминийгаллий арсенид (*AlGaAs*) ўстириш технология-си ишлаб чиқилган. Буфер қатлам сирти анизотроп емириш натижасида текстурланиб, унинг сиртига рух киришмасининг диффузияси рух кукунидан (5.3 см^3 хажмли графит камерада 146 мг) 30 дақиқа давомида $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ҳароратда амалга оширилган. Гетероэпитақсиал қатламнинг ўсиши эса суюқ эпитақсия ёрдамида $813 \text{ }^\circ\text{C}$ дан $809 \text{ }^\circ\text{C}$ гача ҳарорат оралиғида 1град/дақиқа совитиш тезлигида амалга оширилган. Бундан ташқари, диффузия жараёни микро-рельефли чегарани олишга имкон берадиган, тагликнинг сирти (1 см^2) билан контактда бўлган қаттиқ жисмли (*GaAs:Zn* га цинк кукуни пуркалган) манбадан ўтказилган. Олинган тузилма ўтиш чегаралари кесимларининг микрофотографиялари 1-расмда ифодаланган.



а) ясси $p-n$ -ўтиш билан



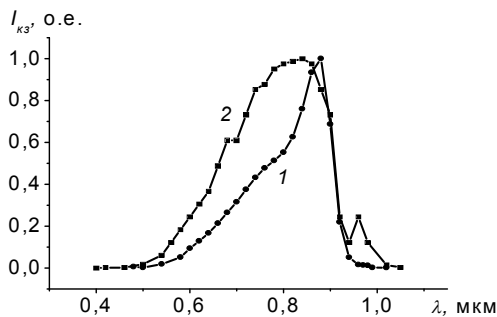
в) контакт диффузияси билан олинган $p-n$ -ўтишнинг микрорельефли чегараси



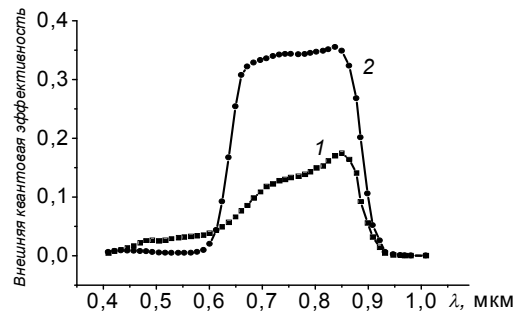
б) дендрит типдаги микрорельефли $p-n$ -ўтиш

1-расм. $pGaAs$ буфер қатлами ва $pAl_{0.4}Ga_{0.6}As$ гетероқатламли тузилма ўтиш чегаралари кесимларининг микрофотографияси

Тажрибада кўрсатилганидек, олинган кўпқатламли микрорельеф сиртли $p^+Al_{0.4}Ga_{0.6}As - pGaAs : Zn - nGaAs - n^+GaAs$ тузилмада спектрал сезгирлик соҳаси қисқа тўлқинлар томонга кенгайди, квант чиқиши эса ясси сиртли тузилмаларга қараганда икки марта ортади (2-расм). Бу эффект микрорельеф шакллантирилишида $p-n$ -ўтиш чегарасида фотосезгир юзанинг кенгайиши билан боғлиқ.



а) спектрал характеристика



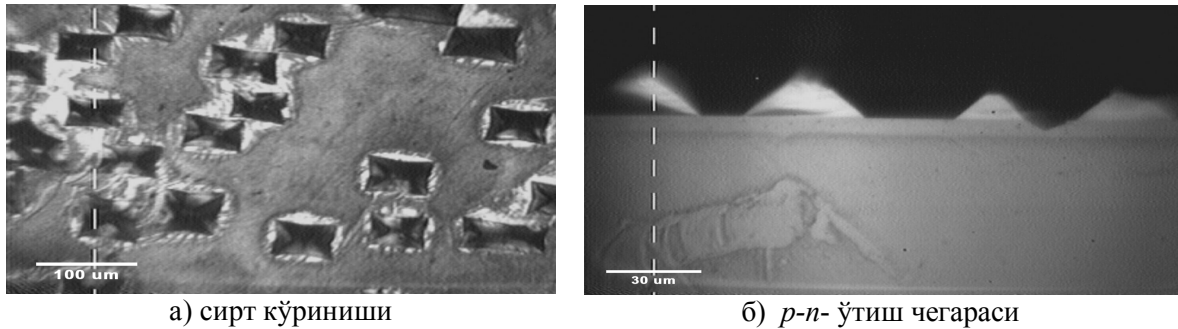
б) фотосезгирликнинг квант чиқиши

2-расм. Ясси (1) ва микрорельефли (2) $p-n$ -ўтишга эга тузилманинг фотоэлектрик характеристикалари

Сувоқ эпитаксия йўли билан арсенид галлий тагликларда индий ва алюминий таркибли арсенид галлий эпитаксиал қатламлар асосида микро-текстурланган юзалар олиш технологияси ишлаб чиқилган, унда ютилаётган нурланишнинг қамраб олиш бурчагини текис юзали структуралардагига нисбатан оширишга имкон беради. Бундай юзалар $p-n$ -ўтишнинг текислиги билан ажралиб туради, ҳамда бундай юзаларни текстурлаш гетероқатламнинг таркиби билан аниқланади.

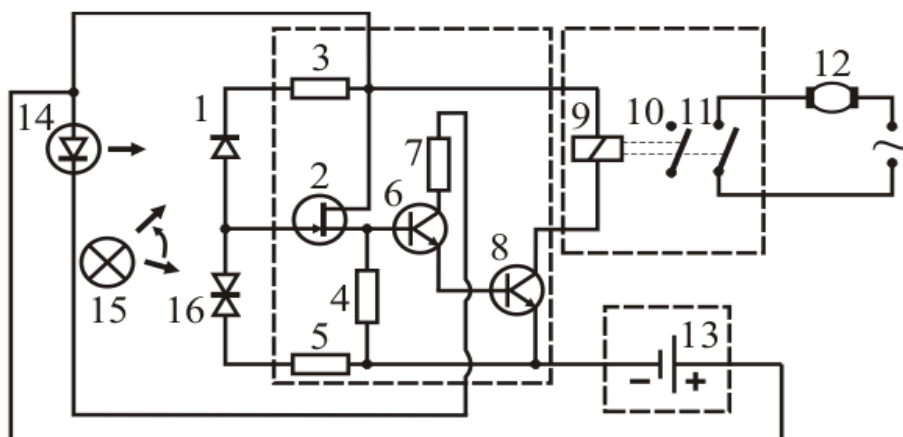
Текстурланган гетероқатламлар алюминий ва германий таркибли қо-ришма-эритмадан $822\text{ }^\circ\text{C}$ до $818\text{ }^\circ\text{C}$ температура оралигида 1 град/минут со-вутишда ўстирилган.

$nGaAs$ -тагликдаги $pGa_{0.94}In_{0.06}As$ -гетероэпитаксиал қатлам устида таркибида 7.5 моль.% легирланмаган арсенид галлий, 0.3 моль.% алюминий ва 3.1 моль.% германийли қоришма-эритмадан $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As$ гетероқатлам ўстирилганда, унинг фронтал сиртида пирамидалар (асоси $40\div 60$ мкм, баландлиги $8\div 10$ мкм) ҳосил бўлиши аниқланган (3-расм). Фотовольтаик тузилманинг $p-n$ -ўтиши текис чегарага эга бўлиб, сирти гетероқатлам таркиби билан аниқланадиган технологик текстура билан ажралиб туради ва ютилаётган ёруғлик нурланишининг қамраб олиш бурчагини ясси тузилмаларга қараганда 50 градусдан 90 градусгача оширишга имкон беради.



3-расм. Ўстирилган микрорельефли тузилма микрофотографияси

$NGaAs$ -таглик билан $nGa_{0.8}In_{0.2}As$ -гетероэпитаксиал қатлам панжаралари параметри фарқи $\sim 1.4\%$ бўлиши ҳисобига юзаси гофрли бўлган ва оптик сигналларни қабул қилиб кучайтириш учун мўлжалланган икки тўсиқли тузилма олиш технологияси ишлаб чиқилган. $NGaAs$ таглигида қалинлиги $2\div 4$ мкм бўлган $nGa_{0.8}In_{0.2}As$ ($N_n = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) гетероқатлам галлийда эритилган 4.9 моль.% арсенид галлий ва 0.7 моль.% индий қотишма-эритмани 838°C дан 822°C гача ҳарорат оралиғида 1 град/дақ. совитиш тезлигида ўстирилган. Бу гетероизотип тузилманинг иккала сиртига кумушни пуркаш билан тўғриловчи, ёғду таркатувчи диоддан кирувчи оптикавий сигнални кучайтиришга имкон берадиган контактлар олинди. Шу асосда битта ёруғлик зонди ёрдамида объектни нафақат улашни, балки узишни ҳам таъминлайдиган бошқариладиган оптоэлектрон калит ишлаб чиқилди (4-расм).



4-расм. Масофадан бошқариладиган оптоэлектрон калитнинг электрон схемаси

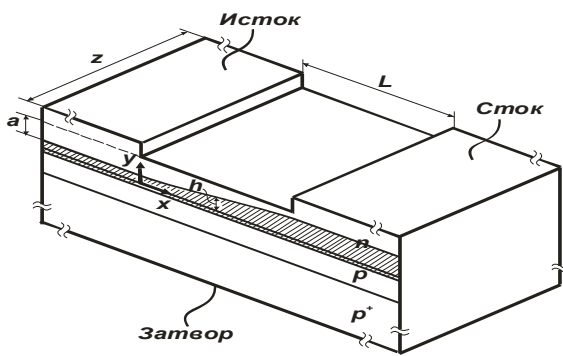
Бу ишланманинг ўзига хос хусусияти шундаки, маълум аналогларига қараганда таклиф қилинган қурилмада нурлантиргич ва қабул қилгич ўртасидаги ҳосил қилинган сток оптоэлектрон алоқа ҳисобига майдоний транзистор калит функциясини ҳам бажаради. Бунда масофадан бошқариш майдоний транзисторни ёруғлик зонди орқали кўзғатиладиган гетероизотип фотодиод ёрдамида ёпилиш режимида қайта уланиши ҳисобига амалга оширилади. Бу тизимда қайта уланиш ёруғлик зондининг иккала фотоқабул қилгичга навбатма-навбат йўналтириб, қайта уланиши билан амалга оширилади. Бу эса электрасбоб - ускуналарнинг масофадан уланиб-узилишига имкон беради.

Учинчи боб «База соҳаси градиентли бўлган кўп қатламли структуралар тайёрлаш технологиясини ишлаб чиқиш»га бағишланган бўлиб, чекланган қотишма-эритмадан суюқлик эпитаксияси усули билан галлий арсенидли май-донли транзисторларнинг база соҳаси қалинлиги бўйича киришмалар градиентини шакллантириш усуллари ва уларнинг майдоний транзисторнинг статик, динамик характеристикалари ва фотокучайтиргич хусусиятларига таъсири кўриб чиқилган. Шунингдек, кўп-қатламли тузилманинг фаол соҳасини қалинлиги бўйича киришмаларнинг градиенти диапазонини кенгайтиришга имкон берадиган, қотишма-эритмани концентрацион аралаштириш йўли билан қатламларни эпитаксиал ўстиришнинг янги усулини амалга ошириш принциплари баён қилинган.

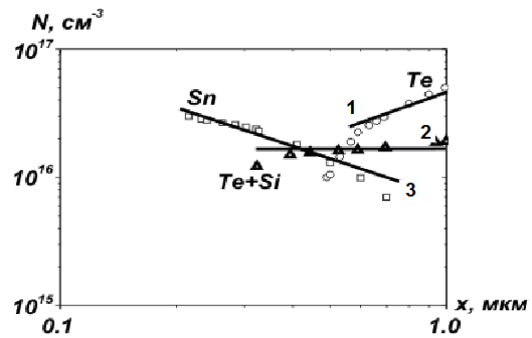
Тадқиқ қилинаётган кўпқатламли галлий арсенидли фотосезгир тузилма ташувчилар концентрацияси $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ бўлган, суюқлик эпитаксияси қурилмасининг учта ячейкасига (катакчасига) жойлаштириладиган, кейинчалик битта жараённинг ўзида турли Te , $Te+Si$ ва Sn легирловчи киришмалар билан кетма-кет $pGaAs$ ва $nGaAs$ -типдаги ўтказувчанликка эга қатламлар ўстириладиган p -типдаги $GaAs$ тагликда олинган.

Ҳамма эпитаксиал қатламлар галлийда эритилган оғирлик нисбатлари 7 моль.% арсенид галлийли маълум киришмалар билан легирланган қотишма-эритмадан ўстирилган. Қалинлиги 0.5 мкм бўлган p -типли эпитаксиал қатламлар 1 град/дақ доимий совитиш тезлигида $848 \div 845 \text{ } ^\circ\text{C}$ ҳароратлар интервалида ва n -тип ўтказувчанликка эга бўлган 1 мкм қалинликдаги қатламлар эса $845 \text{ } ^\circ\text{C}$ бошланғич ҳароратда дастлаб катта тезлик (3град/дақ), кейин эса кичикроқ тезликда (0,5 град/дақ) совитиш билан ўстирилган. Танланган легирловчи киришма ва суюқ фазадан эпитаксиал қатламнинг ўсиш тезлигига мос равишда киришмаларнинг қалинлик бўйича тақсимотининг тегишли профили шаклланади. Ушбу кўпқатламли тузилмалар асосида махсус конструкцияга эга майдоний транзисторлар тайёрланган бўлиб, унда затвор яхлит, n -тип ўтказувчанликка эга, каналнинг горизонталь ва очик эканлиги эса канал қалинлигини ўзгартириш ва унинг кафолатланган фотосезгирлик ва ёпилишини амалга оширишга имкон беради (5-расм). Канал узунлиги 50 мкм (канал узунлигининг қалинлигига нисбати 10 дан катта) бўлиб, бу унинг сиртини кимёвий ва морфологик назорат қилиш имконини беради.

Сигимнинг ҳажмий заряд қалинлиги ўзгариши билан боғлиқ, затвор p - n -ўтиши кучланишига боғлиқлигининг экспериментал маълумотларидан ба-за соҳа қалинлигининг концентрацион прифили аниқланган. Бу эгри чи-зиқларнинг таққосланиши шуни кўрсатадики, Te (Мус.Г-МТ – Мусбат градиентли майдонли транзистор) Te билан легирланган тузилмада ташувчилар концентрацияси киришмаларнинг $2.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}$ градиенти билан ортади (6-расм, 1-эгри чизик), $Te+Si$ (ТТ-МТ – Текис тақсимотли майдонли транзистор) билан легирланган каналли тузилмада эса, ташувчилар концентра-цияси текис тақсимланган (6-расм, 2-эгри чизик) бўлади ҳамда қалай билан легирланган каналли тузилмада (Ман.Г-МТ - Манфий градиентли майдонли транзистор) ташувчилар концентра-цияси киришмалар



5-расм. Очк каналли майдоний транзистор



1- Мус.Г -МТ; 2- ТТ- МТ; 3- Ман.Г -МТ

6-расм. GaAs эпитаксиал қатламлардаги киришмалар тақсимотининг профили

концентрацияси градиенти билан камаяди (6- расм, 3-эгри чизик). 1-жадвалда тадқиқ қилинаётган галлий арсендли майдоний транзис-торларнинг кириш ва чиқиш характеристикаларига каналдаги киришмалар тақсимотининг профили сезиларли даражада таъсир қилиши экспериментал равишда кўрсатилган. Бунда канали теллур, кремний+теллур билан легирлан-ган майдоний транзисторларда ва кремнийли майдоний транзисторга нисба-тан узатиш характеристикасининг эгрилиги бир тартибга камаяди, канали қалай билан легирланган майдоний транзисторда эса камайиш фақатгина 3 марта бўлади.

Назорат намунаси сифатида КП303, КП302 кремнийли майдонли тран-зисторлар танланган. Каналдаги киришмалар тақсимоти мусбат градиентдан манфийга ўтиши билан қоронғилик токлари икки тартибга камаяди, чиқиш динамик қаршиликлари эса 96 кОм дан 200 кОм гача ортади. Бу эса канали қалай билан легирланган майдоний транзисторда узатиш характеристикаси-нинг тўғри чизикқа келтирилишини асослайди ва 7-расмда кўрсатилганидек, энергия тежамкорлиги режимида ишлаш имкониятини яратади.

Каналнинг ёпилишига яқин режимда киришмалари текис тақсимланган майдоний транзисторга қараганда (7-расм, 2-эгри чизик) манфий градиентга эга майдонли транзистор узатиш характеристикасининг тўғри чизикқа яқин-лашишини (7-расм, 3-эгри чизик) узатиш характеристикаларининг каналдаги киришмалар тақсимоти профилига боғлиқ эмаслигини кўрсатувчи мавжуд

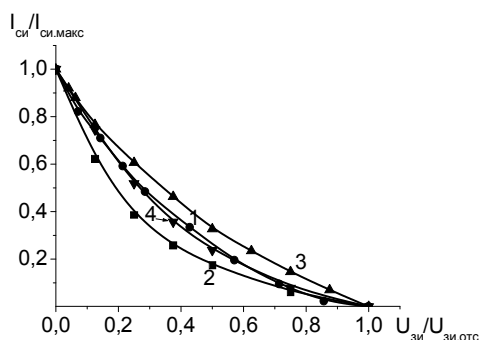
назариялар (Бокумэйл ва Ричернинг тадқиқотлари) билан тушунтириб бўлмайди. Бу назарияларда заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги каналнинг бутун ҳажми бўйича доимий деб қабул қилинган. Назариядан фарқли ўларок, қалай билан легирланган майдоний транзисторда канални қатламма-қатлам едиришда заряд ташувчилар ҳаракатчанлигининг координат ўзгариши топилдики, буни пленка-таглик чегарасига яқинлашиш билан нуқсонлар зичлигининг ўзгариши асосида тушунтириш мумкин. Эпитаксиал қатламлардаги ток ташувчилар ҳаракатчанлигини ўлчашни юпқа плёнкаларда ўлчаш методикаси бўйича кичик кучланишларда амалга оширилди. Қалинлик бўйича ташувчилар ҳаракатчанлиги тақсмоти учун ҳақиқий қиймат берилган интервалда $\mu(x) = \bar{\mu}(x) + x \cdot \frac{d}{dx}(\bar{\mu}(x))$ функциянинг ўртача қийматини аниқлашни ҳисобга олган ҳолда топилган бўлиб, бу ҳақдаги маълумотлар 8-расмда келтирилган.

1-жадвал

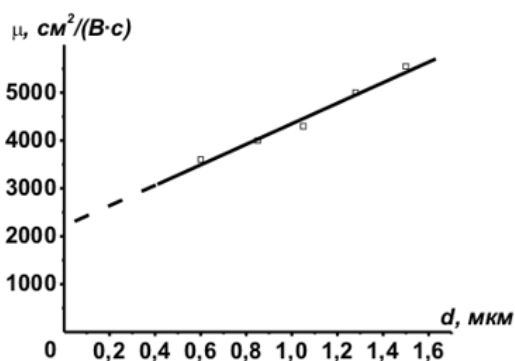
Тадқиқ қилинаётган намуналар узатиш характеристикалари эгрилигининг ёпувчи кучланишга боғлиқлиги бўйича маълумотлар

Мус.Г –МТ- $p^+GaAspGaAs - nGaAs : Te$ $R_{дин} = 100$ кОм, $R_{вых} = 31.9$ кОм									
$U_{зи} \cdot В$	0	0.5	1.0	1.5	2	2.5	3.0	3.5	
$I_{си}, мкА$	422.3	307	202.5	138.1	84.55	38	13.9	2.25	
$S, мкА/В$	230	209	128.8	107	93.1	48.2	23.3		
$k = S \cdot R_{чикши}$	7.3	6.66	4.1	3.4	2.96	1.53	0.74		
ТТ –МТ- $p^+GaAspGaAs - nGaAs : Te + Si$, $R_{дин} = 130$ кОм, $R_{вых} = 34.5$ кОм									
$U_{зи} \cdot В$	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
$I_{си}, мкА$	661	415	272	188	126	87.1	48.5	23.2	0.88
$S, мкА/В$	491.6	286	167	125.2	77.6	77.2	50.6	44.6	
$k = S \cdot R_{чикши}$	16.9	9.8	5.76	4.3	2.67	2.66	1.74	1.5	
Ман.Г- МТ- $p^+GaAspGaAs - nGaAs : Sn$ $R_{дин} = 200$ кОм, $R_{вых} = 38$ кОм									
$U_{зи} \cdot В$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
$I_{си}, мкА$	150	115	91	70.5	49.5	35.9	22.3	12.3	1.63
$S, мкА/В$	175	120	102.5	105	68	68	50	53.3	
$k = S \cdot R_{чикши}$	6.65	4.56	3.89	3.99	2.58	2.58	1.9	2	
КП303 Кремнийли назорат майдоний транзистори $R_{дин} = 96$ кОм, $R_{вых} = 31.5$ кОм									
$U_{зи} \cdot В$		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5		
$I_{си}, мкА$		430	283	153	66	19	6		
$S = \Delta I_{си} / \Delta U_{зи}, мкА/В$		294	260	174	94	26			
$k = S \cdot R_{чикши}$		9.2	8.19	5.48	2.9	0.81			

Айнан мана шу кузатилаётган каналдаги ташувчилар ҳаракатчанлигининг координацияли боғлиқлиги, тадқиқ қилинаётган майдоний транзисторнинг (Ман.Г- МТ) энергия тежамкорлиги режимда, яъни канал ёпилишига яқин, фойдали сигналнинг ўзгариши ва йўқолишини истисно қиладиган



1- Те; 2-(Те+Si); 3- Sn; 4-КП303
7-расм. Транзисторларнинг сток-затвор узатиш характеристикалари



8-расм. Заряд ташувчиларнинг Холл харакатчанлигининг эпитаксиал қатлам қалинлигига боғлиқлиги

режимда ишлашига имкон яратади. Тадқиқ қилинаётган майдоний транзисторларнинг кучайтириш хусусиятларини таққослашдан каналида киришмаларнинг манфий градиенти бўлган майдоний транзистор киришмаларининг мусбат градиентига эга майдоний транзисторларга қараганда (2-жадвал) икки марта кўп (18) ёки кремнийли майдоний транзисторга қараганда эса 3.5 марта кўп кучайтириш коэффициентига эга эканлиги аниқланди.

Шундай қилиб, қиёсий таҳлил каналдаги киришмалар чизикли градиентининг майдоний транзистор статик, динамик характеристикалари ва фото-кучайтириш хусусиятларига таъсири киришмаларнинг мусбат градиенти сток тоқининг кучланишга боғлиқлигига ўсувчи характер беришини кўрсатди.

2- жадвал

Кучайтириш коэффициентининг сток-исток кучланишига боғлиқлиги бўйича маълумотлар*

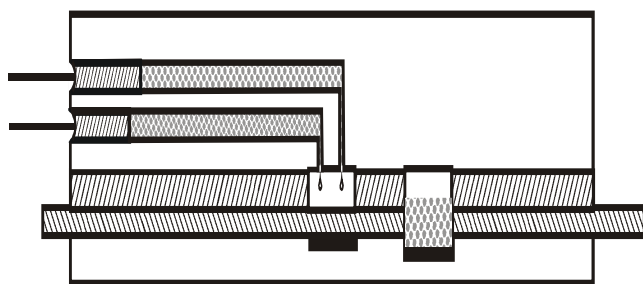
GaAs да майдоний транзистор, канал теллур билан легирланган									
$U_{си}, В$	2.0	2.31	2.69	2.8	2.89	3.1	3.5	3.8	
$U_{чикши}, мВ$	50	64.6	84.7	91.5	83.8	74.6	43.6	24.8	
$K_U = U_{чикши} / U_{кириши}$	5.0	6.46	8.47	9.15	8.38	7.46	4.36	2.48	
GaAs да майдоний транзистор, канал қалай билан легирланган									
$U_{си}, В$	0.5	1.0	1.5	1.75	1.89	2.0	2.1	2.2	2.3
$U_{чикши}, мВ$	11.7	25.4	55.5	105.8	180	180	180	180	111
$K_U = U_{чикши} / U_{кириши}$	1.17	2.54	5.55	10.5	18	18	18	18	11.1
КП303 кремнийли назорат майдоний транзистори									
$U_{си}, В$	0.45	0.7	1.0	1.6	2.3	2.9			
$U_{чикши}, мВ$	40	75	75	60	50	40			
$K_U = U_{чикши} / U_{кириши}$	4	7.5	7.5	6	5	4			
* $U_{кириши} = 10 мВ, f = 1кГц$									

Киришмаларнинг манфий градиентига эга майдоний транзисторларда узатиш характеристикалари киришмаларнинг мусбат градиентига эга майдоний транзисторларга нисбатан тўғри чизикқа келтирилади, бунда транзисторнинг ёпилиши билан кучайтириш коэффициенти сезиларсиз даражада камаяди. Киришмаларнинг канал қалинлиги бўйича даражали ва ночизикли тақсимо-

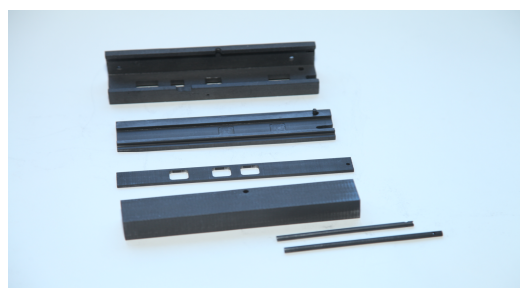
тини майдоний транзисторнинг функционал хусусиятларига таъсирини синчиклаб ўрганиш мақсадга мувофиқ ҳисобланади.

Бирок, қўпқатламли тузилмаларнинг ўсиш жараёнларини тадқиқ қилиш асосида ҳар бир легирловчи киришма эпитаксиал қатламнинг қалинлиги бўйича киришмалар тақсимотининг тўғри чизикқа яқин бўлган тақсимотини бериши, унинг градиенти эса ишлатилаётган киришма тақсимотининг ҳароратга боғлиқ ҳолда берилиши ва у бошқарилмаслиги аниқланди. Кириш-маларнинг бундай ҳолати кристаллизация чегарасида киришмаларнинг концентрациясини ҳосил қилиш шароити ўзгармаслиги билан боғлиқ. Шунинг учун канал қалинлиги бўйича киришмаларнинг даражали ва нозичли тақсимотини олиш учун кристаллизация чегарасида киришмалар концентрациясини ўзгартиришга имкон берадиган технологик шароитни яратиш керак. Бунга эса асосий қотишма-эритмага киришмалар концентрацияси билан фарқланадиган қўшимча қотишма-эритмани киритиш йўли билан эришиш мумкин.

Бу мақсадга эришиш учун ўстирилаётган қатламнинг қалинлиги бўйича киришмалар концентрациясининг чамаланган градиентни олиш учун қотишма-эритмани аралаштириш йўли билан қўпқатламли яримўтказгич p^+pn - эпитаксиал қатлам ўстиришни таъминлаб берувчи махсус қурилма (9-расм) ишлаб чиқилган. Бунда асосий ва қўшимча қотишма-эритма киришмаларининг концентрацияси орасидаги фарқ камида икки тартибга тенг бўлиши керак. Асосий қотишма-эритмага киритиладиган қўшимча қотишма-эритманинг дискрет қисми m массаси киришмалар тақсимоти профилини аниқлайдиган тезлик $\xi = m_0 \gamma \cdot t^n$ билан берилган $m = km_0 l^n$ ифодани қаноатлантириши керак.



а) геометрик кесим



б) қурилма элементлари

9-расм. Икки поршенли графит қурилма

Графит қурилмада дастлаб галлийда эритилган 7 моль.% ташувчилар концентрацияси 10^{17} см^{-3} бўлган арсенид галлийли қотишма-эритмадан p -тип эпитаксиал қатлам 845°C ҳароратда 1 см^2 юзага, $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ концентрацияга эга p^+ -тип тагликка горизонталь узатиш йўли билан ўстирилади. Сўнгра p -тип эпитаксиал қатлам устига олдинги нисбатда галлийда эритилган ташувчилар концентрацияси $7.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ га тенг бўлган n -типли арсенид галлийли асосий қотишма-эритма горизонталь тарзда берилади. Ўстириш камаядиган тезликда мажбурий совитиш билан 830°C ҳароратда асосий қотишма-эритмага 10^{15} см^{-3} концентрацияли $Ga+GaAs:Sn$ (1800 мг 1560:240) қўшимча қотишма-эритмани вертикал тарзда бериш йўли билан амалга оширилади. p -типли эпитаксиал қатлам устига аралаштирилган қотишма-

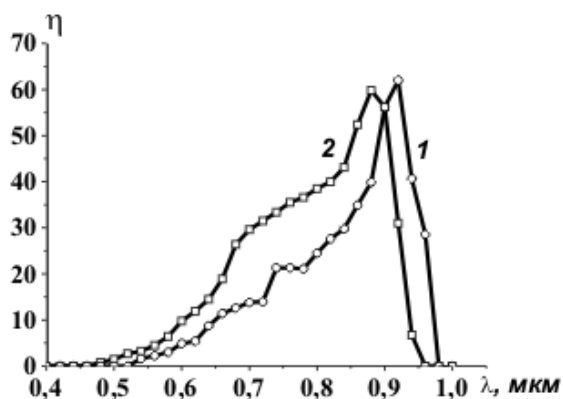
эритмадан, вольт-сигим характеристикадан аниқланадиган, n -типли ($3 \rightarrow 1$) 10^{16} см^{-3} камаювчан концентрацияли қатлам ўстирилади. Таклиф этилаётган усулнинг бошқа усуллардан фарқи шундаки, қўшимча қотишма-эритманинг қўшилиши асосий қотишма-эритманинг тўйиниб кетишига олиб келмайди, бунда тўйинишга мажбурий совитиш ҳисобига эришилади. Киришмалар таксимотининг профили қўшимча қотишма-эритмани узатиш тезлиги ($\xi = f(t)$) билан бошқарилади. Ушбу технология асосида олинган узатиш характеристикасининг тўғри чизиқли бўлиши туфайли каналида киришмаларнинг манфий градиентига эга бўлган фотосезгир майдоний транзистор юқори фотосезгирлигини нафақат канал очик ҳолда, балки канални ёпиш режимига ($U_{зи} = 0.8 \text{ В}$) яқинлашганда ва ишчи кучланиши $1.3 \div 2.2 \text{ В}$ бўлган оралиғида ҳам сақлаб қолади. 1.8 В га тенг оптимал ишчи режимда ва 100 лк га тенг интеграл ёритил-ганликда фототок 4.5 мкА бўлиб сезгирлиги 1.28 А/лм ёки $8.26 \cdot 10^2 \text{ А/Вт}$ бўлиб канали теллур билан легирланган киришмалар градиенти мусбат бўлган майдоний транзисторга қараганда икки марта, ток бўйича фотоэлектрик кучайтириш коэффициенти эса олти марта (60) катта.

Тўртинчи боб «**Майдоний транзисторларнинг кам энергия истеъмол қилишини таъминловчи янги уланиш режимлари**»да кўрсатилиб, бошқариладиган p^+p-n -ўтишли фотосезгир майдоний транзисторнинг уланиш режимларига боғлиқ ҳолда функционал ҳамда микро ва оптоэлектроникада фойдаланиладиган микросхемалар яратиш имкониятларини очиб берадиган кремнийли майдоний транзисторларда узатиш характеристикаларининг схемотехник йўл билан тўғри чизиққа келтириш учун асос ҳисобланадиган сток токининг тўйиниш жараёнлари таҳлил қилинади.

Майдоний транзисторнинг максимал фотосезгирлигини олишнинг оптимал режимларини топиш учун қиёсий таҳлил ўтказилган. Майдоний транзисторнинг ёруғлик интенсивлиги камайиши билан содир бўладиган ҳаракатланувчан режимда ёруғлик интенсивлигига боғлиқ вольтампер характеристикаси каналнинг ёпилиши ҳисобига вольтампер характеристикалар туркумини ҳосил қилади. Умумий истокка эга бўлган режимда эса, сток кучланиши қийматига боғлиқ бўлмаган қийматга эга бўлади, чунки ёруғлик ҳосил қилган ўзгариш затвор кучланиши орқали компенсацияланади.

Канални автоматик тўсиш режимида канал қалинлиги модуляциясининг хусусиятлари билан боғлиқ энг юқори кучайиш кузатилади. Затвор очик бўлган ва транзистор (умумий истокли уланиш) режимида майдоний транзисторнинг квант самарадорлиги таққосланиши затвор очик бўлган режимда кичик кучланишларда (2.23 В га қарши 2 В) квант самарадорлигининг бир хил қийматларини ($60 \div 65$) олиш мумкинлигини кўрсатди (10 -расм). Оптоэлектрон уланиш амперметр сток ва исток орасида, ишчи кучланиш эса сток ва затворга уланган режимда фототок ишорасининг инверсия бўлиши топилган. Бу режимда фототокнинг кучланишга боғлиқ равишда ортиши сток-затвор ўтиши аста-секин ёпилаётган вақтда затвор-исток ўтишининг дастлабки ҳолатга қараганда тўғри йўналишда силжиши билан боғлиқ.

Натижада ишчи кучланиш ортиши билан фотоқабул қилувчи майдон



1- эркин затвор билан;
2- канални автоматик тўсиш режимида

10-рasm. Майдоний фототранзисторнинг спектрал характеристикаси

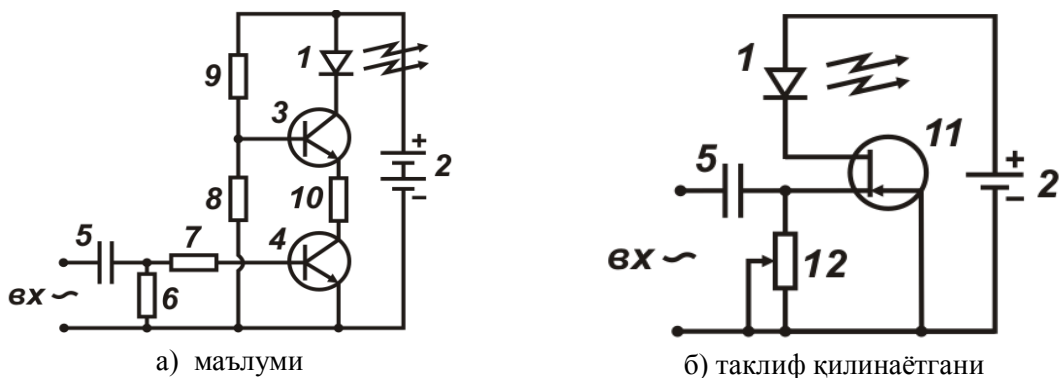
ҳам, фототашувчилар генерацияланадиган ҳажм ҳам ортади. Шу вақтнинг ўзида қоронғулик токининг фототок билан компенсацияси туфайли, унинг шовқин токини ташкил этувчиси кескин камайиши аниқланган. Ишчи кучланиш ортиши билан икки барьер орасидаги фотоқабул қилувчи сиртнинг қайта тақсимланиши – бу сток-затвор кучланиши билан каналнинг ёпилиш режимида майдоний фототранзисторнинг хусусияти ҳисобланади. Майдоний транзисторларда сток токи ортиб бориши билан канални автоматик тўсиш режимида яққол ифодаланган схемотехник сток токи тўйиниши ва фото-электрик кучайиш коэффициенти умумий истокли уланиш режимига (60) қараганда тўрт марта ортиқ (250) қийматга эгаллиги аниқланган.

Канали автоматик тўсиш режимида тадқиқ қилинаётган майдоний транзистор сток токи тўйинишининг сабабини анализ қилиш натижасида, канални тўсаётган резисторда кучланиш тушишининг тўйиниш характери аниқланган. Бу кучланиш исток-затвор ўтишининг ёпилишига ва затворнинг бутун кенглиги бўйича қўзғалмас ионлашган зарядлар ҳосил бўлиши ҳисобига каналнинг торайишига ҳамда сток токининг яққол ифодаланган тўйинишига олиб келади. Канални тўсувчи қаршилиқнинг танланган турли қийматларида сток токи яққол ифодаланади ва сток характеристикаларининг туркуми шаклланади.

Шуни таъкидлаб ўтиш жоизки, қаршилиқ қиймати қанча катта бўлса, сток токи қиймати шунча кам бўлади. Автоматик тўсиш режимида каналнинг тагдан ёритилиши канални тўсувчи кучланиш синхрон камайишига ва сток токи ортишига олиб келади.

Галлий арсенидли майдоний транзисторнинг сток токи тўйиниш жараёнини тадқиқ қилиш натижалари асосида янги техникавий ечим таклиф қилинган бўлиб, у сток токи катта бўлган (3÷30 мА) КП302 кремнийли назорат майдоний транзистори асосидаги нур таратувчи яримўтказгич асбобларнинг стабил ишлаш режимини таъминлашга имкон беради.

Оптик сигналларнинг ток стабилизатори ва икки биполяр транзистор калитидан иборат бўлган модулятордаги фойдали сигнал бузилишини олдини олиш ва ишчи ток стабиллигини ошириш учун, таклиф қилинаётган модуляторда калит ва ток стабилизаторининг манбаи сифатида келтирилган схемага мувофиқ уланган битта майдоний транзистордан фойдаланиш таклиф қилинади (11- рasm). Таклиф қилинаётган модуляторда ишчи ток ишчи



11-расм. Оптик сигналлар модулятори схемаси

кучланиш 10 В дан 3В гача камайганда ҳам ўзгармасдан қолади. Товуш сигнали манбаидан келадиган фойдали сигнал истокнинг чиқишига уланиши хисобига умумий истокли схемадагига нисбатан кўпроқ каналнинг чуқур модуляцияси таъминланади.

Автоматик тўсиш схемасидаги оддий резисторни майдоний транзистор каналининг қаршилигига алмаштириш бизнинг янги ёндашувимиз моҳиятини ташкил қилади (12-расм). Бунда база соҳаси қалинлигининг, майдоний транзистор кучайтириш коэффициентининг умумий истокка уланиш режимига қараганда янада кўпроқ қийматини олишга имкон берадиган, янада чуқурроқ модуляцияси рўй беради. Бу ерда шуни таъкидлаб ўтиш жоизки, «ячейка» деб аталадиган, икки майдоний транзисторнинг уланиш схемаси бир томондан комбинацияланган, яъни умумий затворли майдоний транзисторни ва умумий истокли майдоний транзисторни ўз ичига олади. Бошқа томондан, улардаги 2 - умумий чиқишнинг мавжудлиги унинг уланиш режимлари комбинациясини кўпайтиришга имконият яратади. 1 ва 3 чиқишлар ишчи кучланишни беришга, 4 - чиқишдан эса ушбу катакчанинг ишчи режимларини берадиган тўсиш кучланишни бериш учун фойдаланилади.

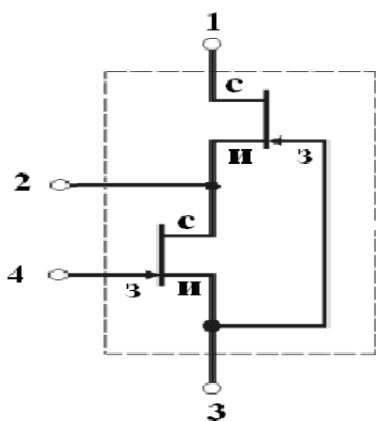
Ушбу уланиш схемасидан фойдаланиш, товуш генераторидан синусоида шаклидаги кичик (~2 мВ) ўзгарувчан сигналдан, сток токининг яққол ифодаланганлиги тўйиниши ва узатиш характеристикасининг тўғри чизиқланиши (13-расм) туфайли, 3-жадвалда келтирилганидек, ёпилиш кучланишининг ярмига тенг тўхтатувчи кучланишда кучайтириш коэффициентини

3-жадвал

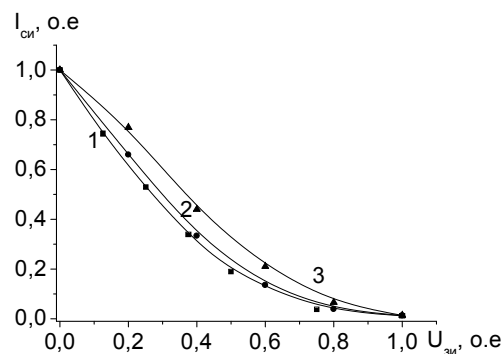
Кучайиш коэффициентининг тўхтатувчи кучланиш катталигига боғлиқлиги бўйича маълумотлар*

$U_{зи}, В$	0.3	0.31	0.32	0.325	0.33	0.335	0.36	0.44	0.54	0.6
$U_{вх}, мВ$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$U_{вых}, мВ$	22	64	130	140	140	130	100	80	40	20
$K_{ус}$	11	37	65	70	70	65	50	40	20	10
* $f = 400 Гц$										

70 гача ошириш имконини берадиган микросхема таклиф этилган. Унда кўшимча транзистор затворининг чиқиши исток чиқишидан ажратилган ва бу истокнинг чиқиши маълум каскаддан фарқли равишда, асосий транзистор



12-расм.
Икки транзисторли ячейка

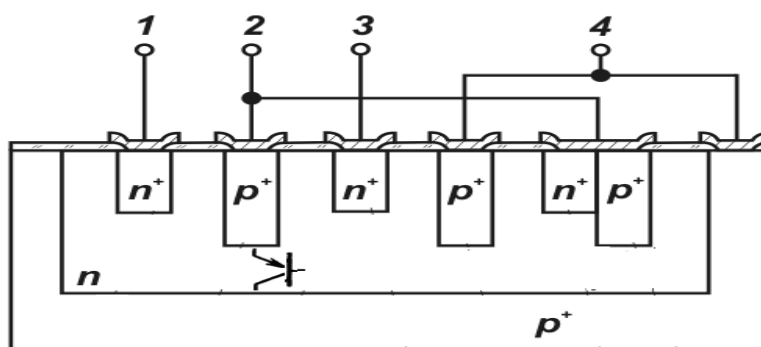


1- $U_{\text{эпилиш}} = -0.8 \text{ В}$; 2- $U_{\text{эпилиш}} = -0.5 \text{ В}$
3-кетма-кет уланган

13-расм. Тадқиқ қилинаётган майдоний транзисторларнинг узатиш характеристикалари

затворининг чиқишига уланган бўлиб, кучайтириш коэффициентини оширишга имкон беради. Таклиф қилинган икки транзисторли «ячейка» асосидаги ток регулятори, харорат ўлчагичи ва оптик сигнал кучайтиргичларининг уланиш режимларининг турли комбинацияларидаги ишланмалари имкониятлари кўрсатилган.

Ушбу икки каскадли «ячейка» динамик юклага эга каскаддан иборат бўлиб, тегишлича модернизацияланса, кичик ва ўртача қувватли кириш сигналларини йўқотишлар ва бузилишларсиз ўзгартириш учун ишлатилиши мумкин. Кириш сигналдан бир вақтнинг ўзида иккала канал модуляцияланадиган, кучайтириш хусусиятлари яхшиланадиган ва уни турли функционал мўлжалдаги қурилмалар яратиш учун тадбиқ қилиш имконияти пайдо бўлади. Динамик юкламали таклиф қилинаётган микросхема маълум микросхема-ларга қараганда, кетма-кет уланган иккала каналнинг бир вақтнинг ўзидаги модуляцияси ҳисобига, берилган уланишда 100 гача бўлган икки тартибга катта кучайтириш коэффициенти эга бўлади. Майдоний транзистордаги динамик юкламали универсал микросхема кремний, $SiGe$ қаттиқ қотишмаси, шунингдек A^3B^5 и A^2B^6 яримўтказгич бирикмалари асосида ҳам тайёрланиши мумкин, 14-расм.



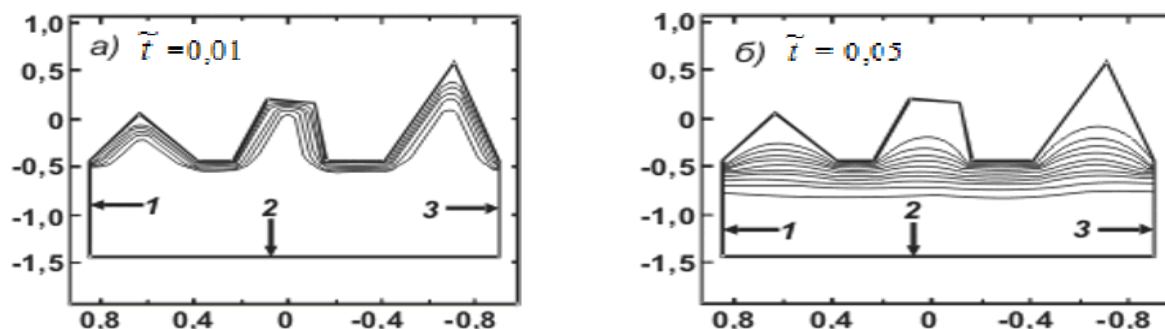
14-расм. Универсал микросхеманинг кўндаланг кесими

Шундай қилиб, майдоний транзистордаги динамик нагрузкали каскад асосидаги таклиф қилинаётган микросхема меёрига етказилган яримўтказ-

гичлар ишлабчиқариш технолгияси асосида ишлаб чиқарилиши мумкин ва ўзгарувчан сигналларнинг кучайтиргичи сифатида ҳамда уланиш режими билан аниқланадиган бошқа мақсадларда ишлатилиши мумкин,

Бешинчи бобда «Кўпқаватли структураларнинг ток характеристикалари ва олиш технологиясининг аналитик ҳисоби тадқиқотлари» келтирилган бўлиб, нотекис сиртга эга бўлган ярим ўтказгичга металнинг диффузияси жараёни, чегараланган ва ортиб борадиган ҳажмли қотишма-эритмадан ўстириладиган галлий арсенидли кўпқатламли тузилмалардаги киришмалар тақсимотининг профили шакллантирилган. Уланишнинг диод ва транзистор режимида киришмаларнинг турли градиентига эга кўп қатламли тузилмаларда ток ташиш жараёнларининг механизмлари анализ қилинган.

Металнинг (*Zn*) текстурланган сиртли яримўтказгичга (*nGaAs*) диффузияси жараёнини моделлаштирилишида аниқланишича, диффузияланаётган металл концентрациясини ва диффузия ўтказиш вақтини ўзгартириб турли шакл ва сиртга эга бўлган *p-n*-ўтишни олиш мумкин. Берилган ҳароратда ва металнинг чекланган миқдорида рухнинг 30 дақиқа ичида 700 °C даги диффузиясида *p-n*-ўтиш чегараси, 15а-расмда кўрсатилганидек, ярим ўтказгич сирти текстурасини такрорлайди, ҳарорат (900 °C) ва диффузия вақти давомийлиги ортиши билан диффузия чегарасининг аста-секин текисланиши рўй беради (15б-расм).



15-расм. *GaAs* да *Zn* диффузияси фронти

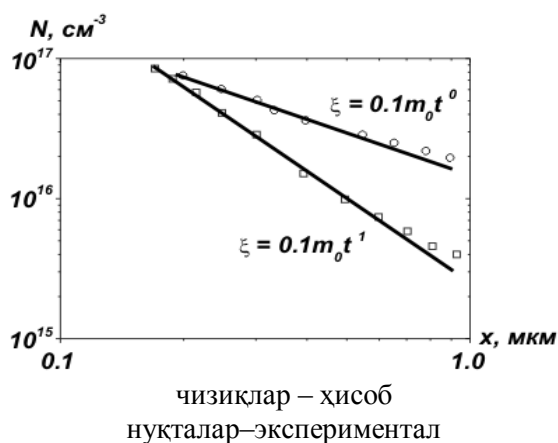
Бу эса яримўтказгичга металл диффузияси коэффицентининг ортиши билан боғлиқ бўлиб, галлий арсенидига цинк атомлари диффузияси жараёнининг экспериментал маълумотлари билан тасдиқланади.

Рух атомларининг текстурланган арсенидгаллий сиртига диффузияси жараёнларини физик-математик моделлаштириш ёрдамида кўрсатилганки, диффузонт миқдори ва жараён давомийлигини танлаш йўли билан микро-рельеф профилини бошқариш мумкин. 15-расмда вақти $t \approx 30$ минут бўлган диффузия жараёни таҳлил қилинганда металл профили тузилма профилини айнан такрорлаши ва моделлаштириш натижалари билан мос келиши ҳар хил диффузия шароитлари учун 4- жадвалда кўрсатилган. Диффузия вақти ёки ҳарорати оширилганда арсенид галлийда рух металининг профили текисланиб ясси ҳолатга тўғри келади. Кристаллизация чегарасида киришмалар концентрациясини бошқариш мақсадида асосий қотишма-эритмага берилган тезликда кўшимча қотишма-эритмани аралаштириш ҳисобига легировчи

Ҳар хил диффузия шароитларида узунлик ва вақтнинг ўлчамсиз катталиқдан ўлчамли катталиқка ўтишидаги ҳисобий маълумотлари

T, °C	D, см ² /сек	[\tilde{x}] мкм	[\tilde{t}] мин	$\tilde{t} = 0.01$ мин	$\tilde{t} = 0.05$ мин
700	$2,98 \cdot 10^{-13}$	10	$5,6 \cdot 10^4$	560	2800
750	$1,39 \cdot 10^{-12}$	10	$1,2 \cdot 10^4$	120	600
800	$5,64 \cdot 10^{-12}$	10	3000	30	150
850	$2,02 \cdot 10^{-11}$	10	800	8	40
900	$6,46 \cdot 10^{-11}$	10	250	2,5	12,5

киришмаларнинг миқдори ва ҳажмини бошқариш таклиф қилинади.



16-расм. Концентрацион аралаштириш усулида қалинлик бўйича киришмалар тақсимоти

Киришмаларнинг шаклланадиган но-чизикли градиентини тушунтириб бера оладиган моделлаштириш ўтказилган. Сиқиб чиқарадиган поршен қадамнинг ўзгариш қонунини орқали қўшимча қотишма-эритмани бериш тезлигини қуйидаги ифода билан $\xi = f(m_0, t) = m_0 \gamma t^n$ бошқариш мумкин.

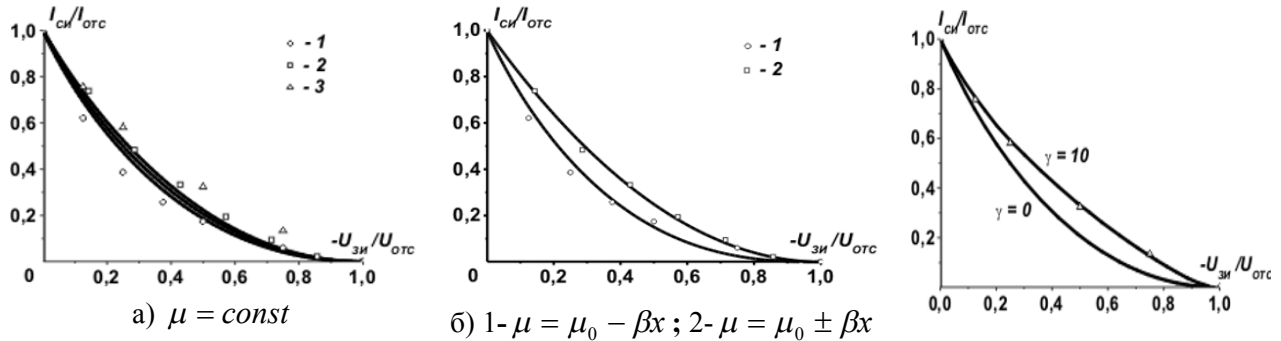
Бу ерда γ ва n - коэффициентлар бўлиб, улар қўшимча қотишма-эритмани бериш тезлиги ўзгаришини ва киришма тақсимоти профилини бошқариши мумкин (16- расм).

Киришмалар тақсимотининг технологик жараёнда ҳосил қилинадиган профиллари майдоний транзисторнинг сток-затвор характеристикаларига сезиларли даражада таъсир қилади. Физик-математик ҳисоб маълумотлари канал қалинлиги бўйича ташувчилар ҳаракатчанлиги ва киришмаларнинг текис тақсимланиши ҳолатида сток тоқлари тўхтатувчи кучланишга квадратик қонун бўйича кучайиш коэффициентининг камайишига олиб келишини кўрсатди (17а-расм).

Узатиш характеристикаларининг аналитик - ҳисоб тадқиқотлари асосида аниқландики, назарий ва экспериментал эгри чизиклар, эпитаксиал қатламларда ташувчилар ҳаракатчанлиги экспериментал тадқиқотларининг натижалари билан тасдиқланадиган, (Ман.Г -МТ) канал қалинлиги бўйича ташувчилар ҳаракатчанлигининг градиенти мавжуд, деб фараз қилингандагина бир-бирига мос келиши аниқланди (17б-расм).

Бунда қалай билан легирланган майдоний транзистор каналида ташувчилар ҳаракатчанлигининг юқори манфий градиенти мавжудлиги каналнинг эффектив узунлигини қисқартиришга, шу билан бирга транзисторларнинг уза тиш характеристикасини тўғри чизикқа олиб келган ҳолда, ташувчилар концентрациясининг электр майдон кучланганлигига боғлиқлигини харак-

терлайдиган $\gamma = \frac{qa^2 \bar{\mu} \cdot \bar{N}}{2\epsilon\epsilon_0 v_{нас} L}$ параметри қийматини 10 гача ортишига олиб келади (17в-расм). γ параметрининг кичик қийматларида канал модуляцияси асосан ташувчилар ҳаракатчанлигининг профили билан, катта қийматларида эса киришмалар концентрациясининг профили билан аниқланади.



17-расм. Майдоний транзисторларнинг узатиш характеристикалари

Каналидаги киришмаларнинг манфий градиентига эга майдоний транзис-торда узатиш характеристикалари худди қисқа каналли майдоний транзисторлардаги каби тўғри чизиқланади. Бу эса эпитаксиал каналнинг ўсиш жараёнини ўзгартириб ва қалинлик бўйича киришмалар тақсимотини бошқариб, қисқа каналли транзистор хусусиятига эга узун каналли майдонли транзисторларни тайёрлаш мумкин бўлганлиги учун ундан энергиянинг кам сарфида тежамкор режимда фойдаланиш мумкин. Каналидаги киришмалар градиенти шаклланиши ҳисобига қоронғилик ва ёруғлик тоқларини бошқариш имкониятини кўрсатадиган майдоний транзисторнинг диод режимидаги фотоэлектрик характеристикаларининг аналитик ҳисоб тадқиқотлари ўтказилди.

ХУЛОСА

1. Тағлик билан алоқада бўлган асосий қотишма-эритмага қўшимча қотишма-эритмани дискрет қисмлар ва бошқарилувчи тезликда қўшиш йўли билан берилган киришманинг эпитаксиал қатлам қалинлиги бўйлаб тақсимотининг шаклланишини таъминлайдиган суяқ эпитаксиянинг янги усули ишлаб чиқилган.

2. Ҳажми ўзгармас ва ўзгарувчан ҳажмли қотишма-эритмадан ўстири-лаётган эпитаксиал қатламлар қалинлиги бўйича киришмалар тақсимо-ти шаклланиши аналитик ҳисобланган, бунда асосий қотишма-эритмага қў-шимча қотишма-эритмани юбориш тезлиги қонунияти киришмалар тақси-мотини бошқариши кўрсатилган.

3. Ягона жараёнда база соҳасининг текстураланган сиртига рух диффу-зияси, сўнгра кетидан эпитаксиал гетероқатламни ўстиришнинг оптимал режимлари аниқланган. Металлни текис бўлмаган юзали яримўтказгичга диффузия жараёнини компьютерли моделлаштириш орқали диффузия вақтини ошиши билан p - n -ўтиш чегараси текисланиши кўрсатилган.

4. Таглик билан гетерослой орасида панжара параметрлари фарқи ~1.4% индий ортиқлиги ҳисобидан юзаси гофр шаклида технологик текстурланган индий таркибли арсенид галлий эпитаксиал қатламли иккитўсиқли изотип $nGa_{0.8}In_{0.2}As - nGaAs$ -гетероструктура олиш технологияси ишлаб чиқилган.

5. Индий таркибли гетероқатлам устида ўстирилган фронтал $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As$ гетероқатламда германий легирловчи киришмаси 3.1 моль.% бўлганда (асоси 40÷60 мкм га ва баландлиги 8÷10 мкм га тенг бўлган) пирамидалар кўринишидаги технологик текстураланган сиртга эга фотовольтаик $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As - pGa_{0.94}In_{0.06}As - nGaAs$ -тузилмалар олиш технологияси яратилган.

6. Затвор ва исток қаршилиги орасига икки барьерли тузилма асосидаги фотоқабул қилгич жойлаштирилган, майдоний транзистордаги кириш каскадига эга кучайтиргичдан ташкил топган элекр асбоблар ва технологик жиҳозларни ёруғлик зонди ёрдамида улаб-узишни таъминлайдиган масофадан бошқариладиган оптоэлектрон калит ишлаб чиқилган.

7. Кириш сигнали истокка бериладиган икки биполяр транзистор ўрнига битта майдоний транзистор, ток манбаи ва ёғду диодидан иборат яримўтказгичли ёруғлик таратувчи асбобларнинг стабил ток режимини таъминлавчи ва биполяр транзисторнинг сифими катталигига боғлиқ сигналлар бузилишининг олдини олувчи оптик сигналлар модулятори ишлаб чиқилган.

8. Канали мусбат градиентли майдонли транзисторга нисбатан икки марта катта фотосезгирликка (800 А/Вт) ва 6 марта катта ток кучайтириш коэффицентига (60) эга бўлган арсенид галлий асосида канали манфий градиентли майдонли транзистор яратилган.

9. Узун каналли транзисторда канал қалинлиги бўйича ҳаракатчанлик ва киришмалар тақсимотининг градиентини ҳисобга олган ҳолда, тежамкорлик режимида фойдаланишга имкон берадиган, қисқа каналли майдоний транзисторнинг хусусиятлари ҳосил бўлишини тасдиқлайдиган сток вольт-ампер характеристикаларининг аналитик ҳисоби тадқиқоти ўтказилган.

10. Каналнинг ёпилишига яқин режимда бир тартибга катта (70) кучайиш коэффицентини таъминлайдиган, каналлари синхрон (бир вақтнинг ўзида) модуляциялашадиган икки транзисторли схема асосида тўртта чиқишга эга универсал микросхема таклиф қилинган.

11. Стабилитрон, кучланиш чеклагичи ва S-диодлар типидagi токи кескин ортадиган яримўтказгич асбобларнинг вольтампер характеристикасини ўлчашни таъминлайдиган, кичик қадамли прецизион мослаштириладиган токни бериш учун мўлжалланган каналлари синхрон модулланадиган икки транзисторли схема асосида стабиллашган ток генератори ишлаб чиқилган.

**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**

ЁДГОРОВА ДИЛБАРА МУСТАФАЕВНА

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ**

01.04.10 – Физика полупроводников (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Ташкент – 2015 год

Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан, за 30.09.2014/В2014.5Т265.

Докторская диссертация выполнена в Физико-техническом институте.

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

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

Официальные оппоненты: **Абдукадыров Мухитдин Абдурашитович**
доктор технических наук, профессор

Алиев Райимжон
доктор технических наук, профессор

Тагаев Марат Баймуратович
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: Ташкентский государственный технический университет

Защита состоится «___» _____ 2015 г. в ___ часов на заседании 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 - 2б. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net.

Докторская диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института, за № 04, с которой можно ознакомиться в ИРЦ по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули - 2б. Тел./Факс: (+99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2015 года
(протокол рассылки ___ от _____ 2015 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

Введение (Аннотация докторской диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире одним из важных физико-технологических проблем в динамично развивающемся направлении микро и оптоэлектроники является разработка многослойных фоточувствительных структур на основе полупроводниковых материалов с улучшенными функциональными характеристиками. При этом изучение взаимосвязи электрофизических параметров активной области арсенидгаллиевых фоточувствительных структур с их эксплуатационными параметрами позволит получить новые технические решения способствующие раскрытию ранее неизвестных возможностей многослойных фоточувствительных структур. Работы, проводимые по усовершенствованию канальной области полевого транзистора, решению проблем снижения энергопотребления, по разработке полевых транзисторов с *p-n*-переходом, а также по разработке технологии изготовления фоточувствительных структур являются перспективными направлениями исследований.

Применение многослойных полупроводниковых приборов, в том числе фотодиодов и транзисторов в автомобильной промышленности и телекоммуникации требует повышения их рабочей частоты, линеаризации передаточных характеристик, увеличения коэффициентов усиления и исследования схем подключения. В связи с этим в целях оптимизации конструктивных параметров полевых транзисторов исследования, проводимые по влиянию на свойства полевых транзисторов, параметров эпитаксиальных структур являются актуальными.

Данная исследовательская работа направлена на разработку способа эпитаксиального роста полупроводниковых материалов путем смещения растворов-расплавов, а также получению арсенидгаллиевых многослойных фоточувствительных структур с управляемым градиентом распределения примесей и подвижности, и фотодиодных структур с микрорельефной границей раздела. Улучшение функциональных характеристик таких структур, получение фоточувствительных полевых транзисторов во взаимосвязи с особенностями технологии изготовления и обеспечение их работоспособности в энергосберегающем режиме является необходимостью диссертации.

Настоящая диссертация служит выполнению в определенной степени задачи по повышению конкурентоспособности изделий электронной техники касающейся, в частности, задач отмеченных в постановлении Президента Республики Узбекистан ПП-1442 “О приоритетах развития промышленности республики Узбекистан в 2011 - 2015 годах” от 15 декабря 2010 года.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертация 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, электронного приборостроения”.

Обзор международных научных исследований по теме диссертации. Исследования в области полевых транзисторов проводятся в ведущих университетах и центрах, в частности, в университетах Беркли (США) и Монпелье (Франция), а также фирмой Mitsubishi Electric (Япония) по разработке технологии изготовления полевых транзисторов с *p-n*-переходом и барьером Шоттки, НПП «Полус» (Россия) по высокочастотным полевым транзисторам на арсениде галлия, а в Калифорнийском университете (США) ведутся работы по технологии получения полевых транзисторов на графене.

В мировом масштабе решены несколько актуальных проблем, в частности, в области получения приборов с внутренним усилением на основе новых полупроводниковых материалов получены важные результаты: на основе эффекта сверхпроводимости создан полевой транзистор управляемый светом – (Национальный университет естественных наук Японии); разработан высокочастотный двумерный полевой транзистор с электронным каналом – (Университет Монпелье Франции); изготовлен полевой транзистор с вертикальным каналом со статической индукцией – (фирма Sony Японии); на основе технологии получения качественных эпитаксиальных слоев алюминий-нитрид галлия AlGaIn/GaN на подложках Si (111) получен полевой транзистор работающий при больших температурах – (компания Nitronex США).

На сегодня проводятся перспективные исследования посвященные решению технических проблем изготовления фоточувствительных структур на основе эпитаксиальных слоев с текстурированной поверхностью и управляемым градиентом примесей, а также расширения их функциональных характеристик.

Степень изученности проблемы. Со стороны А.Г. Милехина рассмотрены возможности использования полевого транзистора в многочисленных комбинациях видов включения для различных назначений. Однако в этих режимах полевому транзистору присущи нестабильность параметров и низкие коэффициенты усиления, обусловленные отсутствием приемов линеаризации его передаточной характеристики. Ученым из США R.A. Puselem показано, что известные технологические способы улучшения параметров за счет укорочения длины канала полевого транзистора приводят, с одной стороны, к улучшению усилительных свойств за счет линеаризации крутизны передаточной характеристики в зависимости от характера распределения примесей в канале, а с другой стороны повышают рассеиваемую мощность из-за увеличения рабочего тока. Вследствие этого факта такие полевые транзисторы становятся экономически невыгодными из-за невозможности их работы в режиме, близком к отсечке канала.

В тоже время известным ученым R.N. Ноусом показано, что создание продольного градиента примесей по длине канала с уменьшающейся концентрацией носителей в направлении истока позволяет лишь повысить эффективность модуляции сопротивления канала напряжением затвор-исток,

но, ни в коем случае не влияет на передаточные характеристики из-за равномерного распределения примесей по толщине канала. При этом не рассмотрены случаи градиента концентрации и подвижности носителей по толщине канала.

Специалистом в области жидкостной эпитаксии, ученым из России В.М. Андреевым показано, что имеющиеся технологии получения из жидкой фазы арсенидгаллиевых многослойных эпитаксиальных структур с принудительным охлаждением раствора-расплава дают технологически плохо управляемые малые градиенты профиля распределения примесей, обусловленные температурной зависимостью их коэффициента распределения. Целенаправленные изменения конструкции устройств жидкостной эпитаксии могут служить основой для модернизации способов и методов создания градиентного распределения примесей в базовой области полупроводниковых приборных структур и определения их влияния на диодные и транзисторные свойства.

До сегодняшнего дня в развитие технологии жидкостной эпитаксии определенный вклад внесли школы академика Ж.И. Алферова, профессора Ю.П. Яковлева академика М.С. Саидова, группы докторов М.Н. Турсунова, М.А. Абдукадырова и А.В. Каримова каждая из которых развивала различные технологические аспекты в соответствии со своими целевыми установками и задачами. В частности, группой А.В. Каримова были разработаны способы получения резкого *p-n*-перехода из раствора-расплава, охлаждаемого с уменьшающейся скоростью, а также технология получения варизонных эпитаксиальных слоев путем смешивания порций растворов-расплавов различного состава в изотермических условиях.

Из вышеизложенного следует, что не разработаны технологии получения требуемого градиента подвижности и примесей по толщине канала полевого транзистора. Линеаризация передаточной характеристики требует нового подхода. Остаются нерешенными научно-технические проблемы, связанные с целенаправленным управлением электрофизическими, фотоэлектрическими и электрическими характеристиками фотодиодной структуры, а также функциональными свойствами многослойной транзисторной структуры при введении неоднородного распределения примесей и подвижности носителей тока в канале, требующих комплексного изучения влияния примесей на их характеристические параметры во взаимосвязи с технологическими условиями их изготовления.

Связь темы диссертации с научными исследованиями научно-исследовательской организации, где выполнена диссертационная работа. Диссертация выполнена в Физико-техническом институте в рамках Государственной программы научно исследовательских работ РУз № А-6-049 на тему: «Разработка технологии изготовления полупроводниковых фотоэлектропреобразователей с избирательной фоточувствительностью» (2006-2008 гг.) и проекта ФА17-Ф-100 «Разработка фотоприемного устройства слабых оптических сигналов на основе фотоэлектропреобразователя» (2009-2011 гг.), а также проекта АЗ-ФА-0-10-

440 “Разработка методов термической и электроимпульсной обработки для увеличения выхода при производстве дефицитных групп полупроводниковых приборов (АО “FOTON”)” (2012-2014 гг.)

Целью исследования является разработка технологии изготовления арсенидгаллиевых многослойных фоточувствительных структур на основе эпитаксиальных слоев с заданным профилем распределения примесей и текстурированной поверхностью, улучшение их функциональных характеристик и изучение новых режимов приборного включения.

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

разработать технологию получения арсенидгаллиевых многослойных структур с текстурированной поверхностью методом жидкостной эпитаксии;

смоделировать процессы диффузии примеси на полупроводник с неплоской поверхностью;

разработать технологию выращивания эпитаксиальных пленок с нелинейным (положительным, отрицательным, степенным) градиентом распределения примесей по толщине;

смоделировать процесс выращивания эпитаксиального слоя принудительным охлаждением из раствора-расплава с изменяющимся составом, сопровождаемый увеличением объема раствора-расплава;

разработать полевой транзистор на основе арсенида галлия с неравномерным (положительным, отрицательным, степенным) профилем распределения примесей по толщине канала;

смоделировать электронные процессы в полевых транзисторах с неравномерным профилем распределения примесей и подвижностей носителей по толщине канала;

разработать различные режимы (автоматического смещения, максимальной проводимости, а также управляемого напряжением сток-затвор) включения полевого транзистора, расширяющие его функциональные возможности;

разработать дистанционно-управляемый оптоэлектронный ключ с быстрым переключением объекта с помощью одного светового излучателя и входного каскада на основе полевого транзистора;

разработать новые режимы приборного включения на основе сопоставительного анализа полученных результатов для арсенидгаллиевого полевого транзистора и контрольного кремниевого образца.

Объект исследования - фоточувствительные многослойные транзисторные структуры с управляющим $p^+ GaAs-pGaAs-nGaAs$ -переходом с различными профилями распределения примесей и подвижности носителей в базе и контрольные образцы на основе кремния, а также арсенидгаллиевые структуры с изотипной гетеро и микрорельефной границей раздела.

Предмет исследования – способы и режимы эпитаксиальной и диффузионной технологии получения многослойных арсенидгаллиевых структур с поверхностными и морфологическими неоднородностями и режимы

функционального включения транзисторных структур, и процессы токопереноса.

Методы исследования. В работе применены комплексные информативные методы экспериментальной физики: вольтамперные, вольтфарадные методы изучения структур с *p-n*-переходами; методы измерения спектральной фоточувствительности при различных рабочих напряжениях и структурные методы изучения морфологии поверхности и границ раздела многослойных структур, а также методы теоретических расчетов и компьютерного моделирования технологических и электронных процессов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые разработан способ неизотермического процесса выращивания эпитаксиального слоя полупроводниковых соединений A^3B^5 с профилем распределения примесей задаваемым скоростью смешивания дополнительного раствора-расплава в основной раствор-расплав и проведено физико-технологическое моделирование профиля распределения примесей по толщине выращиваемых эпитаксиальных слоев;

разработана технология диффузии примеси цинка в арсенид галлия с текстурированной поверхностью с последующим ростом эпитаксиального гетерослоя, установлены оптимальные режимы заключающиеся в диффузии - цинка при $800\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 80 минут и роста гетерослоя в интервале температур от $813\text{ }^\circ\text{C}$ до $809\text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью охлаждения 1 град/минут в едином процессе;

предложены технологии получения изотипной двухбарьерной $nGa_{(1-x)>0.8}In_{\leq 0.2}As - nGaAs$ -гетероструктуры на основе индийсодержащего эпитаксиального слоя арсенида галлия с технологически текстурированной поверхностью в виде гофров при избытке индия, создающем различие параметров решеток в $\sim 1.4\%$ с подложкой арсенида галлия и фотовольтаической $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As - pGa_{0.94}In_{0.06}As - nGaAs$ -структуры с технологически текстурированной поверхностью в виде выпуклых пирамид (с основанием $40\div 60\text{ мкм}$ и высотой $8\div 10\text{ мкм}$) при избытке легирующей примеси германия в $3.1\text{ моль.}\%$ во фронтальном гетерослое $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As : Ge$ выращенном на индийсодержащем гетерослое;

впервые изготовлен фоточувствительный полевой транзистор на арсениде галлия с отрицательным (убывающим к поверхности) градиентом примесей в канале, имеющий фоточувствительность в два раза больший по сравнению с полевым транзистором с положительным градиентом примесей и в 3.5 раза больший коэффициент усиления в отличие от известных аналогов;

предложены способы и режимы включения полевого транзистора, обеспечивающие его работу в качестве фотоприемника с максимальной чувствительностью, малоинерционного фоторезистора и переключателя больших мощностей в электронных схемах;

проведен физико-математический расчет токопереноса в полевых транзисторах на основе арсенида галлия с управляющим *p-n*-переходом с учетом градиента подвижности носителей и влияния поверхностных состояний, впервые показана возможность линеаризации передаточных характеристик полевых транзисторов с длинным каналом;

разработана универсальная микросхема с четырьмя выводами на основе «двухтранзисторной ячейки» с синхронно модулируемыми каналами, обеспечивающая на порядок (70 против 7 в обычных случаях) больший коэффициент усиления в режиме, близком к отсечке канала;

впервые создан дистанционно-управляемый оптоэлектронный ключ, обеспечивающий одним световым зондом включение-выключение электроприборов и технологических оборудований, состоящий из усилителя с входным каскадом на полевом транзисторе, между затвором и сопротивлением истока которого введен фотоприемник на основе двухбарьерной структуры;

впервые собран модулятор оптических сигналов, позволяющий повысить срок службы полупроводниковых светоизлучающих приборов, содержащий полупроводниковый излучатель света и выполняющий функции источника тока и ключа один полевой транзистор взамен двух биполярных транзисторов, где входной сигнал подается к истоку;

разработан генератор стабилизированных токов на основе «двухтранзисторной ячейки» с линеаризованной передаточной характеристикой, который предназначен для использования в качестве прецизионно-регулируемого генератора тока с малым шагом, обеспечивающим измерение вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов с резко возрастающим током типа стабилитрона, ограничителей напряжения или *S* – диодов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан неизотермический способ выращивания эпитаксиальных слоев арсенида галлия с управляемым распределением примесей по толщине и на их основе предложена технология изготовления фоточувствительной многослойной структуры с заданным градиентом примесей в базовой области, обеспечивающим оптимизацию их ключевых параметров и функционирование в энергосберегающем режиме;

разработаны усовершенствованные технологии изготовления многослойных индий и алюминий содержащих гетероструктур обеспечивающие увеличение их фоточувствительности за счет снижения оптических потерь;

разработаны технические решения, раскрывающие функциональные возможности полевого транзистора на основе арсенида галлия и контрольного образца на основе кремния в электронных схемах, предназначенных для усиления постоянного и переменного сигналов.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением современных научных и технологических методов, стандартных и апробированных в заводских условиях методик контроля

параметров и характеристик полупроводниковых приборов. Результаты и выводы обосновываются на физических представлениях, основанных на теоретических и экспериментальных данных. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием комплексных независимых методик измерения и обработки данных, а также их соответствием современным понятиям физики и техники полупроводников и изделий на их основе.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Полученные результаты раскрывают физику действия многослойных фоточувствительных структур с градиентной базой.

Практические результаты являются важными для выявления оптимальных условий и режимов эксплуатации различных электронных схем с полевыми транзисторами, используемых в телекоммуникации и в системах приема и передачи оптических сигналов.

Внедрение результатов исследования. Получены, предназначенные для предотвращения выхода из строя и увеличения срока службы радиоэлектронной аппаратуры, 4 патента на изобретения Республики Узбекистан: «Модулятор оптических сигналов», (IAP №04854 от 21.02.2014); «Дистанционно-управляемый оптоэлектронный ключ», (IAP № 04600 от 25.04.2012); «Способ эпитаксиального наращивания полупроводниковых материалов путем смещения растворов-расплавов», (IAP №04053 от 09.10.2009); «Фоточувствительный полевой транзистор», (IAP № 04832 от 21.11.2008г.);

разработано устройство «Генератор малых токов», позволяющее установить причины отказа и технологических отклонений от установленного регламента полупроводниковых приборов, и внедрено в АО «FOTON». Экономический эффект от внедрения за счет повышения процента выхода годных полупроводниковых приборов на 10% составляет 20 млн. сумм в год (Акт внедрения от 10.04.2014г. Ассоциации «Узэлтехсаноат»).

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на республиканских и международных конференциях: 14-International Young Scientists Conferece SPO 2013, Kyiv, Problems of Optics and High Technology Material Science. (Kyiv, 2013); “Яримўтказгичлар физикаси ва қурилмалари ҳамда уларни ўқитишнинг муаммолари” (Наманган 2013); “Актуальные проблемы физики” (Баку, 2008); “Неравновесные процессы в полупроводниках” (Ташкент, 2007); “Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики” (Ташкент, 2007); V-International Young Scientists Conferece SPO 2006, Kyiv, Problems of Optics and High Technology Material Science. (Kyiv, 2006); “Фундаментальные и прикладные вопросы физики” (Ташкент, 2006); “Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе”, МЭПП (Баку-Сумгаит, 2005); RIO 5 “World Climate & Energy Event” (Braziliya, 2005); Scanning probe microscopy - 2003 International Workshop, Nizhny Novgorod (Russia, 2003).

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены (3 июнь 2015г.) на расширенном семинаре по направлению физики

полупроводников при Физико-техническом институте АН РУз, а также в одноразовом Научном семинаре (25.11.2015г.) при Научном совете 16.07.2013.FM/Т.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 исследований. По материалам диссертации опубликовано 43 научных работ, из них 23 статей, в том числе 8 на английском языке, 1 книга (монография), 15 трудов конференций и 4 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающей 127 наименований и 2-х приложений. Текст диссертации изложен на 200 страницах машинописного текста, включая 89 рисунков и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе анализируется **«Состояние проблемы и тенденции улучшения технологии изготовления полупроводниковых структур с неоднородной базовой областью»** на основе литературных данных по состоянию проблемы и тенденциям улучшения функциональных характеристик многослойных полупроводниковых структур в зависимости от структурных и морфологических неоднородностей и рассмотрено влияние конструктивных особенностей полевых транзисторов на их функциональные свойства, а также определены схемотехнические пути улучшения электрических параметров и характеристик полевых транзисторов. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулирована постановка задачи.

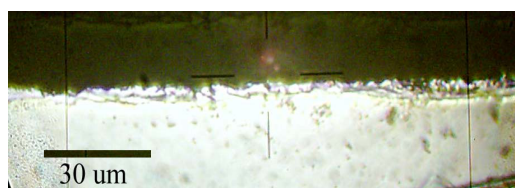
Во второй главе **«Разработка технологии получения многослойных структур с микрорельефной поверхностью»** приведены технологические этапы создания многослойных структур с текстурированной поверхностью методами диффузии и жидкостной эпитаксии, их спектральные характеристики, усилительные и фотоэлектрические свойства гетероструктуры, особенности дистанционно - управляемого

оптоэлектронного ключа на его основе.

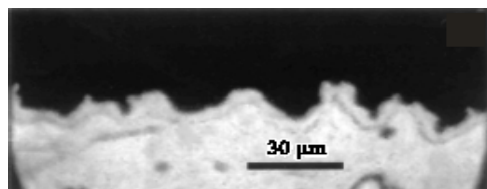
Разработана технология получения многослойных структур с микрорельефной поверхностью комбинированным способом, обеспечивающим поэтапную диффузию примесей цинка на текстурированную поверхность буферного слоя арсенида галлия и последующий рост эпитаксиального гетерослоя ($AlGaAs$) поверх него из ограниченного раствора-расплава в едином процессе. Текстурование поверхности буферного слоя осуществлялось анизотропным травлением. Диффузия примесей цинка проводилась из порошка цинка (146 мг в графитовой камере объемом 5.3 см^3) в арсенид галлия с микрорельефной поверхностью при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 50 минут. Рост гетерослоя производили в интервале температур от $813 \text{ }^\circ\text{C}$ до $809 \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью охлаждения 1 град/минут . При этом были выбраны подложки $nGaAs$ с концентрацией 10^{18} см^{-3} и с размерами (1 см^2) соответствующими ячейкам графитовой кассеты. Кроме того процесс диффузии можно провести из твердотельного источника (напыленного порошка цинка на $GaAs:Zn$) контактируемого с поверхностью подложки, что позволяет получить микрорельефную границу раздела двух сред. Микрофотографии сколов полученных структур приведены на рис. 1.



а) с плоским $p-n$ -переходом



б) микрорельефная граница $p-n$ -перехода типа дендрита



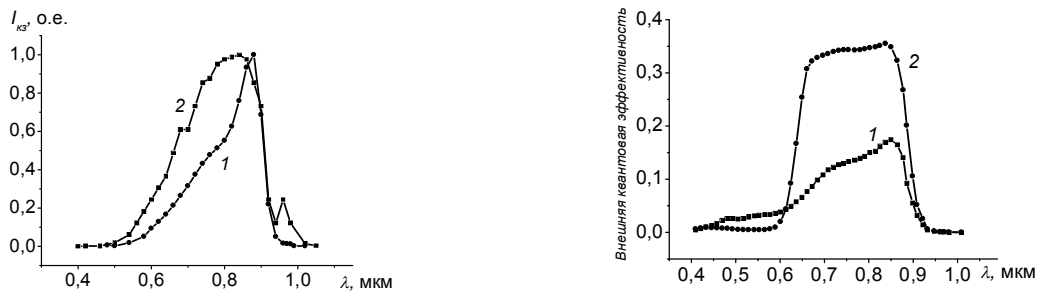
в) микрорельефная граница $p-n$ -перехода полученного контактной диффузией

Рис. 1. Микрофотография сколов переходов структур с буферным слоем $pGaAs$ и гетерослоем $pAl_{0.4}Ga_{0.6}As$

Экспериментально показано, что в полученной многослойной фотовольтаической $p^+ Al_{0.4}Ga_{0.6}As - pGaAs : Zn - nGaAs - n^+ GaAs$ - структуре с микрорельефной поверхностью область спектральной чувствительности расширяется в коротковолновую часть, а квантовый выход становится в два раза больше по сравнению со структурами с плоской поверхностью (рис.2.), что делает перспективным целенаправленное использование такой структуры в качестве фотовольтаического приемника. Обнаруженный эффект связан с увеличением фоточувствительной площади на границе $p-n$ -перехода при формировании микрорельефов.

Разработана технология выращивания микротекстурированной поверхности методом жидкостной эпитаксии на основе индий и алюминийсодержащих эпитаксиальных слоев арсенида галлия на подложках

арсенида галлия, которая позволяет увеличить угол захвата поглощаемого светового излучения поверхностью в сравнении с плоской структурой. Такие поверхности отличаются ровной границей *p-n*-перехода, а технологическое текстурирование такой поверхности определяется составом гетерослоя.



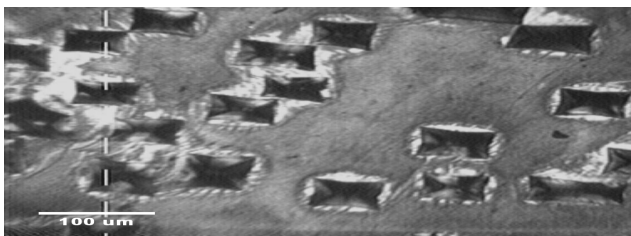
а) спектральная характеристика б) квантовый выход фоточувствительности

Рис. 2. Фотоэлектрические характеристики структуры с плоским (1) и микрорельефным (2) *p-n*-переходом

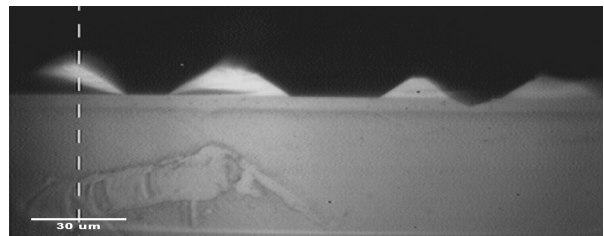
Текстурированные алюминий и индийсодержащие слои выращивали в интервале температур от 822 °С до 818 °С со скоростью охлаждения 1 град/минут.

Гетерослой $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As:Ge$ выращивали из раствора-расплава содержащего 7.5 моль.% нелегированного арсенида галлия, 0.3 моль.% алюминия и 3.1 моль.% германия растворенных в галлии в интервале температур от 822 °С до 818 °С со скоростью охлаждения 1 град/минут.

Выявлено, что при выращивании гетерослоя $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As:Ge$ из раствора-расплава содержащего 7.5 моль.% нелегированного арсенида галлия, 0.3 моль.% алюминия и 3.1 моль.% германия на индийсодержащем $pGa_{0.94}In_{0.06}As$ - гетерослое формируется текстура в виде выпуклых пирамид (с размерами основания $40 \div 60$ мкм и высотой $8 \div 10$ мкм), рис. 3. *p-n*-переход фотовольтаической структуры имея ровную границу, его поверхность отличается технологической текстурой и позволяет увелить угол обхвата света до 90 угловых градусов против 50 градусов в плоских структурах.



а) вид поверхности



б) граница раздела *p-n*-перехода

Рис. 3. Микрофотографии структуры с выращенным микрорельефом

Выращен гетерослой $nGa_{(1-x)>0.8}In_{\leq 0.2}As$ ($N_n = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) с толщиной $2 \div 4$ мкм с гофрированной поверхностью (за счет различия параметров решеток 1.4 %) на подложке $nGaAs:O$ с принудительным охлаждением раствора-расплава содержащего 4.9 моль.% арсенида галлия и 0.7 моль.% индия

растворенных в галлии в интервале температур от 838 °С до 822 °С со скоростью охлаждения 1 град/минут. На обе поверхности этой гетероизотипной структуры напылением серебра нанесены выпрямляющие контакты позволяющие, усилить входной оптический сигнал, поступающий от светодиода. На этой основе разработан управляемый оптоэлектронный ключ, обеспечивающий не только дистанционное включение, но и выключение объекта с помощью одного светового зонда, рис. 4.

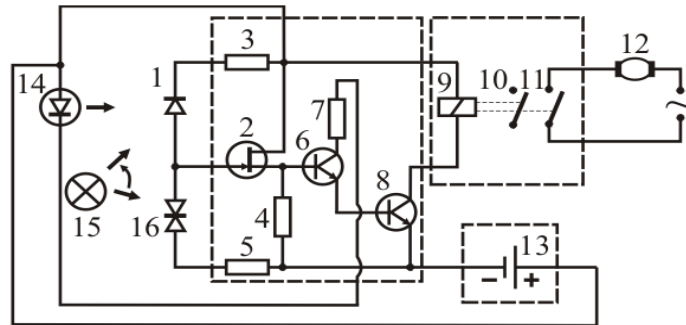


Рис. 4. Электронная схема дистанционно - управляемого оптоэлектронного ключа

Особенность разработки состоит в том, что в отличие от известного аналога в предложенном устройстве реализуется функция ключа за счет созданной стоковой оптоэлектронной связи между излучателем и фотоприемником. Дистанционное управление при этом осуществляется за счет переключения полевого транзистора в режиме запирания с помощью гетероизотипного фотодиода возбуждаемого световым зондом. Переключение в этой системе производится поочередным наведением светового зонда на оба фотоприемника, что приводит к дистанционному включению-выключению электрических приборов и оборудования.

В третьей главе «Разработка технологии изготовления многослойных структур с неоднородной базовой областью» рассматриваются способы формирования градиента примесей по толщине базовой области арсенидгаллиевых полевых транзисторов методом жидкостной эпитаксии из ограниченного объема раствора-расплава и их влияние на статические, динамические характеристики и фотоусилительные свойства полевого транзистора, а также излагаются принципы реализации нового способа эпитаксиального наращивания слоев, путем концентрационного смешивания растворов-расплавов позволяющего расширить диапазон градиента примесей по толщине активной области многослойной структуры.

Исследуемые арсенидгаллиевые многослойные фоточувствительные структуры получены на подложках *p*-типа *GaAs* с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, размещаемых в три ячейки в устройстве жидкостной эпитаксии, где последовательно выращиваются слои *pGaAs* и *nGaAs*-типа проводимости с различными легирующими примесями *Te*, *Te+Si* и *Sn* в едином процессе.

Все эпитаксиальные слои выращивали из растворов-расплавов с весовыми частями содержащих 7 моль.% арсенид галлия легированных соответствующими примесями растворенных в галлии. Слои *p*-типа толщиной 0.5 мкм выращивали в интервале температур от 848 °С до 845 °С

при постоянной скорости охлаждения 1 град/мин, а слои *n*-типа проводимости толщиной 1 мкм выращивали при охлаждении с уменьшающейся скоростью от 3 град/мин до 0.5 град/мин. В соответствии с выбранной легирующей примесью и скоростью роста эпитаксиального слоя из жидкой фазы будет формироваться соответствующий профиль распределения примесей по его толщине. На основе этих многослойных структур изготовлены полевые транзисторы с особой конструкцией, где затвор является сплошным, а канал *n*-типа проводимости горизонтальным и открытым, что позволяла изменять толщину канала и задавать его гарантированную отсечку и фоточувствительность, (рис. 5). Длина канала порядка 50 мкм (отношение длины канала к толщине больше 10), что открывает возможность для контролируемой химической и морфологической обработки его поверхности.

На основе экспериментальных данных зависимости емкости от напряжения *p-n*-перехода затвора, связанных с характерным изменением толщины объемного заряда определены концентрационные профили по толщине базовой (запираемой) области. Сопоставление этих кривых показало, что в структуре легированной *Te* (образец ПТ-ПГ) концентрация носителей тока увеличивается с градиентом примесей $2.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}$ (рис. 6, кривая 1), а в структуре где канал легирован *Te+Si* (образец ПТ-РР) концентрация носителей заряда является равномерной (рис. 6, кривая 2). Отметим, что в структуре с каналом легированным оловом (образец ПТ-ОГ) концентрация носителей уменьшается с градиентом примесей $2.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}$ (рис. 6, кривая 3).

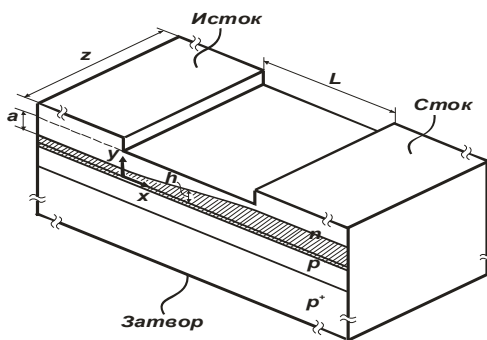
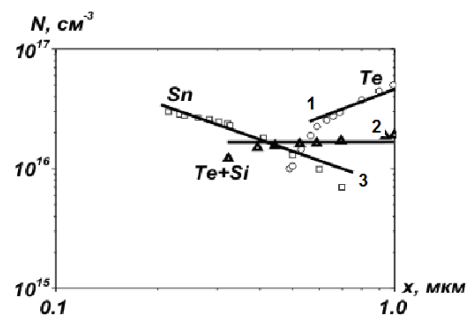


Рис. 5. Полевой транзистор с открытым каналом



1-ПТ-ПГ; 2- ПТ-РР; 3- ПТ-ОГ

Рис. 6. Профиль распределения примесей в эпитаксиальных слоях GaAs

Экспериментально показано, что профиль распределения примесей в канале существенно влияет на входные и выходные характеристики исследуемых полевых транзисторов. Из табл. 1 видно, что крутизна передаточной характеристики с увеличением запирающего напряжения в арсенид галлиевых полевых транзисторах, канал которых легирован теллуrom, а также кремний+теллуrom по сравнению с кремниевым полевым транзистором имеет на порядок меньшие значения, а в полевом транзисторе канал, которого легирован оловом уменьшение составляет всего лишь в три раза.

В качестве контрольного образца были выбраны кремниевые полевые транзисторы КП303, КП302). По мере перехода распределения примесей в

Таблица 1

Данные крутизны передаточной характеристики исследуемых образцов в зависимости от запирающего напряжения

ПТ-ПГ $p^+GaAspGaAs-nGaAs:Te$ $R_{дин} = 100$ кОм, $R_{вых} = 31.9$ кОм									
$U_{зи}$, В	0	0.5	1.0	1.5	2	2.5	3.0	3.5	
$I_{си}$, мкА	422.3	307	202.5	138.1	84.55	38	13.9	2.25	
S , мкА/В	230	209	128.8	107	93.1	48.2	23.3		
$k = S \cdot R_{вых}$	7.3	6.66	4.1	3.4	2.96	1.53	0.74		
ПТ-РР $p^+GaAspGaAs-nGaAs:Te+Si$, $R_{дин} = 130$ кОм, $R_{вых} = 34.5$ кОм									
$U_{зи}$, В	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
$I_{си}$, мкА	661	415	272	188	126	87.1	48.5	23.2	0.88
S , мкА/В	491.6	286	167	125.2	77.6	77.2	50.6	44.6	
$k = S \cdot R_{вых}$	16.9	9.8	5.76	4.3	2.67	2.66	1.74	1.5	
ПТ-ОГ $p^+GaAspGaAs-nGaAs:Sn$ $R_{дин} = 200$ кОм, $R_{вых} = 38$ кОм									
$U_{зи}$, В	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
$I_{си}$, мкА	150	115	91	70.5	49.5	35.9	22.3	12.3	1.63
S , мкА/В	175	120	102.5	105	68	68	50	53.3	
$k = S \cdot R_{вых}$	6.65	4.56	3.89	3.99	2.58	2.58	1.9	2	
КП303 Контрольный кремниевый полевой транзистор $R_{дин} = 96$ кОм, $R_{вых} = 31.5$ кОм									
$U_{зи}$, В		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5		
$I_{си}$, мкА		430	283	153	66	19	6		
$S = \Delta I_{си} / \Delta U_{зи}$, мкА/В		294	260	174	94	26			
$k = S \cdot R_{вых}$		9.2	8.19	5.48	2.9	0.81			

канале от положительного градиента к отрицательному, темновые токи уменьшаются на два порядка, а выходные динамические сопротивления увеличиваются от 96 кОм до 200 кОм. Это свидетельствует о том, что в полевом транзисторе канал, которого легирован оловом, осуществляется линейаризация передаточной характеристики и создается возможность работы в энергосберегающем режиме, как показано на рис. 7. Существенная линейаризация крутизны передаточной характеристики полевого транзистора с отрицательным градиентом (рис. 7, кривая 3) по сравнению с полевым транзистором с равномерным распределением примесей (рис. 7, кривая 2) в режиме близком к отсечке канала невозможно объяснить существующими теориями (работы Бокумэйла и Ричера), которые предсказывают независимость передаточной характеристики от профиля распределения примесей в канале. Заметим, что в этих теориях подвижность носителей заряда принята постоянной по всему объему канала. Вопреки теории в реальном полевом транзисторе легированным оловом при послойном травлении канала обнаружено координатное изменение подвижности носителей заряда, которые можно объяснить увеличением плотности дефектов по мере приближения к границе пленка-подложка. Измерения подвижности носителей в эпитаксиальных слоях осуществляли при малых

напряжениях, по методике измерения в тонких пленках. Действительные выражения для распределения подвижности носителей по толщине найдены с учетом определения среднего значения функции в заданном интервале:

$$\mu(x) = \bar{\mu}(x) + x \cdot \frac{d}{dx}(\bar{\mu}(x)), \text{ данные, которых приведены на рис. 8.}$$

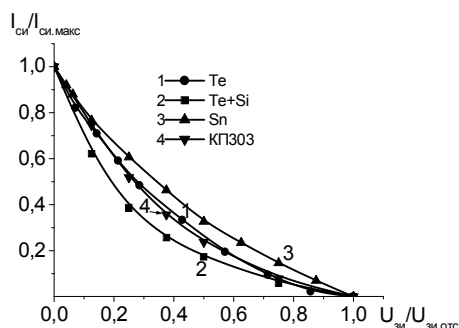


Рис. 7.

Стокзатворные передаточные характеристики транзисторов

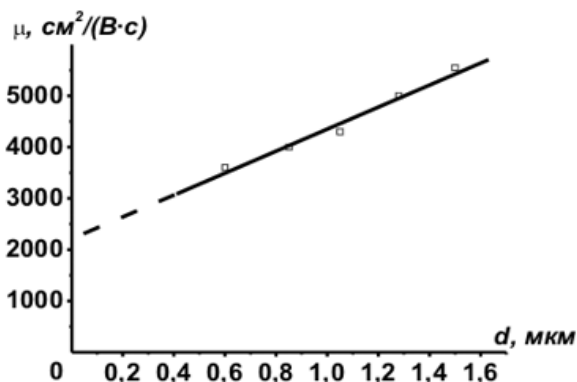


Рис. 8.

Зависимость холловской подвижности носителей заряда от толщины эпитаксиального слоя

Именно, наблюдаемая координатная зависимость подвижности носителей в канале открывает возможность для работы исследуемого полевого транзистора (ПТ-ОГ) в энергосберегающем режиме, то есть в режиме близком к отсечке канала, исключая искажения и потери полезного сигнала. Из сопоставления усилительных свойств исследуемых полевых транзисторов выявлено, что полевой транзистор с отрицательным градиентом примесей в канале имеет коэффициент усиления (18) в два раза больший по сравнению с полевым транзистором с положительным градиентом примесей (9) или в 3.5 раза больше по сравнению с кремниевым полевым транзистором, как показано в таблицы 2.

Таблица 2

Данные коэффициента усиления от напряжения сток-исток*

Полевой транзистор на GaAs канал легирован теллуром									
$U_{си}, \text{ В}$	2.0	2.31	2.69	2.8	2.89	3.1	3.5	3.8	
$U_{вых}, \text{ мВ}$	50	64.6	84.7	91.5	83.8	74.6	43.6	24.8	
$K_U = U_{вых} / U_{вход}$	5.0	6.46	8.47	9.15	8.38	7.46	4.36	2.48	
Полевой транзистор на GaAs канал легирован оловом									
$U_{си}, \text{ В}$	0.5	1.0	1.5	1.75	1.89	2.0	2.1	2.2	2.3
$U_{вых}, \text{ мВ}$	11.7	25.4	55.5	105.8	180	180	180	180	111
$K_U = U_{вых} / U_{вход}$	1.17	2.54	5.55	10.5	18	18	18	18	11.1
КП303 контрольный кремниевый полевой транзистор									
$U_{си}, \text{ В}$	0.45	0.7	1.0		1.6	2.3		2.9	
$U_{вых}, \text{ мВ}$	40	75	75		60	50		40	
$K_U = U_{вых} / U_{вход}$	4	7.5	7.5		6	5		4	
* $U_{вход} = 10 \text{ мВ}, f = 1 \text{ кГц}$									

Таким образом, сопоставительный анализ влияния линейного градиента примесей в канале на статические, динамические характеристики и фотоусилительные свойства полевого транзистора показал, что положительный градиент примесей придает нарастающий характер зависимости тока стока от напряжения. Их передаточные характеристики линеаризуются по сравнению с полевыми транзисторами с положительным градиентом примесей, обеспечивая незначительное трехкратное снижение коэффициента усиления по мере запираания транзистора. Влияние степенного и нелинейного распределения примесей по толщине канала на функциональные свойства полевого транзистора требует подробного изучения.

На основе исследования процессов роста многослойных структур было установлено, что каждая легирующая примесь дает характерное близкое к линейному распределение примесей по толщине эпитаксиального слоя, градиент которого задается температурной зависимостью коэффициента распределения конкретной примеси и является неуправляемым. Такое поведение примесей обусловлено неизменностью условий создания концентрации примесей на фронте кристаллизации. Поэтому для получения степенного и нелинейного распределения примесей по толщине канала необходимо создать новые технологические условия позволяющие изменить концентрацию примесей на фронте кристаллизации, что может быть достигнуто за счет добавления в основной раствор-расплав дополнительного раствора-расплава, с отличающейся концентрацией примеси.

Для реализации поставленной задачи было разработано специальное устройство жидкостной эпитаксии (рис. 9), обеспечивающее эпитаксиальное наращивание многослойных полупроводниковых p^+pn -структур путем смешивания растворов-расплавов, с заданным градиентом концентрации примесей по толщине выращиваемого слоя. При этом было установлено, что разница между концентрациями примесей основного и дополнительного раствора-расплава должна быть не менее двух порядков. Масса m дискретной части дополнительного раствора-расплава вводимого в основной раствор-расплав

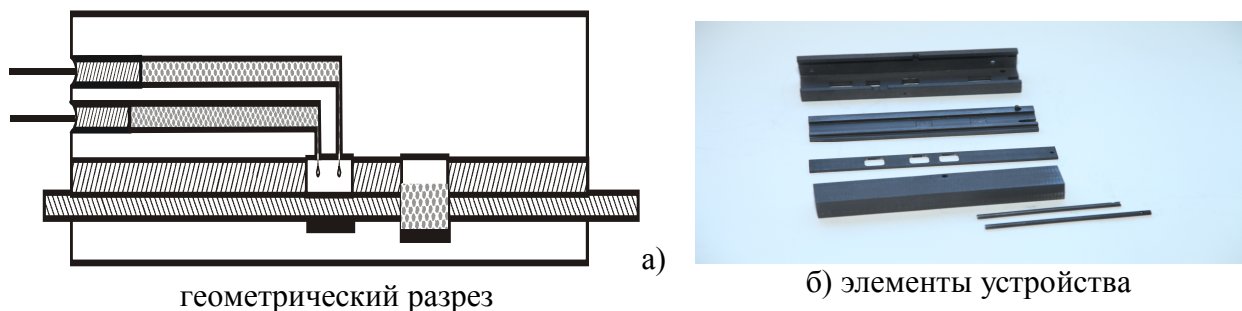


Рис. 9. Двухпоршневое графитовое устройство

должна удовлетворять соотношению, $m = km_0 l^n$ подаваемой со скоростью $\xi = m_0 \gamma \cdot t^n$ определяющей профиль распределения примесей.

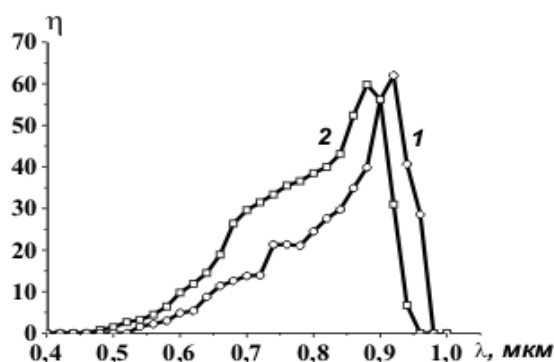
В графитовом устройстве сначала выращивался эпитаксиальный слой p -типа с концентрацией носителей 10^{17} см^{-3} из раствора-расплава содержащего 7 моль% арсенида галлия растворенного в галлии приведенного путем горизонтальной подачи при температуре 845°C в контакт с подложкой площадью 1 см^2 p^+ -типа с концентрацией $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Затем на поверхность эпитаксиального слоя p -типа горизонтально подавался основной раствор-расплавы n -типа содержащий арсенид галлия в галлии в том же соотношении с концентрацией носителей $7.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Рост осуществляется при вертикальной подаче дополнительного раствора-расплава n -типа также содержащего 7 моль% арсенида галлия растворенного в галлии с концентрацией 10^{15} см^{-3} к основному раствору-расплаву при температуре 830°C принудительным охлаждением и с уменьшающейся скоростью. При росте на поверхности эпитаксиального слоя p -типа из смешиваемых растворов-расплавов выращивается градиентный слой n -типа с убывающей концентрацией носителей $(3 \rightarrow 1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, которые определены из вольтемкостных характеристик. Отличие предлагаемого способа от известных состоит в том, что смешивание дополнительного раствора-расплава не приводит к пересыщению основного раствора-расплава, а пересыщение достигается за счет принудительного охлаждения. Профиль распределения примесей управляется скоростью подачи дополнительного раствора-расплава ($\xi = f(t)$). Установлено, что полученный на основе этой технологии фоточувствительный полевой транзистор с отрицательным градиентом примесей в канале благодаря линеаризованной передаточной характеристики сохраняет высокую фоточувствительность не только при нулевом смещении, но и с приближением режима отсечки канала ($U_{зи} = 0.8 \text{ В}$) при рабочем напряжении ($1.3 \div 2.2 \text{ В}$). При оптимальном рабочем напряжении 1.8 В и интегральной освещенности 100 лк создается фототок стока равный 4.5 мкА с фоточувствительностью 1.28 А/лм или $8.26 \cdot 10^2 \text{ А/Вт}$, что в два раза больше по сравнению, чем в полевом транзисторе с положительным градиентом примеси, канал которого легирован теллуром, а коэффициент фотоэлектрического усиления по току больше в пять раз (60).

В четвертой главе приведены **«Новые режимы включения полевых транзисторов, обеспечивающие малое потребление энергии»**, где анализируются функциональные возможности фоточувствительного полевого транзистора с управляющим p^+p-n -переходом в зависимости от режимов включения и процессы насыщения тока стока служащие основой для схемотехнической линеаризации передаточной характеристики на кремниевых полевых транзисторах открывающих возможность создания микросхемы используемой в микро и оптоэлектронике.

Проведен сопоставительный анализ для выявления оптимальных режимов получения максимальной фоточувствительности полевого фототранзистора. Выяснено, что вольтамперная характеристика полевого транзистора в зависимости от интенсивности света в плавающем режиме с уменьшением интенсивности освещения создает семейство кривых за счет

запираания канала. А в режиме с общим истоком толщина канала приобретает неизменное от напряжения стока значение, поскольку создаваемое светом изменение компенсируется напряжением затвора.

Установлено, что в режиме автоматического смещения наблюдается наибольшее усиление, обусловленное особенностями модуляции толщины канала в данном режиме. Сравнение квантовых эффективностей полевого фототранзистора в плавающем и транзисторном (в схеме с общим истоком) режимах показывает (рис. 10), что одинаковые значения квантовой эффективности (60÷65) можно получить при меньших напряжениях в режиме плавающего затвора (при 2 В против 2.23 В). Обнаружена инверсия знака фототока в полевом транзисторе при режиме оптотранзисторного включения, когда амперметр включен между стоком и истоком, а рабочее напряжение включено к стоку и затвору. В этом режиме увеличение фототока с напряжением обусловлено смещением в прямом направлении перехода затвор-исток



1- с плавающим затвором;
2- со смещенным затвором

Рис. 10. Спектральная характеристика полевого фототранзистора

относительно первоначального состояния, в то время как переход сток-затвор постепенно запирается. В результате как площадь фотоприемной поверхности, так и объем где генерируются фотоносители, увеличивается с ростом рабочего напряжения. В тоже время выявлено, что в связи с компенсацией темнового тока фототоком шумовые составляющие практически исключаются. Особенностью полевого фототранзистора в режиме запираания канала напряжением сток-затвор является перераспределение фотоприемной поверхности между двумя барьерами с увеличением рабочего напряжения. Выявлено, что в полевых транзисторах с нарастающим током стока можно получить ярко выраженное насыщение тока стока схемотехнически в режиме автоматического смещения и в четыре раза больший коэффициент фотоэлектрического усиления (250) по сравнению (60) с режимом включения с общим истоком.

Анализ причины насыщения тока стока исследуемого полевого транзистора при использовании режима включения автоматического смещения, показал насыщающийся характер падающего напряжения на смещающем резисторе. Такое изменение падающего напряжения приводит к последовательному запираанию перехода исток-затвор и сужению канала по всей ширине затвора за счет образования ионизованных зарядов, что и

приводит к ярко выраженному насыщению тока стока. Подбирая значения смещающего сопротивления можно сформировать семейство стоковых характеристик с более ярко выраженными токами стока.

Следует отметить, что чем больше будет величина сопротивления, тем меньше будет ток стока. В режиме автоматического смещения подсветка канала приводит к синхронному уменьшению смещающего напряжения и увеличению тока стока.

На основе результатов исследования процесса насыщения тока стока арсенидгаллиевого полевого транзистора предложено новое техническое решение, позволяющее повысить срок службы полупроводниковых светоизлучающих приборов на основе контрольного кремниевого полевого транзистора КП302 с большим током стока (3÷30 мА).

С целью предотвращения нестабильности рабочего тока и искажений полезного сигнала в разработанном модуляторе в качестве источника стабилизатора тока и ключа предложено использовать один полевой транзистор вместо двух биполярных транзисторов используемых в известном модуляторе, рис.11.

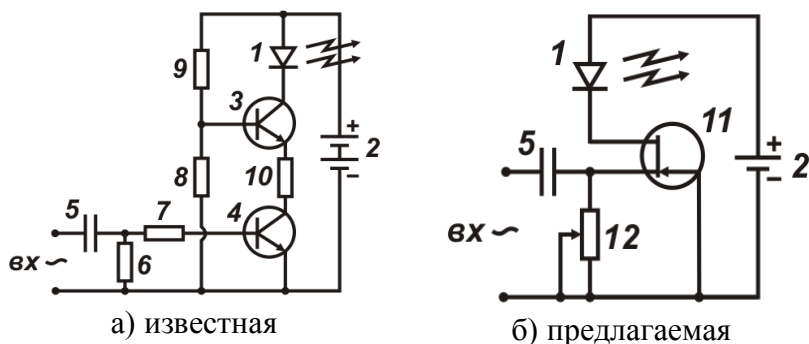


Рис.11. Схема модулятора оптических сигналов

В предлагаемом модуляторе рабочий ток остается неизменным при снижении рабочего напряжения от 10 до 3 В. Подача полезного сигнала от источника звукового сигнала к выводу истока, обеспечивает глубокую модуляцию канала с коэффициентом усиления большим, чем в схеме с общим истоком.

Замена обычного резистора на сопротивление канала полевого транзистора в схеме с автоматическим смещением составляет сущность предложенного нового подхода (рис.12). При этом осуществляется более глубокая модуляция толщины базовой области по сравнению с режимом включения с общим истоком, что позволяет повысить значение коэффициента усиления полевого транзистора. Здесь следует отметить, что с одной стороны схема включения двух полевых транзисторов, так называемая «ячейка» является комбинированной, то есть включает полевой транзистор с общим затвором и полевой транзистор с общим истоком. С другой стороны наличие в ней общего вывода 2 открывает возможность для увеличения комбинаций его режимов включения. Выводы 1 и 3 служат для подачи рабочего напряжения, а вывод 4 используется для подачи смещающего

напряжения задающего рабочие режимы этой ячейки, а также для подачи полезного сигнала.

При использовании данной схемы включения благодаря ярко выраженному насыщению тока стока (рис. 12) и линеаризации передаточной характеристики (рис. 13) от малого (~2 мВ) переменного сигнала синусоидальной формы подаваемого от звукового генератора получен коэффициент усиления порядка 70 при запирающем напряжении равном половине напряжения отсечки, как приведено в табл. 3.

Таблица 3

Данные зависимости коэффициента усиления от величины запирающего напряжения*

$U_{зи}, В$	0.3	0.31	0.32	0.325	0.33	0.335	0.36	0.44	0.54	0.6
$U_{вх}, мВ$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$U_{вых}, мВ$	22	64	130	140	140	130	100	80	40	20
$K_{ус}$	11	37	65	70	70	65	50	40	20	10
* $f = 400 Гц$										

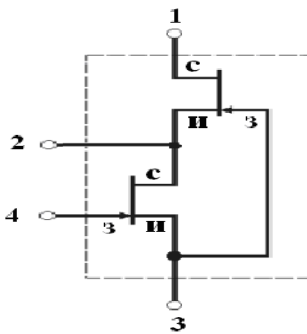


Рис.12.

Двухтранзисторная ячейка

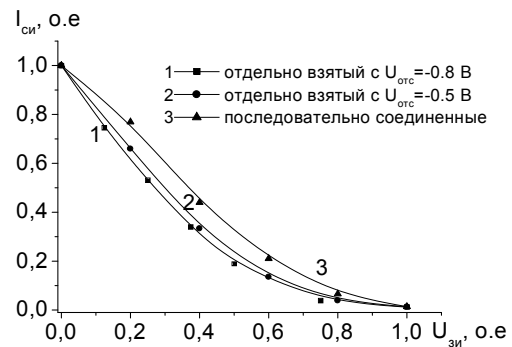


Рис. 13. Передаточные характеристики исследуемых полевых транзисторов

В ней вывод затвора разъединен от вывода истока и соединен к истоку основного транзистора, что позволяет увеличить коэффициент усиления. На основе предложенной «двухтранзисторной ячейки» при различных комбинациях его режимов включения показаны возможности разработки регулятора тока, измерителя температуры и усилителя оптического сигнала

Данная «двухтранзисторная ячейка» представляя собой, каскад с динамической нагрузкой, при соответствующей модернизации может быть использована также для преобразования входного сигнала малой и средней мощности без искажений и потерь. В ней от входного сигнала одновременно модулируются оба канала, улучшаются усилительные свойства и появляется возможность ее применения для создания устройств с различными функциональными назначениями. Предлагаемая микросхема, с динамической нагрузкой при данном включении по сравнению с известной имеет на два порядка больший коэффициент усиления до 100 за счет одновременной модуляции последовательно соединенных каналов. Универсальная микросхема с динамической нагрузкой на полевом

транзисторе (рис. 14) может быть изготовлена на основе кремния, твердых растворов $SiGe$, а также полупроводниковых соединений A^3B^5 и A^2B^6 .

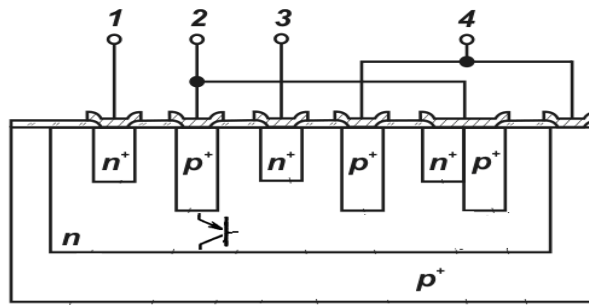


Рис. 14. Поперечный разрез предлагаемой универсальной микросхемы

Таким образом, предлагаемая микросхема на основе каскада с динамической нагрузкой на полевом транзисторе может быть освоена на базе отработанной производственной технологии полупроводниковых изделий и использоваться в качестве усилителя переменных сигналов и в других целях определяемых режимами включения.

В пятой главе проведены **«Расчетно-аналитические исследования технологии получения и токовых характеристик многослойных структур»**, процесса диффузии металла в полупроводник с неплоской поверхностью, а также процессов формирования профиля распределения примесей в арсенидгаллиевых многослойных структурах, выращиваемых из раствора-расплава с ограниченным и увеличивающимся объемом, в том числе рассмотрены результаты расчетно-аналитических исследований процессов токопереноса в многослойных структурах с различным градиентом примесей в диодном и транзисторном режимах включения.

Моделированием процесса диффузии металла (Zn) в полупроводник ($nGaAs$) с текстурированной поверхностью установлено, что меняя концентрацию диффундируемого металла и времени проведения диффузии можно создавать $p-n$ -переходы различной формы и площади. При ограниченном количестве металла и заданной температуре диффузии цинка $700\text{ }^{\circ}C$ при времени диффузии 30 минут граница $p-n$ -перехода повторяет текстуру поверхности полупроводника, как приведено на рис. 15а, а по мере повышения температуры ($900\text{ }^{\circ}C$) и длительности времени диффузии происходит постепенное выравнивание фронта диффузии рис. 15б. Это обусловлено увеличением коэффициента диффузии металла в полупровод-

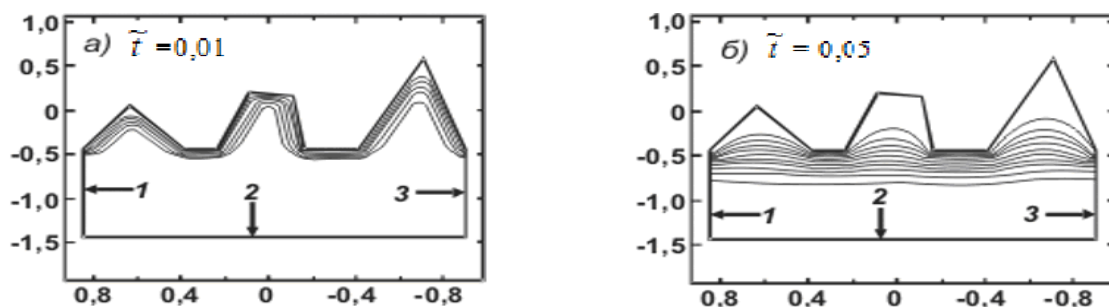


Рис. 15. Фронты диффузии Zn в $GaAs$

нике, которое подтверждается экспериментальными данными процесса диффузии атомов цинка в арсениде галлия.

Путем расчетно-технического моделирования диффузии цинка на текстурированную поверхность арсенида галлия показано, что подбирая количество диффузанта и длительность процесса можно управлять профилем микрорельефа. При анализе процесса диффузии при времени диффузии $t \approx 30$ минут профиль металла повторяет профиль структуры (рис. 15) и для различных условий диффузии согласуются с экспериментальными данными, как приведено в табл. 4.

Таблица 4

Расчетные данные для перехода от безразмерных к размерным величинам длины и времени при различных условиях диффузии

T, °C	D, см ² /сек	$[\tilde{x}]$, мкм	$[\tilde{t}]$, мин	$\tilde{t} = 0.01$, мин	$\tilde{t} = 0.05$, мин
700	$2,98 \cdot 10^{-13}$	10	$5,6 \cdot 10^4$	560	2800
750	$1,39 \cdot 10^{-12}$	10	$1,2 \cdot 10^4$	120	600
800	$5,64 \cdot 10^{-12}$	10	3000	30	150
850	$2,02 \cdot 10^{-11}$	10	800	8	40
900	$6,46 \cdot 10^{-11}$	10	250	2,5	12,5

При увеличении времени диффузии или температуры профиль распределения цинка выравнивается.

С целью управления концентрацией примесей на фронте кристаллизации предложено управлять объемом и количеством легирующих примесей за счет смешивания в основной раствор-расплав дополнительного раствора-расплава с задаваемой скоростью.

Установлено, что задавая закон изменения шага выдавливающего поршня, можно управлять скоростью подачи дополнительного раствора-расплава $\xi = f(m_0, t) = m_0 \gamma t^n$, где γ и n - коэффициенты, определяющие изменение скорости подачи дополнительного раствора-расплава и позволяющие тем самым управлять профилем распределения примеси, рис. 16.

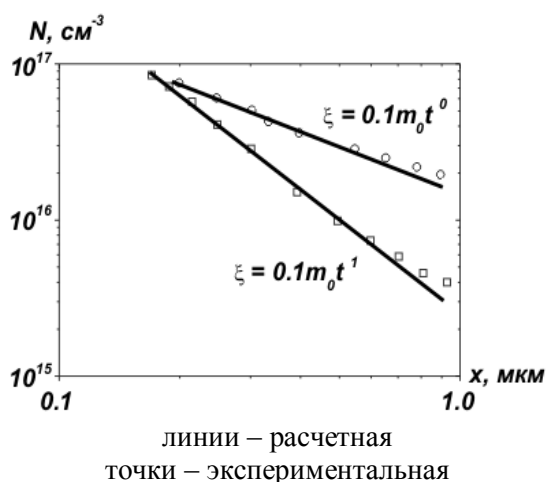


Рис. 16. Распределение примесей по толщине при использовании концентрационного смешивания

На основе расчетно-аналитического исследования передаточных характеристик установлено, что расчетные и экспериментальные кривые

Создаваемые в технологическом процессе профили распределения примесей существенным образом влияют на стокзатворные характеристики полевого транзистора.

По расчетным данным показано, что в случае равномерного распределения примесей и подвижности носителей по толщине канала токи стока при увеличении запирающего напряжения уменьшаются по квадратичному закону, приводя к снижению коэффициента усиления (рис.17,а).

согласуются лишь в предположении наличия градиента подвижности носителей по толщине канала (ПТ-ОГ) (рис. 17б), существование которого подтверждено результатами экспериментального исследования подвижности носителей в эпитаксиальных слоях. При этом наличие высокого отрицательного градиента подвижности носителей в канале полевого транзистора легированного оловом приводит к укорачиванию эффективной длины канала, и тем самым к увеличению значения параметра $\gamma = \frac{qa^2 \bar{\mu} \cdot \bar{N}}{2\epsilon\epsilon_0 v_{нас} L}$,

характеризующего степень зависимость подвижности носителей от напряженности электрического поля, до 10, приводя к линейризации передаточной характеристики транзисторов, рис. 17в. При малых значениях параметра γ модуляция канала определяется преимущественно профилем подвижности носителей, а при больших значениях она определяется профилем концентрации примеси.

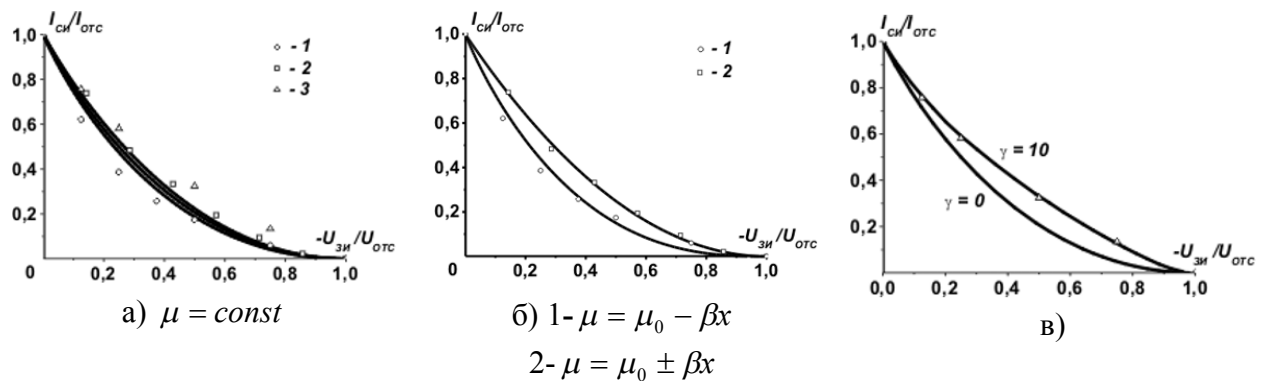


Рис. 17. Передаточные характеристики полевых транзисторов

В полевом транзисторе с отрицательным градиентом примесей в канале передаточные характеристики линейризуются как в полевых транзисторах с коротким каналом. Это указывает на то, что варьируя процессами роста эпитаксиального канала и управляя распределением примесей по толщине можно получить полевые транзисторы с длинным каналом со свойствами коротко-канального транзистора, которые можно использовать в экономичном режиме с малым потреблением энергии.

Проведены расчетно-аналитические исследования фотоэлектрических характеристик полевого транзистора в диодном режиме, которые показали возможность управления темновыми и световыми токами за счет формируемого градиента примесей в канале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан новый способ жидкостной эпитаксии, обеспечивающий формирование заданного профиля распределения примесей по толщине эпитаксиальных слоев выращиваемых путем смешивания в основной раствор-расплав, контактирующий с подложкой, дополнительного раствора-расплава дискретными частями с управляемой скоростью.

2. Проведено расчетно-аналитическое исследование профиля распределения примесей по толщине выращиваемых эпитаксиальных слоев из раствора-расплава с неизменным объемом и с увеличивающимся объемом, где скорость подачи дополнительного раствора-расплава в основной раствор-расплавы задает профиль распределения примесей.

3. Установлены оптимальные режимы диффузии цинка на текстурированную поверхность базовой области и последующего роста эпитаксиального гетерослоя в едином процессе. Путем компьютерного моделирования процесса диффузии металла в полупроводник с неплоской поверхностью показано, что, по мере увеличения времени диффузии, профиль границы *p-n*-перехода становится все более плоской, что согласуется с экспериментальными результатами.

4. Разработана технология получения изотипной двухбарьерной $nGa_{(1-x)>0.8}In_{\leq 0.2}As - nGaAs$ -гетероструктуры на основе индийсодержащего эпитаксиального слоя арсенида галлия с технологически текстурированной поверхностью в виде гофров при избытке индия, создающем различие параметров решеток в $\sim 1.4\%$ с подложкой арсенида галлия.

5. Разработана технология получения фотовольтаической $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As - pGa_{0.94}In_{0.06}As - nGaAs$ -структуры с технологически текстурированной поверхностью в виде выпуклых пирамид (с основанием $40\div 60$ мкм и высотой 8-10 мкм) при легирующей примеси германия в 3.1 моль.% во фронтальном гетерослое $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As$ выращенном на индийсодержащем гетерослое.

6. Разработан дистанционно-управляемый оптоэлектронный ключ, обеспечивающий включение-выключение электроприборов и технологических оборудований с помощью одного светового зонда, состоящий из усилителя с входным каскадом на полевом транзисторе, в котором между затвором и сопротивлением истока введен фотоприемник на основе двухбарьерной структуры с высоким входным сопротивлением.

7. Разработан модулятор оптических сигналов, содержащий полупроводниковый излучатель света, источник тока и ключа на одном полевом транзисторе вместо двух биполярных транзисторов, что позволяет сохранить стабилизированный ток и исключить искажения сигнала связанные с большой емкостью биполярного транзистора.

8. Разработан фоточувствительный полевой транзистор на арсениде галлия с отрицательным градиентом примесей в канале имеющий в два раза большую фоточувствительность (800 А/Вт) и в 6 раз больший коэффициент усиления по току (60) по сравнению с полевым транзистором с положительным градиентом примесей.

9. Проведено расчетно-аналитическое исследование стоковых вольтамперных характеристик полевого транзистора с длинным каналом с учетом градиента распределения примесей и подвижности по толщине канала, объясняющее проявление в нем свойств коротко-канального полевого транзистора и возможность его использования в экономичном режиме.

10. Предложена универсальная микросхема с четырьмя выводами на основе «двухтранзисторной ячейки» с синхронно модулируемыми каналами, обеспечивающими на порядок больший коэффициент усиления в режиме, близком к отсечке канала, в сравнении со схемой с динамической нагрузкой на полевом транзисторе.

11. Разработан генератор стабилизированных токов на основе «двухтранзисторной ячейки» с линеаризованной передаточной характеристикой, который предназначен для использования в режиме заданного прецизионно-регулируемого тока с малым шагом, обеспечивающим измерение вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов с резко возрастающим током типа стабилитрона, ограничителей напряжения или S – диодов.

**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
ASSOCIATION «PHYSICS-SUN», INSTITUTE OF ION-PLASMA AND
LASER TECHNOLOGIES AND SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

**SCIENTIFIC-PRODUCTION ASSOCIATION «PHYSICS-SUN»
PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE**

YODGOROVA DILBARA MUSTAFAEVNA

**DEVELOPMENT OF PHOTSENSITIVE MULTILAYER STRUCTURES
MANUFACTURING TECHNOLOGY ON THE BASIS OF GALLIUM
ARSINIDE**

01.04.10 – Physics of semiconductors (technical sciences)

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Tashkent – 2015 year

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/B2014.5T265.

Doctoral dissertation is carried out at the Physical - Technical Institute.

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

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

Official opponents: **Abdukadirov Mukhitdin Abdurashidovich**
doctor of sciences in technics, professor

Aliyev Rayimdjan
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 «__» _____ 2015 at _____ at the meeting 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 yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net.

Doctoral dissertation is registered in Information-resource center of Physical Technical Institute by № 04, it is possible to review it in IRC at the following address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-30-41.

Abstract of dissertation sent out on «__» _____ 2015 year.
(mailing report _____ on «__» _____ 2015 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

Introduction (Annotation of doctoral dissertation)

Topicality and demand of the subject of dissertation. In world one of the important physical and technological problems in the fastest dynamical growing areas of micro- and optoelectronics is the development of photosensitive gallium arsenide multilayer structures with enhanced functional characteristics. In this case investigation of the relationship of their operating parameters with electro-physical parameters of the active region will provide to obtain new technical solutions contributing to reveal previously unknown features of photosensitive multilayer structures. Performing research on the improvement of channel region of the field-effect transistor, on solving problems on reduction of energy consumption, on the development of field-effect transistors with p-n-junction, as well as the development of manufacturing technology of photosensitive structures are promising areas of research.

Application of multi-layer semiconductor devices, particularly photodiodes and transistors in automotive industry and telecommunications needs to enhance their operation frequencies, linearization of transfer characteristics, increasing the their gain and research inclusion modes. Thus the research conducting on influence of epitaxial layer parameters to the properties of field-effect transistors aimed at optimization of construction parameters of field-effect transistors are actual.

This research work aimed at development of the method of epitaxial growth of semiconductor materials by mixing solution-melts as well as obtaining gallium arsenide multilayer photosensitive structures with a controllable gradient of impurity and mobility distributions and photodiode structures with micro-relief border of interface. Improving of functional characteristics of these structures and obtaining photosensitive field-effect transistors in conjunction with the features of manufacturing technology and providing their operation in power saving mode are the demand of this dissertation.

This thesis is devoted to solving in a certain extent the problems on enhancing the competitiveness of electronic products, particularly, the problems noted in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan DP-1442 «On the priorities of industrial development of Uzbekistan in 2011 – 2015» of 15 December, 2010.

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 on field-effect transistors are held at leading universities and centers, in particular in University of Berkeley (USA) and Montpelie (France), as well as by company Mitsubishi Electric (Japan) to the development of manufacturing technology of field-effect transistors with *p-n*-junction and a

Schottky barrier, SPC “Polyus” (Russia) on the high-frequency field-effect transistors on gallium arsenide, and at the University of California (USA) research are held on manufacturing technology graphene field-effect transistors.

In world scale some actual problems are solved, particularly, in the field of devices with internal gain on the base of new semiconductor materials significant results are obtained: field-effect transistors controlled by the light were created based on superconductivity – (National University of Natural Sciences, Japan); a high-frequency field effect transistor structure with two-dimensional electron channel has been developed – (University of Montpelie, France); static induction field-effect transistor with vertical channel has been manufactured – (Sony, Japan); high temperature field-effect transistor has been obtained based on technology of growth of high quality epitaxial layers of aluminium-gallium nitride AlGaN/GaN over the Si (111) substrates – (Nitronex, US).

At this time advanced research are performing on solving the technical problems of manufacturing technology of photosensitive structures based on epitaxial layers with micro-relief surface and controllable gradient of impurities, and extension of their functional characteristics.

Degree of study of problem. Numerous connection combinations of field-effect transistor for various applications are considered by A.G. Milekhin. As well as, is noted that with the approach of locking mode of the channel instabilities of parameters and low gain, caused by the nonlinearity of the transfer characteristic, are inherent in it. Known technological methods for improving the parameters by shortening the channel length of the field-effect transistor used by Pucel R.A. lead on the one hand to improve the amplifying properties due to the linearization of the transfer characteristics associated with the profile of impurity distribution in the channel, and on the other hand increase the power dissipation with increasing of the operating current. This circumstance signifies that these field-effect transistors become economically unfavorable due to impossibility of their operation in mode close to pinch-off of the channel.

At the same time a famous scientist Noyce R.N. showed that the creation of a longitudinal gradient of impurities along the length of the channel with decreasing carrier density in the direction of the source allows to increase the efficiency of the channel resistance modulation by gate voltage, but by no means does not affect to transfer characteristic due to the uniform distribution of the impurities along the thickness of the channel. In this case gradient of impurities and mobility of charge carriers along the thickness of the channel are not considered.

By a specialist in the field of liquid epitaxy Russian scientists V.M. Andreev it is demonstrated that technologically unmanageable gradients of impurity distribution, inherent to the selected dopant, can be obtained in the epitaxial layers produced from solution-melt with forced cooling due to the temperature dependence of the distribution coefficient of the dopant. Possibility of purposeful modification of the constructions of liquid epitaxy devices are a prerequisite for the modernization of technological methods and techniques so that be able to provide different impurity distribution gradients and to identify their influence on the

properties of diode and transistor structures.

Until the present day in the development of liquid phase epitaxy technology a certain contribution have been made by group of academician Zh.I. Alferov, professor Y.P. Yakovlev, academician M.S. Saidov, doctors M.N. Tursunov, M.A. Abdukadirov and A.V. Karimov as well as others, each of which has developed various technological aspects in accordance with their targets and objectives. In particular, by the group of A.V. Karimov methods have been developed to obtain abrupt p-n-junction from the solution-melt which is cooled at a decreasing rate, as well as technology of obtaining variable-band epitaxial layers by mixing portion of solution-melts with different composition into the main solution-melt under isothermal conditions.

From above it follows that the manufacturing technologies of the desired gradient of impurities and mobility of charge carriers along the thickness of the channel are unprocessed. The methods of linearization of transfer characteristic require a new approach. Thus, remain unexplained the opportunities of enhancement of electrical characteristics of photodiode structure and functional properties of the multilayer transistor structure with an inhomogeneous distribution of impurities and mobility of charge carriers in the channel, as well as at non-traditional connection modes, which require a comprehensive study of the influence of irregularities on their characteristic parameters in conjunction with the technological conditions.

Connection of dissertational research with the plans of scientific-research works. Doctoral dissertation is carried out at the Physical-technical institute SPA «Physics-Sun» of AS RU under Research and Development State Programs: № A-6-049 «Development of manufacturing technology of semiconductor photoelectric converters with selective photosensitivity» (2006-2008); ФA17-Ф-100 «Development of photoreceiving device for weak optical signals based on photoelectric converter» (2009-2011) and A3-ΦA-0-10-440 «Development of thermal and electric pulse processing methods aimed at increase of yield at production of lacking groups of semiconductor devices (JSC «FOTON»))» (2012-2014).

Purpose of research is development of a multilayer photosensitive gallium arsenide structures on the basis of epitaxial layers with a predetermined impurity distribution profile and textured surface, improving their functional characteristics and research of new connection modes.

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

to develop a manufacturing technology of a multilayer gallium arsenide structures with a micro-relief surface by liquid phase epitaxy;

to simulate processes of impurity diffusion in a semiconductor with a micro-relief surface;

to develop a growth technology of epitaxial films with non-linear gradient (positive or negative gradient, power-law gradient) distribution of impurities along the thickness;

to simulate a non-isothermal growth process of epitaxial film from solution-melt with varying composition accompanied by increase of volume of solution-

melt;

to develop a field-effect transistor on the base of gallium arsenide with non-uniform (positive or negative gradient, power-law gradient) distribution profile of the impurities along the thickness;

to simulate electronic processes in field-effect transistors with non-uniform distribution profile of the impurities and mobility of charge carriers along the thickness of the channel;

to develop different connection modes (mode of automatic bias, mode of maximum conductivity, and drain-gate voltage-controlled mode) of field-effect transistor that enhance its functionality;

to develop a remotely-controlled optoelectronic switch with fast switching of an object using a single light emitter and the input stage on the basis of field-effect transistor;

to develop new connection modes based on comparative analyse of the obtained results for gallium arsenide field-effect transistor and reference silicon sample.

Objects of research are $p^+GaAs-pGaAs-nGaAs$ -junction field-effect transistors with different distribution profiles of impurities and mobility of charge carriers in the base, as well as gallium arsenide structures with isotype hetero and micro-relief boundary.

Subject of research is process of developing the epitaxial and diffusion technologies of manufacturing the multilayer gallium arsenide structures with structural and morphological irregularities.

Methods of research. In dissertation have been applied the complex information methods of experimental physics: measurement of current-voltage and capacitance-voltage characteristics; measuring the spectral photosensitivity at different bias and morphological studies of surfaces and interfaces, as well as methods of theoretical calculations and computer simulations of technological and electronic processes.

Scientific novelty of dissertational research consists in the following:

for the first time, a method is developed for non-isothermal growth process of epitaxial layer of A^3B^5 semiconductors with desired distribution profile of impurities by mixing the saturated solution-melts and is conducted its simulation;

a technology is developed for diffusion of impurity zinc to gallium arsenide with textured surface followed by growth of epitaxial hetero-layer, optimal modes are established consisting in zinc diffusion at 800°C for 80 minutes and growth of hetero-layer in temperature range from 813°C to 809°C with cooling rate 1 deg/min in a single process;

a technology is developed for manufacturing isotype double-barrier $nGa_{(1-x)>0.8}In_{\leq 0.2}As - nGaAs$ -heterostructure based on indium-containing epitaxial layers of gallium arsenide with technologically textured surface in the form of ripples at excess of indium, leading to the difference in the lattice parameters equal to 1.4% with gallium arsenide substrate and the photo-voltaic $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As - pGa_{0.94}In_{0.06}As - nGaAs$ -structure with technologically textured surface in the form

of pyramids (with a base 40-60 microns and a height of 8-10 microns) at impurity germanium with 3.1 mol.% in frontal hetero-layer $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As:Ge$ grown on indium-containing hetero-layer;

for the first time, a photosensitive field-effect transistor is developed based on gallium arsenide with negative (decreasing to the surface) gradient of impurity distribution in the channel having a gain twice as large as compared to the field-effect transistor with a positive gradient of impurities distribution and 3.5 times larger in comparison with the conventional devices;

connection modes of field-effect transistor are proposed providing its operation as a photoreceiver with maximum sensitivity, as a fast-response photoresistor and as a high power switch in electronic circuits;

a calculation of current transport process in field-effect transistors is conducted taking into account the gradient of the carrier mobility distribution and the influence of surface states which for the first time showed the possibility of linearizing the transfer characteristics of the field-effect transistors with a long channel;

a universal microchip with four electrodes is developed on the basis of double-transistor circuit with synchronically modulated channels providing an order of magnitude (70 compared to 7 in ordinary cases) higher gain in mode close to pinch-off the channel;

for the first time, a remotely-controlled optoelectronic switch is developed providing a switching on and switching off of the electronic devices and technological equipments consisting of an amplifier with the input stage on the basis of field-effect transistor wherein between the gate and resistor of source is included a photodetector based on double-barrier structure;

for the first time, a modulator of optical signals is developed allowing to increase the lifetime of the semiconductor light-emitting devices consisting of semiconductor light-emitting device, current source and a switch based on single field-effect transistor instead of two bipolar transistors wherein input signal is applied to the source;

a generator of stabilized currents are developed based on “double-transistor cell” with linearized transfer characteristics, which is intended for setting precision-regulated current with a small step, provides a measurement of the current-voltage characteristics of semiconductor devices with sharply increasing current stabilatron type, voltage suppressor and S – diodes.

Practical results of research consist in the following:

a method is developed for non-isothermal growth process of epitaxial layer of gallium arsenide with predetermined distribution profile of impurities along the thickness and on their base a technology is proposed for manufacturing the a photosensitive multilayer structure with desired gradient of impurities in base region aimed at optimization of their key parameters providing operation in power saving mode;

the modified manufacturing technologies are developed for multi-layer aluminium and indium-containing heterostructures providing increasing of the

photosensitivity of multi-layer structures by decreasing the optical losses;

technical solutions are developed disclosing the functional capabilities of field-effect transistors based on gallium arsenide and a reference sample based on silicon in electronic circuits designed to amplification of the DC and AC signals.

Reliability of obtained results is confirmed by the use of modern scientific and technological methods, standard and tested in the manufacturing factory techniques to control the parameters and characteristics of the semiconductor devices. Results and conclusions are justified on physical representations based on theoretical and experimental data. The reliability of the experimental data is provided by using complex independent measuring techniques and data processing, as well as their corresponding to modern concepts of physics and technology of semiconductors and devices based on them.

Theoretical and practical value of results of research. Obtained results expand the physics of multi-layer photosensitive structures with gradential base.

Practical results are important for identifying connection modes of various electronic circuits with field-effect transistors used in telecommunications and in systems of transmission and receiving of optical signals.

Realization of results of research. 4 patents of the Republic of Uzbekistan intended to prevent failure and increase the lifetime of electronic equipment have been obtained: “Modulator of optical signals”(IAP №04854 on 21.02.2014); “Remote optoelectronic switch” (IAP №04600 on 25.04.2012); “Method of epitaxial growth of semiconductor materials by mixing the solution-melts” (IAP №04053 on 09.10.2009); “Photosensitive field-effect transistor” (IAP №03832 on 21.11.2008);

a device “Generator of low currents” are developed which provides to establish the reasons for refusal and technological deviations from the established regulations of semiconductor devices and implemented at SJC “FOTON”. The economic effect of implementation due to increasing the percent of yield of semiconductor devices by 10% is 20 million Uzbek Sums per year (Implementation act of “Uzeltechsanoat” Association from 10.04.2014).

Approbation of work. Main results of the dissertation were presented and discussed at the republican and international conferences, including: «Young Scientists Conference on Optics and High Technology Materials Science», SPO-2013 (Kyiv, 2013); «Physics of Semiconductors and Devices, Problems of Teaching» (Namangan, 2013); «Actual Problems of Physics» (Baku, 2008); «Non-equilibrium Processes in Semiconductors» (Tashkent, 2007); «Fundamental and Applied Problems of Modern Physics» (Tashkent, 2007); «Young Scientists Conference on Optics and High Technology Materials Science», SPO-2006 (Kyiv, 2006); «Fundamental and Applied Problems of Modern Physics» (Tashkent, 2006); «Microelectronic Converters and Devices» (Baku-Sumgait, 2005); RIO 5 «World Climate & Energy» Event (Braziliya, 2005); «Scanning probe microscopy – 2003» International Workshop, Nizhny Novgorod (Russia, 2003).

Main results of the dissertation were presented and discussed at the enlarged seminar (3 June, 2015) on specialty «Physics of Semiconductors» at the Physical-Technical Institute SPA «Physics-Sun» AS RU, as well as at the one-off scientific

seminar (25 November, 2015) at Scientific council 16.07.2013.FM/T.12.01 at Physical Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies and Samarkand State University on award of the scientific degree of Doctor of Science in specialty 01.04.10 - Physics of Semiconductors (technical sciences).

Publication of results. According to the materials of the dissertation 43 scientific papers are published, including 23 articles, 8 of which in English, 1 monograph, 15 conference proceedings and 4 patents for inventions.

Structure and volume of dissertation. Dissertation consists of introduction, five chapters, conclusion and list of references, including 127 items of references and 2 appendixes. It is presented on 200 printed pages, containing 89 figures and 28 tables.

MAIN CONTENTS OF DISSERTATION

In the **introduction** the topicality and relevance of the dissertational subject have been justified, the conformity of the research with priority directions of scientific and technological development in the republic have been defined, presented an review of international scientific researches on theme of the dissertation, degree of study of the problem, the purpose and tasks, the object, subject and methods of investigation have been formulated, the scientific novelty of the research has been stated, the reliability of the obtained results has been proved, their theoretical and practical values have been revealed, short information about the implementation of the results and approbation of the work as well as about the volume and structure of the dissertation have been given.

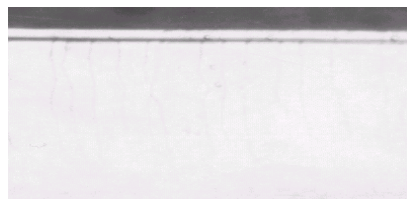
In the first chapter «**State of issues and trends to improve manufacturing technology of semiconductor structures with an inhomogeneous base region**» of the dissertation a review of literature data on the status of the research problem and trends to improve the functional characteristics of multi-layer semiconductor structures depending on the structural and morphological irregularities are given and the influence of constructional features of the field-effect transistors on their functional properties, as well as ways to improve the electrical parameters of field-effect transistors by circuit design are considered. Based on the analysis of available data are formulated the tasks of dissertation.

In the second chapter «**Development of technology for manufacturing the multilayer structures with the micro-relief surface**» technological steps of manufacturing multilayer structures with a textured surface by diffusion methods and liquid phase epitaxy, their spectral responses, amplifying and photoelectric properties of heterostructure, features of remotely-controlled optoelectronic switch on the basis of this heterostructure are given.

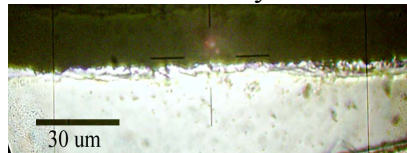
The technology is developed for manufacturing multilayer structures with micro-relief surface by combined method providing diffusion of zinc impurities into the textured surface of the gallium arsenide buffer layer and subsequent growth of epitaxial hetero-layers (*AlGaAs*) on top of the buffer layer from a limited solution-melt in a single process.

Texturing the surface of the buffer layer was carried out by anisotropic

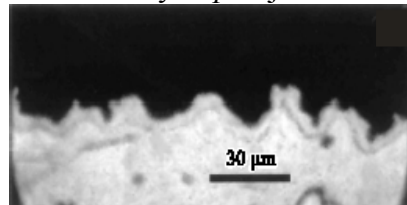
etching. Diffusion of zinc impurities was provided from zinc powder (146 mg in a graphite chamber with volume of 5.3 cm³) into gallium arsenide with micro-relief surface at 800°C during 50 minute. Growth of hetero-layer was carried out at



a) *p-n*-junction with flat boundary



b) dendrite type micro-relief boundary of *p-n*-junction



c) micro-relief boundary of *p-n*-junction obtained by contact diffusion

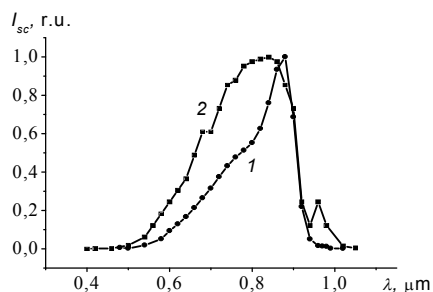
Fig. 1. Micrographs of cleavages of structures with buffer layer *pGaAs* and hetero-layer *pAl_{0.4}Ga_{0.6}As*

substrates, which allows increasing the angular response to the absorbed light as compared with a flat structure (up to 90 degrees compared to 50 degrees in the flat structures). They are characterized by flat boundary of *p-n*-junction and technologically textured surface defined by composition of hetero-layer.

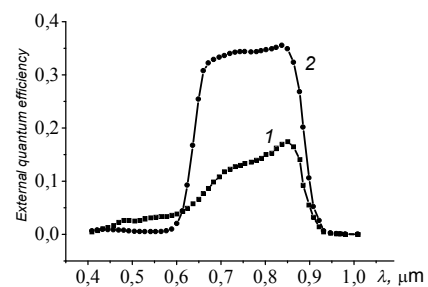
temperature range from 813°C to 809°C with cooling rate 1 degree/minute. In this case, the *nGaAs* substrates were chosen with concentration 10¹⁸ cm⁻³ and with dimensions (1 cm²) corresponding to the cell of a graphite cassette. In addition the diffusion process can be carried out from the solid-state (from the deposited zinc powder on *GaAs:Zn*) contacting the surface of the substrate, allowing to obtain a micro-relief interface. Micrographs of cleavages of obtained structures are shown in fig. 1.

It is experimentally shown that in the obtained multilayer *p⁺Al_{0.4}Ga_{0.6}As-pGaAs:Zn-nGaAs-n⁺GaAs*-structure with micro-relief surface the range of spectral response extends into the region of short wavelengths, and the quantum yield becomes twice higher as compared than in the structures with flat surface (fig. 2.) which can be specifically used as the photovoltaic receiver.

The technology is developed for manufacturing the structures with grown micro-relief surface by liquid phase epitaxy on the basis of indium and aluminum-containing epitaxial layers of gallium arsenide on the gallium arsenide



a) spectral response



b) quantum efficiency of photosensitivity

Fig. 2. Photoelectric characteristics of structures with flat (1) and micro-relief (2) *p-n*-junction

A *pAl_{0.1}Ga_{0.9}As:Ge* heterolayer were grown from the solution-melt containing 7.5 mol.% undoped gallium arsenide, 0.3 mol.% aluminium and 3.1

mol.% germanium solved in gallium at the interval of temperature from 822 °C to 818 °C with cooling rate 1 degree per minute.

It is revealed that at growth of $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As:Ge$ heterolayer from the solution-melt with the above composition on the indium-contained $pGa_{0.94}In_{0.06}As$ heterolayer texture in the form of pyramids (with a base 40-60 microns and a height of 8÷10 microns) is formed, fig. 3.

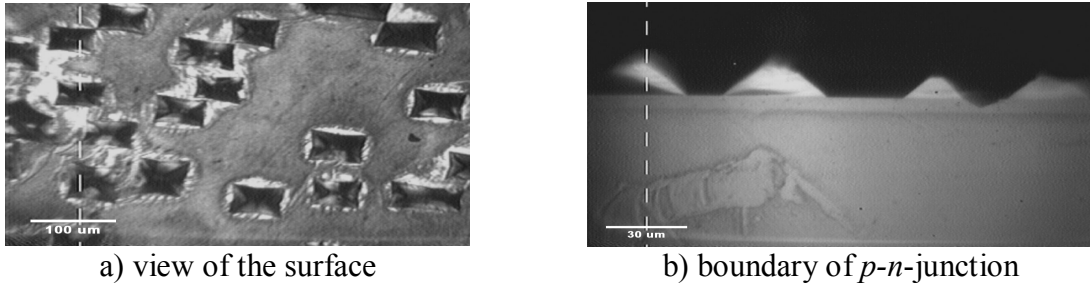


Fig. 3. Micrographs of structures with grown micro-relief

The hetero-layer $nGa_{(1-x)>0.8}In_{\leq 0.2}As$ with corrugated surface (due to differences in the lattice parameters of 1.4%) is grown with thickness 2÷4 micron on the substrate $nGaAs:O$ by forced cooling the solution-melt containing 4.9 mol.% gallium arsenide and 0.7 mol.% indium solved in gallium at temperature range from 838°C to 822°C with cooling rate 1 degree/minute.

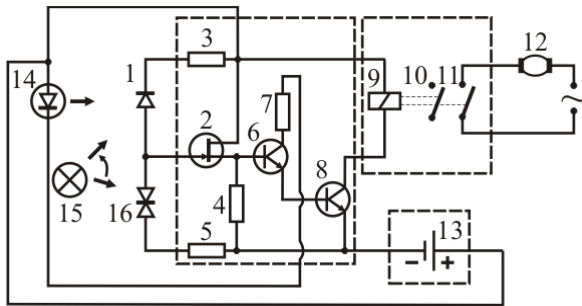


Fig. 4. Electronic circuit of remotely-controlled optoelectronic switch

On both surfaces of this hetero-isotype structure the rectifying contacts are obtained by deposition of silver allowing to amplify the input optical signal (from light emission diode). On this basis the controlled optoelectronic switch is developed providing not only switching on, but also switching off the object remotely using a single light probe, fig. 4. The feature of this design is that as compared

with the conventional analogues it has a function of switch due to created optoelectronic feedback at drain between the light emitter and the photodetector.

In this case, the remote control is carried out by switching the field-effect transistor to the locking mode using the hetero-isotype photodiode excited by a light probe. Switching in this system is performed by alternately pointing the light probe to both photodetectors, which leads to remotely switching on and switching off the electrical devices and equipments

In the third chapter «**Development of technology for manufacturing the multilayer structures with non-uniform base region**» methods of formation an impurity gradient along the thickness of the base region of gallium arsenide field-effect transistors by method of liquid phase epitaxy from a limited volume of the solution-melt and their influence on static, dynamic characteristics and photo-amplifying properties of the field-effect transistor are considered, and realization principles of a new method are described for epitaxial growth of layers by mixing

the solution-melts allowing to extend the range of the gradient of impurities along the thickness of the active region of the multilayer structure.

The investigated gallium arsenide multilayer photosensitive structures are obtained on p-type *GaAs* substrates with charge carriers' concentration equal to $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, which are placed into the three cells of liquid phase epitaxy equipment, where are consistently grown layers *pGaAs* and *nGaAs*-type conductivity with different impurities *Te*, *Te+Si* and *Sn* in a single process. The all epitaxial layers were grown from the solution-melt containing 7 mol.% gallium arsenide doped by appropriate impurities solved in gallium. The epitaxial layers of p-type conductivity with thickness 0.5 micron were grown in temperature range $848 \div 845^\circ\text{C}$ at constant cooling rate 1 degree/minute, and layers of n-type conductivity with thickness 1 micron were grown with cooling at first in a high rate (3 deg/min) passing to a small rate (0.5 deg/min). In accordance with the selected dopant and growth rate of the epitaxial layer from the liquid phase the corresponding impurity distribution profile along its thickness will be formed.

On the basis of these multi-layer structures field-effect transistors with unique construction are manufactured wherein the gate is all-over, the channel of n-type conductivity is horizontal and uncovered which allows to change the thickness of the channel and to set the guaranteed pinch-off of the channel and photosensitivity, fig. 5. The thickness of the channel is about 50 micron (the ratio of the channel length to its thickness is more than 10) which provides an opportunity for controlled chemical and morphological processing the its surface.

On the basis of experimental data of capacitance dependence from voltage on the gate's p-n-junction related with typical change of the thickness of the space charge region the concentration profiles are defined along the thickness of the base (latching) region. A comparison of these curves shows that in the structure doped with *Te* (Sample FET-PG) concentration of the charge carriers increases with gradient of impurities $2.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-4}$ (fig. 6, curve 1), and in the structure with channel doped with *Te+Si* (Sample FET-UNI) concentration of the charge carriers is uniform (fig. 6, curve 2) and in the structure with channel doped with *Sn* (Sample FET-NG) concentration of the charge carriers reduces with gradient of impurities $2.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-4}$ (fig. 6, curve 3). As a reference sample silicon field-effect transistors «KП303», «KП302» were selected.

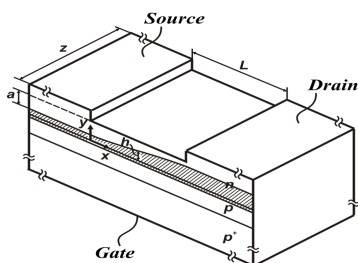
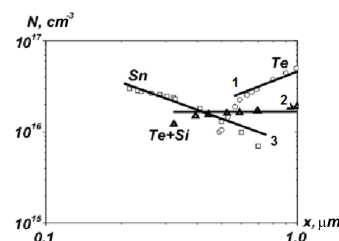


Fig. 5. Field effect transistor with uncovered channel



1- FET-PG; 2- FET-UNI; 3- FET-NG

Fig. 6. Distribution profile of impurities in GaAs epitaxial layers

It is experimentally shown that distribution profile of impurities in the channel significantly affects to the input and output characteristics of the investigated field-effect transistors. As the transition of the impurity distribution in the channel from the positive to the negative gradient, dark current is decreased by two orders of magnitude, and an output dynamic resistance is increased from 96 k Ω to 200 k Ω . From Table 1 it can be seen that the transconductance of the transfer characteristic in the field effect transistors, the channel of which is doped with tellurium, silicon+tellurium and in the silicon field-effect transistor are decreased by the order of magnitude and in the field effect transistor, the channel of which is doped with tin, a reduction is only three times. It testifies that in the field effect transistor, the channel of which is doped with tin, is performed the linearization of the transfer characteristics and provides an opportunity to operation in a power-saving mode, as shown in fig. 7. Significantly linearization of the transfer characteristics of the field-effect transistor with negative gradient (fig. 7., curve 3) as compared with field effect transistor with uniform distribution of impurities (fig. 7., curve 2) in the mode close to the pinch-off of the channel is impossible to explain by existing theories (in works of Bockemuehl and Richer), which predicts the independence of the transfer characteristic from the impurity distribution profile in the channel.

Table 1

Data on transconductance of transfer characteristics of investigated samples depending on the gate voltage

FET-PG $p^+GaAs - pGaAs - nGaAs:Te$, $R_d = 100\text{ k}\Omega$, $R_{out} = 31.9\text{ k}\Omega$									
$U_{gs} \cdot \text{V}$	0	0.5	1.0	1.5	2	2.5	3.0	3.5	
$I_d, \mu\text{A}$	422.3	307	202.5	138.1	84.55	38	13.9	2.25	
$S, \mu\text{A/V}$	230	209	128.8	107	93.1	48.2	23.3		
$k = S \cdot R_{out}$	7.3	6.66	4.1	3.4	2.96	1.53	0.74		
FET-UNI $p^+GaAs - pGaAs - nGaAs:Te + Si$, $R_d = 130\text{ k}\Omega$, $R_{out} = 34.5\text{ k}\Omega$									
$U_{gs} \cdot \text{V}$	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
$I_d, \mu\text{A}$	661	415	272	188	126	87.1	48.5	23.2	0.88
$S, \mu\text{A/V}$	491.6	286	167	125.2	77.6	77.2	50.6	44.6	
$k = S \cdot R_{out}$	16.9	9.8	5.76	4.3	2.67	2.66	1.74	1.5	
FET-NG $p^+GaAs - pGaAs - nGaAs:Sn$, $R_d = 200\text{ k}\Omega$, $R_{out} = 38\text{ k}\Omega$									
$U_{gs} \cdot \text{V}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
$I_d, \mu\text{A}$	150	115	91	70.5	49.5	35.9	22.3	12.3	1.63
$S, \mu\text{A/V}$	175	120	102.5	105	68	68	50	53.3	
$k = S \cdot R_{out}$	6.65	4.56	3.89	3.99	2.58	2.58	1.9	2	
KIP303 - a reference silicon field effect transistor, $R_d = 96\text{ k}\Omega$, $R_{out} = 31.5\text{ k}\Omega$									
$U_{gs} \cdot \text{V}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5			
$I_d, \mu\text{A}$	430	283	153	66	19	6			
$S = \Delta I_d / \Delta U_{gs}, \mu\text{A/V}$	294	260	174	94	26				
$k = S \cdot R_{out}$	9.2	8.19	5.48	2.9	0.81				

Note that in these theories the mobility of charge carriers is assumed to be constant over the whole volume of the channel. Contrary to the theory in the real tin-doped field-effect transistor at layer-by-layer etching of the channel coordinate change in mobility of the charge carriers is found, which can be explained with increasing of the density of defects on approach to the film-substrate interface. Measuring the mobility of the charge carriers in epitaxial layers was performed at low voltages, by the method of measurement in thin films. The actual expressions for the distribution of the charge carrier mobility along the thickness were found with considering the definition of the mean value of the function in the given interval: $\mu(x) = \bar{\mu}(x) + x \cdot \frac{d}{dx}(\bar{\mu}(x))$, the data are given in fig. 8.

Namely, observed coordinate dependence of charge carriers mobility in the channel provides an opportunity for operation of the investigated field-effect transistor (FET-NG) in a power-saving mode, i.e. in a mode close to pinch-off of the channel excluding the distortion and loss of useful signal. From a comparison of the amplifying properties of the investigated field-effect transistors it is revealed that the field-effect transistor with a negative gradient. From a comparison of the amplifying properties of the investigated field-effect transistors it is revealed that the field-effect transistor with a negative gradient of the impurities in the channel has a gain of two times larger than the field effect transistor with a positive gradient of the impurities or 3.5 times more than in silicon field-effect transistor, as shown in table 2.

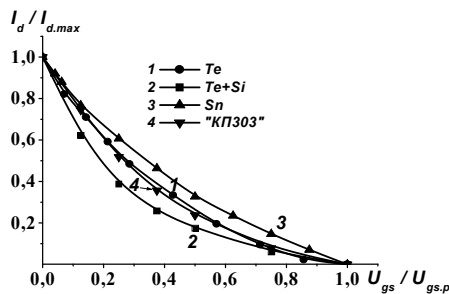


Fig. 7. Drain-gate transfer characteristics of transistors

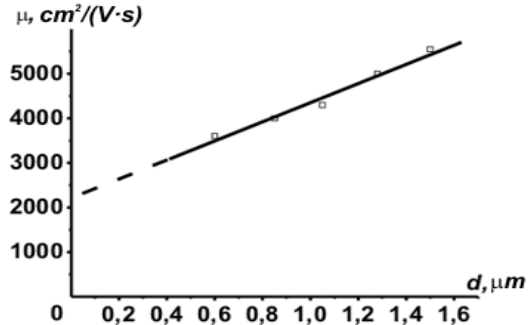


Fig. 8. Dependence of charge carriers mobility on thickness of epitaxial layer

Thus, a comparative analysis of the influence of a linear gradient of impurities in the channel on the static, dynamic characteristics and photo-amplifying properties of the field-effect transistor has shown that the positive gradient of impurities imparts increasing character to dependence of the drain current from the voltage. In field-effect transistors with negative gradient of impurities in the base region dark currents are reduced by two orders of magnitude, and dynamic resistances are increased two times. Their transfer characteristics are linearized in comparison with field-effect transistors with positive gradient of impurities providing minor (three times) reduction of the gain as blocking of the transistor. The investigation of the nature of influence of the linear and nonlinear impurity distribution along the thickness of the channel on the functional properties of the field-effect transistor is appropriate.

Table 2

Data on gain depending on the drain-source voltage*

Field effect transistor on GaAs with channel doped by tellurium									
U_{ds}, V	2.0	2.31	2.69	2.8	2.89	3.1	3.5	3.8	
U_{out}, mV	50	64.6	84.7	91.5	83.8	74.6	43.6	24.8	
$K_U = U_{out} / U_{in}$	5.0	6.46	8.47	9.15	8.38	7.46	4.36	2.48	
Field effect transistor on GaAs with channel doped by tin									
U_{ds}, V	0.5	1.0	1.5	1.75	1.89	2.0	2.1	2.2	2.3
U_{out}, mV	11.7	25.4	55.5	105.8	180	180	180	180	111
$K_U = U_{out} / U_{in}$	1.17	2.54	5.55	10.5	18	18	18	18	11.1
"KII303" a reference silicon field effect transistor									
U_{ds}, V	0.45	0.7	1.0		1.6	2.3		2.9	
U_{out}, mV	40	75	75		60	50		40	
$K_U = U_{out} / U_{in}$	4	7.5	7.5		6	5		4	

* $U_{in} = 10 mV, f = 1 kHz$

However, based on the investigation of the growth processes of multilayer structures it is established that each dopant gives a typical nearly linear impurity distribution along the thickness of the epitaxial layer, the gradient of which is given by the temperature dependence of the distribution coefficient of specific impurity and is uncontrollable.

This behavior of impurities is caused by constancy of the conditions creating the impurity concentration at the crystallization front. Therefore, to obtain the power-law and nonlinear impurity distribution along the thickness of the channel creation of new conditions allowing to change the concentration of impurities at the crystallization front is necessary, which can be achieved by adding to the main solution-melt an additional solution-melt with different concentrations of impurities.

In this connection, a special device is designed for liquid phase epitaxy (fig. 9) providing epitaxial growth of multi-layer semiconductor p^+pn -structures by mixing the solution-melts, with a predetermined gradient of impurity concentration along the thickness of the grown layer. The difference between the impurity concentrations in the main and additional solution-melts should be at least two orders of magnitude. Mass m of a discrete part of the additional solution-melt injected to the main solution-melt must satisfy the relation $m = km_0 l^n$, feeding with velocity $\xi = m_0 \gamma \cdot t^n$ defining the distribution profile of impurities.

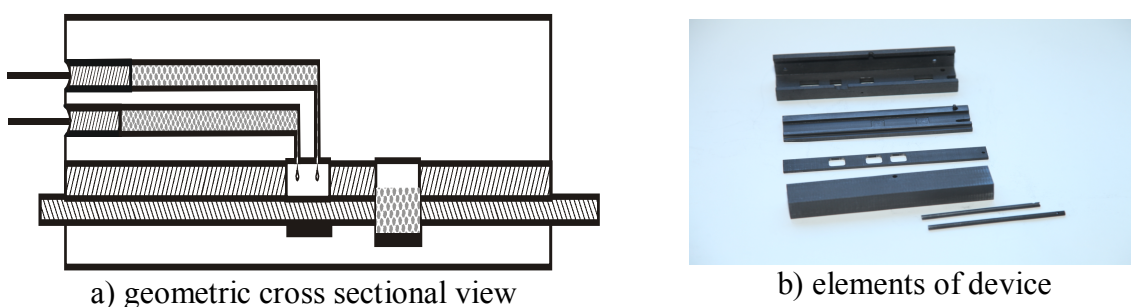


Fig. 9. Double piston graphite device

In graphite device were first grown epitaxial layer of p -type with concentration of charge carriers 10^{17} cm^{-3} from solution-melt containing 7 mol.% gallium arsenide solved in gallium brought by the horizontal submission at temperature 845°C into contact to the substrate with area 1 cm^2 of p^+ -type with concentration $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Then to the surface of the epitaxial layer of p -type horizontally brought a main solution-melt of n -type containing gallium arsenide in same composition with concentration of charge carriers $7.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Growth is carried out by vertical feeding an additional solution-melt of n -type containing also 7 mol.% gallium arsenide solved in gallium with concentration 10^{15} cm^{-3} to the main solution-melt at temperature 830°C by forced cooling with decreasing rate. At growth on the surface of epitaxial layer of p -type from mixing solution-melts a gradient layer of n -type is grown with decreasing concentration of charge carriers $3 \rightarrow 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, which are defined from capacitance-voltage dependences. The difference of proposed method from the known is that the mixing of additional solution-melt does not lead to super-saturation of the main solution-melt; super-saturation is achieved by forced cooling. Impurity distribution profile is controlled by the feed rate of additional solution-melt ($\xi = f(t)$).

It is established that the obtained on the basis of this technology a photosensitive field-effect transistor with negative gradient of the impurity in the channel due to the linearized transfer characteristic maintains a high photosensitivity not only at zero bias, but also at approaching of pinch-off mode ($U_{GS}=0.8 \text{ V}$) at operation bias ($1.3 \div 2.2 \text{ V}$).

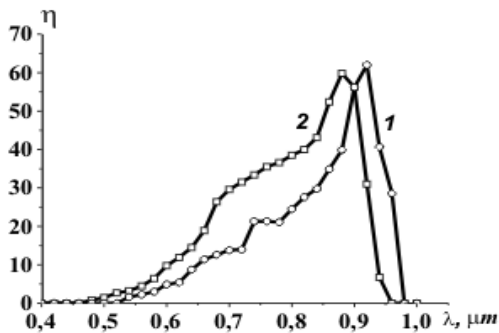
At optimal operation voltage 1.8 V and integrated illuminance 100 lx drain photocurrent is generated equal to 4.5 mA , which corresponds to the photosensitivity 1.28 A/lm or $8.26 \cdot 10^2 \text{ A/Wt}$, which is twice more in comparison within field-effect transistor with positive gradient of impurities channel of which doped by tellurium and photoelectric current gain is five times higher (60).

In the fourth chapter «**New connection modes of field-effect transistors providing low power consumption**» the functionalities of the photosensitive field-effect transistor with a controlling p^+p-n -junction depending on the connection mode and the saturation processes of drain current providing the basis for the linearization of transfer characteristic by circuit design on silicon field-effect transistors allowing the creation of microchips used in micro and optoelectronics are analyzed.

A comparative analysis is performed to identify the optimal connection modes to obtain maximum photosensitivity of the field-effect phototransistor. It is found that the current-voltage characteristic of the field-effect transistor depending on the light intensity in the floating mode with decreasing the light intensity creates a family of curves on account of the locking of the channel. And in the mode with a common source thickness of the channel acquires unchangeable from the drain voltage value, because changes produced by the light are compensated by the gate voltage.

It is established that in an automatic displacement mode the greatest gain is

observed caused by features of modulation of the channel thickness in this mode. Comparison of quantum efficiencies of field-effect phototransistors in floating gate mode and in transistor mode (in circuit with common source) indicates (fig. 10) that same values of quantum efficiencies (60÷65) can be obtained at low voltage in floating gate mode (at 2 V against 2.23 V).



1 – with floating gate; 2 – with biased gate

Fig. 10. Spectral response of field effect phototransistor

As a result, both an area of the photo-receiving surface and volume, where photocarriers are generated, increase with the operating voltage. At the same time, due to the compensation of the dark current by the photocurrent the noise components are almost excluded. A feature of the field-effect phototransistor in the mode of locking the channel by drain-gate voltage is redistribution of the photo-receiving surface between two barriers with increasing of operating voltage.

It is found that in the field-effect transistors with rising drain current can be obtained strongly pronounced saturation of the drain current by circuit design in an automatic displacement mode and four times larger photoelectric gain (250) compared (60) with a connection mode with a common source.

In order to identify the causes of the drain current's saturation in the investigated field-effect transistor in an automatic displacement mode saturating nature of falling voltage on the biasing resistor is defined. This voltage leads to a successive locking of source-gate junction and narrowing of the channel across the width of the gate due to the formation of fixed ionized charges, which leads to the strongly pronounced saturation of drain current. At different fitted values of biasing resistance, a family of drain characteristics is formed with more pronounced drain currents.

It should be noted that the greater the value of resistance, the less will be the drain current.

On the basis of the results of investigation the processes of drain current saturation in gallium arsenide field-effect transistor new technical solution is proposed allowing to extend the lifespan of semiconductor light emitting devices based on a reference silicon field-effect transistor "KП302" with high drain current (3÷30 mA).

With a view to avoid instabilities of the operating current and distortions of the useful signal in a known modulator of the optical signals, consisting of a

current regulator and a switch based on the two bipolar transistors, in the proposed modulator as a current regulator and a switch is proposed to use a field-effect transistor connected according to the circuit which is shown in fig. 11.

There operating current remains unchanged at reducing of the operating voltage from 10 to 3 V, and the value of the operating current of the light emission diode is defined by variable potentiometer, the dependence of which at the quadratic law coincides with the theoretical curve. A useful signal from the audio signal source is supplied to the source lead providing a deep modulation of the channel with a gain greater than in the circuit with the common source.

Replacing a conventional resistor to a channel resistance of the field-effect transistor in the circuit with an automatic displacement is the essence of our new

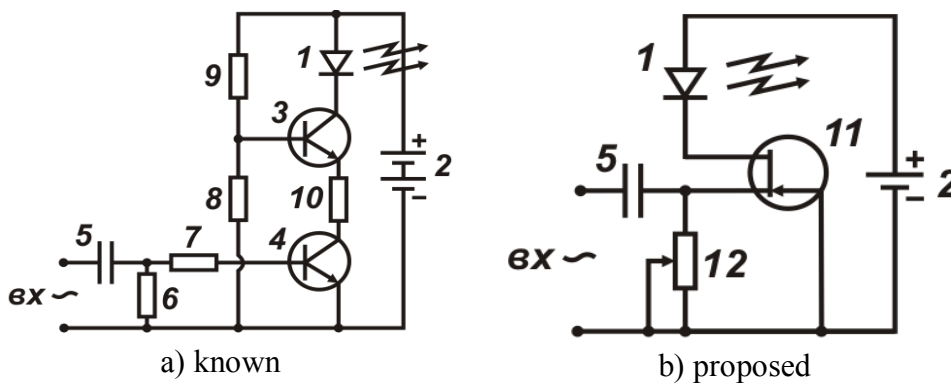


Fig.11. Circuit of optical modulator

approach (fig. 12). In this case a deeper modulation of the thickness of the base region as compared with a connection mode with common source is carried, which allows to obtain a greater value of the gain of the field-effect transistor.

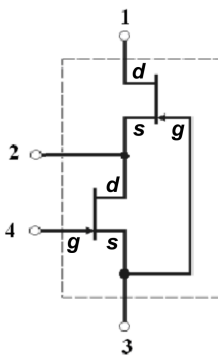


Fig. 12. Double-transistor cell

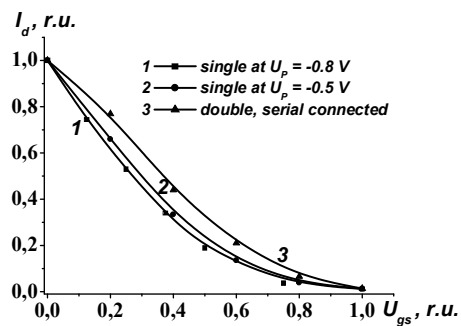


Fig. 13 Transfer characteristics of investigated field effect transistors

It should be noted that on the one hand connection circuit of the two field-effect transistors, so-called “cell”, is combined, i.e. consists of a field-effect transistor with common gate and a field-effect transistor with common source. On the other hand it contains a common pin 2 which provides an opportunity to increase combinations of its connection modes. Pins 1 and 3 are used for supplying the operating voltage and pin 4 is used for supplying the bias voltage pre-assigning

operating conditions of the cell, and for supplying the useful signal.

When using this connection circuit due to the strongly pronounced saturation of the drain current and linearization of transfer characteristic (fig. 13 from a small (~ 2 mV) alternating signal in the form of sine supplied from the sound generator the gain of about 70 is obtained at reverse voltage equal to half of the pinch-off voltage, as shown in Table 3.

Table 3

Data on gain depending on the value of reverse gate voltage*

U_{GS}, V	0.3	0.31	0.32	0.325	0.33	0.335	0.36	0.44	0.54	0.6
U_{IN}, mV	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
U_{OUT}, mV	22	64	130	140	140	130	100	80	40	20
K_G	11	37	65	70	70	65	50	40	20	10
* $f = 400Hz$										

The possibilities of the development of the current regulator, temperature measuring device and optical signal amplifier based on the proposed double-transistor cell at various combinations of its connection modes are demonstrated. This double-transistor cell representing a cascade with a dynamic load at the appropriate modernization can also be used to convert the input signal of low and medium power without distortions or losses.

A microchip is proposed, wherein both channels are simultaneously modulated by the input signal, amplifying properties are improved and a possibility is appeared for its application for the creation of devices with different functionality.

There gate terminal of the additional transistor is disconnected from the source terminal and the source terminal is connected to the gate terminal of the primary transistor, unlike the known cascade that has allowed to increase the gain.

In comparison with known microchip proposed one with dynamic load at this connection has two orders of magnitude larger gain up to 100 due to the simultaneous modulation of two series-connected channels.

Universal microchip with dynamic load on field-effect transistor (fig. 14) can be manufactured on the basis of silicon, solid solutions of SiGe, and semiconductor compounds A^3B^5 and A^2B^6 . Thus, proposed microchip based on cascade with dynamic load on field-effect transistor can be manufactured by known technologies and used as amplifier of alternating signals and in other purposes defined by connection modes.

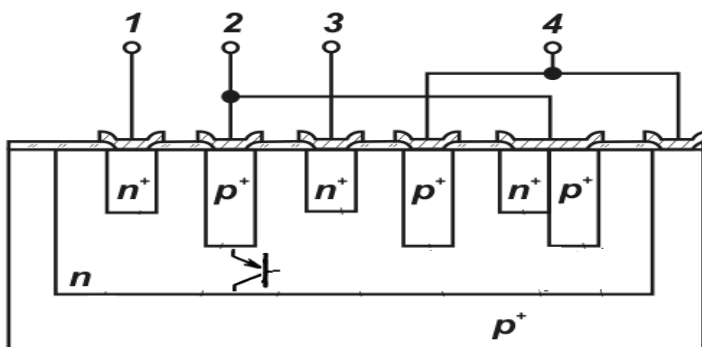


Fig. 14. Cross-sectional view of proposed universal microchip

In the fifth chapter «**Computational-analytical investigations of manufacturing technology and the current characteristics of multilayer structures**» computational-analytical investigation of processes discussed in the dissertation is given, main assumptions and approximations used in the calculations and simulations are justified, the results of computational-analytical analysis of the diffusion process of the metal into the semiconductor with a non-planar surface and the formation processes of impurity distribution profile in gallium arsenide multilayer structures grown from solution-melt with limited and increasing volume are presented, the results of computational-analytical investigation of the charge transport processes in multilayer structures with different gradients of impurities in the diode and transistor modes are reviewed.

By simulation of diffusion process of metal (Zn) into semiconductor (nGaAs) with micro-relief surface it is established that by changing the concentration of diffusible metal and the time of diffusion p - n -junction of different shape and area can be obtained. At limited quantity of metal and predetermined diffusion temperature of zinc 700°C in duration of diffusion 30 minute shape of p - n -junction interface repeats the texture of the semiconductor surface as shown in fig. 15a, and with increasing the temperature (900°C) and the duration of diffusion a gradual alignment of the diffusion front occurs (fig. 15b), caused by an increase of the diffusion coefficient of the metal in the semiconductor which is confirmed by experimental data of diffusion process of zinc atoms in gallium arsenide.

A computational-technical research of the growth process of the epitaxial layer from solution - melt with limited volume is performed explaining nearly

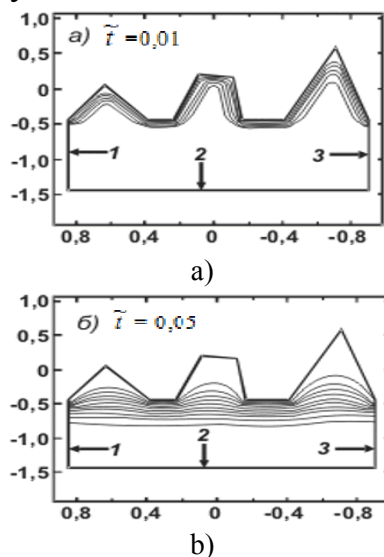


Fig. 15. Diffusion front of Zn at GaAs

$\xi = f(m_0, t) = m_0 \gamma t^n$, where γ and n are coefficients defining the change of the feedrate of additional solution-melt and thereby allowing to control impurity distribution profile, fig. 16. Created in the technological process impurity distribution profiles significantly affect the drain-gate characteristics of the field-effect transistor.

According to the calculations it is shown that in case of uniform distribution of impurities and mobility of carriers along the thickness of the channel drain

linear distribution of impurities formed by the temperature dependence of the distribution coefficient of a particular dopant. In order to control the concentration of impurities on the crystallization front controlling the volume and quantity of dopants by mixing into a main solution-melt an additional solution-melt with desired speed is proposed, and simulation was carried out, which explains the non-linear gradient formed by impurities, which are consistent with experimental data in different diffusion conditions as shown in table 4.

It is established that by setting the law of changing the steps of extruding piston a feedrate of additional solution - melt can be controlled:

current decreases by square law with increasing of the blocking voltage, leading to a decrease in gain (fig. 17a). On the basis of the computational-analytical investigation of the transfer characteristics it is established that calculated and experimental curves are consistent only under the assumption of existence of the gradient of the carrier mobility along the thickness of the channel (FET-NG) (fig. 17b), whose existence is confirmed by the results of experimental investigation of the carriers mobility in the epitaxial layers.

Table 4

Calculated data for transition from dimensionless to dimensional units of time and coordinate at different diffusion conditions

T, °C	D, cm ² /s	[\tilde{x}] μm	[\tilde{t}] min	$\tilde{t} = 0.01$ min	$\tilde{t} = 0.05$ min
700	$2,98 \cdot 10^{-13}$	10	$5,6 \cdot 10^4$	560	2800
750	$1,39 \cdot 10^{-12}$	10	$1,2 \cdot 10^4$	120	600
800	$5,64 \cdot 10^{-12}$	10	3000	30	150
850	$2,02 \cdot 10^{-11}$	10	800	8	40
900	$6,46 \cdot 10^{-11}$	10	250	2,5	12,5

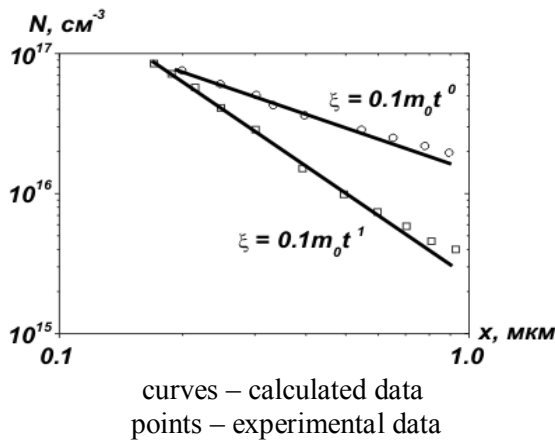


Fig. 16. Impurity distribution along thickness when used method of concentration mixing

In this case the presence of large negative gradient of carriers mobility in the channel of the field-effect transistor doped with tin leads to a shortening of the effective length of the channel, and thereby to increase the value of the parameter $\gamma = \frac{qa^2 \bar{\mu} \cdot \bar{N}}{2\epsilon\epsilon_0 V_{nac} L}$, which

characterizes the degree of dependence of the carrier mobility on the electric field strength, until 10, resulting in linearization of the transfer characteristic, fig. 17c.

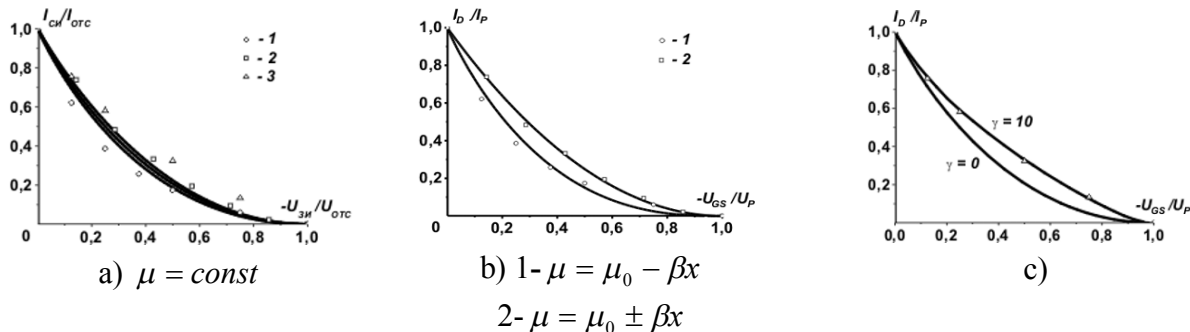


Fig. 17. Transfer characteristics of field effect transistors

It is shown that for small values of parameter γ modulation of the channel is mainly determined by the profile of the carrier mobility, and for large values it is determined by the impurity concentration profile. In field-effect transistor with negative gradient of impurities in the channel the transfer characteristics are

linearized as in field-effect transistors with short channel. This suggests that by varying the processes of growing the epitaxial channel and controlling the distribution of impurities along the thickness field effect transistors with a long channel can be obtained with the properties of the short-channel transistor which can be used in an economy mode with low energy consumption. Computational-analytical investigations of photovoltaic characteristics of the field-effect transistor in the diode mode are performed, which have shown the ability to control the dark and light currents due to formed gradient of impurities in the channel.

On the basis of the dependence of photocurrent on absorption coefficient using literature data for gallium arsenide were built spectral characteristics. As can be seen, these calculated curves are qualitatively consistent with the experimental data. In this case anomalous decrease of the photocurrent in FET-NG at reverse voltage of 0.9 V can be explained by the fact that at illumination of the structure a saturation of the surface states takes place, which leads to reduction of the surface recombination velocity. Caused by this reduction of dark current superimposing on the current of the photocarriers leads to a decrease of the photocurrent.

CONCLUSION

1. A new method of liquid phase epitaxy is developed providing the formation of a given impurity distribution profile along the thickness of epitaxial layers grown by mixing into the main solution-melt contacting with the substrate an additional solution-melt in discrete parts with controlled rate. In this case the impurities concentration in the additional solution-melt at least two orders of magnitude is different by the impurities concentration in the main solution-melt.

2. A computational-analytical research of impurity distribution profiles along the thickness of epitaxial layers grown from solution-melt with the constant volume and the varying volume where gradient impurity distribution profile determined by feed-rate of additional solution-melt into the main solution-melt are conducted.

3. Optimal modes of zinc diffusion into textured surface of the base region and subsequent growth of epitaxial hetero-layer in single process are established. By computer simulation of diffusion process of metal into semiconductor with micro-relief surface it is shown that with increasing the duration of diffusion a gradual alignment of the shape of *p-n*-junction interface occurs, which is confirmed by experimental data.

4. A technology is developed for manufacturing isotype double-barrier $nGa_{(1-x)>0.8}In_{\leq 0.2}As - NGaAs$ -heterostructure based on indium-containing epitaxial layers of gallium arsenide with technologically textured surface in the form of ripples at excess of indium, leading to the difference in the lattice parameters equal to 1.4% with gallium arsenide substrate.

5. A technology is developed for manufacturing the photo-voltaic $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As - pGa_{0.94}In_{0.06}As - nGaAs$ -structure with technologically textured surface in the form of pyramids (with a base 40÷60 microns and a height of 8÷10

microns) at doping impurity germanium 3.1 mol.% in frontal hetero-layer $pAl_{0.1}Ga_{0.9}As:Ge$ grown on indium-containing hetero-layer.

6. A remotely-controlled optoelectronic switch is developed providing a switching on and switching off of the electronic devices and technological equipments consisting of an amplifier with the input stage on the basis of field-effect transistor wherein between the gate and resistor of source is included a photodetector based on double-barrier structure with high input resistance.

7. A modulator of optical signals is developed allowing increasing the lifetime of the semiconductor light-emitting devices consisting of semiconductor light-emitting device, current source and a switch based on single field-effect transistor instead of two bipolar transistors which allows to keep stabilized current and to remove distortions of signal caused by high capacitance of bipolar transistor.

8. A photosensitive field-effect transistor is developed based on gallium arsenide with negative gradient of impurity distribution in the channel having a photosensitivity (800 A/Wt) and a current gain 6 times larger (60) as compared to the field-effect transistor with a positive gradient of impurities distribution.

9. A computational-analytical research of drain current-voltage characteristics of the field-effect transistor with long channel are conducted taking into account the distribution gradients of the impurities and charge carrier mobility along the thickness of channel which explains the appearance of the properties of short-channel field-effect transistor and the possibility of its use in economic mode.

10. A universal microchip with four electrodes is proposed on the basis of “double-transistor cell” with synchronically modulated channels providing an order of magnitude higher gain in mode close to pinch-off the channel as compared to circuit with dynamic load on field-effect transistor.

11. A generator of stabilized currents are developed based on “double-transistor cell” with linearized transfer characteristics, which is intended for setting precision-regulated current with a small step, provides a measurement of the current-voltage characteristics of semiconductor devices with sharply increasing current stabilatron type, voltage suppressor and S – diodes.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазиизопериодическим переходом. – Ташкент: Фан, 2005. С. 250.
2. Патент на изобретение РУз IAP №04854 от 21.02.2014. Модулятор оптических сигналов / Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Каландаров Ж., Кахоров А.А.
3. Патент на изобретение IAP № 04600 от 25.04.2012. Дистанционно-управляемый оптоэлектронный ключ / Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Гиясова Ф.А., Кахоров А.А. // Расмий ахборотнома. 30.11.2012. №11.
4. Патент на изобретение РУз IAP №04053. от 09.10.2009. Способ эпитаксиального наращивания полупроводниковых материалов путем смещения растворов-расплавов / Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Бахранов Х.Н., Гиясова Ф.А., Саидова Р.А., Хайдаров Ш.А. // Расмий ахборотнома. – 30.11.2009. №11.
5. Патент на изобретение IAP №03832 от 21.11.2008. Фоточувствительный полевой транзистор / Ёдгорова Д.М., Каримов А.В., Юлдашев Ш.Ш., Мирджалилова М.А. // Расмий ахборотнома. – 31.12. 2008. - № 12.
6. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulkhaev O. A. Long Channel Field Effect Transistor with Short Channel Transistor Properties // Semiconductors, 2014. – Vol. 48, – No. 4. – P. 481-486. (№11. Springer, IF=0.705)
7. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Якубов Э.Н., Юлдашев Ш.Ш, Тураев А.А. Исследование эффекта насыщения тока стока полевого транзистора с последовательно соединенными каналами // Физическая инженерия поверхности. - Харьков, 2012. – Т.10, – № 4. – С.308-313. (01.00.00, №91)
8. Каримов А.В., Джураев Д.Р., Ёдгорова Д.М., Рахматов А.З., Абдулхаев О.А, Каманов Б.М., Тураев А.А. Некоторые особенности ограничителя тока на полевом транзисторе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. –Одесса, 2011. –№ 1-2. – С.25-27. (01.00.00, №46)
9. Karimov A.V., Yodgorova D.M. Some Features of Photocurrent Generation in Single and Multibarrier Photodiode Structures // Semiconductors, 2010. –Vol. 44. –No.5. –P.647-652.(№11.Springer, IF=0.705)
10. Ёдгорова Д.М. Эффект усиления фототока в фотодиодной структуре с прямо- и обратновключенными переходами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. –Одесса, 2010. №1. –С. 3-5. (01.00.00, №46)
11. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Якубов Э.Н. Корреляция параметров арсенидгаллиевых эпитаксиальных слоев и технологии их выращивания // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. –Одесса, 2009.- № 5. – С. 38-41. (01.00.00, №46)

12. Ёдгорова Д.М. Влияние сопротивления истока на фотоэлектрические свойства арсенидгаллиевого полевого фототранзистора // Доклады АН РУз. – Ташкент, 2009. –№ 3-4. – С. 46-50. (01.00 00, № 7)
13. Akopyan A.A., Bahronov H.N., Borkovskaja O.Ju., Dmitruk N.L., Karimov A.V., Konakova R.V., Yodgorova D.M., Mamontova I. B. Photoconverters based on gallium arsenide diffused *p-n*-junction formed on a microprofile GaAs surface // Semiconductors, 2009. – V.43, -№3. – P. 368-373. (№11. Springer, IF=0.705)
14. Edgorova D.M. Photocurrent amplification effect of the fet gate *p–n* junction // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Springer Science+Business Media, 190 Inc. –New York, 2009. –Vol. 82. –No. 1. –P.190-197. (01.00.00, №7)
15. Yodgorova D.M. Specialities of optical FET with tin-doped junction channel // Radioelectronics and Communications systems. - New York, 2008. –V. 51. – №5. – P. 280-283.(№1, Web of Science IF=0.167)
16. Yodgorova D.M. Optical FET output characteristics research in light-activated // Radioelectronics and communications systems. - New York, 2008. - V. 51. – №10. –P. 552-554.(№1, Web of Science IF=0.167)
17. Ёдгорова Д.М., Каримов А.В., Азимов Т.М., Гиясова Ф.А., Бузруков У.М., Якубов А.А. Особенности фотоэлектрических характеристик фотоэлектронпреобразовательных структур // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – Одесса, 2007. - №4. - С. 23-28. (01.00.00, №46)
18. Ёдгорова Д.М., Каримов А.В., Саидова Р.А., Гиясова Ф.А., Хайдаров Ш.А. Оптимизация распределения концентрации носителей по толщине эпитаксиальных слоев // Технология и конструирования в электронной аппаратуре. – Одесса, 2007. – № 6. – С. 57-61. (01.00 00, №46)
19. Ёдгорова Д.М. Исследование термоэлектрических характеристик арсенидгаллиевых структур с модулируемой базовой областью // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2007. –№4. – С. 254-258. (01.00 00, №5)
20. Ёдгорова Д.М. Фотоэлектрические характеристики полевого фототранзистора в плавающем режиме // Петербургский журнал Электроники. – Санкт-Петербург, 2007. – №1. – С. 69-73. (01.00 00, №37)
21. Ёдгорова Д.М. Фотоэлектрические характеристики полевого транзистора легированного *Te* и *Sn* // Петербургский журнал электроники. - Санкт-Петербург, 2007. – №2. – С. 97-104. (01.00 00, №37)
22. Ёдгорова Д.М. Механизм управления фоточувствительностью полевого фототранзистора // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – Одесса, 2006. – №6. – С. 43-48. (01.00 00, №46)
23. Ёдгорова Д.М. Тонкие пленки для фоточувствительных структур // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2006. – №3. – С. 96-99. (01.00 00, №5)
24. Ёдгорова Д.М. Особенности получения тонкой пленки *AlGaAs* на структурах с текстурированной поверхностью // ДАН РУз. – Ташкент, 2006. -№3. - С. 27-30. (01.00 00, №7)

25. Ёдгорова Д.М. Механизм насыщения тока стока полевого транзистора // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – Одесса, 2006. – №5. – С. 58-61. (01.00 00, №46)
26. Ёдгорова Д.М. Исследование зависимости выходных характеристик полевого транзистора от параметров управляющего перехода // Физическая инженерия поверхности. – Харьков, 2005. – №3-4. – С.232-234. (01.00 00, №91)
27. Dmitruk N.L., Karimov A.V., Konakova R.V., Yodgorova D.M., Kudryk Ya.Ya., Sachenko A.V. Investigation of the effect of external factors on the electrophysical parameters of barrier heterostructures *pAlGaAs-pGaAs-nGaAs* // Journal Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics. – Kiev, 2005. – V.8. - №1. – P. 46-52. (01.00 00, №7)
28. Karimov A.V., Yodgorova D.M. Features of growing epitaxial layers from solid solutions based on indium and aluminium arsenides // Journal Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics. – Kiev, 2004. – V.7. - №4. – P. 383-385. (01.00 00, №7)

II бўлим (II часть; II part)

29. Yodgorova D.M., Kuliev Sh.M., Karimov A.V. Solid-state current source and amplifier of light signals: 14-th Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Mater. Sci. SPO-2013 October 24-27. – Kyiv, 2013. – AP.49. – P. 109-110.
30. Абдулхаев О.А., Ёдгорова Д.М. Особенности полевого транзистора с неравномерным распределением примесей в канале / Материалы региональной конференции «Яримўтказгичлар физикаси ва қурилмалари ҳамда уларни ўқитишнинг муаммолари». Наманган, 2013 йил. 26 апрел. –Б. 65-66.
31. Абдулхаев О.А., Гиясова Ф.А., Ёдгорова Д.М., Каримов А.В., Миржалилова М.А. Управление профилем распределения примесей в эпитаксиальных слоях, выращенных из раствора-раслава с контролируемым объемом и составом / Межд. конф. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» к 80-летию академика АН РУз М.С. Саидова 24-25 ноября. – Ташкент, 2010. – С. 159-160.
32. Yodgorova D.M. Research of resistance influence of a source on photoelectric properties of the arsenide gallium field phototransistor / Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Mater. Sci. SPO-2009 October 22-25 – Kyiv, 2009, –P.104-107.
33. Акопян А.А, Борковская О.Ю., Дмитрук Н.Л., Каримов А.В., Yodgorova D.M., Конакова Р.В., Мамонтова И.Б. Некоторые особенности волноводной фотоприемной структуры с микрорельефной границей *p-n*-перехода / 5-межд. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы физики» 25-27 июня 2008 года. – Баку, 2008. – С. 349-352.
34. Ёдгорова Д.М. Эффект усиления фототока в полевом транзисторе с управляющим *p-n*-переходом / Респ. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики» 18-19 мая 2007 года. – Ташкент, 2007. - С.127-128.

35. Ёдгорова Д.М. Об отклонении параметров низкоразмерных структур / Межд. конф. «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах» к 60-летию академика АН РУз А.Т.Мамада-лимова 1-3 февраля 2007 года. – Ташкент, 2007. – С. 97-98.
36. Ёдгорова Д.М., Каримов А.В., Джураев Д.Р., Якубов А.А. Анализ термоэлектрических процессов в полевом транзисторе / Респ. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики» 18-19 мая 2007 года. – Ташкент, 2007. – С. 130-132.
37. Ёдгорова Д.М., Каримов А.В., Бузруков У.М., Хайдаров Ш.А. Определение параметров эпитаксиальных слоев методом магнетосопротивления / Межд. конф. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» 26-27 октября 2006 года – Ташкент, 2006. – С. 222-224.
38. Yodgorova D.M. About dynamic resistance of field transistor's canal: Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Mater. Sci. SPO-2006 October 26-29 – Kyiv, 2006. –P.143-144.
39. Karimov A.V., Yodgorova D.M. Formation of microrelief structures by epitaxial technology / RIO 5 «World Climate & Energy Event» 15-17 February 2005. – Rio-dejaneiro, 2005. – P. 227-230.
40. Karimov A.V., Yodgorova D.M. The research of influence of textured of active area on the photoelectric parameters of photoconverters / 20th European photovoltaic solar energy conference, 6-10 june 2005. – Barcelona, 2005. – P. 195-196.
41. Ёдгорова Д.М., Каримов А.В. Гетерослои с широкозонным окном-фильтром на текстурированных поверхностях / 5-межд.научно-техническая конференция. «Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе» МЭПП 5-8 декабря 2005 г., Баку-Сумгаит, 2005. – С. 21-22.
42. Karimov A.V., Yodgorova D.M. Microrelief and diffusion *p-n*-junctions for heterophotoconverter structures *Al(In)GaAs-GaAs*: 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 7-11 June 2004. –Paris, 2004. –P.166-168.
43. Karimov A.V., Dmitruk N.L., Konakova R.V., Agzamova A.H., Yodgorova D.M. Structures surface processing for photoconverters: Scanning probe microscopy-2003, 2-5 march 2003. – Nizhny Novgorod, 2003. -P.134-136.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида
таҳрирдан ўтказилди (22.10.2014 йил)

Босишга рухсат этилди: 27.11.2015
Ҳажми: 4,5. Адади: 100. Буюртма: № 67
“Top Image Media” босмахонасида босилди.
Тошкент шаҳри, Я.Ғуломов кўчаси, 74-уй