

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ - ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

УСМОНОВ ЖОХОНГИР НИШОНБОЕВИЧ

**GaP VA GaAs АСОСИДАГИ ТАРКИБИДА ВИСМУТ АТОМЛАРИ
БЎЛГАН КЎП ТАРКИБЛИ ГЕТЕРОТУЗИЛМАЛАРНИНГ ФИЗИК
ХОССАЛАРИ**

01.04.10 - Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2021

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

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

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

Усмонов Жохонгир Нишонбоевич

GaP ва GaAs асосидаги таркибида висмут атомлари бўлган кўп
таркибли гетеротузилмаларнинг физик хоссалари..... 3

Усмонов Жохонгир Нишонбоевич

Физические свойства многокомпонентных висмутосодержащих
гетероструктур на основа GaAs и GaP..... 21

Usmonov Joxongir Nishonboyevich

Physical properties of multicomponent bismuth-containing heterostructures
based on GaAs and GaP..... 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... 43

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

УСМОНОВ ЖОХОНГИР НИШОНБОЕВИЧ

**GaP VA GaAs АСОСИДАГИ ТАРКИБИДА ВИСМУТ АТОМЛАРИ
БЎЛГАН КЎП ТАРКИБЛИ ГЕТЕРОТУЗИЛМАЛАРНИНГ ФИЗИК
ХОССАЛАРИ**

01.04.10- Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2021

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.1.PhD/FM264 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Андижон давлат университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбари:	Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабидинович физика-математика фанлари доктори, профессор ЎзР ФА академиги
Расмий оппонентлар:	Арипов Хайрулла Кабилович физика-математика фанлари доктори, профессор Зикриллаев Нурулла Фатхуллаевич физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	Наманган муҳандислик-технология институти

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «11» 08 соат 10⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (99871) 248-79-94, факс: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

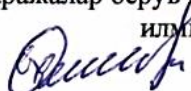
Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин. (24 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

Диссертация автореферати 2021 йил «27» 08 кuni тарқатилди.
(2021 йил «27» 08 даги 27 рақамли реестр баённомаси).



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

 **Ж.Ж. Хамдамов**
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, (PhD)

 **Х.К. Арипов**
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф. д., профессор.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурлиги. Ҳозирги даврда микро- ва наноэлектрон яримўтказгичли қурилмалар ишлаб чиқаришнинг жадал ривожланиши янги турдаги материаллар ва тузилмалар яратиш учун материалшунослик ва асбобсозлик соҳасидаги тадқиқотларни рағбатлантиради. Ушбу йўналишда GaAs, GaP ва бошқа монокристалл бинар бирикмалари асосида кўптаркибли яримўтказгичли қаттиқ қоришмаларни олиш муҳим ҳисобланади. Уларнинг электрик ва фотоэлектрик хоссаларини ўрганиш, шунингдек, янги ва ҳали ўрганилмаган хусусиятлари олимлар ва ишлаб чиқарувчиларнинг эътиборини тобора кўпроқ жалб этмоқда. Бу хоссалар юқори фотосезувчанлик, ёруғлик ютиш спектрал соҳасини кенгайтириш, яроқлилиқ муддатини орттириш ҳамда юқори тезликда ишлаш каби ноёб хусусиятли электрон қурилмалар тайёрлашда алоҳида аҳамият касб этади.

Жаҳон миқёсида аввалдан белгиланган параметрли кўптаркибли ҳамда кўпқатламли яримўтказгичли тузилмаларни олиш технологияларини ишлаб чиқиш, қатламлараро бўлиниш чегараси ҳолатини, тайёр маҳсулотлар хусусиятларига киришма элементлари ва ташқи омиллар таъсирини аниқлаш истиқболли йўналишлар ҳисобланади. Шу сабабдан жаҳоннинг кўплаб етакчи илмий тадқиқот марказлари кўптаркибли юпқа қатламли қаттиқ қоришмаларни ва гетеротузилмаларни олиш технологияларини, уларнинг таркибий қисмлари, киришма атомларини шунингдек, ҳарорат, нурланиш, намлик ва бошқа турдаги ташқи омилларни улар асосидаги электрон қурилмаларнинг электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятларига таъсирларини ўрганишга катта эътибор қаратмоқда.

Республикаимизда кремний, германий, арсенид галлий, галлий фосфиди асосида юпқа қатламли кўптаркибли яримўтказгичли қаттиқ қоришмалар ва гетеротузилмалар олиш ҳамда турли қатламлар сирти ва бўлиниш чегараларидаги физик жараёнлар механизмларини аниқлаш бўйича самарали илмий изланишлар олиб борилмоқда. Хусусан, арзон ва юқори самарали нанообъектли юпқа плёнкали гетеротузилмаларни олиш, уларнинг физикавий параметрларини аниқлаш ҳамда уларни оптоэлектрон маҳсулотлар ишлаб чиқаришга жорий этиш борасида муайян натижаларга эришилмоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида «илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш, ...»¹ вазифалари белгиланган. Мазкур йўналишда микроэлектроника қурилмаларини ишлаб чиқиш учун янги турдаги яримўтказгич материаллар – қаттиқ қоришмаларни яратиш муҳим илмий аҳамият касб этади.

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги "2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида" ги ПФ 4947-сонли фармони

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон “2017-2021 йилларда электротехника саноати бошқарувини жадал ривожлантириш ва диверсификациялашни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги Қарорларида, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги қарорларида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертацияда олиб борилган тадқиқотлар муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияни ривожланишнинг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергия, энергия ресурсларини тежаш, транспорт, машинасозлик ва асбобсозлик; замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобсозликни ривожлантириш» устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилиш даражаси. Кейинги йилларда А.Ф. Иоффе номидаги Физика техника институтида Ж.И. Алферов ва ҳамкасблари томонидан ўтказилган кенг қамровли тадқиқотлар, молекуляр нур эпитакия усули ёрдамида олинган GaAs асосида яримўтказгичли қаттиқ қоришмалар ҳамда кўпқатламли гетеротузилмаларни янги турдаги яримўтказгичли лазерларда фойдаланиш имкониятиларини кўрсатди. Олинган натижаларни юқори баҳолаиб, Физика соҳасида Нобел мукофоти билан тақдирланди. Ж.И. Алферов, М.С. Саидов ва уларнинг издошлари суюқ фазали эпитакия усули ёрдамида қаттиқ қоришмалар ва гетеротузилмаларни олиш технологиясини ишлаб чиқдилар. Олинган юқори сифатли $(\text{Ge}_2)(\text{ZnSe})$, $(\text{GaAs})(\text{ZnSe})$, $(\text{GaP})(\text{ZnSe})$ қаттиқ қоришмаларнинг ва бошқа $p\text{-GaAs-}n\text{-(Ge}_2\text{)}_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ ва $p\text{-Si-}n\text{-(GaP)}_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ гетеротузилмаларнинг кристаллик тузилиши мукамаллик даражаси юқори эканлиги кўрсатилди, бундай қаттиқ қоришмаларда икки атомли GaAs, ZnSe бирикмалари билан нисбатан кичик таъқиқланган соҳали яримўтказгичлар Ge ва Si валент соҳасида энергетик сатҳларни шакллантиришга олиб келиши ва янги турдаги фотоэлектрик қурилмалар яратилиш имконини бериши аниқланди. Андижон давлат университети олимлари С.З. Зайнабидинов, А.Й. Бобоевлар GaAs асосида олинган қаттиқ қоришмалар, бинар бирикмалар ва гетеротузилмаларнинг тузилмавий асослари ва электрофизик хоссаларини тадқиқ қилдилар ҳамда кўптаркибли $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилмасини олишнинг оптимал шароитларни аниқладилар.

Диссертация мавзуси бўйича мавжуд илмий адабиётларнинг таҳлили, бу соҳада олиб бораётган бир қатор илмий тадқиқот марказлар кўламининг кенглигини яримўтказгичли қаттиқ қоришмалар ҳамда гетеротузилмаларнинг хоссаларига бўлган қизиқишнинг юқори эканлигини кўрсатмоқда. Кўплаб

тадқиқот натижаларига қарамай, бу соҳада ҳали ҳал қилинмаган муаммолар мавжуд. Бу биринчи навбатда, мукамаллик даражаси юқори бўлган қаттиқ қоришмалар ва гетеротузилмалар олиш технологияларини такомиллаштириш, кўптаркибли тизим элементларининг оптимал танлови, таркибий элементларининг ва нуқсонларнинг ўзаро таъсир механизмлари, ҳамда уларнинг хусусиятларига ташқи омилларнинг таъсирларидир.

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

Диссертация иши Андижон давлат университетида 2017-2020 йилларда бажарилган ОТ-Ф2-68 рақамли "Кристалларда киришма атом нуқсонли микро ва нано- бирикмалар ҳосил бўлиш механизмлари ва уларнинг кенг имкониятли кўп қатламли тузилмаларни яратишдаги роли" ҳамда Андижон машинасозлик институтида 2016 йилда бажарилаган Ф-2-001 рақамли "Радиация таъсирида яримўтказгичли GaAs/Ge/ZnSe қаттиқ қоришмасида заряд ташувчиларни кўчиши ва ёруғликка сезгирлиги" мавзусидаги илмий-тадқиқот лойиҳалари доирасида тайёрланган.

Тадқиқотнинг мақсади. GaP ва GaAs асосида янги кўптаркибли, висмут киришма атомлари бўлган қаттиқ қоришмалар ва гетеротузилмаларнинг электрофизик хоссаларини тадқиқ қилиш ҳамда уларни олиш оптимал технологик шароитларини аниқлаш.

Тадқиқотнинг вазифалари:

A^{3B^5} ва A^{2B^6} турдаги яримўтказгичли бирикмалари асосида узлуксиз беш компонентли қаттиқ қоришмаларнинг ҳосил бўлиш термодинамикасини аниқлаш;

висмут киришма атомлари бўлган $(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ юпқа пленкаларини суюқ-кристалланиш ҳолатидан олишнинг оптимал технологик шароитларини аниқлаш;

$(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ кўпқатламли юпқа пленкаларнинг тузилмавий хоссалари ва электрофизик хусусиятларини тадқиқ қилиш;

олинган пленка сиртида ўз-ўзидан ҳосил бўлувчи $GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta}$ ва ZnSe нанокристалларини ҳосил бўлиш механизмларини ва уларнинг тузилмавий катталикларини аниқлаш;

$n-(GaP)-p-(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ гетеротузилмларининг фото-сезгирлиги ва уларда ток ўтиш механизмларини тадқиқ қилиш.

Тадқиқот объекти GaP ва GaAs монокристалл тагликлари ва $(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ эпитаксиал қатламлари, шунингдек, улар асосида тайёрланган гетеротузилмалар ҳисобланади.

Тадқиқотнинг предмети. Суюқ фазали эпитаксия усули ёрдамида GaP ва GaAs тагликларига $(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ эпитаксиал қатламларини ўстириш технологиялари ва уларнинг тузилиши, эпитаксиал қатлам сиртида ҳосил бўладиган нанокристалларининг сиртий зичлигини, геометрик шакллари ва ёнбош (латераль) ўлчамларини аниқлаш, шунингдек гетеротузилмаларининг фото- ва электрик хоссаларини аниқлаш.

Тадқиқотнинг усуллари. Илмий тадқиқот ишини бажариш мобайнида юпка қатламларни ўстириш учун суюқ фазали эпитаксия усулидан, тузилмавий таҳлиллар учун XRD-6100 рентгенодифрактометрдан, морфологик таҳлиллар учун атомий куч микроскопидан (Solver NexT), спектрал фотосезгирлигини аниқлаш учун CARLZEISJENA фирмаси монохроматоридан ва бошқа турли стандарт қурилмалардан фойдаланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

(111) ва (100) кристаллографик ориентацияли GaP ва GaAs монокристалл тагликлар сиртига ўстирилган $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмалар кўптаркибли юпка пардаларининг тузилмавий параметрлари сифатли юпка пардаларнинг тузилмавий хоссаларига тўлиқ мос келиши аниқланган;

суюқ фазали эпитаксия усулида висмут ҳосил қилувчи аралашма-эритмадан $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламларни ўстиришнинг оптимал технологик шароитлари аниқланган;

ўстирилган $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ юпка қатламлари сфалерит тузилишга эга, ўлчамлари 62 нм ли блоклардан иборат (111) ориентацияли монокристалл эканлиги ва юпка парданинг кристалл панжара параметри $a_f = 0,5656$ нмга тенглиги аниқланган;

$n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетеротузилмасининг максимал спектрал фотосезгирлиги фотон энергияси 1.34 эВ га тенг бўлганда $n\text{-}p$ ўтиш чегарасидаги Ge_2 молекулаларининг GaAs молекулалари билан қисман ўрин алмашилиши натижасида ҳосил бўлиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари. $n\text{-GaP-}p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилмасини тўғриловчи диод ҳамда кўзга кўринувчи ва ультрабинафша нурлар соҳаларида ишловчи фотоқабулқилгичлар учун фотоэлемент сифатида фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги: яхши синалган экспериментал ва мустақил усуллар мажмуаларидан: электр ва ёруғликка сезгир қурилмалар, инфрақизил ва рентген спектрометрлари, атом кучи микроскопи; кабилардан фойдаланилганлиги натижаларнинг ижобий тақрорийлиги; уларнинг умумий физик қонунлар ва визуал кузатиш натижалари билан таққослаш, ўхшаш ҳодисалар ҳақидаги умумий физик тасаввурларга зид эмаслиги; умумий физикавий қонуниятлар билан визуал кузатишларнинг мос келиши.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти $n\text{-GaP-}p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ турдаги гетеротузилманинг селектив сезгирлик табиати, кўп қатламли гетеротузилмаларда кўптаркибли қаттиқ қоришмаларда ток ўтиш механизмлари назарий жиҳатдан асосланган.

Олинган натижаларнинг амалий аҳамияти электрон қурилмалар ва маҳсулотлар ишлаб чиқаришда қўлланиладиган кўптаркибли гетеротузилмаларнинг юпка қатламларини олишнинг оптимал технологик шароитларни аниқланганлиги.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.

Суюқ фазали эпитаксия усулида висмутли қоришма-эритмасидан $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламларни ўстириш ва уларнинг электрофизик хоссаларини тадқиқ қилиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

квант нанообъектларининг ўлчамига, шаклига ва уларнинг зичликларига ўсиш ҳарорати оралиғи, совутиш тезлигига ва технологик меъёрларни таъсирини аниқлаш усуллари ЎзР ФА ЯФИ Ф2-ФА-Ф120 рақамли “Кичик ўлчамли юқори ҳароратли ўтаўтказгичлар, яримўтказгичли гетеротузилмалар, металл ва улар оксидларининг электрон хоссалари ва радиациявий такомиллаштирилиши” мавзусидаги лойиҳада қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясидан 2021 йил 12 апрелдаги олинган 2/1255-1051 рақамли маълумотнома);

GaP асосидаги GaAs/Bi/Ge/ZnSe гетротузилмаларни олиш, уларда ҳосил бўлган нанообъектларнинг табиати ва тақсимотини бошқариш, улардан кўринувчи ва ультрабинафша нурлар соҳаларида ишловчи электрон асбобларда фотоактив элемент сифатида фойдаланиш бўйича олинган натижалардан «FOTON» АЖда ишлаб чиқариладиган яримўтказгичли электрон қурилмалар тайёрлашда фойдаланилган (“Ўзэлектрсаноат” акциядорлик компаниясининг 2021-йил 5-апрелдаги 04-3/645 рақамли маълумотномаси).

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 4 та халқаро ва 3 та республика миқёсидаги илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 16 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий Аттестация Комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган нашрларда 8 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб ва хулосадан ташкил топган. У 120 саҳифада ифодаланиб, 27 та расмларни, 7 та жадвалларни ва 100 та фойдаланилган адабиётлар рўйхатини ўз ичига олади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

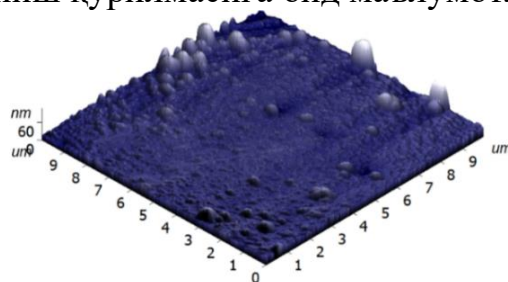
Кириш қисмида диссертация иши мавзусининг долзарблиги, ишнинг мақсад ва вазифалари асослаб берилган, илмий янгилиги ва амалий аҳамияти баён этилган, олинган асосий натижалар ва уларнинг амалиётга жорий этилганлиги ҳақидаги маълумотлар келтирилган.

“ A^3B^5 ва A^2B^6 яримўтказгичлар асосидаги кўптаркибли эпитаксиал қатламларнинг хоссалари” номли биринчи бобда $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмаларнинг ўстириш усуллари, электрофизик ва тузилмавий характеристикалари, шунингдек, улар асосида суюқ фазали

эпитаксия усулида кўптаркибли қаттиқ қоришмалари юпка пардаларини олиш ҳақида қисқача илмий адабиётлар таҳлили келтирилган.

Адабиётлардаги маълумотлар таҳлили икки ва уч таркибли яримўтказгичли қаттиқ қоришмаларнинг хоссалари, уларнинг олиш технологияси, тузилмавий ва физикавий хусусиятлари батафсил тадқиқ этилганини кўрсатади. Яримўтказгичли кўпқатламли гетеротузилмаларнинг қатламли табиати қаттиқ қоришманинг кристалл панжарасининг фонон спектрини ва электрон энергетик спектрини ўзгаришига олиб келади, бу эса улардаги электронлар ҳаракатчанлигини элементар яримўтказгичлардаги электронларнинг ҳаракатчанлигига нисбатан ортишини кўрсатади. Ҳозирча бунинг сабаблари ноаниқ бўлгани учун, тахминларга кўра, кўптаркибли яримўтказгичли қаттиқ қоришмаларда гетероўтишлар қатламлари орасида кескин чегара юзага келиши туфайли электронлар ҳаракатчанлигининг ортиши кузатилади. Шунинг учун кўптаркибли яримўтказгичли қаттиқ қоришмалар ва гетероўтишларни ишлаб чиқариш технологияларини ва уларни физикавий хусусиятларини ўрганиш замонавий яримўтказгичли электрониканинг долзарб муаммоларидан биридир.

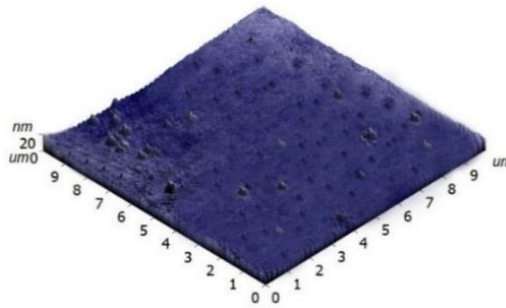
Диссертациянинг “Тадқиқот усуллари ва олиниш технологияси” номли иккинчи бобида $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмаларни ўрганишнинг тажрибавий усуллари, суюқ фазадан эпитаксиал қатламларни олиш технологияси ва яримўтказгич материалларнинг тузилишини, ҳамда электр хоссаларини ўрганиш қурилмасига оид маълумотлар баён этилган.



1-расм. $T_{\text{д.к.}}=730\text{ }^{\circ}\text{C}$ ҳароратда ўстирилган $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмаси сиртининг атом кучи микроскопи тасвири

GaP тағлигига $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмасини ўстириш учун суюқ фаза эпитаксия усули ёрдамида висмут ҳосил қилувчи аралашма-эритмадан амалга оширилди. Тағлик (111) кристаллографик ориентацияга эга. Кристалланишнинг дастлабки ҳарорати $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ташкил қилди. Аввал алоҳида тажрибалар асосида ҳамда эпитаксиал қатлам кристалланишининг дастлабки ҳароратига мос келадиган Bi-GaAs-Ge-ZnSe қоришма-эритмасининг таркиби аниқланди.

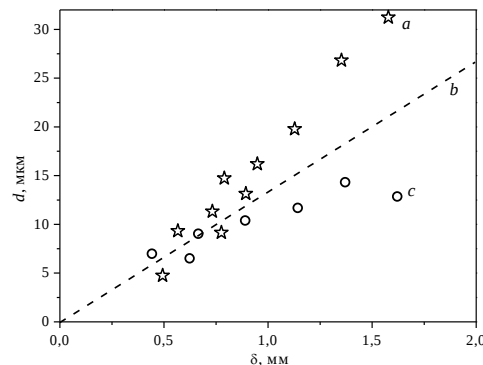
Ўстириш жараёни тағликларни бир неча градусга совутилган қоришма-эритмага ботириш орқали амалга оширилади, чунки аралашма-эритма галлий арсенидига нисбатан тўйинмаган бўлади. Ўтказилган тажрибалар тағликларнинг эришини олдини олиш учун зарур бўлган дастлабки совутишнинг оптимал қиймати $\Delta T=6-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ни ташкил қилишини кўрсатади.



2-расм. $T_{н.к.}=750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ҳароратда ўстирилган $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмаси сиртининг атом кучи микроскопи тасвири.

«Solver-NEXT» атом кучи микроскопи ёрдамида ўтказилган морфологик тадқиқотлар асосида эпитаксиал қатламлар кристалланишнинг бошланғич ҳарорати $T=730\text{ }^{\circ}\text{C}$ да GaP тагликлар сиртида фақатгина дендритлар шаклланиши аниқланган. Ушбу ҳолатда GaP тагликларида сифатли $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмаларини олиш имкони мавжуд эмаслиги кўрсатилди.

Эпитаксияланишнинг дастлабки ҳарорати $T=750\text{ }^{\circ}\text{C}$ гача кўтарилиши билан шаклланган оролчалар бир-бири билан бирлашиб, узлуксиз қатлам ҳосил бўлди. Лекин бундай қатламлар текис сиртлар ва бир қанча наноўлчамдаги объектлар, яъни нанооролчаларга ҳам эга (1-расм.). Кристалл панжаралар домийси a нинг ($a_{\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta}}=5.9\text{ \AA}$) ($a_{\text{GaAs}}\approx a_{\text{Ge}}\approx a_{\text{ZnSe}}=5.6\text{ \AA}$) номувофиклиги 4% ни ташкил этганлиги туфайли бундай натижаларнинг кузатилишига олиб келади. Бундан ташқари уларнинг хона ҳароратида иссиқликдан кенгайишининг чизикли коэффицентлари бир-биридан анча фарқ қилади: $\alpha_{\text{GaP}}=5,3\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, $\alpha_{\text{GaAs}}=6,4\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, $\alpha_{\text{GaAs}}=6,1\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$ ва $\alpha_{\text{ZnSe}}=7\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$.



3-расм. $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмалар эпитаксиал қатламлари қалинлигини тагликлар орасидаги масофа бўйича тақсимооти a - юқори таглик учун, b - назарий боғлиқлик, c - пастки таглик учун.

Тажрибаларда кузатилган иссиқлик кенгайиш коэффицентларининг бундай фарқи $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмали эпитаксиал қатламларининг ёрилиб кетишига ҳам олиб келиши мумкин.

3-расмдаги экспериментал натижаларнинг кўрсатишича қалинлик ўлчаш хатолиги доирасида, қуйидаги ифода билан тавсифланган тўғри чизикқа мос келади

$$d_{(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y} = \frac{\delta}{2} \left[\frac{A_1}{\rho_1} (1-x-y) + \frac{A_2}{\rho_2} x + \frac{A_3}{\rho_3} y \right] \cdot \frac{\rho}{A} [C_1 + C_2 + C_3] \quad (1)$$

пастки ва юқори тагликлар орасидаги тиркиш ≈ 0.8 мм га етганга қадар экспериментал натижалар назарий чизикдан катта фарқ қилади. Бу ерда, x ва y -таркибида Ge ва ZnSe бўлган A_1, A_2, A_3, A ва $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho$ қаттиқ қоришмасидаги галлий арсениди, германий, рух селениди ва висмутнинг суюқлик фазасидаги молекуляр оғирликлари ва зичлиги: C_1, C_2, C_3 галлий арсенид, германий ва рух селенларнинг молекуляр улушлари: δ - бу тагликлар орасидаги бўшлиқнинг катталиги. Германий ва рух селеннинг молекуляр оғирликлари ва зичликларининг катталиги бир-бирига яқин бўлгани учун, $\frac{A_1}{\rho_1} \approx \frac{A_2}{\rho_2} \approx \frac{A_3}{\rho_3}$, (1) ифода билан тасвирланган назарий чизиклар ён бағирлари турли « x » ва « y » учун деярли бир хил бўлади.

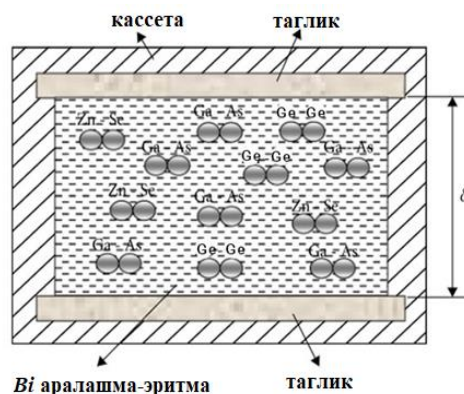
Шуни ҳам таъкидлаш керакки, қуйи ва юқори тагликларда ўстирилган қаттиқ қоришмали қатламларининг тузилмавий мукамаллиги ҳам бир-биридан фарқ қилади. Пастки тагликларда силлиқ юзали, бошқа барча шароитлари бир хил бўлган ҳолда, тузилмавий мукамалроқ эпитаксиал қатламлар олинади.

Шунингдек, эпитаксияланишнинг дастлабки ҳароратининг ортиши билан қуйи ва юқори тагликларда ўстирилган қатламларнинг тузилмавий мукамаллиги яхшиланади.

Олинган эпитаксиал қатламлар қалинлигининг оралиқ "8" қийматига боғлиқлигини қуйидагича тушунтириш мумкин (4-расм). Маълум ҳароратда тутиб турилган аралашма-эритмада эритилган таркибий қисмлар аралашма - эритма ҳажми бўйича бир текис тақсимланади ва аралашма-эритма германийга нисбатан ҳам, рух селенга нисбатан ҳам тўйинганлиги сабабли $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришманинг чўкмалари суюқ фазасини ҳосил қилади ҳамда улар гравитацион майдон таъсирида аралашма-эритмада қайта тақсимлана бошлайди. Шундай қилиб, аралашма-эритмада конвексия оқимлари пайдо бўлади. $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришманинг зичлиги эритувчининг зичлигидан паст бўлганлиги сабабли бундай конвексия оқимлари қаттиқ қоришма массасини юқори кристалланиш фронти томонига етказиб беришни кўпайтиради.

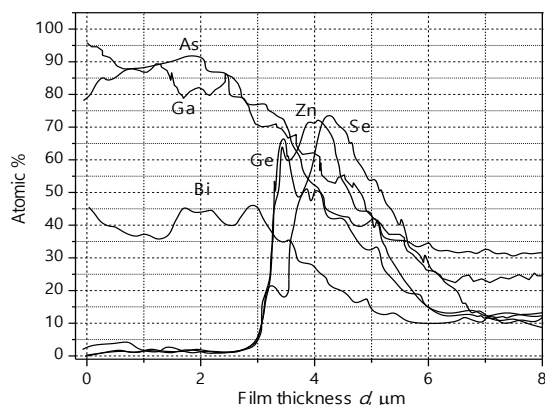
Шунинг учун бошқа барча шартлар бир хил бўлиши, юқори таглик устида қаттиқ қоришма қатламлари ўсиш тезлиги сезиларли юқори бўлганлиги туфайли қалин қатламлар шаклланишига олиб келиши мумкин. Ўсиш тезлигининг ортиши ҳам қатламлар тузилмавий мукамаллигининг ёмонлашувига олиб келади. 0,8 мм дан кичик оралиқларда қоришма-эритмада конвексия оқимларининг ҳосил бўлиши тўлиқ амалга ошмайди ва ўсиш фақат компонентларнинг молекуляр диффузияси туфайлигина амалга оширилади.

Шундай қилиб, қатламларнинг ўсиши палладий билан тозаланган водород атмосферасида мажбурий совутиш йўли билан 1–1.5 град/мин тезликда амалга оширилди. Қатламларнинг кристалланиши 750–650°C ҳарорат оралиғида ўтказилди. Ўстирилган эпитаксиал тагликлар 10 μm гача бўлган қалинликда, солиштира қаршилиги 10 Ом·см ва заряд ташувчилар концентрацияси $1.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ билан p -тур ўтказувчанликка эга.



4-расм. Эритмадаги компонентларнинг тақсимланиши-кристалланиш вақтида $\delta > 0.8$ мм да тагликлар орасида жойлашган эритмалар.

XRD-6100 (Shimadzu, Япония) қурилмасида тагликлар ва эпитаксиал қатламларнинг тузилмавий тадқиқотлари амалга оширилди. Рентген найчасига берилган кучланиш 40.0 кВ ва ток кучи 30.0 мА. XRD-6100 билан олинган тажриба натижаларини Фуллпроф дастури ёрдамида Ритвелд усулида ўрганилди.



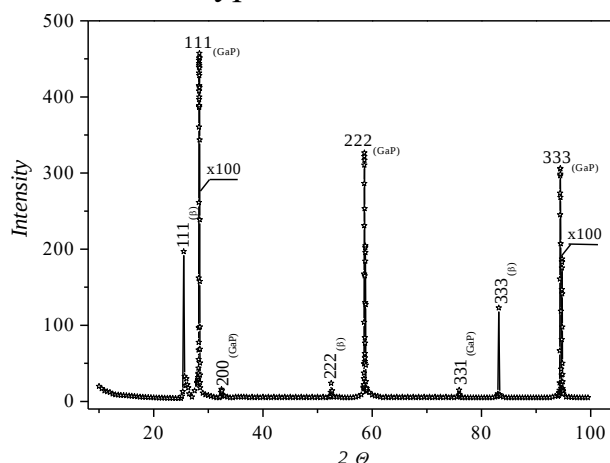
5-расм. $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмали эпитаксиал қатлам қалинлиги бўйича $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta}$, Ge_2 ва ZnSe ларнинг тақсимланиши.

«Jeol» JSM 5910 LV-Япония рентген микроанализатори ёрдамида $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ-қоришмали эпитаксиал қатламнинг қиялиги ва сиртининг кимёвий таркиби ўрганилди. Олинган натижалар таҳлилига кўра Ge, Zn ва Se атомларининг плёнка қалинлигининг дастлабки уч микронигача бўлган соҳасидаги тақсимланиш бир текисда эканлигини кўрсатди. Қалинлик 3 дан 7 мкм гача бўлганда тақсимланиш кескин ўзгаради ва деярли Гаусс кўринишига эга бўлиб қолади. Ga, As ва Bi элементлар учун ушбу қалинлик оралиғида аста-секин уларнинг таркиби камайиб боради. Кейин барча элементлар учун улар таркибининг турли қийматлари билан бир текис тақсимланиши ўрнатилади: галлий учун 24 % да, мишьяк-12% да, висмут-10 % да, германий учун-31 % да, селен учун 9 % ва рух учун 14 % да $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{0.46}(\text{Ge}_2)_{0.31}(\text{ZnSe})_{0.23}$ қаттиқ қоришмани шакллантириш шароити учун мос келади.

"Нанокристалли қаттиқ қоришмаларнинг тузилиши ва морфологияси" деб номланган учинчи бобда GaP таглик тузилиши ва $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ ўстирилган эпитаксиал қатламлар ҳамда бундай қаттиқ

коришмаларнинг электрон микроскопик тадқиқотлари натижалари келтирилган.

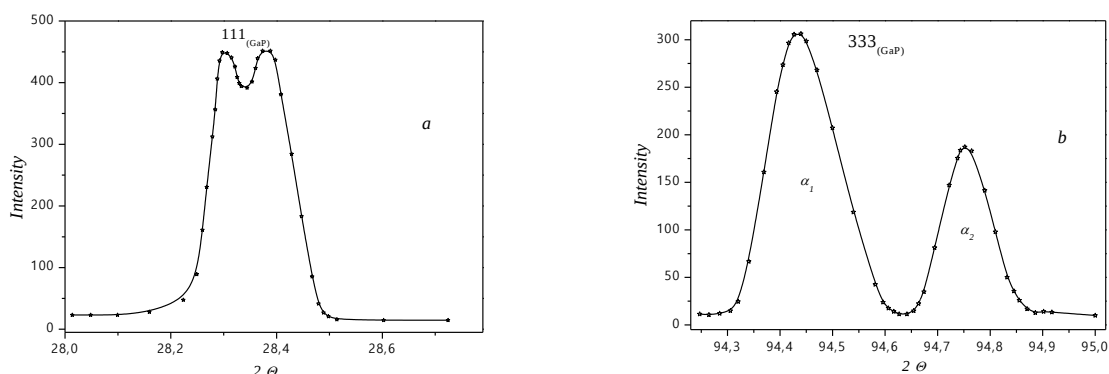
6-расмда GaP монокристалл таглигининг рентгенограммаси келтирилган. Дифраксион расмда турли интенсивликдаги селектив табиатга эга бўлган тузилмавий рефлекслар кузатилиши кўрсатилган. Олинган натижалар ва уларнинг таҳлиллари фойдаланилаётган таглик сирти (111) кристалланиш текислигига мос келишини кўрсатади. Бунинг тасдиғи сифатида рентгенограммада яна бир қатор (ННН) сериядаги селектив рефлекслар (бу ерда $(H=1,2,3\dots)$ $d/n = 0,3141$ ($2\theta = 28,4^\circ$) да $(111)_{\text{GaP}}$ ва $d/n = 1,046 \text{ \AA}$ ($2\theta = 94,9^\circ$) да $(333)_{\text{GaP}}$ юқори интенсивликдаги чўққилар) кузатилган. Уларни β ташкил этувчисининг мос равишда $2\theta = 25,7^\circ$ ва $2\theta = 83,3^\circ$ сочилиш бурчагида кузатилган. Дифраксион расмдаги юқори сочилиш бурчакларида таглик кристалл панжарасида жуда кучсиз интенсивликдаги $(331)_{\text{GaP}}$ $d/n = 1,2479 \text{ \AA}$ ($2\theta = 76,3^\circ$) тузилмавий рефлекслар кузатилган. Асосий рефлекснинг юқори интенсивлиги ва ингичка кенглиги, шунингдек рентгендифрактограмманинг ноэластик фон сатҳининг монотон табиатга эгалиги таглик кристалл панжарасининг мукамаллигини кўрсатади.



6-расм. GaP таглигини рентгенограммаси.

Бундан ташқари, α_1 ва α_2 нурланишлар бўйича асосий рефлекснинг кучсиз ажралиши (7, а расм), унинг бузилган шаклини, яъни таглик кристалл панжарасида эластик кичик кучланишларнинг мавжудлигини кўрсатади. Бу хулоса галлий фосфид панжараси учун $d/n = 2,7473 \text{ \AA}$ да $(200)_{\text{GaP}}$ ва $d/n = 1,5684 \text{ \AA}$ да $(222)_{\text{GaP}}$ рентгенограммадаги тақиқланган акслантириш мавжудлигини кўрсатади. Унинг интенсивлиги асосий чўққининг интенсивлиги $(111)_{\text{GaP}}$ га боғлиқ, чунки $I(200)/I(111) = 3.55 \times 10^{-4}$ ва $I(22)/I(111) = 7,2 \times 10^{-3}$ ($(111)_{\text{GaP}}$, интенсивлиги 10^{-4} дан катта.

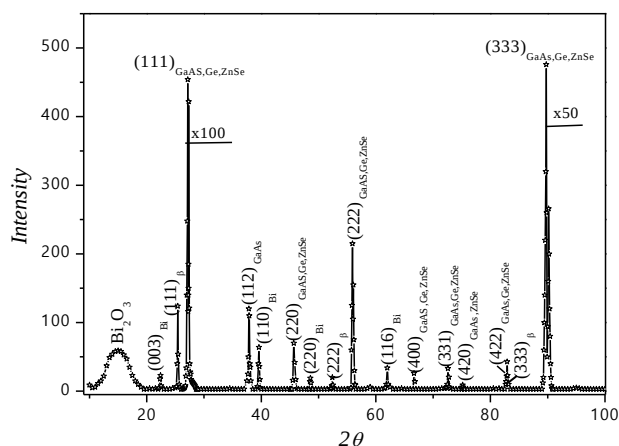
Ушбу далиллар галлий фосфид молекулаларининг таглигни асосий кристалл панжаралари бўйлаб тугунлар аро бир хил тақсимланишини ва микро-бузилишларга эга локал ҳудудларнинг мавжудлигини кўрсатади. Дифраксион акслантиришларнинг сусайиши қонунларига кўра, $(222)_{\text{GaP}}$ рефлекси олмоғсимон тузилишдаги кристалл панжаранинг рентгенграммасида мавжуд бўлмаслиги керак. У фақат панжарада бузилишлар (эластик микрозўриқишлар) ҳисобига пайдо бўлади.



7-расм. GaP таглигини (a) (111) va (b) (333) рефлекслари

$d/n = 1,046 \text{ \AA}$ ($2\theta = 94,9^\circ$) даги $(333)_{\text{GaP}}$ тузилма чиғиғининг α_1 ва α_2 нурланишлар бўйича яхши (ҳисоб-китобга яқин) ажралиши (7-б расм) ва асосий рефлекснинг кучсиз ажралаиши $(111)_{\text{GaP}}$ (7-а расм) эластик кучланиш асосан тагликнинг сиртга яқин қатламида тўпланганлигини кўрсатади.

Таглик панжараси қийматининг тажриба ёрдамида аниқланган катталиги $a_s = 5,448 \text{ \AA}$ бўлиб, у $a_{\text{GaP}} = 5,445 \text{ \AA}$ жадвалларда келтирилган қиймати билан таққосланади². Бузилган кристалл панжара соҳасининг ҳажмий улуши монокристаллнинг бутун ҳажмига нисбатан жуда кам эканлигини кўрсатади.



8-расм. $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиальқатламнинг рентгенограммавий тузилиши.

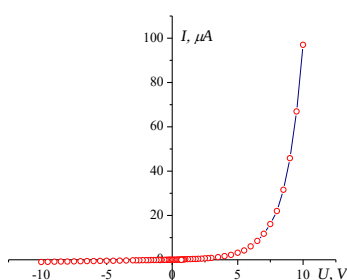
8-расмда $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ ўстирилган эпитаксиал қатламнинг рентгенограммаси келтирилган. У тагликнинг рентгенграммасидан сезиларли даражада фарқ қилиб, унда интенсивлик қийматлари бўйича турли тузилмавий рефлекслари кузатишган. Ушбу натижаларнинг таҳлили рентгенограммада $\{hkl\}$ сериясидаги (бу эрда $h, k, l=1, 2, 3, \dots$) юқори интенсивликдаги селектив рефлекслар кетма-кетлигини: $d/n = 3.44 \text{ \AA}$ да $(111)_{\text{GaAs,Ge,ZnSe}}$, $d/n = 1.631 \text{ \AA}$ да $(222)_{\text{GaAs,Ge,ZnSe}}$, ва $d/n = 0.9422 \text{ \AA}$ да $(333)_{\text{GaAs,Ge,ZnSe}}$ каби тузилма чизикларининг кузатилиши, олинган пленкаларнинг сирти (111) кристаллографик ориентацияга эга эканлигидан далолат беради. Уларнинг β – ташкил этувчилари мос равишда $2\theta_{(200)} = 25.6^\circ$, $2\theta_{(400)} = 52.8^\circ$ ва $2\theta_{(600)} = 83.5^\circ$ сочилиш бурчакларида кузатишган. Бундан ташқари рентгенограммада турли

²Краткий справочник физико–химических величин. Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. –Л.: Химия, 1983. –232 с.

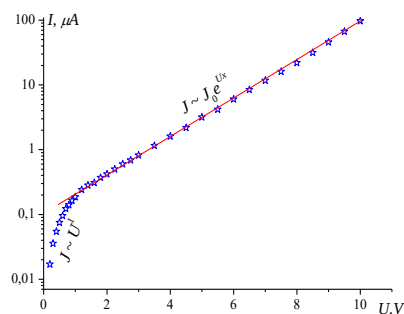
интенсивликка эга бўлган янги тузилма чизиқлари: $d/n = 2.305 \text{ \AA}$ да $(112)_{\text{GaAs}}$, $(2\theta = 38.5^\circ)$, $d/n = 2.273 \text{ \AA}$ ($2\theta = 39.4^\circ$) да $(110)_{\text{Bi}}$, $d/n = 2.001 \text{ \AA}$ ($2\theta = 45.19^\circ$) да $(220)_{\text{GaAs,Ge,ZnSe}}$, $d/n = 1.868 \text{ \AA}$ ($2\theta = 48.46^\circ$) да $(220)_{\text{Bi}}$, $d/n = 1.491 \text{ \AA}$ ($2\theta = 62.16^\circ$) да $(116)_{\text{Bi}}$, $d/n = 1.297 \text{ \AA}$ ($2\theta = 72.68^\circ$) да $(331)_{\text{GaAs,Ge,ZnSe}}$ ва $d/n = 1.155 \text{ \AA}$ ($2\theta = 83.46^\circ$) да $(422)_{\text{GaAs,Ge,ZnSe}}$ ҳам пайдо бўлган.

Шунингдек, рентгенодиффрактограммада яна учта $d/n = 3.955 \text{ \AA}$ ($2\theta = 22.3^\circ$) да $(003)_{\text{Bi}}$, $d/n = 1.413 \text{ \AA}$ ($2\theta = 66.1^\circ$) да $(400)_{\text{GaAs,Ge,ZnSe}}$ ва $d/n = 1.245 \text{ \AA}$ ($2\theta = 75.1^\circ$) да $(420)_{\text{GaAs,ZnSe}}$ сфалерит тузилма учун хос бўлган кучсиз тақиқланган тузилма чизиқлари кузатилган. Уларнинг интенсивлигини асосий рефлекс (111) интенсивлигига нисбати мос равишда $I(003)/I(400)=5.1 \times 10^{-4}$, $I(400)/I(111)=5.7 \times 10^{-4}$ ва $I(420)/I(111) = 2 \cdot 10^{-4}$ га тўғри келади. Ушбу қийматлар 10^{-4} дан биров юқорирокдир, бу эса олмооссимон кристалл панжарадаги киришмаларнинг бир хил тақсимланишига мос келади³. Асосий рефлекс $(111)_{\text{GaAs,Ge,ZnSe}}$ нинг ингичка кенглиги ($FWHM=5.51 \cdot 10^{-3}$ рад) ва юқори интенсивлиги ($2 \cdot 10^5$ имп·с⁻¹), кристалл панжарасининг юқори даражадаги мукамаллигини билдириб, ўстирилган плёнка (111) кристаллографик ориентацияли монокристалл эканлигини кўрсатади. Кристалл панжара қиймати ва субкристаллитларнинг (блокларининг) ўлчамлари юқоридаги чўққининг кенглиги бўйича мос равишда $a_f = 0,5656 \text{ \AA}$ ва $620 \text{ \AA}$ ларга тенглиги аниқланди.

"Висмут таркибли нанообъектли гетеротузилмаларнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссалари" номли тўртинчи бобда турли ҳароратларда қоронғуликдаги вольтампер характеристикасининг натижалари ҳамда тайёрланган гетеротузилмаларнинг фотосезгирлиги спектрал боғлиқликлари бўйича тадқиқ натижалари келтирилган.



а



б

9-расм. “ $n\text{-GaP-p-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилма-ларининг турли ҳароратларда(а) яримлогарифмик ва (б) логарифмик масштабдаги ВАХ си.

$n\text{-GaP} - p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ эпитаксиал қатламлар асосида тайёрланган гетеротузилмасининг вольтампер характеристикаси (ВАХ) ни текшириш учун намунага кумушни вакумда пуркаб ўтказиш усулида омик контакт олинди. 9-а расмда хона ҳароратида ўлчанган типик ВАХ ва унинг

³ Шулпина И.Л., Кютт Р.Н., Ратников В.В., Прохоров И.А., Безбах И.Ж., Щеглов М.П.. Методы рентгеновской дифракционной диагностики сильнолегированных монокристаллов полупроводников. Журнал технической физики 2010, Том. 80, Вып. 4. стр.105-114.

тўғри йўналиши кўрсатилган. Тузилмага берилаётган кучланишнинг бир хил қийматларида тўғри ток кучини (J_{dir}) тескари ток кучига (J_{rev}) нисбати $k = J_{\text{dir}}/J_{\text{rev}}$ коэффициентли тўғриловчи хусусиятига эга бўлиб, берилаётган кучланишнинг дастлабки 0.7 дан 10 В гача ўзгарганда k - 2 дан 100 гача қийматларни қабул қилади.

ВАХ нинг тўғри йўналишида 10 В гача бўлган кучланиш оралиғида токнинг тўйиниши кузатилмайди, бу эса сиртий ҳолатларининг зичлигини камлигини кўрсатади. Намунага берилаётган кучланишнинг дастлабки 0 дан 0.5 В гача орттирилганда $J \approx U^\alpha$ токнинг кучланишга боғлиқлиги $\alpha = 1$ кўрсаткичли Омик соҳа кузатилди. 9-б расмдан токнинг кучланишга боғлиқлиги $J \sim J_0 e^{U_x}$ турдаги экспоненциал боғлиқликни юзага келаётганини кўриш мумкин. ВАХ натижаларини таҳлил қилиш унинг қуйидаги экспоненциал олд қиймати $J_0 = 48 \mu\text{A}$ катталиқга эга бўлган

$$J = J_0 e^{\frac{qU}{ckT}} \quad (2)$$

кўринишидаги боғланиш билан яхши тавсифланишини кўрсатади. Бундай кучланишларда p - n тузилмалар орқали ток ўтиши номувозанат заряд ташувчилар диффузияси асосида аниқланади⁴ ва ВАХ экспериментал катталиқлари асосида

$$c = \frac{q(U_2 - U_1)}{kT \cdot \ln(I_2 / I_1)} \quad (3)$$

тенглама ёрдамида ҳисобланадиган, экспонента кўрсаткичи “ c ” катталиги билан сезиларли равишда боғлиқ бўлади. Кўрилаётган ҳолатдаги экспонента кўрсаткичи “ c ” нинг хона ҳароратидаги қиймати $c \approx 24,4$ ни ташкил этади. (2) муносабатга мувофиқ равишда бизнинг тузилма узун базали диод ҳисобланади ($d/L_p > 1$, бу ерда, d – диод базасини узунлиги, L_p – асосий заряд ташувчиларнинг диффузия йўли). Бошқа томондан “ c ” катталиқ В.И. Стафеев назарияси бўйича электронлар ва ковакларнинг нисбати, база қалинлигига ва асосий заряд ташувчиларнинг диффузия йўлига боғлиқ бўлади⁵.

$$c = \frac{2b + ch(W / L_p) + 1}{b + 1} \quad (4)$$

Бизнинг ҳолатда $d = 10$ мкм ни ташкил этиб, L_p – асосий заряд ташувчиларнинг диффузия йўли

$$L_p = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 kT}{q^2 p}} \quad (5)$$

формуласи билан аниқланади. Бу ерда $C = \varepsilon \varepsilon_0 S/d$ формула ёрдамида экспериментал тадқиқот натижаларидан аниқланадиган ε – диэлектрик сингдирувчанлик, (ε_0 – диэлектрик доимийси, q ва p асосий заряд ташувчилар заряди ва концентрацияси):

⁴ Стафеев В.И. Влияния сопротивления толщии полупроводника на вид вольтамперной характеристики диода // ЖТФ. 1958.– т.28, в.8.– С.1631-1641.

⁵ А.С. Саидов, Ш.Н. Усмонов, М.У. Каланов, К.А. Амонов. Альтернативная энергетика и экология. №15. №137. 2013. ст. 41-45.

$$b = \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (6)$$

электронлар ва ковакларнинг нисбати. $W=20$ мкм ва $b=2.87$ фойдаланиб (5) муносабатдан $L_p \sim 3,87 \cdot 10^{-6}$ м эканини топамиз. Асосий заряд ташувчилар – ковакларнинг ҳаракатчанлиги Холл усули ёрдамида ўлчаниб, $\mu_p = 405$ см²/В·с ни ташкил этиши аниқланди. ($\mu_n = b \cdot \mu_p = 1162,4$ см²/В·с) орқали ноасосий заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги қиймати ҳам баҳоланди). Асосий заряд ташувчилар яшаш вақти ва ҳаракатчанлиги катталиги ($\mu_p \tau_p$) ни

$$\mu_p \tau_p = \frac{qL_p^2}{kT} \quad (7)$$

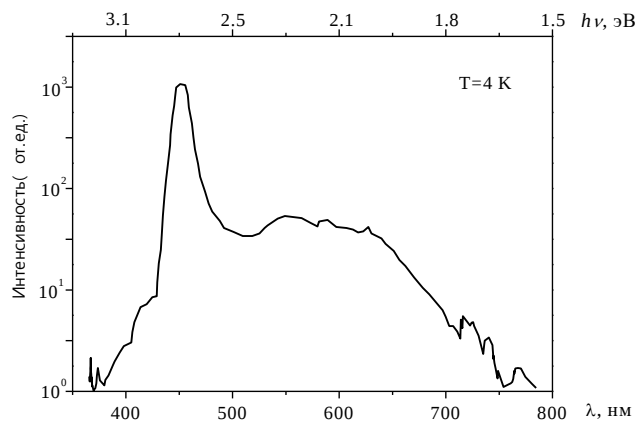
билан ифодалаш мумкин.

Ҳисоблашлар хона ҳароратидаги $\mu_p \tau_p$ кўпайтма $5,79 \cdot 10^{-6}$ см²/В ни, бу маълумотлар асосида асосий заряд ташувчиларнинг яшаш вақти $\tau_p = 1,73 \cdot 10^{-8}$ с ни ташкил этганини кўрсатди. (2) формуладаги экспонентани олд кўпайтмаси J_0

$$J_0 = \frac{kT}{q} \cdot \frac{S \cdot b \cdot ch(W/L_p)}{2(b+1) \cdot L_p \cdot \rho \cdot tg(W/2L_p)} \quad (8)$$

кўринишга эга бўлади.

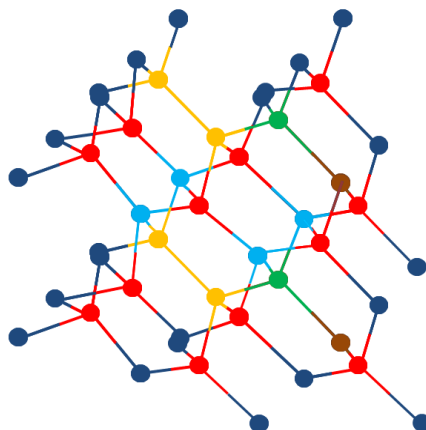
Бу ерда S – намуна сирти, ρ - GaP таглиги ва $(GaAs_{1-\delta}Bi_\delta)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ қаттиқ қоришмаси (яъни p - n ўтиш) орасидаги солиштирма қаршилик. ВАХ сини экспериментал нуқталаридан аниқланган J_0 катталикнинг хона ҳароратидаги қиймати $48 \cdot 10^{-6}$ А га тенг. (8) тенглама ёрдамида ҳисобланган ўтиш қатламининг (таглик ва эпитаксиал пленка) солиштирма қаршилигининг хона ҳароратидаги қиймати $54,3 \cdot 10^4$ Ом·см ни ташкил этди.



10-расм. $(GaAs_{1-\delta}Bi_\delta)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ қаттиқ қоришмасининг 4 К ҳароратдаги фотолюминесценция спектри.

Шунингдек, ўстирилган $(GaAs_{1-\delta}Bi_\delta)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ қаттиқ қоришмали эпитаксал қатламнинг 4 К ҳароратдаги фотолюминесценция спектри ўрганилди. 10-расмда $(GaAs_{1-\delta}Bi_\delta)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ қаттиқ қоришмали эпитаксиал қатламнинг фотолюминесценция спектри келтирилган. Фотолюминесценция суяқ гелий ҳароратида (4 К) эпитаксиал қатламдан лазер нурланиши ($\lambda_L=325$ нм) билан кўзғатилди ва намунадан чиқаётган сигналларни СДЛ-2 детектори ёрдамида қайд қилинди. 10-расмдан, $(GaAs_{1-\delta}Bi_\delta)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ қаттиқ қоришмаси кўзга кўринувчи нурларни тўла

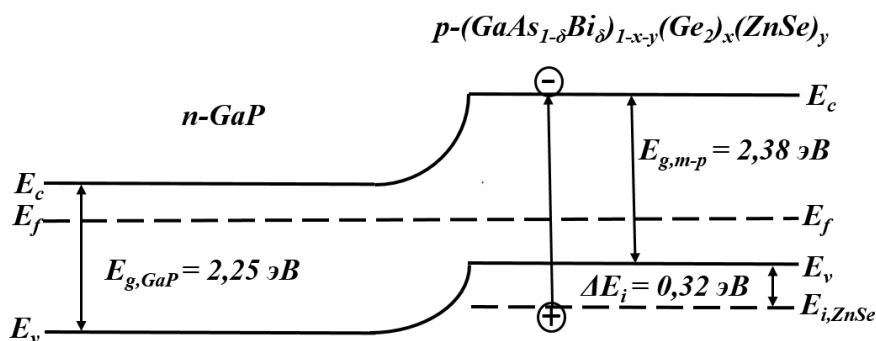
камраб олган кенг спектрга эга бўлиб, энг юқори интенсивликдага фоточўкки $\lambda_{max} = 457$ нм да кузатилган. Бу фоточўкки ZnSe монокристали таъқиқланган соҳаси 2.7 эВ га мос келади.



11-расм. $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ узлуксиз қаттиқ қоришмасининг молекулалари тетраэдрик боғланишининг фазовий конфигурацияси

● – As, ● – Ga, ● – Bi, ● – Ge, ● – Se, ● – Zn.

Маълумки, тоза яримўтказгичли руҳ селен материалида ZnSe молекула атомларини ковалент боғи, яъни $E_{g,\text{ZnSe}} = 2.74$ эВ Ga–As ва Ge–Ge боғларга нисбатан мустаҳкамроқ бўлади. Лекин ZnSe молкулалари қаттиқ қоришма тетраэдр панжарасида GaAsBi бирикмаси ёки жуфтлашган Ge атомлари ўзаро ўрин алмашилиши, яъни уни Ga, As, Bi ва Ge атомлари ўраб олиши натижасида Zn–Se боғ нисбатан кучсизлашади (11-расм).



12-расм. $n\text{-GaP-p-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилмасининг энергетик соҳалари диаграммаси

Ушбу ZnSe бирикмасига тегишли бўлган фоточўққини кенг фотолюминесценция спектрида сезиларли даражада ажралиб туриши $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмаси валент соҳаси шифтидан $\Delta E_i = E_{g,\text{ZnSe}} - E_{g,(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x} = 2.7 - 2.38 = 0.32$ эВ пастда жойлашган 2.7 эВ ионланиш энергиясига эга бўлган энергетик соҳа ҳосил қилаётганидан далолат беради.

3.82 эВ энергияга эга бўлган лазер нурланиши эпитакциал қатламнинг сирти бўйлаб соҳаларида деярли тўлиқ ютилганлиги сабабли, фотолюминесцент нурланиш эпитаксиал қатламнинг ушбу қалинлиги 1 мкм соҳаларида содир бўлади. Бироқ 1,5 мкм чуқурликкача эпитаксиал қатламда ZnSe нинг моляр миқдори 10-14 % ни ташкил этади (5-расм). Шунинг учун,

$(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмасида бундай миқдордаги ZnSe молекулари эпитаксиал қатлам валент соҳасида жойлашган изовалент киришма сатҳини мавжудлигини намоён қилади.

ХУЛОСАЛАР

1. Кристалланишнинг дастлабки ҳароратини $T=750\text{ }^{\circ}\text{C}$ гача ошириш орқали ўсиш оролчаларини бир-бири билан бирлашиб, когерент нанообъектли узлуксиз эпитаксиал қатлам ҳосил бўлиши аниқланди.

2. $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{0.46}(\text{Ge}_2)_{0.31}(\text{ZnSe})_{0.23}$ эпитаксиал қатламларни ўстиришда масса алмашилиш жараёнига тағликлар орасидаги масофа 0,8 мм дан катта бўлганда гравитацион кучлар таъсирида пайдо бўладиган конвексия оқимлари ҳам таъсир этиши аниқланган.

3. Рентгенодифраксия тадқиқотлар ўстирилган плёнкалар (111) кристаллографик ориентацияли, блок ўлчами 62 нм бўлган монокристалли иборат бўлиб, сфалерит тузилишга эга ва плёнканинг кристалл панжараси қиймати $\alpha_{\text{плёнка}} = 5,6268\text{ \AA}$ ни ташкил этишини кўрсатди.

4. $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ қаттиқ қоришмасининг сиртида ва сирти бўйлаб соҳаларда панжара қиймати $\alpha_{\text{ZnSe}} = 5,667\text{ \AA}$ бўлган 66 нмли рух селен нанокристаллар кўринишида ҳосил бўлиши, бу қиймат массив ZnSe нинг панжара ўлчами катталигига яқинлиги аниқланган.

5. $n\text{-GaP}-p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ нинг вольтампер характеристикаси токининг тўғри йўналишдаги даража кўрсаткичи, кучланишни турли соҳаларида ҳар хил қийматга эга бўладиган экспоненциал боғланиш билан таърифланиши аниқланди.

6. $n\text{-GaAs}-p\text{-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетеротузилмасининг фотосезгирлигининг фотонлар энергияси 1.34 эВ га тенг бўлганда максимал қийматга эга бўлишига, гетеротузилмалар қаттиқ қоришмаларини хажми ва бўлиниш чегарасида Ge_2 ва GaAs молекулаларининг ўзаро қисман ўрин алмашишлари туфайли тузилмавий ўзгаришларининг вужудга келиши сабаб эканлиги кўрсатилди.

7. $n\text{-GaP}-p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетеротузилмасини спектрал фотосезгирлиги кўринувчи нурлар соҳаларида ишловчи фотоэлектрон қурилмаларида фотоактив элементи сифатида фойдаланиш мумкинлиги кўрсатилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УСМОНОВ ЖОХОНГИР НИШОНБОЕВИЧ

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
ВИСМУТОСОДЕРЖАЩИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА
ОСНОВЕ GaAs И GaP**

01.04.10-Физика полупроводников

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

Ташкент – 2021

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

Научный руководитель: **Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабидинович**
доктор физико-математических наук, профессор,
академик АН РУз

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

Зикриллаев Нурулла Фатхуллаевич
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Наманганский инженерно-технологический институт**

Защита диссертации состоится «11» 09 2021 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана. (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Тошкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-76-94, факс: (998 71) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института. (зарегистрирована за № 27) по адресу: 100057, Узбекитсан, г. Тошкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.

Автореферат диссертации разослан «27» 08 2021 года.
(реестр протокола рассылки № 27 от «27» 08 2021 г.).



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

 **Ж.Ж.Хамдамов,**
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней. PhD

 **Х.К. Арипов,**
председатель Научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время интенсивное развитие производства микро- и нанoeлектронных полупроводниковых изделий стимулируют исследования в области материаловедения и приборостроения с целью разработки новых типов материалов и структур. В этом направлении наиболее важным является получение многокомпонентных полупроводниковых твердых растворов элементарных полупроводников на основе монокристаллов бинарных соединений GaAs, GaP и других. Изучение их электрических и фотоэлектрических характеристик все более привлекает внимания ученых и производителей своими новыми, ранее неизвестными свойствами. Эти характеристики имеют особое значение в изготовлении электронных изделий с уникальными свойствами такие как высокая фоточувствительность, возможность расширения спектральной области поглощения света, увеличение срока функционирования и быстродействия.

На мировом уровне разработки технологий получения многокомпонентных многослойных полупроводниковых структур с заданными параметрами, определение состояний границ раздела между слоями, влияние наличия примесных элементов и внешних воздействий на параметры конечных продуктов являются перспективными направлениями. Поэтому многие ведущие мировые исследовательские центры уделяют большое внимание технологии получения многокомпонентных тонкослойных твердых растворов и гетероструктур, их составляющих компонентов, изучению влияния примесных атомов, температуры, излучения, влажности и других внешних факторов на электрические и фотоэлектрические свойства полученного материала и электронных изделий на их основе.

В нашей республике ведутся эффективные научные исследования по получению тонкослойных многокомпонентных полупроводниковых твердых растворов и гетеропереходов на основе кремния, германий, арсенида галлия, фосфида галлия и выявления механизмов физических процессов на поверхности и границах раздела различных слоев. В частности, достигнуты определенные результаты в получении доступных и высокоэффективных тонкопленочных гетероструктур с нанообъектами, определение их физических параметров и внедрение их в производство оптоэлектронных изделий. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан отмечены задачи «стимулирование научно-исследовательской и инновационной деятельности, создание эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений в практику, ...»¹. В данном направлении создание новых типов полупроводниковых материалов – твердых растворов для разработки микроэлектронных устройств имеет особое научное значение.

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

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит решению задач, предусмотренных в Постановлениях Президента № ПП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2772 от 13 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017-2021 гг.», № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: III. «Энергия, энергосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Комплексные исследования, проводимые в последние годы в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Ж.И. Алферовым со своими сотрудниками, твердых полупроводниковых растворов и многокомпонентных многослойных гетероструктур, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на основе GaAs показали возможность создания новых типов полупроводниковых лазеров. Высокое значение полученных результатов отмечено Нобелевской премией в области физики. Исследованиями Ж.И. Алферова М.С. Саидова и их последователей налажена технология выращивания твердых растворов и гетероструктур методом жидкофазной эпитаксии. Полученные высококачественные полупроводниковые твердые растворы $\text{Ge}_2(\text{ZnSe})$, $(\text{GaAs})(\text{ZnSe})$ $(\text{GaP})(\text{ZnSe})$ и другие гетероструктуры $p\text{-GaAs-}n\text{-(Ge}_2\text{)}_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ и $p\text{-Si-}n\text{-(GaP)}_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ показали высокую степень совершенства кристаллической структуры, определены механизмы взаимодействия двухатомных молекул GaAs, ZnSe с более узкозонными полупроводниками Ge, Si в твердых растворах приводит к образованию энергетических уровней в валентной зоне, которые позволяют создавать новые типы фотоэлектрических приборов. Ученые из Андижанского государственного университета С.З. Зайнабидинов, А.Й. Бобоев исследовали структурные особенности и электрофизические свойства твердых растворов бинарных соединений и гетероструктур на основе GaAs и определили оптимальные условия получения многокомпонентных $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктур.

Анализ существующей научной литературы по теме диссертации показывает, насколько обширна география исследовательских центров, а также большой интерес к свойствам полупроводниковых твердых растворов и гетероструктур. Несмотря на многочисленные результаты исследований еще

остаётся много нерешенных задач в этой области. Это, прежде всего, совершенство технологий получения твердых растворов и гетероструктур с высокой степенью совершенства, оптимальный подбор элементов многокомпонентных систем, механизмы взаимодействия элементов составляющих компонентов, влияние дефектов структуры и примесных атомов в кристаллах, влияние внешних воздействий на их свойства.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проектов научных исследований Андиганского государственного университета ОТ-Ф2-68 «Механизмы образования примесно-дефектных микро- и нанообъединений в кристаллах и их роль в создании многослойных структур с широкими функциональными возможностями» (2017-2020 гг.) и Андиганского Машиностроительского института по темам: Ф-2-001 «Транспорт носителей заряда и фоточувствительность в полупроводниковом твердом растворе GaAs/Ge/ZnSe при радиационном воздействии» (2016 г.).

Целью исследования является исследование структурных и электрофизических свойств новых многокомпонентных висмутосодержащих гетероструктур на основе GaAs и GaP, а также определение оптимальных технологических условий их получения.

Задачи исследования:

определение термодинамики образования непрерывных пятикомпонентных твердых растворов на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 и A^2B^6 ;

определение оптимальных технологических условий получения тонких пленок $(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ из жидко-кристаллического состояния, содержащего примесные атомы висмута;

исследование структурных особенностей и электрофизических свойств многокомпонентных тонких пленок $(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$;

исследование механизмов самообразования нанокристаллитов $GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta}$ и ZnSe поверхности полученных пленок и определение их структурных параметров;

исследование механизмов токопереноса и фоточувствительности гетероструктур $n-(GaP)-p-(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$.

Объектом исследования являются монокристаллические подложки GaP и GaAs, эпитаксиальные слои $(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$, а также гетероструктуры, изготовленные на их основе.

Предметом исследования являются технологии выращивания и структурный анализ многокомпонентных эпитаксиальных слоев $(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ на подложках GaP и GaAs, полученных методом жидкофазной эпитаксии, определение латеральных размеров, поверхностной плотности и геометрических форм нанокристаллов на поверхности эпитаксиального слоя, а также их фото- и электрических свойств.

Методы исследований. В ходе исследований для получения тонких пленок использовались метод жидкофазной эпитаксии, рентгеновский дифрактометр XRD-6100 (Shimadzu) для структурного анализа, атомно-силовой микроскоп (Solver NexT) для морфологического анализа, оптический монохроматор фирмы CARLZEISJENA для определения спектральной фоточувствительности, а также другие стандартные устройства.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

выявлено, что структурные параметры многослойных тонких пленок твердых растворов $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, выращенные на поверхности монокристаллических подложек GaP и GaAs с кристаллографическими ориентациями (111) и (100) соответственно, полностью соответствуют параметрам качественных пленок;

определены оптимальные технологические режимы выращивания эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ методом жидкофазной эпитаксии из висмутосодержащего раствора-расплава;

установлено, что выращенные пленки $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ являются монокристаллическими с ориентацией (111), состоящие из наноблоков с размерами 62 нм, которые имеют сфалеритную структуру, а параметр кристаллической решетки пленки составляет $a_f = 0,5656$ нм;

установлено, что максимальная спектральная фоточувствительность гетероструктуры $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ при энергии фотонов, равной 1,34 эВ возникает в результате частичного взаимообмена местами молекулы Ge_2 с молекулами GaAs на границе n - p -перехода.

Практические результаты исследования заключаются в следующем::

Гетероструктуры $n\text{-GaP-}p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ могут быть использованы как выпрямительный диод и как фотоэлемент для фотопреобразователей, работающих в видимой и ультрафиолетовой областях спектра излучений.

Достоверность результатов исследований обосновывается на использовании хорошо апробированных экспериментальных и комплексных независимых методов: электрических и светочувствительных приборов, инфракрасных и рентгеновских спектрометров, атомно-силовой микроскопии; хорошей воспроизводимостью результатов; непротиворечивостью выводов обще физическим представлениям подобных явлений; сопоставлением их с литературными данными и визуальным наблюдением.

Научная и практическая значимость результатов исследований

Научная значимость результатов исследований заключается в определении механизмов переноса заряда многокомпонентных твердых растворах в многослойных гетероструктурах, и в теоретическом обосновании природы селективной чувствительности гетероструктур типа $n\text{-GaP-}p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$.

Практическая значимость результатов исследования заключается в определении оптимальных технологических условий получения тонких слоев

многокомпонентных гетероструктур для использования их в производстве электронных приборов и изделий.

Внедрение результатов исследования.

На основе научных результатов, полученных по выращиванию эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ методом жидкофазной эпитаксии из висмутосодержащего раствора-расплава и исследований их электрофизических свойств:

методы определения влияния на размер, форму и их плотности квантовых нанообъектов диапазона температур роста, скорости охлаждения и технологических условий применен при выполнении гранта Института ядерной физики № Ф2-ФА-Ф120 (2012-2016 г.г.) на тему «Электронные свойства и радиационная модификация низкоразмерных высоко температурных сверхпроводников, полупроводниковых гетероструктур, металлов и их оксидов». (Справка Академии Наук Республики Узбекистан за № 2/1255-1051 от 12 апреля 2021 г.);

Результаты по получению гетероструктур на основе GaAs/Bi/Ge/ZnSe, управлению природой и распределением образующихся в них нанообъектов, применения их в электронных изделиях в качестве фотоактивного элемента в области видимых и ультрафиолетовых лучей были использованы на АО «ФОТОН» при производстве полупроводниковых электронных устройств (Справка № 04-3/645 Акционерной компании «Узэлтехсаноат» от 5 апреля 2021 года).

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ в том числе 8 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Кабинете Министров Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она изложена на 120 страницах, включая 27 рисунков, 7 таблиц и список использованной литературы из 100 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **вводной** части приводятся актуальность темы диссертационной работы, обоснованы цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость работы, кратко описаны основные полученные результаты и сведения о внедрении результатов.

В первой главе под названием «**Свойства многокомпонентных эпитаксиальных пленок на основе полупроводников A^3B^5 и A^2B^6** », приведен краткий литературный обзор о методах выращивания твердых растворов $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, электрофизических и структурных свойств, а

также возможностях получения тонких пленок многокомпонентных твердых растворов на их основе методом жидкофазной эпитаксии.

Анализ литературных данных показал, что, подробно исследованы свойства полупроводниковых двойных и тройных твердых растворов, технологии их получения, структурные характеристики и физические свойства. Слоистый характер полупроводниковых многокомпонентных гетероструктур приводит к изменению фононного спектра кристаллической решетки твердого раствора и энергетического спектра электронов, следствием которого является увеличение подвижности электронов по сравнению с подвижностью электронов в элементарных полупроводниках.

В многокомпонентных полупроводниковых твердых растворах предполагается, что увеличение электронной подвижности происходит из-за того, что гетеропереход имеет резкую границу между слоями, причины которой остаются неясной. Поэтому получение и исследование физических свойств многокомпонентных полупроводниковых твердых растворов является одной из актуальных проблем физики и технологий современной полупроводниковой электроники.

Во второй главе «Технология получения и методы исследований» посвященной описанию экспериментальных методов исследований твердых растворов $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, описаны методы и технология получения эпитаксиальных слоев из жидкой фазы и описание установок для исследования структуры и электрических характеристик полупроводниковых материалов.

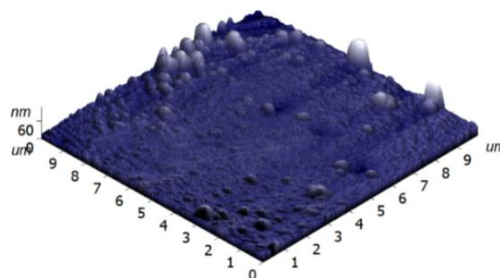


Рис. 1. Атомно-силовое микроскопическое изображение поверхности твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, выращенных при температуре $T_{\text{н.к.}}=730\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выращивание твердых растворов $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ проводилось на подложках GaP методом жидкофазной эпитаксии из висмутосодержащего раствора-расплава. Подложки были ориентированы по направлениям (111). Температура начала кристаллизации при этом составляла $750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Состав раствора-расплава Bi-GaAs-Ge-ZnSe, соответствующий температуре начала кристаллизация также определялся на основе предварительных опытов.

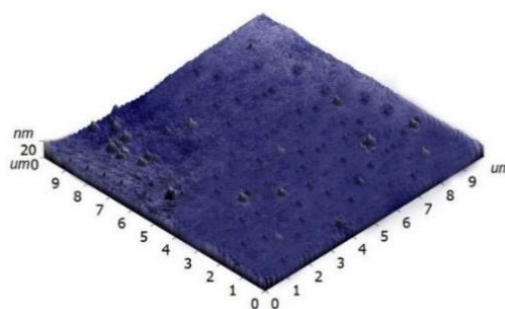


Рис. 2. Атомно-силовое микроскопическое изображение поверхности твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, выращенных при температуре $T_{\text{н.к.}}=750\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Поскольку раствор-расплав не насыщен по отношению к арсениду галлия, рост осуществлялся погружением подложек в раствор-расплав, переохлажденный на несколько градусов. Эксперименты показали, что оптимальная величина начального переохлаждения, необходимая для предотвращения подрастворения подложек, составляет $\Delta T=6-8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Проведенные морфологические исследования полученных слоев с помощью атомно-силового микроскопа «Solver-NEXT», показали что получить сплошные эпитаксиальные слои твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ удовлетворительного качества на подложках GaP не удастся. При температуре начала эпитаксии $T=730\text{ }^{\circ}\text{C}$ на подложках GaP получены только островки роста.

С увеличением температуры начала эпитаксии до $T=750\text{ }^{\circ}\text{C}$ островки роста сливались между собой, образуя сплошной слой. Однако, такие слои имели матовую поверхность и множества наноразмерных объектов, т.е. наноструктуры (рис.1). Такого результата следовало ожидать, поскольку, несоответствие решеток ($a_{\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta}}=5.9\text{ \AA}$) ($a_{\text{GaAs}}\approx a_{\text{Ge}}\approx a_{\text{ZnSe}}=5.6\text{ \AA}$) в данном случае составляет 4%. Кроме того, линейные коэффициенты термического расширения между собой сильно различаются: при комнатной температуре $\alpha_{\text{GaP}}=5,3\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, $\alpha_{\text{GaAs}}=6,4\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, $\alpha_{\text{GaAs}}=6,1\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$ и $\alpha_{\text{ZnSe}}=7\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$.

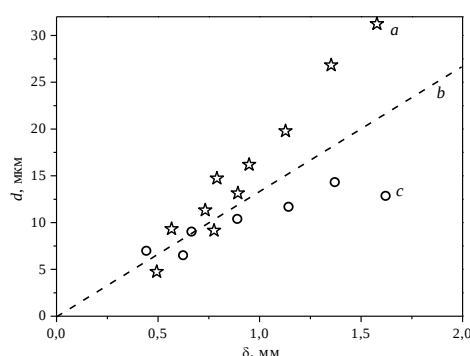


Рис. 3. Зависимости толщины эпитаксиальных слоев твердых растворов $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ от зазора между подложками. *a* – для верхней подложки, *b* – теоритическая зависимость, *c* – для нижней подложки.

Такое различие коэффициентов термического расширения вероятно привело к растрескиванию эпитаксиальных слоев твердых растворов $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, которые наблюдались в экспериментах.

Как видно на рис. 3, экспериментальные данные, в пределах ошибок измерения толщины, ложатся на прямой, описываемой выражением

$$d_{(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y} = \frac{\delta}{2} \left[\frac{A_1}{\rho_1} (1-x-y) + \frac{A_2}{\rho_2} x + \frac{A_3}{\rho_3} y \right] \cdot \frac{\rho}{A} [C_1 + C_2 + C_3] \quad (1)$$

до достижения величины зазора $\approx 0,8$ мм, после чего экспериментальные кривые как для нижних, так и для верхних подложек сильно расходятся от теоретических. Где, x и y -содержание Ge и ZnSe в твердом раствора, A_1, A_2, A_3, A и $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho$ молекулярные веса и плотности арсенида галлия, германия, селенида цинка и висмута соответственно: C_1, C_2, C_3 молекулярные доли арсенида галлия, германия и селенида цинка в жидкой фазе: δ величина зазора между подложками. Поскольку молекулярные веса и плотности германия и селенида цинка очень близки между собой по величине, $\frac{A_1}{\rho_1} \approx \frac{A_2}{\rho_2} \approx \frac{A_3}{\rho_3}$ то наклоны теоретических прямых, описываемых выражением (1) почти одинаковы для разных « x » и « y ».

Следует также отметить, что структурное совершенство слоев твердых растворов, выращенных на нижних и верхних подложках также отличаются между собой. Более совершенные эпитаксиальные слои с гладкой поверхностью при прочих равных условиях получаются на нижних подложках.

Также отметим, что с увеличением температуры начала эпитаксии структурное совершенство слоев, выращенных как на нижних, так и на верхних подложках, улучшается.

Полученные зависимости толщины эпитаксиальных слоев от величины зазора « δ » при больших зазорах можно объяснить следующим образом (рис.4). В растворе-расплаве, выдержанном при определенной температуре, растворенные компоненты распределяются однородно по всему объему раствора-расплава и поскольку раствор-расплав был насыщен как по отношению к германию, так и по отношению к селенида цинка, то возникают выделения твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ в жидкой фазе, которые начинают перераспределяться в растворе-расплаве под влиянием гравитационного поля. Таким образом, в растворе-расплаве возникают конвекционные потоки. Поскольку, плотность твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ ниже плотности растворителя, то такие конвекционные потоки усиливают подвод массы твердого раствора к верхнему фронту кристаллизации.

Поэтому, при прочих равных условиях, фактическая скорость роста слоев на верхней подложке значительно выше, что вероятно, способствует образованию более толстых пленок. Увеличение скорости роста приводит также к ухудшению структурного совершенства слоев. При зазорах меньших, чем 0,8 мм, вероятно, условия для образования конвекционных потоков в растворе-расплаве недостаточны и рост осуществляется только за счет молекулярной диффузии компонентов.

Таким образом, рост слоев осуществляли принудительным охлаждением в атмосфере очищенного палладием водорода со скоростью 1–1.5 град/мин. Кристаллизацию слоев проводили в интервале температур 750–650°C. Выращенные эпитаксиальные пленки имели толщины до 10 $\mu\text{м}$ и p -тип проводимости с удельными сопротивлениями около 10 Ом·см и концентрацией носителей $1.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

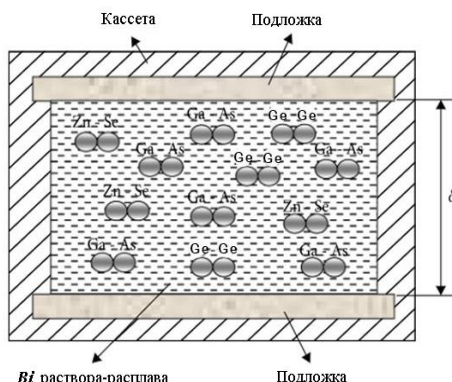


Рис. 4. Схема распределения компонентов в растворе-расплаве находящегося между подложками при $\delta > 0.8 \text{ мм}$ во время кристаллизации.

Структурные исследования подложек и эпитаксиальных пленок были выполнены на XRD-6100 (Shimadzu, Япония). Рентгеновское напряжение составляет 40,0 (кВ), а ток - 30,0 (мА). Экспериментальные результаты, полученные с помощью XRD-6100, изучались методом Ритвельда с использованием программы Fullprof.

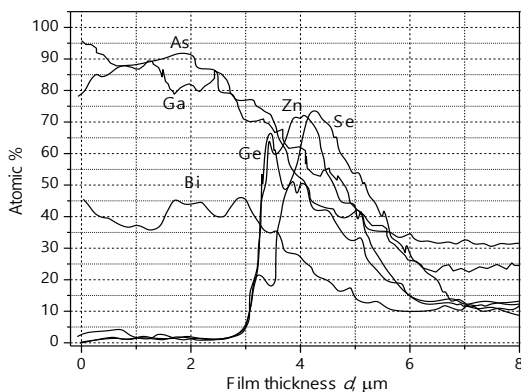


Рис. 5. Распределение $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$, Ge_2 и ZnSe по толщине эпитаксиальных слоев твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$.

Химический состав поверхности и уклон эпитаксиальных слоев твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ были изучены с помощью рентгеновского микроанализатора «Jeol» JSM 5910 LV-Япония. Результаты анализа показали, что распределение содержания Ge, Zn и Se в пленке с толщиной до трех микронов имеет равномерный характер. От 3 до 7 мкм распределение резко изменяется и имеет почти гауссовский вид. В этом интервале толщины для элементов Ga, As и Bi это распределение имеет тенденцию постепенного уменьшения их содержания. И далее для всех элементов устанавливается равномерное распределение их содержания, но с различными значениями: для галлия составляет 24 ат.%, для мышьяка 12 ат.%,

для висмута 10 ат.%, для германия 31 ат.%, для селена 9 ат. % и для цинка 14 ат.%, что соответствует условиям образования твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{0.46}(\text{Ge}_2)_{0.31}(\text{ZnSe})_{0.23}$.

В третьей главе «Структуры и морфология твердых растворов с нанокристаллитами» представлены результаты исследований структуры подложку GaP и выращенные эпитаксиальные слои $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, а также электронно-микроскопические исследования таких твердых растворов

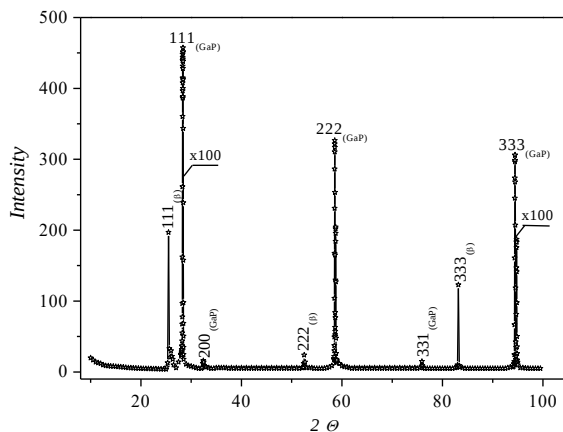


Рис. 6. Рентгенограмма подложки GaP.

На рис. 6 представлена рентгенограмма подложки – монокристалла GaP. Видно, что в дифракционной картине присутствуют несколько структурных рефлексов селективного характера с различной интенсивностью. Анализ показал, что поверхность подложки соответствует кристаллографической плоскости (111). Об этом свидетельствуют присутствие на рентгенограмме серии селективных рефлексов (ННН) (где Н=1,2,3...), интенсивные линии $(111)_{\text{GaP}}$ с $d/n = 0,3141$ ($2\theta = 28,4^\circ$) и $(333)_{\text{GaP}}$ с $d/n = 1,046 \text{ \AA}$ ($2\theta = 94,9^\circ$). Их β составлявшие видны при углах рассеяний $2\theta = 25,7^\circ$ и $2\theta = 83,3^\circ$, соответственно.

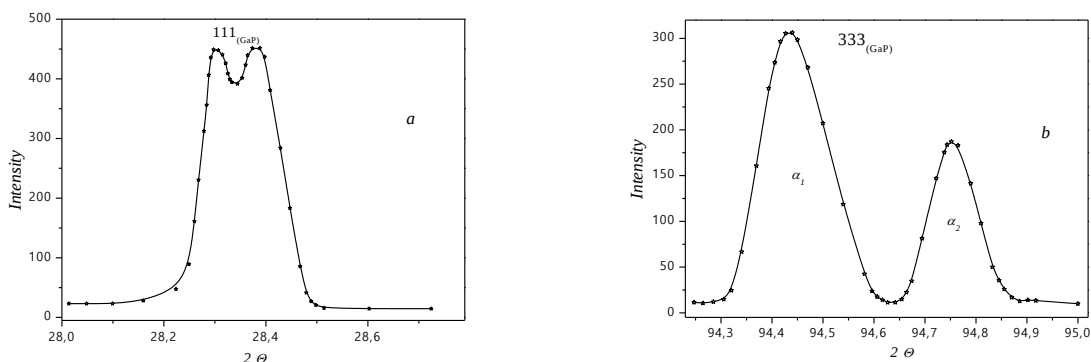


Рис. 7. Формы рефлексов (111) (a) и (333) (b) подложки GaP.

В дифракционном спектре при достаточно больших углах рассеяния выделяется структурный рефлекс $(331)_{\text{GaP}}$ с $d/n = 1,2479 \text{ \AA}$ ($2\theta = 76,3^\circ$) с очень слабой интенсивностью от кристаллической решетки подложки. Большая интенсивность основного рефлекса и узкая ширина, также монотонный характер уровня неупругого фона рентгенограммы свидетельствуют о

совершенстве кристаллической решетки подложки. Однако, слабое расщепление основного рефлекса по α_1 и α_2 излучениям, то есть его искаженная форма (рис. 7, а) показывают наличие упругого микронапряжения в решетке подложки. Этот вывод подтверждается присутствием на рентгенограмме запрещенного отражения $(200)_{\text{GaP}}$ с $d/n = 2,7473 \text{ \AA}$ и $(222)_{\text{GaP}}$ с $d/n = 1,5684 \text{ \AA}$ для решетки фосфида галлия их интенсивность относятся к интенсивности основного пика $(111)_{\text{GaP}}$, как $I(200)/I(111) = 3.55 \times 10^{-4}$ и $I(22)/I(111) = 7,2 \times 10^{-3}$, что больше чем 10^{-4} .

Эти факты свидетельствуют о неоднородном распределении атомов фосфида галлия по междоузлиям матричной решетки подложки и наличии локальных областей с микроискажениями. По закону погасания дифракционных отражений, рефлекс $(222)_{\text{GaP}}$ не должен присутствовать на рентгенограмме неискаженной решетки алмазоподобной структуры. Он появляется только при наличии искажений (упругого микронапряжения) в решетке. Хорошие (близкие к расчетному) расщепления рефлекса $(333)_{\text{GaP}}$ с $d/n = 1,046 \text{ \AA}$ ($2\theta = 94,9^\circ$) по α_1 и α_2 излучениям (рис. 7 б) и слабое расщепление основного отражения $(111)_{\text{GaP}}$ (рис. 7 а) свидетельствует о том, что упругое напряжение в основном сосредоточено на приповерхностном слое подложки.

Экспериментальное значение параметра решетки подложки составляло $a_s = 5,448 \text{ \AA}$, что сравнимо с табличным значением $a_{\text{GaP}} = 5,445 \text{ \AA}^2$. Это показывает то, что объемная доля искаженной области решетки составляет ничтожную малую величину по сравнению со всем объемом монокристалла.

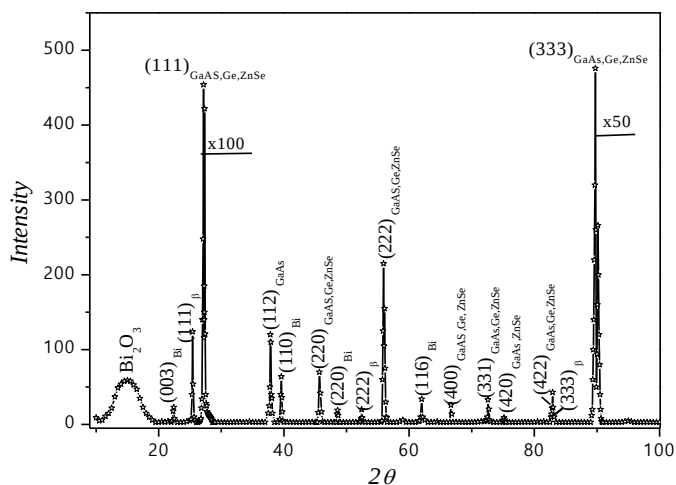


Рис. 8. Рентгенограмма структуры эпитаксиальной пленки – $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$.

На рис. 8 представлена рентгенограмма выращенной эпитаксиальной пленки $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. Она существенно отличается от рентгенограммы подложки в ней присутствуют несколько селективных структурных рефлексов с различной по величине интенсивности.

²Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. –Л.: Химия, 1983. –232 с.

Анализ этих результатов показал, что на рентгенограмме присутствует серия селективных рефлексов типа $\{HKL\}$ (где $H, K, L=1, 2, 3, \dots$) с большой интенсивностью; структурные линии $(111)_{\text{GaAs, Ge, ZnSe}}$ с $d/n = 3.44 \text{ \AA}$, $(222)_{\text{GaAs, Ge, ZnSe}}$ с $d/n = 1.631 \text{ \AA}$ и $(333)_{\text{GaAs, Ge, ZnSe}}$ с $d/n = 0.9422 \text{ \AA}$, которые свидетельствуют о том, что поверхность полученных пленок соответствует кристаллографической плоскости (111) . Их β – составляющие видны при углах рассеяния $2\theta_{(200)} = 25.6^\circ$, $2\theta_{(400)} = 52.8^\circ$ и $2\theta_{(600)} = 83.5^\circ$, соответственно. Кроме того, на рентгенограмме появились новые структурные линии с различными интенсивностями; $(112)_{\text{GaAs}}$ с $d/n = 2.305 \text{ \AA}$ ($2\theta = 38.5^\circ$), $(110)_{\text{Bi}}$ с $d/n = 2.273 \text{ \AA}$ ($2\theta = 39.4^\circ$), $(220)_{\text{GaAs, Ge, ZnSe}}$ с $d/n = 2.001 \text{ \AA}$ ($2\theta = 45.19^\circ$), $(220)_{\text{Bi}}$ с $d/n = 1.868 \text{ \AA}$ ($2\theta = 48.46^\circ$), $(116)_{\text{Bi}}$ с $d/n = 1.491 \text{ \AA}$ ($2\theta = 62.16^\circ$), $(331)_{\text{GaAs, Ge, ZnSe}}$ с $d/n = 1.297 \text{ \AA}$ ($2\theta = 72.68^\circ$) и $(422)_{\text{GaAs, Ge, ZnSe}}$ с $d/n = 1.155 \text{ \AA}$ ($2\theta = 83.46^\circ$).

На рентгенограмме также видно присутствие еще трех, более слабо запрещенных отражений $(003)_{\text{Bi}}$ с $d/n = 3.955 \text{ \AA}$ ($2\theta = 22.3^\circ$), $(400)_{\text{GaAs, Ge, ZnSe}}$ с $d/n = 1.413 \text{ \AA}$ ($2\theta = 66.1^\circ$) и $(420)_{\text{GaAs, ZnSe}}$ с $d/n = 1.245 \text{ \AA}$ ($2\theta = 75.1^\circ$) наблюдаемых для сфалеритных структур. Соотношение их интенсивностей к интенсивностям основного рефлекса (111) , оцениваются как $I(003)/I(400) = 5.1 \times 10^{-4}$, $I(400)/I(111) = 5.7 \times 10^{-4}$ и $I(420)/I(111) = 2 \cdot 10^{-4}$, соответственно. Эти значения несколько больше величины 10^{-4} , соответствующую равномерному распределению примесей в алмазаподобной решетке³. Узкая ширина ($FWHM = 5.51 \cdot 10^{-3}$ рад) и большая интенсивность ($2 \cdot 10^5$ имп·с⁻¹) основного рефлекса $(111)_{\text{GaAs, Ge, ZnSe}}$ свидетельствует о высокой степени совершенства кристаллической решетки твердого раствора, то есть выращенная пленка является монокристаллической, с ориентацией (111) . Экспериментально определенная величина параметра решетки и размеры субкристаллитов (блоков) пленки, оцененные по ширине данного пика, составили около $a_f = 0,5656 \text{ \AA}$ и $620 \text{ \AA}$, соответственно.

В четвертой главе под названием «Электрофизические и фотоэлектрические свойства висмутосодержащих гетероструктур с нанобъектами» приведены результаты исследований темновых вольтамперных характеристик при различных температурах и спектральные зависимости фоточувствительности изготовленных гетероструктур.

³Шулпина И.Л., Кютт Р.Н., Ратников В.В., Прохоров И.А., Безбах И.Ж., Щеглов М.П.. Методы рентгеновской дифракционной диагностики сильнолегированных монокристаллов полупроводников. Журнал технической физики 2010, Том. 80, Вып. 4. стр.105-114.

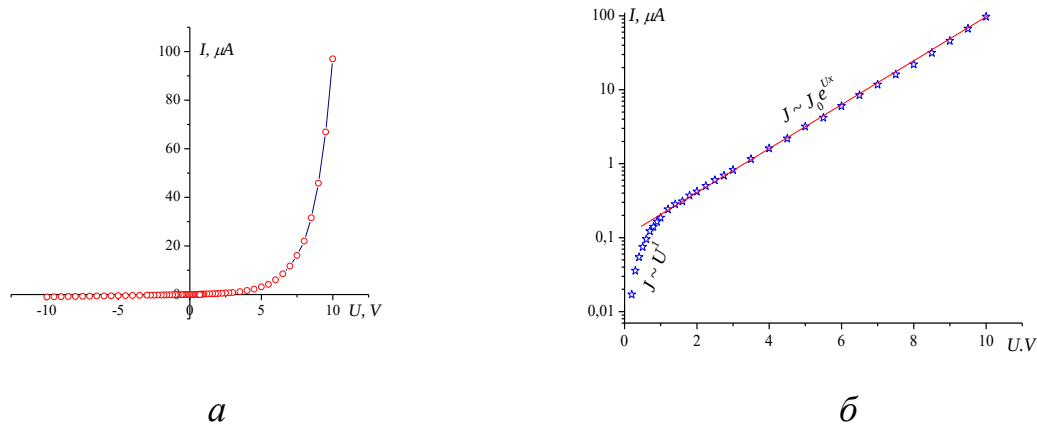


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика структур $n\text{-GaP} - p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ (а) и ее прямая ветвь в логарифмическом масштабе (б).

Для исследований вольтамперных характеристик (ВАХ) гетероструктур $n\text{-GaP} - p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ создавались омические контакты путем вакуумного напыления серебра на структуру. Типичная ВАХ и ее прямая ветвь, измеренные при комнатной температуре, представлены на рис. 9. а. Структура имеет хорошие выпрямляющие свойства с коэффициентом выпрямления, определяемым как отношение силы прямого тока (J_{dir}) к обратному (J_{rev}) при одинаковых значениях приложенного напряжения $k = J_{\text{dir}}/J_{\text{rev}}$, принимающие значения от 2 до 100 при изменении подаваемого напряжения от 0.7 до 10 В.

В диапазоне напряжений до 10 В в прямом направлении ВАХ не наблюдается насыщение тока, что свидетельствует о низкой плотности поверхностных состояний. Начальный участок от нуля до 0,5 В представляет собой омический участок с показателем $\alpha = 1$, т.е. имеется зависимость $J \approx U^\alpha$. Из рис. 9-б. видно, что зависимость тока от напряжения представляет собой экспоненциальную зависимость типа $J \sim J_0 e^{U/x}$. Из анализа вольтамперной характеристики следует, что ее следующий участок хорошо описывается экспоненциальной зависимостью вида

$$J = J_0 e^{\frac{qU}{ckT}} \quad (2)$$

с предэкспоненциальным множителем $J_0 = 48 \mu\text{A}$. При этих напряжениях ток через $p\text{-}n$ структуры определяется, в основном, диффузией неравновесных носителей⁴, и в значительной степени зависит от величины – «с» в показателе экспоненты который может быть вычислен из экспериментальных данных вольтамперной характеристики с помощью соотношения

$$c = \frac{q(U_2 - U_1)}{kT \cdot \ln(I_2 / I_1)} \quad (3)$$

Для рассматриваемого нами случая, показатель «с» в экспоненте при комнатной температуре имеет значение $c \approx 24,4$. Это, в соответствии с отношениями (2) указывает, что наши структуры имеют длинную базу. С

⁴Стафеев В.И. Влияния сопротивления толщи полупроводника на вид вольтамперной характеристики диода // ЖТФ. 1958.– т.28, в.8.– С.1631-1641.

другой стороны параметр «с» по теории В.И. Стафеева зависит от соотношения подвижностей электронов и дырок, толщины базы и диффузионной длины неосновных носителей.

$$c = \frac{2b + ch(W / L_p) + 1}{b + 1} \quad (4)$$

В нашем случае $d = 10$ мкм, L_p - диффузионная длина основных носителей – дырок, определяется формулой⁵:

$$L_p = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 kT}{q^2 p}} \quad (5)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, определяются из экспериментальных данных с помощью формулы $C = \varepsilon \varepsilon_0 S/d$, (ε_0 – диэлектрическая постоянная, q и p – заряд и концентрация основных носителей);

$$b = \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (6)$$

- отношение подвижностей электронов и дырок. Используя для $W=20$ мкм, и $b=2.87$, из (5) находим значение $L_p \sim 3,87 \cdot 10^{-6}$ м. Подвижность основных носителей – дырок, определенная по методу Холла, составляла $\mu_p = 405$ см²/В·с. (для оценки принималось значение подвижности неосновных носителей через $\mu_n = b \cdot \mu_p = 1162,4$ см²/(В·с).) Произведение подвижности на время жизни основных носителей ($\mu_p \tau_p$) можно выразить как:

$$\mu_p \tau_p = \frac{q L_p^2}{kT} \quad (7)$$

Расчеты показали, что при комнатной температуре произведение $\mu_p \tau_p$ имеет значения $\sim 5,79 \cdot 10^{-6}$ см²/В; на основе этих данных определено время жизни основных носителей: $\tau_p = 1,73 \cdot 10^{-8}$ с.

Пред экспоненциальный множитель I_0 в формуле (2) имеет вид:

$$J_0 = \frac{kT}{q} \cdot \frac{S \cdot b \cdot ch(W/L_p)}{2(b+1) \cdot L_p \cdot \rho \cdot tg(W/2L_p)} \quad (8)$$

где S – площадь образца, ρ - удельное сопротивление между подложками GaP и твердого раствора $(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ (т.е. p - n перехода). Значение J_0 , определенное из экспериментальных точек кривых ВАХ, при комнатной температуре равнялось $48 \cdot 10^{-6}$ А. С помощью уравнения (8) было вычислено удельные сопротивления ρ переходного слоя (подложка и эпитаксиальная пленка) которая составляла $54,3 \cdot 10^4$ Ом·см при комнатной температуре.

⁵ А.С. Саидов, Ш.Н. Усмонов, М.У. Каланов, К.А. Амонов. Альтернативная энергетика и экология. №15. №137. 2013. ст. 41-45.

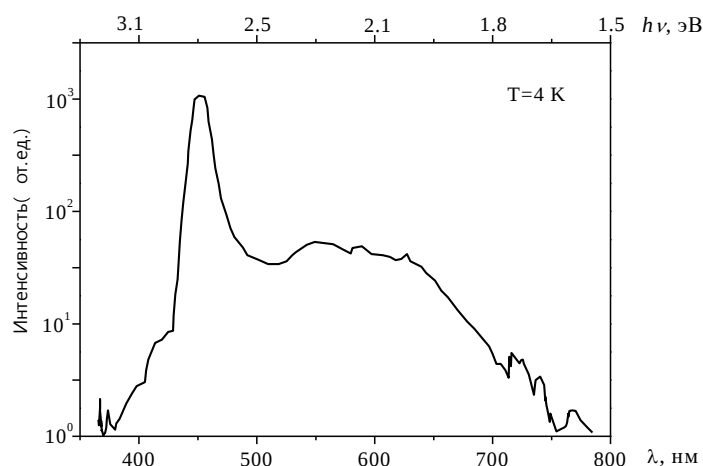


Рис. 10. Спектр фотолюминесценции поверхности твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, при температуре 4 К.

Так же были определены спектр фотолюминесценции (ФЛ) поверхности твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, при температуре 4 К. На рис.10. приведена спектр ФЛ поверхности эпитаксиального слоя $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. Возбуждение ФЛ производилось лазерным излучением ($\lambda_{\text{л}}=325$ нм) со стороны эпитаксиального слоя при температуре жидкого гелия (4 К), сигнал регистрировался на установке СДЛ-2. Как видно из рис.10 спектр ФЛ твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ имеет широкую полосу, охватывающую практически весь видимый диапазон спектра излучения с максимумом пика при $\lambda_{\text{max}} = 457$ нм. Этот пик соответствует ширине запрещенной зоны ZnSe, равной 2.7 эВ.

Известно, что ковалентная связь атомов молекул ZnSe в чистом полупроводниковом материале селенида-цинка, выражаемая как $E_{g,\text{ZnSe}} = 2.74$ эВ прочнее, чем связь Ga–As и Ge–Ge. Но, когда молекула ZnSe замещает молекулы GaAsBi или Ge_2 в тетраэдрической решетке связь Zn–Se ослабевает под влиянием окружающих ее атомов Ga, As и Ge (рис. 11).

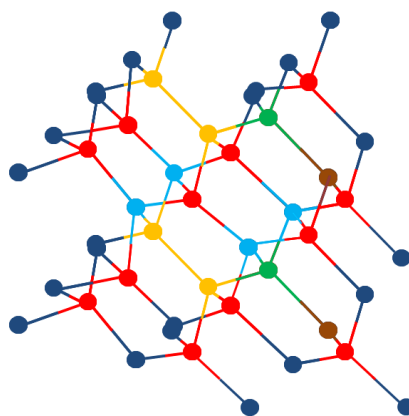


Рис. 11. Пространственная конфигурация тетраэдрических связей молекул непрерывного твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$
 ● – As, ● – Ga, ● – Bi, ● – Ge, ● – Se, ● – Zn.

Явное выделение пика излучения ZnSe на фоне широкого спектра ФЛ, по видимому, свидетельствует о возникновении энергетического уровня с энергией ионизации 2.7 эВ, расположенной на $\Delta E_i = E_{g,\text{ZnSe}} - E_{g,(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x}$

$= 2.7 - 2.38 = 0.32$ эВ ниже потолка валентной зоны базового полупроводника $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$.

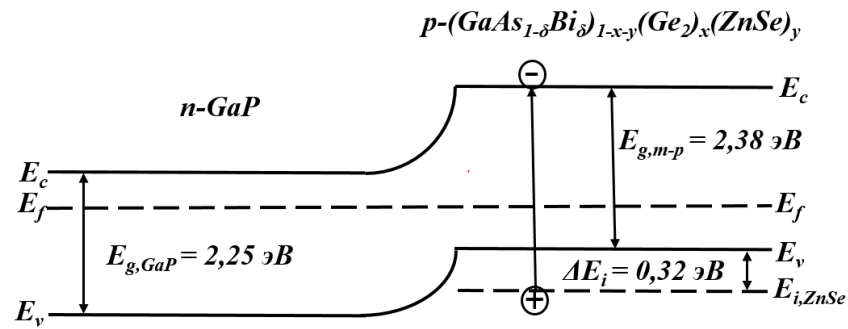


Рис. 12. Энергетическая зонная диаграмма $n\text{-GaP-p-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктуры.

Поскольку, подаваемое лазерное излучение с энергией 3.82 эВ практически полностью поглощается на приповерхностной области эпитаксиального слоя толщиной ~ 1 мкм, то фотолюминесцентное излучение происходит именно с этой области пленки. Однако до глубины 1.5 мкм молярное содержание ZnSe в пленке составляет $10 \div 14$ % (рис. 5). Это означает что при содержании такого количества молекул ZnSe в твердом растворе $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ свидетельствует оналичии изовалентного примесного с уровня, расположенного в валентной зоне пленки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определено, что увеличение температуры начала кристаллизации до $T = 750$ °С островки роста сливались между собой, образуя сплошной слой с когерентными нанообъектами.

2. Определены, что при зазорах между подложками больших 0,8 мм на процесс массоподвода, при выращивании эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{0.46}(\text{Ge}_2)_{0.31}(\text{ZnSe})_{0.23}$, влияют также конвекционные потоки, возникающие под действием силы гравитации.

3. Рентгенодифракционные исследования показали, что выращенные пленки являются монокристаллическими с ориентацией (111), с размером блоков 62 нм, и имеют сфалеритную структуру, а параметр кристаллической решетки пленки составляет $\alpha_{\text{пленка}} = 5,6268$ Å.

4. Выявлено, что на поверхности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ образуются нанокристаллиты размерами 66 нм в форме nanoостровков селенида цинка с параметром решетки $\alpha_{\text{ZnSe}} = 5,667$ Å, которые близки к размеру решетки массивного ZnSe.

5. Обнаружено, что вольтамперная характеристика $n\text{-GaP} - p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктур в прямом направлении тока хорошо описывается экспоненциальной зависимостью, с различными показателями степени экспоненты для различных участков напряжения;

6. Определено, что наблюдаемая максимальная фоточувствительность гетероструктур $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ при энергии фотонов 1,34 эВ

является следствием изменения структур в объеме и на границах раздела твердых растворов, связанных с частичными взаимно-обменными процессами между молекулами Ge_2 и GaAs .

7. Показано, что $n\text{-GaP}-p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктуры могут быть использованы как фотоактивный элемент фотоэлектрических изделий, работающих в видимой области спектра излучения.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON THE
AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND
MICROELECTRONICS AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

ANDIJAN STATE UNIVERSITY

USMONOV JOXONGIR NISHONBOEVICH

**PHYSICAL PROPERTIES OF MULTICOMPONENT BISMUTH-
CONTAINING HETEROSTRUCTURES BASED ON GaAs AND GaP**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent - 2021

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2021.1.PhD/FM264.

The dissertation was carried out at the Andijan state university.

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

Scientific supervisor:	Zaynabidinov Sirojiddin Zaynabidinovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor. Academician of the AS RUz
Official opponents:	Aripov Xayrulla Kabilovich Doctor of Physical and Mathematical, Sciences, Professor Zikrillaev Nurulla Fatxullaevich Doctor of Physical and Mathematical, Sciences, Professor
Leading organization:	Namangan Institute of Engineering and Technology

The defense of the doctoral dissertation will be held on «11» 09 2021, at 10⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 on awarding scientific degrees of under Research Institute of semiconductor physics and microelectronics at the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Toshkent city, Uzbekistan. Phone: (99871) 248-79-94, fax: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

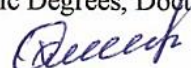
The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No 27). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Toshkent city, Uzbekistan. Phone: (99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on «27» 08 2021.
(Registry record No. 27 dated «27» 08 2021).




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


J.J. Khamdamov
Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees, Doctor of philosophy (PhD)


Kh.K. Aripov
Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific Council
On Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and
Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the research work is obtaining new multicomponent bismuth-containing heterostructures based on GaAs and GaP and studying their electrophysical properties.

The object of investigation is GaP single-crystal substrate and epitaxial layers $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, as well as heterostructures prepared on their basis.

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

it was determined that thin films $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, grown on the surface of single-crystal GaP and GaAs substrates, with crystallographic orientations (111) and (100), respectively, in their structural parameters fully correspond to properties of high-quality thin films;

the optimal technological modes of growing structurally perfect epitaxial layers $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ are determined) and for the first time, a solid solution was obtained from a bismuth-containing melt solution by liquid-phase epitaxy;

it was found that the grown films $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ are single-crystal with orientation (111), consisting of nanoblocks with dimensions of 62 nm, which have a sphalerite structure, and the crystal lattice parameter of the film is $a_f = 0.5656$ nm;

it was found that the maximum spectral photosensitivity of the n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge) $_x$ heterostructure at a photon energy equal to 1.34 eV arises as a result of partial interchange of places of the Ge $_2$ molecule with GaAs molecules at the n - p junction boundary.

Implementation of the research results. Based on the obtained scientific results by growing epitaxial layers $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ by the method of liquid-phase epitaxy from the bismuth-containing solution-melt and studies of their electrophysical properties:

methods for determining the influence of quantum nanoobjects on the size, shape, and density of their growth temperature range, cooling rate, and technological conditions were applied in the implementation of the grant of the Institute of Nuclear Physics No. F2-FA-F120 (2012-2016) on the topic "Electronic properties and radiation modification of low-dimensional high-temperature superconductors, semiconductor heterostructures, metals and their oxides". (Certificate of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2/1255-1051 dated April 12, 2021);

from the results obtained on the production of gyrotechnics based on GaAs/Bi/Ge/ZnSe, management of the nature and distribution of nanoobjects formed in them, GaAs/Bi/Ge/ZnS heterotoxicity as a photoactive material used in the field of visible rays and ultraviolet light were used at JSC "PHOTON" in the production of semiconductor electronic devices (Reference No. 04-3/645 of the Joint-Stock Company "Uzeltehsanoat" dated April 5, 2021).

Approbation of research results. The main results of the dissertation were presented and discussed at 4 international and 3 republican scientific conferences.

Publication of research results. On the subject of the dissertation, 16 scientific papers were published, 8 articles of them published in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of dissertation works.

The structure and scope of the dissertation. The research work consists of introduction, four chapters, a conclusion. It is presented on 120 pages, including 27 figures, 7 tables, contains 100 literatures.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS
I бўлим (1 часть; part1)

1. Зайнабидинов С.З., Саидова А.С., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н. Особенности свойств поверхности полупроводникового твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ с квантовыми точками ZnSe. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2021, № 1, С. 107–112 (01.00.00; №9. IF: 0.863).
2. Зайнабидинов С.З., Йўлчиев Ш.Х., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н. Электрические свойства $n\text{-GaAs-}p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_x(\text{Ge}_2)_y$ гетероструктур. // Доклады Академии Наук РУз. - Ташкент, 2019. - № 6, с. 10-12 (01.00.00; №7).
3. Йўлчиев Ш.Х., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н. Структурные особенности полупроводникового твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // Физика полупроводников и микроэлектроника. Ташкент, 2019, №3, С. 62-67 (01.00.00; №16).
4. Мансуров Х.Ж., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., Махмудов Х.А., Абдурахимов Д.П., Уринбоев М.И. Получение, структура и электрофизические свойства твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\Delta}\text{Bi}_{\Delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // Научный вестник Андижанского государственного университета (Физика-математика тадқиқотлари), №2 (43) 2020, С. 15-23 (01.00.00; №13).
5. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., Махмудов Х.А., Эргашев Б.М. Получение и электрофизические свойства непрерывного твердого раствора $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_x(\text{ZnSe})_y$. // Научный вестник Андижанского государственного университета (Физика-математика тадқиқотлари), №1 (41) 2019, С. 35-43 (01.00.00; №13).
6. Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., Махмудов Х.А., Урибоев М.И., Тожимухаммадов А.К. Фотоэлектрические свойства $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктур с нанокристаллами германия. // Научный вестник Наманганского государственного университета, 2020, №1. С. 58–64 (01.00.00; №14).
7. Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., Махмудов Х.А., Уринбоев М., Юнусалиев Н.Ю., Тожимухаммадов А.К., Абдуллаев А.А. Исследование структуры и поверхностных состояний твердого раствора $(\text{GaAs})_{0,69}(\text{Ge}_2)_{0,17}(\text{ZnSe})_{0,14}$. // Молодой ученый. Казан, № 41 (279) / 2019 С. 1-4 (01.00.00; №18).
8. Бобоев А.Й., Мансуров Х.Ж., Усмонов Ж.Н., Махмудов Х.А., Урибоев М.И., Юнусалиев Н.Ю., Эргашев Б.М., Тожимухаммадов А.К. Электрические и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных пленок $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // Молодой ученый. - Казан, № 21 (311) / 2020, С. 26-31 (01.00.00; №18).

II бўлим (2 часть; part 2)

9. A. Boboev, J. Usmonov, Kh. Makhmudov, M. Urinboev, A. Tojimukhammadov, J. Urinboev. The Electro-Physical and Photo-Electrical Properties of the Solid Solutions $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ and $(\text{GaAs})_{0.71}(\text{Ge}_2)_{0.25}(\text{ZnSe})_{0.04}$. // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET). India, 2020, №9, P. 4684-4692.
10. Boboev A., Usmonov J., Makhmudov Kh., Urinboev M., Ergashev B., Yunusaliyev N., Tojimukhammadov A. Structural characteristics of $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ heterostructures. // European multi science journal ежемесечный международный научный журнал. 2020, №31. С. 19-23.
11. Мансуров Х.Ж., Усмонов Ж.Н., Махмудов Х.А., Уринбоев М.И. Определение оптимальных технологических условий выращивания питаксиальных слоев $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ методом жидкостной эпитаксии. // Международная научно-техническая конференция на тему: “Инновационные проблемы в сфере технических и технологических наук” Термиз-2020, 22 сентябрь. С. 353-354.
12. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., Уринбоев М.И. Республиканской конфренсии. Структурные особенности твердого раствора $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // Республиканской конфренсии. Современные промлемы физики полупроводников (Нукус) 2019, 20-21 ноябр. С. 23-26.
13. Зайнабидинов С.З., Усмонов Ж.Н. Выращивание эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // Республиканской научной-практической конфренсии. Инновационные технологии в науке и образовании (Нукус) 2018, 20-21 ноябр С. 36-40.
14. Бобоев А.Ю., Усмонов Ж.Н., Абдурахимов Д.П. Механизм переноса тока в $n\text{-Ge-}p\text{-(Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктурах. // Республика илмий-амалий анжумани. Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари республика илмий–амалий анжумани. Андижан, 2015, 4-5 декабрь. 78–80 бб.
15. Бобоев А.Ю., Усмонов Ж.Н., Абдурахимов Д.П. Особенности вольтамперных характеристик гетероструктур $n\text{-Ge-}p\text{-(Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x\text{ZnSe})_y$. // Республика илмий-амалий анжумани. Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари республика илмий–амалий анжумани. Андижан, 2015, 4-5 декабрь. 81–83 бб.
16. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н. Структурные особенности твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // Международная научная конференция «Тенденции развития физики конденсированных сред». Фарғона, 2021, 25 май. 22-26 бб.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида
тахрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини
мослиги текширилди (17.08.2021 йил)

Бичим 60x841/16. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табағи:3. Адади 60. Буюртма №23.
Гувоҳнома reestr № 10-4434
Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника
илмий-тадқиқот институти босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: 100057, Тошкент ш., Янги Олмазор кўчаси, 20-уй.