

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

**УРГАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ**

АСАТОВА УМИДА ПАЛВАНОВНА

**ТОР ЗОНАЛИ $Ge_{1-x}Sn_x$, $(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ ҚАТТИҚ ҚОРИШМАЛАРИ
ВА УЛАРНИНГ ФОТОЭЛЕКТРИК 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**

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

Асатова Умида Палвановна

Тор зонали $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$, $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришмалари ва уларнинг
фотоэлектрик хоссалари 3

Асатова Умида Палвановна

Узкозонные твердые растворы $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$, $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ и их
фотоэлектрические свойства..... 21

Asatova Umida Palvanovna

Narrow-gap $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$, $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ solid solutions and their photoelectric
properties..... 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.ФМ/Т.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**УРГАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ**

АСАТОВА УМИДА ПАЛВАНОВНА

**ТОР ЗОНАЛИ $Ge_{1-x}Sn_x$, $(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ ҚАТТИҚ ҚОРИШМАЛАРИ ВА
УЛАРНИНГ ФОТОЭЛЕКТРИК 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 В2019.2.PhD/FM143 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Урганч Давлат университети ва Физика-техника институтида бажарилган.
Диссертация автореферати уч тилда (Ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (ispm.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: Усмонов Шукрулло Негматович
физика-математика фанлари доктори

Расмий оппонентлар: Шаробаев Носир Юсупжонович
физика-математика фанлари доктори, профессор
Тургунов Нозимжон Абдуманипович
физика-математика фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот: Тошкент давлат техника университети

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 «22» маб соат 10⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент ш., 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. (22 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 «10» маб куни тарқатилди.
(2021 йил «10» маб даги 22 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

З. Т. Азаматов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф. д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги даврда жаҳон амалиётида яримўтказгич материалшунослиги ва оптоэлектрон асбобсозлиги соҳаларида элементар яримўтказгичлар билан бир қаторда $A^{III}B^V$ бинар бирикмалар қаттиқ қоришмалари ҳам кенг кўламда фойдаланиб келинмоқда. Улар орасида айниқса, нурланиш спектрининг яқин (тўлқин узунлиги 3 мкм гача) ва ўрта (8÷11 мкм) инфрақизил диапазонига тўғри келувчи фундаментал ютиш соҳасига эга бўлган яримўтказгич материаллар ўз ўрнига эга. Бундай материаллар термофотоэлектр генераторлар, термовольтаик элементлар, инфрақизил нурланиш датчиклари, тепловизорлар ва шунга ўхшаш қурилмаларни ишлаб чиқаришда муҳим аҳамият касб этади.

Дунё миқёсида тор зонали яримўтказгичли қаттиқ қоришмаларнинг эпитаксиал қатламларини ўстиришда Ge (тақиқланган зонасининг кенглиги - $E_g = 0.67$ эВ) ва унинг Sn билан қаттиқ қоришмаси ($E_g < 0.67$ эВ), шунингдек, InSb ($E_g = 0.18$ эВ) ва унинг Sn билан қаттиқ қоришмаси ($E_g < 0.18$ эВ) истиқболли материаллардан ҳисобланади. Шу сабабдан бошқариладиган таркибли ва кристалл мукамалликка эга кўп компонентали яримўтказгичли қаттиқ қоришмаларнинг юпқа қатламларини ўстириш, шунингдек, уларнинг структуравий, электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятларини ўрганиш бўйича илмий изланишлар олиб борилмоқда. Бу борада суюқ фазадан $Ge_{1-x}Sn_x$ ва $(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ қаттиқ қоришмаларни ўстириш технологияларини яратишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Республикамизда қаттиқ қоришмаларнинг эпитаксиал қатламларини олиш технологиясига, шунингдек яримўтказгич материаллар ва улар асосидаги асбоблар структураларининг хусусиятларини комплекс ўрганиш борасида муайян натижаларга эришилмоқда. Бу борада турли хил ёт тагликларда тор зонали яримўтказгичли қаттиқ қоришмаларнинг монокристалл эпитаксиал қатламларини ўстириш ва улар асосида инфрақизил соҳада сезгирлиги юқори бўлган кўп қатламли структуралар олишга бўлган эҳтиёж ортиб бормоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида «... мутлақо янги турдаги маҳсулотлар ва технологияларни ишлаб чиқаришни ўзлаштириш, шу асосда маҳаллий товарларнинг ташқи ва ички бозорларда рақобатбардошлигини таъминлаш»¹ вазифалари белгиланган. Мазкур йўналишда микроэлектроника қурилмаларини ишлаб чиқариш учун зарур электрофизик хусусиятларга эга бўлган янги яримўтказгич материаллар - қаттиқ қоришмаларни яратиш муҳим илмий аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 17 февралдаги ПҚ 2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил

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

этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора тадбирлари тўғрисида»ги, 2018 йил 14 июлдаги ПҚ 3855-сон «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора тадбирлар тўғрисида»ги, 2019 йил 30 майдаги ПҚ 4348-сон «Электротехника саноатини янада ривожлантириш учун қулай шарт шароитлар яратиш ва тармоқнинг инвестициявий ҳамда экспорт салоҳиятини ошириш бўйича қўшимча чора тадбирлар тўғрисида»ги Қарорлари, шунингдек, ушбу соҳада қабул қилинган бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти 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 ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги кунга қадар Ge, Sn, InSb ва InAs асосидаги тор зонали қаттиқ қоришмаларнинг эпитаксиал қатламларини ўстириш ва уларнинг структуравий, фотоэлектрик хусусиятларини тадқиқ қилиш муаммолари қуйидаги илмий марказларда ўрганилган: Max Planck Institute of Microstructure Physics, Institute of Physics, Martin Luther University Halle Wittenberg (Германия), Eco Topia Science Institute, Nagoya University, Department of Crystalline Materials Science, Graduate School of Engineering, Institute for Advanced Research (Япония), Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, Department of Physics and Astronomy, Rutgers University (США), А.Ф. Иоффе номидаги Физика-техника институти, Россия ФАнинг микроструктуралар физикаси институти (Россия), ЎзР ФА нинг Физика-техника институти (Ўзбекистон).

Юқори миқдордаги Sn ли $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ қаттиқ қоришмаларнинг қатламлари турли усуллар ёрдамида ўстирилган. Америкалик олимлар Nupur Bhargava, Matthew Coppinger, Jay Prakash Gupta молекуляр нурли эпитаксия усули билан 250°C дан паст ҳароратда Ge (001) тагликларида $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.145$) эпитаксиал қатламларни ўстиришган. Қатламларнинг тузилиши когерент, юқори сифатли, кучланишга эга бўлган. Қаттиқ қоришма таркибининг $0 \leq x \leq 0.145$ бутун ўзгариш оралиғида кристалл панжара тугунларида жойлашган Sn атомлари миқдори 90% дан юқорини ташкил қилган. Япон олимлари Osamu Nakatsuka, Yosuke Shimura va Wakana Takeuchi молекуляр нурли эпитаксия усули билан Si (110), Ge (001) ва InP (001) тагликларида Sn миқдори юқори (27% гача) бўлган юпқа $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ эпитаксиал қатламларни ўстиришган. $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ эпитаксиал қатламларни ўрганиш бўйича кўплаб илмий натижаларга эришилганлигига қарамасдан, мукамал $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ монокристалл қатламларни ўстириш хусусиятлари, уларни

структуравий ва фотоэлектрик хусусиятлари, шунингдек улар асосидаги *p-n*-структураларда электр токининг ўтиш механизмлари тўлиқ ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим ёки илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Физика-техника институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг № ФА-Ф2-Ф030 + Ф096 “ZnS, ZnSe, ZnTe, GaSb, Si, Ge, SiC асосидаги қаттиқ қоришмаларни ўстириш ва уларнинг фотоэлектрик ва люминесцент хусусиятлари”; Ф2-ФА-0-43917 “Si, Ge, GaSb, InSb, GaP, GaAs, ZnSe, ZnS, SiC, олмос асосидаги янги қаттиқ қоришмалар ва гетероструктураларнинг вольтаик, нурланиш хусусиятлари, нанодефектлари” илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) ва $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришмалар ва улар асосидаги *p-n* гетероструктураларнинг структуравий, электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ўрин алмашувчи қаттиқ қоришмаларни олиш режимларини ишлаб чиқиш;

суяқ фазадан Ge (111) тагликларга $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ва GaAs (100), Ge (100) ва GaP (111) тагликларга $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришмаларнинг эпитаксиал қатламларини ўстириш;

$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ва $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришмалар эпитаксиал қатламларининг кимёвий таркибини ва кристалл мукамаллигини аниқлаш;

ток ўтказувчи контактли *n-Ge-p-Ge* $_{1-x}\text{Sn}_x$, *n-GaAs-p-(InSb)* $_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$, *n-Ge-p-(InSb)* $_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$, *n-GaP-p-(InSb)* $_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$, гетероструктураларни тайёрлаш;

$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ва $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришмалар асосида тайёрланган *p-n* гетероструктураларда ток ўтиш механизмларини ва фотосезгирликнинг спектрал боғлиқликларини таҳлил қилиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ва $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришмаларнинг эпитаксиал қатламлари ва улар асосидаги гетероўтишлар олинган.

Тадқиқотнинг предмети $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ва $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришмаларнинг таркибий қисмларини атомлараро ва молекулалараро ўрин алмашиниш ҳодисалари, шунингдек бундай қаттиқ қоришмалар асосида яратилган гетероструктуралардаги ток ўтиш механизмлари ва фотовольтаик жараёнлардан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Қўйилган вазифаларни ечиш учун қуйидаги усуллар қўлланилган: $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ва $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришмаларнинг эпитаксиал қатламларини структуравий мукаммалиги рентген нурланиши дифракцияси усули, эпитаксиал қатламларнинг химик таркиби ва таркибий қисмларнинг атомларини сирт ва қалинлик бўйича тақсимланишини сифат жиҳатдан баҳолаш рентген микронзондли таҳлил усули, $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ қаттиқ қоришмаларнинг эпитаксиал қатламлари сирти рельефи атом куч микроскопияси, заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги Холл усули, қаттиқ

қоришмалар таркибий қисмларининг аҳамияти ва структураларнинг спектрал фотосезгирликлари фотоўтказувчанликни спектрал боғланиши, $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришма қатламининг тақиқланган зонаси кенглигини баҳолаш фотоютилишни спектрал боғланиши, $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ва $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришмалар эпитаксиал қатламлари асосидаги структураларда ток ўтиш механизмлари вольт ампер характеристикани таҳлил қилишнинг замонавий усулларидадан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

мукамал монокристалл структурага эга, панжара доимийси 5.6812 \AA бўлган ва (111) ориентацияли $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришмаларни $740 \div 450^\circ\text{C}$ ҳарорат оралиғида ва 1 град/мин совитиш тезлигида суюқ фазадан ўстиришнинг технологик режими ишлаб чиқилган;

илк бор индий антимоиднинг бинар бирикмаси индийда $250 \div 325^\circ\text{C}$ ҳарорат интервалида эритилганда InSb молекуласи шаклида бўлиши аниқланган;

илк бор $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) эпитаксиал қатлам юзасида диаметри $100 \div 400 \text{ нм}$ ва баландлиги эса $5 \div 20 \text{ нм}$ бўлган алоҳида нанокристаллитлар ҳосил бўлиши аниқланган;

Sn атомлари таъсирида $n\text{-Ge-p} - \text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) структуранинг фотосезгирлик чегараси германийли электрон-ковак ўтишга нисбатан 0.27 эВ га нурланиш спектрининг узун тўлқинли соҳасига силжиши ва нурланиш спектрининг 0.4 эВ фотонлар энергиясидан бошланиши аниқланган;

$(\text{InSb})_{0.95}(\text{Sn}_2)_{0.05}$ қаттиқ қоришманинг кристалл панжараси тугунларида Sn атомлари жойлашиши сабабли, унинг тақиқланган зонаси кенглиги InSb бинар бирикманинг тақиқланган зонаси кенлигидан 0.07 эВ га кичик бўлиши ва 0.11 эВ ни ташкил қилиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

$n\text{-Ge}$ тагликларида суюқ фазадан $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришманинг эпитаксиал қатламларини олишнинг оптимал технологик режими ишлаб чиқилган;

$(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришманинг эпитаксиал қатламлари асосида $8 \div 11 \text{ мкм}$ тўлқин узунликлар диапазонидаги инфрақизил нурланишга сезгир датчиклар ва тепловизорларни ишлаб чиқариш имконияти аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги замонавий ўлчаш воситалари ва тадқиқот усуллари кўлланилганлиги, экспериментал ва ҳисобланган маълумотларни бошқа муаллифларнинг назарий натижалари билан мувофиқлиги, шунингдек олинган натижаларни замонавий физик моделлар асосида тавсифланганлиги билан асосланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти молекуляр ўрин алмашиш қаттиқ қоришмаларнинг эпитаксиал қатламларини ўсиш механизмлари ва структуравий хусусиятлари, тор зонали қаттиқ қоришмалар асосида тайёрланган электрон-ковак ўтишлардаги ток ўтиш механизмлари ҳақидаги тасавурларни аниқлаштириш ва такомиллаштириш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти Ge тагликларига ўстирилган $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришмалар самарадор фотоўзгарткичларни, GaAs, Ge ва GaP тагликларига ўстирилган $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришмалар эса фотодатчиклар ва тепловизорларни ишлаб чиқаришда қўлланилишидан иборат.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.

$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$), $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришмаларнинг структуравий, электрофизик, фотоэлектрик хусусиятлари ва улар асосидаги *p-n* гетероструктураларда ток ўтиш механизмлари бўйича олинган илмий натижалар асосида:

суяқ фазали эпитаксия усули билан (111) йўналишли, панжара доимийси 5.6812 \AA , Ge таглик ва қаттиқ қоришма панжара доимийлари орасидаги номувофиқлик 0.0044 бўлган $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ қаттиқ қоришманинг мукамал монокристалларини $740 \div 450^\circ\text{C}$ харорат оралиғида, 1 град/мин совитиш тезлигида ўстириш усулидан, шунингдек, Sn атомлари туфайли *p-Ge-p-Ge* $_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) гетероструктура фотосезгирлигини германийли электрон-ковак ўтишларниқига нисбатан нурланиш спектрининг узун тўлқин соҳаси томон 0.27 эВ га силжишидан «FOTON» акционерлик жамиятида гетеро электрон-ковак ўтишлар ва яримўтказгичли пластиналар олишда қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акционерлик жамиятининг 2020 йил 11 мартдаги №04-1/680-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш электрофизик параметрлари инфрақизил фотоприёмниклар аналоглари даражасидаги тажрибавий намуналарни тайёрлаш имконини берган;

инфрақизил нурланиш фотодатчиклари ва тепловизорлар ишлаб чиқаришда GaAs, Ge и GaP тагликларга ўстирилган $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришмаларни қўллаш бўйича тавсиялар Italia Syntes Alloys компанияси заводида инфрақизил нурланишнинг ўрта диапазони учун фотоэлектрик ўзгарткичларни ишлаб чиқаришнинг технологик жараёнида фойдаланилган (Italia Syntesalloys S.p.A Codice Fiscale-Partita Iva 02494460021-Numero REA BI-192088, Biella, 2021 йил 28 январдаги маълумотнома). Илмий натижалардан фойдаланиш $8 \div 11$ мкм тўлқин узунлигидаги инфрақизил нурланишнинг самарадор фотодатчикларини ишлаб чиқариш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 9 та халқаро ва 7 та республика миқёсида ўтказилган илмий-амалий конференцияларда маъруза ва муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича асосий натижалар 28 та илмий ишда, улардан 8 таси диссертация ишларининг асосий илмий натижаларини нашр этиш учун Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан тавсия этилган илмий журналларда, шу жумладан 4 та мақола хорижий халқаро журналларда чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 33 та расм, 3 та жадвални ўз ичига олган ҳолда, 109 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурлиги асосланган, тадқиқотнинг республикада фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси очиб берилган, тадқиқот мақсади ва вазибалари белгиланган, тадқиқот объектлари, тадқиқот усуллари, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий аҳамияти, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, ишни апробациядан ўтганлиги ва нашр қилиниши, шунингдек диссертациянинг ҳажми ва тузилиши тўғрисида қисқача маълумот берилган.

“Германий, қалай ва А^{III}В^V бинар бирикмалари асосидаги тор зонали қаттиқ қоришмаларни ўстиришнинг ва уларнинг структуравий, электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятларини тадқиқ қилишнинг ҳозирги ҳолати” деб номланган биринчи бобда Ge, Sn ва бинар бирикмалар InAs, InSb, GaSb асосидаги қаттиқ қоришмаларни ҳосил бўлиш имкониятлари бўйича адабиётлар шарҳи берилган; суюқ фазали эпитаксия, металлорганик бирикмалардан газ фазали эпитаксия ва молекуляр нурли эпитаксия каби ўстиришнинг турли хил технологик усуллари кўрилган; ўстиришнинг ҳозирги ҳолати, шунингдек, тор зонали яримўтказгичли қаттиқ қоришмаларнинг структуравий ва электрофизик хусусиятлари таҳлил қилинган; Ge_{1-x}Sn_x қаттиқ қоришма қатламлари ва улар асосидаги гетероструктураларнинг электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятларини ўрганиш натижалари тақдим этилган; замонавий асбобсозликда ва нурланиш спектрининг инфрақизил (ИК) соҳасида ишлайдиган қурилмаларда тор зонали яримўтказгичлардан фойдаланиш бўйича маълумотлар келтирилган.

“Ge_{1-x}Sn_x ва (InSb)_{1-x}(Sn₂)_x қаттиқ қоришмаларнинг суюқ фазали эпитаксияси хусусиятлари” деб номланган иккинчи бобда Ge_{1-x}Sn_x ва (InSb)_{1-x}(Sn₂)_x қаттиқ қоришмаларнинг эпитаксиал қатламларини суюқ фазали эпитаксия усули билан ўстириш бўйича тадқиқот натижалари келтирилган.

Ge_{1-x}Sn_x қаттиқ қоришма суюқ фазали эпитаксия усули билан чегараланган ҳажмли қалайли қоришма-эритмасидан водород атмосферасида ўстирилган. Суюқ фазали эпитаксия жараёни горизонтал жойлашган тагликларга эга вертикал кварц реакторида ўтказилган. Таглик сифатида (111) кристаллографик йўналишга ва 1 Ом·см солиштирма қаршиликка эга бўлган Ge шайбаларидан фойдаланилган. Тагликнинг диаметри 20 мм, қалинлиги 400 мкм ни ташкил қилган. Эпитаксия қатламлари суюқ фазали эпитаксия жараёни параметрларининг ҳар хил қийматларида ўстирилган. Қоришма-эритма таркиби, қоришма-эритмани мажбурий совутиш тезлиги,

кристалланиш бошланадиган ҳарорат ва қоришма-эритма қалинлиги (юқори ва пастки тагликлар орасидаги масофа) ўзгартириб борилган.

Қаттиқ қоришма таркибидаги Sn атомлари миқдори кристалланиш бошланадиган ҳароратга ва қоришма-эритманинг таркибига боғлиқлиги аниқланган. Бир хил шароитда кристалланиш бошланадиган ҳарорат ортиши билан $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ қаттиқ қоришма таркибида Sn атомларини миқдорининг ортиши кузатилган. $\text{Ge}+\text{Sn}+\text{ZnSe}$ қоришма-эритмадан ўстирилган қаттиқ қоришмада Sn атомлари миқдори кристалланиш бошланадиган ҳарорат 740°C да бўлганда 10 ат.% ни, 540°C да эса 3 ат.% ни ташкил қилган.

Совитиш тезлиги $0.5\div 1.0$ град/мин бўлганда сифатли қатламларнинг ўсишига эришилган. Бир хил шароитда эпитаксиал қатламларнинг мукамаллиги юқори ва пастки тагликлар орасидаги қоришма-эритма қалинлигига ҳам боғлиқ бўлган. Қоришма-эритма қалинлиги 0.65 дан 1 мм гача бўлганда эпитаксиал қатламлар мукамал монокристалл структурага эга бўлган.

InSb ва Sn_2 молекулаларининг қаттиқ қоришма ҳосил қилиши мумкинлиги молекулалар атомларининг ковалент радиуслари йиғиндиси ($r_{\text{In}} + r_{\text{Sb}} = r_{\text{Sn}} + r_{\text{Sn}} = 2.80 \text{ \AA}$) ва валентликлари йиғиндиси ($z_{\text{In}} + z_{\text{Sb}} = z_{\text{Sn}} + z_{\text{Sn}} = 8$) ўзаро тенглиги билан асосланган. 1-расмда $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришма атомларини тетраэдрик ковалент боғлари кўрсатилган. 1-расмдан кўриняптики, тетраэдрик панжарада қаттиқ қоришма компоненталарининг асосий ковалент боғлари - In-Sb ва Sn-Sn билан бирга, яна In-Sn ва Sn-Sb боғлари ҳам мавжуд.

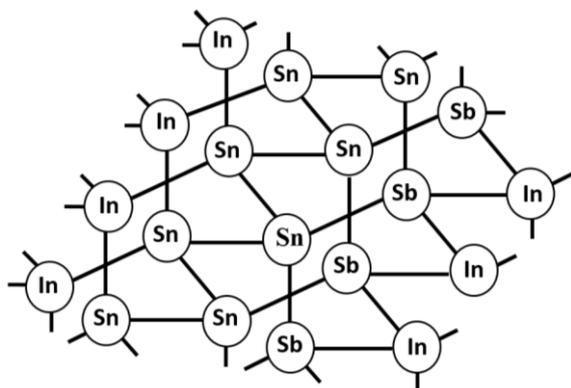
$(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришмани ўстириш учун InSb ва Sn орасида молекуляр ўрин алмашиш содир бўлиши керак, яъни InSb молекуласи Sn_2 молекуласи билан ўрин алмашиши керак.

$(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришмани суяқ фазали эпитаксияси учун эритувчи сифатида In олинган. Нормал шароитда In, InSb , Sn ларни эриш ҳароратлари мос равишда 156.6°C , 527°C ва 231.9°C га тенг. InSb ни суяқ In даги, $220\div 400^\circ\text{C}$ ҳарорат оралигидаги эрувчанлиги, эритма InSb билан тўйингунга қадар ушлаб турилганда намуналарнинг оғирлигини йўқотиш усули билан аниқланган. Бунда Sn ни InSb ни эрувчанлигига таъсири ҳисобга олинган. Тажриба натижаларига кўра InSb ни In даги эрувчанлиги унча катта эмас ва 350°C ҳароратда 7.4 моль % ни ташкил қилади.

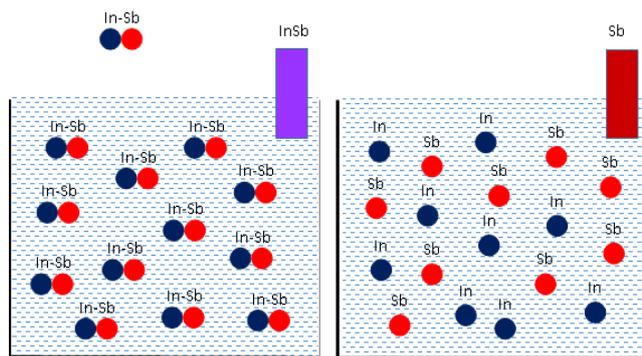
Проф. А.С. Саидов моделига кўра, InSb 350°C ҳароратда индийда эритилганда молекула кўринишида бўлади (2а-расм). InSb молекуласини алоҳида In ва Sb атомларига ажралиши (2б-расм), InSb ни индийдаги эрувчанлигини Sb ни индийдаги эрувчанлигига мос келишини билдиради. Аммо 350°C да Sb ни In даги эрувчанлиги ~ 12 моль % га тенг. У ҳолда 350°C да InSb ни In даги эрувчанлиги ҳам 12 моль % бўлиши керак эди. Лекин бундай ҳолат кузатилмаган, демак, 350°C да In да эриган InSb асосан молекула кўринишида бўлади.

$(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришмалари In қоришма-эритмадан H_2 атмосферасида ўстирилган. Таглик сифатида диаметри 2 см, қалинлиги

350÷400 мкм, n типдаги ўтказувчанликка эга бўлган GaAs, Ge ва GaP шайбалари ишлатилган. GaAs ва GaP тагликларда заряд ташувчилар концентрацияси $(4\div 7)\cdot 10^{17}\text{см}^{-3}$ га, Ge тагликнинг солиштирма қаршилиги 1 Ом·см га тенг. Юқори ва пастки тагликлар орасидаги қоришма-эритма қалинлиги 1 мм, кристалланиш ҳарорати оралиғи $325\div 220^\circ\text{C}$ ва қоришма-эритманинг совитиш тезлиги 1 град/мин бўлганда силлиқ кўзгусимон сиртга ва юқори кристалл мукамалликка эга бўлган $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришманинг эпитаксиал қатламлари ўстирилган. Ўстирилган қатламлар ковак ўтказувчанликка ва (100) ориентацияли монокристалл структурага эга бўлган.



1-расм. $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ўрин алмашувчи қаттиқ қоришмасининг тетраэдрик боғлари.



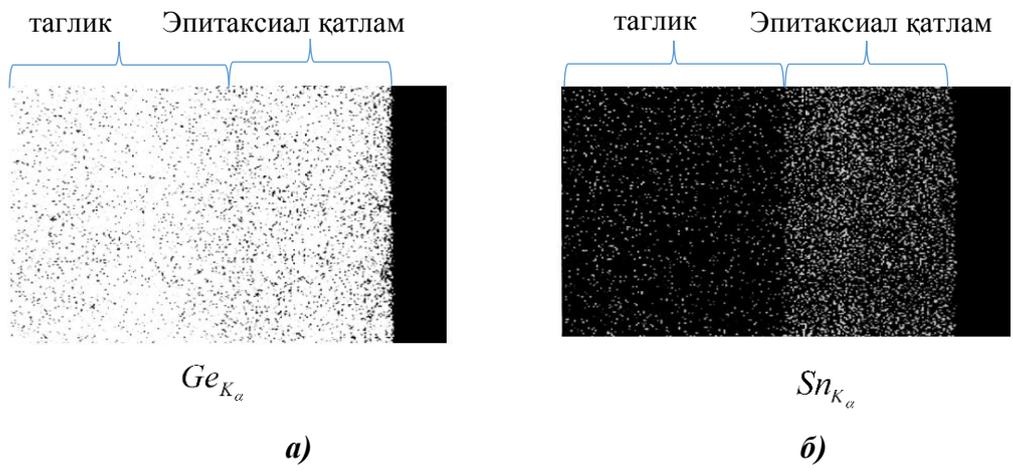
2-расм. Индий антимоидининг эриши:
 а) InSb молекулалари кўринишида,
 б) алоҳида In ва Sb атомлари кўринишида.

$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ қаттиқ қоришма эпитаксиал қатламларнинг ва улар асосидаги структураларнинг структуравий, электрофизик, фотоэлектрик хусусиятлари деб номланган учинчи бобда $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришманинг юпқа қатламлари ва улар асосидаги *p-n*-ўтишларнинг структуравий, электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятлари бўйича экспериментал тадқиқотлар натижалари келтирилган.

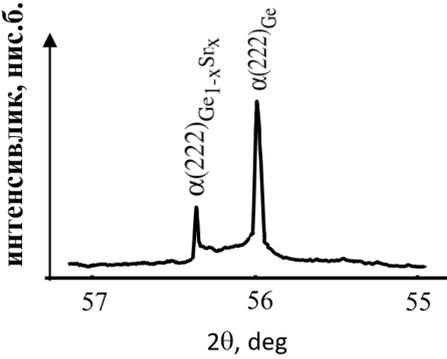
Сирт ва ён томондан олинган рентген микрозондли таҳлил натижалари шуни кўрсатадики, эпитаксиал қатламларда иккинчи фаза ва металл аралашмалар мавжуд эмас. Эпитаксиал қатламнинг сирти ва ён томонида Ge ва Sn атомларининг тақсимооти микрон ўлчамлар тартибида бир жинсли. Қатлам сирти кўзгусимон силлиқ. 3-расмда $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришма қатламининг ён томонидан олинган рентген растр манзараси келтирилган. 3 б - расм Ge тагликларига етарлича ёпишган $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ қаттиқ қоришма қатламининг ҳосил бўлганини кўрсатди.

$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришманинг структуравий мукамаллиги ДРОН-УМ1 рентген дифрактометри ($Cu_{K\alpha}-\lambda=1.5418 \text{ \AA}$ тўлқин узунликли нурланиш) ёрдамида ўрганилган. 4-расмда қаттиқ қоришма қатламининг рентгенограммаси тасвирланган. Рентгенограммада $\{222\}$ сериядаги тор, интенсив, селектив рефлексларнинг мавжудлиги эпитаксиал қатламнинг кристаллографик йўналиши (111) кристаллографик текисликка мос келишидан далолат беради. $2\theta = 56.36^\circ$ ($d/n = 1.84 \text{ \AA}$)да кузатилаётган,

нисбатан кичик интензивликка эга бўлган иккинчи $\alpha(222)_{\text{GeSn}}$ рефлекс, рентген нурларини $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ панжарасининг $\{222\}$ серия текисликларидан қайтиши туфайли ҳосил бўлган бўлиб, у $\omega_{\text{пол}} \approx 4.1 \cdot 10^{-4}$ рад ярим кенгликка эга. Селектив рефлекслар кенглигини торлиги ва рентген нурланишларнинг диффуз қайтишлари мавжуд эмаслиги эпитаксиал қатлам кристалл панжараси юқори даражада мукамалликка эга эканлигини кўрсатади.

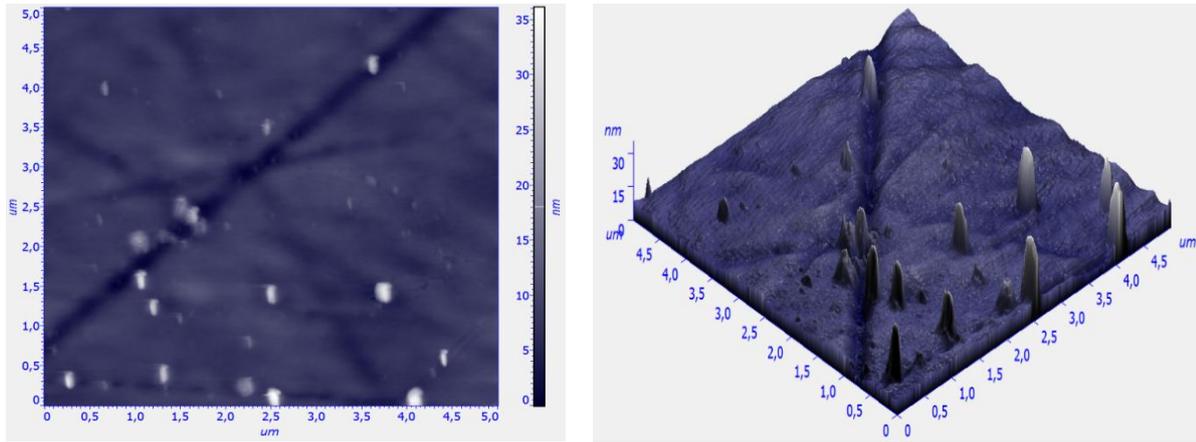


3-расм. $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришма эпитаксиал қатламлари ён томонининг манзараси.



4-расм. $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришма эпитаксиал қатламининг рентгенограммаси.

$\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ қатламлар сиртининг рельефи атом куч микроскопи ёрдамида ўрганилган. Қатламнинг силлиқ сиртида турли ўлчамда ва алоҳида жойлашган «дўнгликлар» мавжудлиги аниқланган (5- расм). «Дўнгликлар» асосининг диаметрлари ~ 100 дан 400 нм гача, баландлиги 5 дан 20 нм гача ўзгаради. Қатлам сиртнинг силлиқ қисмини ғадир-будирлиги ~ 3 нм дан ошмайди. Қаттиқ қоришма панжарасининг (222) текислигида дифракция содир бўлганда юзага келадиган структуравий рефлекслар кенглигининг торлиги, бошқа рефлекслар ва диффуз қайтишлар мавжуд эмаслиги шундан далолат берадики, «дўнгликлар» (111) йўналишга эга бўлган нанокристаллар бўлиб, улар қаттиқ қоришма кристалл панжарасининг матрицаси билан когерент жойлашган. Наноўлчамдаги «дўнгликлар»ни ҳосил бўлиши суяқ фазадан эпитаксия қатламларининг ўсиши давомида юзага келувчи ўз-ўзини шакллантириш жараёнлари натижасидир. Нанокристаллар ковалент радиуслар ($r_{\text{Ge}} = 1.22 \text{ \AA}$ ва $r_{\text{Sn}} = 1.40 \text{ \AA}$) фарқи туфайли ҳосил бўладиган кристалл панжаранинг механик кучланишларини бартараф этади.



5-расм. $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қорышма эпитаксиал қатламининг икки ўлчамли (а) ва уч ўлчамли (б) АСМ тасвирлари.

$p\text{-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ дан иборат бўлган, $d = 15$ мкм қалинликдаги база соҳали $n\text{-Ge-p-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) гетероструктуранинг вольт-ампер характеристикаси (ВАХ) ўрганилган (6-расм). ВАХ тўғри тармоғининг бошланғич соҳаси ($V < 0.5$ В) В.И. Стафеев таклиф қилган боғланиш билан тавсифланади:

$$I = I_0 \exp(qV / ckT) \quad (1)$$

(1) боғланиш А.Ю. Лейдерман томонидан аниқлаштирилган ва қуйидаги ифода олинган:

$$c = \frac{2b + ch(d / L_n) + 1}{b + 1} \quad (2)$$

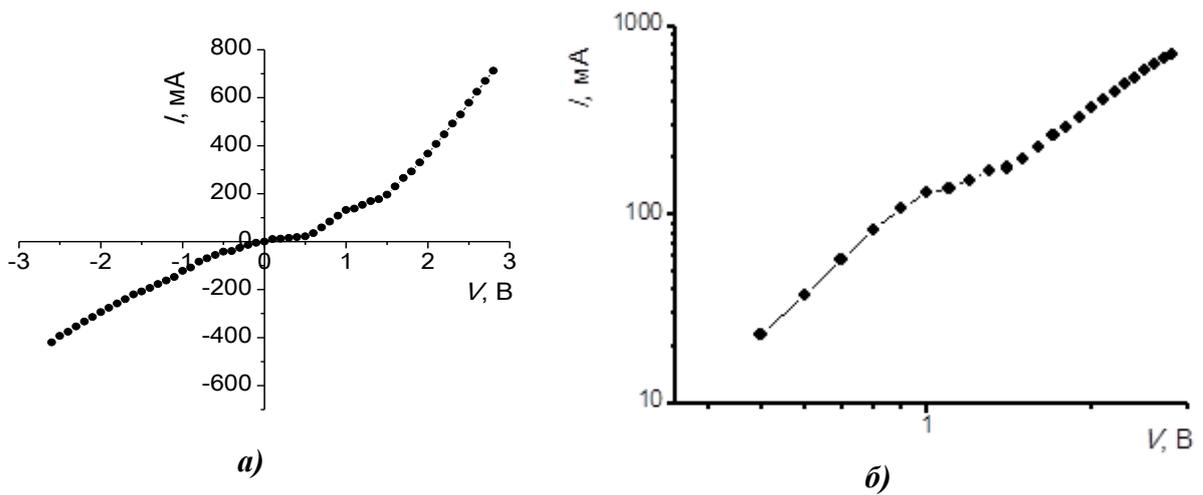
бу ерда, $b = \mu_n / \mu_p$, μ_n ва μ_p - мос равишда электрон ва ковакларнинг ҳаракатчанлиги, L_n – база соҳасида ноасосий заряд ташувчиларнинг диффузия узунлиги. ВАХ маълумотлари асосида $c = 20.8$ қиймат аниқланган.

(1) ифодадаги I_0 кўпайтувчи қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$I_0 = \frac{kT}{q} \cdot \frac{S \cdot b \cdot ch(d / L_n)}{2(b+1) \cdot L_n \cdot \rho \cdot tg(d / 2L_n)} \quad (3)$$

(S – намуна юзаси, ρ - солиштирма қаршилик). I_0 қиймат $I_0 = 8.82 \cdot 10^{-3}$ А га тенг бўлди. (3) ифода ёрдамида ўтиш соҳаси солиштирма қаршилигининг қиймати $\rho = 2.2 \cdot 10^3$ Ом·см га тенглиги аниқланган.

Холл усули билан ўлчанганда эпитаксиал қатламнинг солиштирма қаршилиги $5.3 \cdot 10^3$ Ом·см ни ташкил қилди. Демак, $n\text{-Ge}$ таглик ва $p\text{-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) эпитаксиал қатлам орасида юқори қаршиликли ўтиш қатлами ҳосил бўлади, шунинг учун тадқиқ қилинаётган структурани $n\text{-p-p}^+$ -кўринишида қараш мумкин.



6-расм. $n\text{-Ge-p-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) гетероструктура вольт-ампер характеристикаси (а) ва унинг тўғри тармоғи логарифмик масштабда (б).

ВАХ да экспоненциал соҳадан кейин даражали боғланишли соҳалар кузатилади (б б - расм): $0.5 \div 0.9$ В ораликда квадратик соҳа – $I = 133 \cdot V^2$, сўнгра 1.4 В гача – $I = 123 \cdot V^{1.3}$ ҳамда $V > 1.4$ В да иккинчи квадратик соҳа – $I = 87 \cdot V^2$. ВАХ даги бундай боғланишларни n ва p^+ қатламларига омик контакт қилинган $n\text{-}p\text{-}p^+$ структурада, икки томонлама инжекция модели доирасида, омик релаксация режимида ток ўтишни дрейф механизми ёрдамида, рекомбинацион комплекслар ичида электрон алмашув жараёнининг инерциясини ҳисобга олган ҳолда сифат жиҳатдан тушунтириш мумкин. Бу ҳолда эркин номувозанат заряд ташувчилар концентрацияси (n) нинг ўзгаришини тавсифлайдиган асосий тенглама қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\frac{J \cdot N_a}{q(b+1)^2 n^2} \cdot \frac{dn}{dx} + U = 0 \quad (4)$$

бу ерда, J – ток зичлиги, U – номувозанатий заряд ташувчиларнинг рекомбинация тезлиги. Бу режимни «вакансия + рекомбинациявий киришма маркази» типидagi рекомбинация комплекслари мавжуд бўлган юқори қаршиликли $p\text{-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ базага эга $n\text{-Ge-p-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{-}p^+\text{-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) структураларда текшираимиз. Бу ҳолда U нинг ифодаси қуйидаги кўринишда бўлади:

$$U = N_R \cdot \frac{c_n c_p (np - n_i^2)}{c_n (n + n_1) + c_p (p + p_1) + c_n c_p \tau_{RS} np} \quad (5)$$

бу ерда, N_R – рекомбинациявий фаол марказларни дастлабки концентрацияси, c_n ва c_p – ушбу марказларда мос равишда электрон ва ковакларни тутиб олиш коэффициентлари, τ_{RS} – N_R ларнинг рекомбинация-стимуллашган қайта тикланиш вақти, n_1, p_1 – Шокли-Рид статистикаси факторлари.

Агар $c_n(n+n_1)+c_p(p+p_1) \gg c_n c_p \tau_{RS} np$ шарт бажарилса рекомбинация тезлиги ифодаси Шокли-Рид статистикаси ифодасига ўтади. Бу ҳолда чегаравий шартларни, яъни инжекцияловчи контактларнинг ноидеаллигини: $n(0) \sim \sqrt{J}$, $n(d) \sim \sqrt{J}$ (яъни, ток $n\text{-}p$ ўтиш орқали фақат электрон ташкил

этувчи билан эмас, балки ковак ташкил этувчи билан ҳам, шунга ўхшаш, $p-p^+$ ўтиш орқали ток фақат ковак ташкил этувчи билангина эмас, балки электрон ташкил этувчи билан ҳам аниқланади) ҳисобга олиб, (4) тенгламанинг ечими сифатида ВАХ учун қуйидаги ифодага эга бўламиз:

$$J = \frac{9}{8} \cdot \frac{q\mu_n\tau_n\mu_p N_a}{d^3} \cdot V^2 \quad (6)$$

(6) ифода $0.5 \div 0.9$ В ораликда ВАХ нинг квадратик соҳасини – $I = 133 \cdot V^2$ яхши тавсифлайди. Сўнгра инжекция даражаси ортиши билан $c_n(n+n_1)+c_p(p+p_1) > c_n c_p \tau_{RS} \cdot np$ шарт бажарилади. $c_n \approx c_p$, $p \approx n$ бўлганда рекомбинация тезлиги қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$U = \frac{p}{2\tau_n} - \frac{c_p \tau_{RS} p^2}{4\tau_n} \quad (7)$$

(7) ифода инобатга олинса, (4) тенгламанинг ечими ВАХ учун қуйидаги ифодани беради:

$$V = \sqrt{\frac{8d^3}{9q\mu_p\mu_n\tau_n N_a}} \cdot M(J) \cdot \sqrt{J} \quad (8)$$

бу ерда

$$M(J) \approx 1 + 3m \left(2 + C \tau_{RS} c_p \sqrt{J} \right)^2 \quad (9)$$

(8) ифода ток ва кучланиш орасидаги квадратик боғланишга нисбатан заифроқ боғланишни ифодалайди ва у ВАХ да кузатилган $I = 123 \cdot V^{1.3}$ га мос келади.

Агар $c_n(n+n_1)+c_p(p+p_1) \ll c_n c_p \tau_{RS} \cdot np$ бўлса рекомбинация тезлиги тўйинишга эришади ва қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$U = \frac{N_R}{\tau_{RS}} \quad (10)$$

ВАХ яна квадратик кўринишни олади:

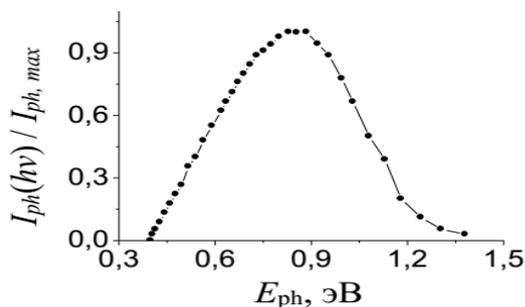
$$J = B_0 \cdot (V - V_0)^2 \quad (11)$$

(11) ифода $V > 1.4$ В бўлганда ВАХ эга бўладиган иккинчи квадратик боғланишини тавсифлайди - $I = 87 \cdot V^2$.

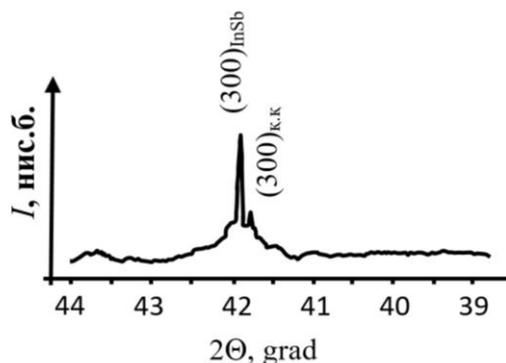
Қаттиқ қоришмани таркибий қисмларининг аҳамиятини ўрганиш учун инфрақизил спектрометр ИКС-21 ёрдамида $n\text{-Ge}-p\text{-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) структуранинг фотосезгирлигини фотонлар энергиясига боғлиқлиги ўрганилган. Фотосезгирлик фотонлар энергиясининг турли қийматларида қисқа туташув токи ($I_{ph}(h\nu)$)ни унинг максимал қийматига нисбати ($I_{ph,max}$), яъни $I_{ph}(h\nu)/I_{ph,max}$ бўйича баҳоланди. Структуранинг фотосезгирлиги фотонлар энергиясини 0.4 дан 1.4 эВ гача бўлган оралигини эгаллади (7-расм).

«(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x қаттиқ қоришма эпитаксиал қатламлари ва улар асосидаги гетероструктураларнинг структуравий, электрофизик, термовольтаик ва фотоэлектрик хусусиятлари» деб номланган тўртинчи

бобда $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришма қатламлари ва улар асосидаги гетероструктураларнинг структуравий, электрофизик, термовольтаик ва фотоэлектрик хусусиятлари бўйича тадқиқотлар натижалари келтирилган.



7-расм. $n\text{-Ge-p-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) гетероструктуранинг спектрал фотосезгирлиги



8-расм. $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришма қатламининг рентгенограммаси.

Қатламларни структуравий мукамаллиги ДРОН-УМ1 дифрактометрида олинган рентгенограммани тадқиқ қилиш натижалари бўйича ўрганилган. 8-расмда GaAs (100) тагликларга ўстирилган $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришма қатламининг рентгенограммаси тасвирланган.

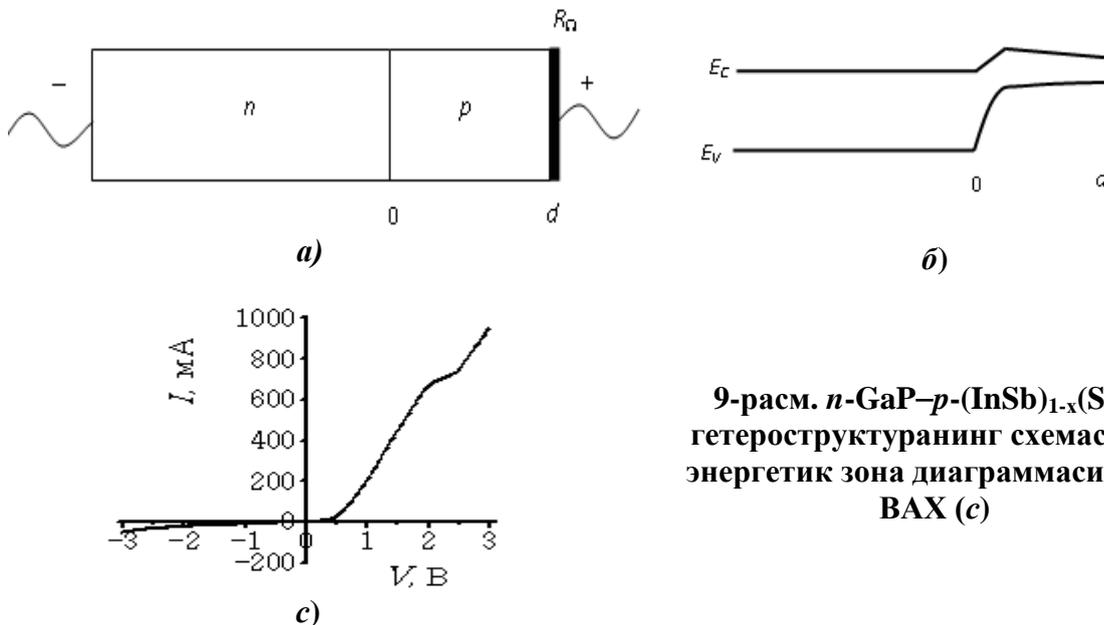
Рентгенограммада интенсивлиги юқори $(300)_{\text{InSb}}$ ва паст $(300)_{\text{к.к}}$ бўлган иккита структуравий рефлекслар мавжуд. $2\theta = 41.97^\circ$ да $d/n = 0.384 \text{ \AA}$ ли $(300)_{\text{InSb}}$ интенсив рефлекс рентген нурларини InSb панжарасининг $\{300\}$ серияли текислигидан сочилиши туфайли ҳосил бўлиб, $\omega \approx 1.62 \cdot 10^{-3}$ рад ярим кенгликка эга. $2\theta = 41.85^\circ$ да $d/n = 0.385 \text{ \AA}$ ли кичикроқ интенсивликдаги рефлекс рентген нурларини $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришма панжарасининг $\{300\}$ серия текислигидан сочилиши туфайли ҳосил бўлади ва $\omega \approx 8.61 \cdot 10^{-4}$ рад ярим кенгликка эга. Структуравий рефлекслар яримкенглигининг торлиги ва рентгенограммада бошқа пикларни мавжуд эмаслиги қаттиқ қоришма кристалл панжарасини юқори даражада мукамаллигидан далолат беради. Эпитаксиал қатлам (100) йўналишдаги монокристалл ҳисобланади. Селектив рефлекслар асосида InSb (a_{InSb}) панжара ва $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($a_{\text{кк}}$) қаттиқ қоришма панжара доимийлари мос равишда $a_{\text{InSb}} = 6.475 \text{ \AA}$ ва $a_{\text{кк}} = 6.486 \text{ \AA}$ га тенглиги аниқланган.

$n\text{-GaP-p-(InSb)}_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) гетероструктурда ток ўтиш механизмини ўрганиш мақсадида, уни ВАХ тадқиқ қилинган. Структура заиф варизонликка эга, унда тақиқланган зона кенглиги $E_g(0) = 0.18 \text{ эВ}$ дан $E_g(d) = 0.1 \text{ эВ}$ (9-расм а, б) гача ўзгарган. Гетероструктурани ВАХ 9 с расмда кўрсатилган. $0.08 \div 0.50 \text{ В}$ кучланишларда ВАХ даража кўрсаткичи $c = 3.6$ бўлган экспоненциал боғланиш билан яхши тавсифланади ((1) ифодага қаранг), бу ҳолда ноасосий заряд ташувчилар ҳаракатчанлигини яшаш вақтига кўпайтмаси $\mu_n \tau_n = 4.79 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{В}$ ни ташкил этади. ВАХ да экспоненциал соҳадан кейин даража кўрсаткичи - m ва коэффиценти A турлича бўлган $I = A \cdot V^m$ типдаги даражали боғланишлар, яъни $V = (0.60 \div 0.80)$ да $A = 220 \text{ мА/В}^{3.1}$ ли $I = A \cdot V^{3.1}$, $V = (0.80 \div 0.90) \text{ В}$ да $A = 195 \text{ мА/В}^{2.5}$ ли $I =$

$A \cdot V^{2.5}$, $V = (0.90 \div 1.40)$ В да $A = 195$ мА/В^{2.1} ли $I = A \cdot V^{2.1}$, $V = (1.40 \div 1.80)$ В да $A = 232$ мА/В^{1.5} ли $I = A \cdot V^{1.5}$ мавжудлиги, $V = (2.10 \div 2.48)$ В кучланишларда эса А.Ю. Лейдерман таклиф қилган «инжекциявий камбағаллашиш эффекти» назарияси доирасида тавсифлаш мумкин бўлган субчизиқли соҳа кузатилган:

$$V = V_0 \cdot \exp(Iad / S) \quad (12)$$

Бундай ВАХ чуқур сатҳли, юқори концентрацияли ёпишиш марказлари мавжуд структураларда, эркин заряд ташувчиларнинг қарама қарши йўналишдаги бикутбий диффузияси ва дрейфи туфайли юзага келади, бунда, $a = 1/(2kT\mu_p N_t)$, N_t – чуқур сатҳли ёпишиш марказларининг концентрацияси. Субчизиқли соҳа натижаларидан a параметрнинг қиймати $a = 3.03 \cdot 10^3$ см/А га тенглиги, асосий заряд ташувчилар ҳаракатчанлигини чуқур сатҳли ёпишиш марказлари концентрациясига кўпайтмаси $\mu_p \cdot N_t = 4 \cdot 10^{16}$ см⁻¹·В⁻¹·с⁻¹ га тенглиги аниқланган. ВАХ да субчизиқли соҳадан кейин $I = 207 \cdot V^{1.38}$ соҳа кузатилган.



9-расм. n -GaP- p -(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x гетероструктуранинг схемаси (а), энергетик зона диаграммаси (б) ва ВАХ (с)

Стационар шароитда p - базада эркин заряд ташувчилар тақсимотини тавсифлайдиган асосий тенглама қуйидаги кўринишда бўлади:

$$D_n \frac{d^2 n}{dx^2} - \mathcal{G}_a \frac{dn}{dx} - \frac{n - n_n}{\tau_n} = 0 \quad (13)$$

бу ерда, \mathcal{G}_a - p -база бикутбий дрейф тезлиги бўлиб, қуйидаги формула билан ифодаланади:

$$\mathcal{G}_a = \frac{\mu_p}{(b\gamma + b + 1)n} \left\{ N_a - \left[\frac{dE^*}{dx} p - p \frac{d^2 E^*}{dp^2} \right] + \left[N_t^- - n \frac{dN_t^-}{dn} \right] \right\} E_j \quad (14)$$

бу ерда, $\gamma = N_t/n_t$ - электронлар учун ёпишиш фактори, N_a – саёз акцепторлар концентрацияси, $E^* = \varepsilon \cdot E / (4\pi q)$, ε - диэлектрик доимий, $E_l = J / (q\mu_n(bn + p))$.

n -GaAs- p -(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x ($0 \leq x \leq 0.05$) ва n -GaP- p -(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x ($0 \leq x \leq 0.05$) гетероструктуралар фотосезгирлигини электромагнит нурланишнинг тўлқин узунлигига боғлиқлиги ўрганилган (10-расм). p -(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x

($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришма қатламларининг қалинлиги иккала структурада ~ 15 мкм га тенг. GaAs, GaP тагликларнинг ва $(\text{InSb})_{0.95}(\text{Sn}_2)_{0.05}$ қаттиқ қоришманинг тақиқланган зоналари кенлиги, мос равишда $E_{g,\text{GaAs}} = 1.43$ эВ, $E_{g,\text{GaP}} = 2.26$ эВ, $E_{g(\text{InSb})(\text{Sn})} = 0.11$ эВ ларни ташкил қилади.

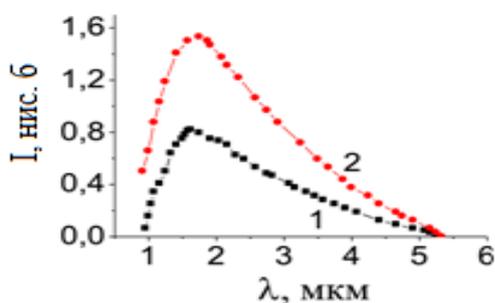
10-расмдан кўриняптики, иккала структура учун ҳам фотосезгирлик ўхшаш ва максимумлар 1.65 мкм да кузатилган. Фотосезгирлик тўлқин узунлигининг 1.0÷5.3 мкм диапазонини эгаллаган. Лекин, бир хил шароитда $n\text{-GaP-p-(InSb)}_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ структура фотосигналининг сон қиймати $n\text{-GaAs-p-(InSb)}_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ структурасиникига нисбатан икки марта катта. Бу р- $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қатлам ва $n\text{-GaP}$, $n\text{-GaAs}$ тагликлар орасидаги электрон-тешик ўтишда ҳосил бўладиган потенциал тўсиқларнинг фарқига боғлиқ бўлса керак.

$(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ қаттиқ қоришманинг тақиқланган зонаси кенлигини аниқлаш учун ютиш коэффициентини (α)ни нурланиш тўлқин узунлигига боғланиши ўрганилган (11-расм). Ютиш коэффициенти Бугерт-Ламберт қонуни асосида баҳоланган:

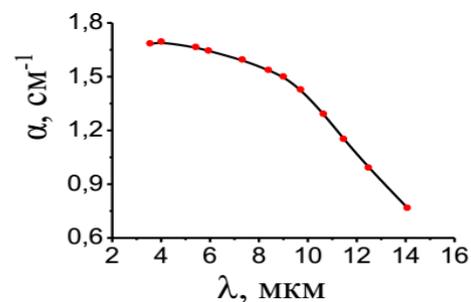
$$I(\lambda) = (1 - R(\lambda))^2 \cdot I_0(\lambda) \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot d} \quad (15)$$

бу ерда, $R(\lambda)$ – қатлам сиртини нурни қайтариш коэффициенти, $I_0(\lambda)$ ва $I(\lambda)$ – мос равишда намунага тушаётган ва ундан ўтган монохроматик нурланиш интенсивлиги.

$(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ тор зонали яримўтказгич, шунинг учун $\alpha = \alpha(\lambda)$ боғланиш нурланиш спектрининг ИК соҳасида ишловчи икки каналли компенсацияловчи SPECORD-71 спектрометр ёрдамида оптик ютилиш усули билан аниқланди. 11- расмдан кўриняптики, $\alpha(\lambda)$ ИК нурланиш соҳасида тўлқин узунлигининг кенг оралиғини эгаллайди ва ~ 14 мкм гача етади. $\alpha = \alpha(\lambda)$ боғланишни узун тўлқинли чегарасини таҳлили шуни кўрсатадики, қаттиқ қоришмани тақиқланган зона кенлиги $E_{g,\text{кк}} = 0.11$ эВ ни ташкил этади ва $E_{g,\text{InSb}} = 0.18$ эВ дан кичикдир. $E_{g,\text{кк}}$ ни $E_{g,\text{InSb}}$ га нисбатан камайишига кристалл панжара тугунларида InSb молекулаларининг атомлари ўрнини Sn атомлари олиши сабаб бўлади.



1. $n\text{-GaAs-p-(InSb)}_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$);
 2. $n\text{-GaP-p-(InSb)}_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$).
 10-расм. Спектрал фотосезгирлик.



11-расм. $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қатламнинг ютилиш коэффициентини тўлқин узунлигига боғлиқлиги.

ХУЛОСА

1. Sn эритмадан Ge (111) тагликларга p-тип ўтказувчанликдаги 5.3 мОм·см солиштира қаршиликли, панжара доимийси 0.56812 нм бўлган (111) йўналишли монокристалл структурага эга бўлган $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришманинг эпитаксиал қатламларини ўстиришнинг технологик режими ишлаб чиқилди.

2. Илк бор антимонид индий бинар бирикмаси индий эритмасида ўзининг эриш ҳароратидан паст ($250 \div 325^\circ\text{C}$) ҳароратларда, асосан InSb молекуласи шаклида бўлишлиги, молекулаларни тўлалигича алоҳида атомларга диссоциацияланмаслиги аниқланди.

3. In ли эритмадан GaAs (100) тагликларга p-тип ўтказувчанликдаги, панжара доимийси 0.6486 нм бўлган (100) йўналишли монокристалл структурага эга бўлган $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришманинг эпитаксиал қатламларини $325 \div 220^\circ\text{C}$ ҳарорат оралиғида, юқори ва пастки тагликлар орасидаги қоришма-эритманинг қалинлиги 1 мм ва совитиш тезлиги 1 град/мин бўлганда ўстиришнинг технологик режими ишлаб чиқилди.

4. Илк бор $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришмасининг эпитаксиал қатламлари сиртида асосининг диаметри $100 \div 400$ нм, баландлиги эса $5 \div 20$ нм бўлган турли ўлчамдаги алоҳида жойлашган нанокристаллитлар ҳосил бўлганлиги аниқланди.

5. $n\text{-Ge-p-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) структурада ток ўтиши диффузия ва «вакансия + рекомбинация аралашма маркази» типидagi рекомбинация комплекслари ичида электрон алмашуви инерциясини ҳисобга олган ҳолда омик релаксация режимида дрейф механизмлари билан тавсифланиши аниқланди.

6. Sn атомлари ҳисобига $n\text{-Ge-p-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) структуранинг фотосезгирлиги тоза германийли электрон-ковакли ўтишникига нисбатан паст энергияли фотонлар томонига ~ 0.27 эВ га силжиши ва фотонлар энергиясининг 0.4 дан 1.4 эВ гача спектрал диапазонини эгаллаши аниқланди.

7. Илк бор нурланишнинг ютилиш коэффицентини спектрал боғлиқлиги бўйича олинган экспериментал натижалар асосида $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришма эпитаксиал қатламларининг тақиқланган зонаси кенглиги 0.11 эВ ни ташкил қилиши аниқланди.

8. Олинган ва тадқиқ қилинган $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) қаттиқ қоришмалар 1.5÷3 мкм тўлқин узунликлар соҳасида ишлайдиган термофотозэлектрик генераторлар ва фотодатчикларни тайёрлаш учун, $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) қаттиқ қоришмалар эса 8÷11 мкм тўлқин узунликлар соҳасида ишлайдиган тепловизорлар ва фотодатчикларни ишлаб чиқиш учун тавсия қилинди.

**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**

**УРГЕНЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

АСАТОВА УМИДА ПАЛВАНОВНА

**УЗКОЗОННЫЕ ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ $Ge_{1-x}Sn_x$, $(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$
И ИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2019.2.PhD/FM 143.

Диссертация выполнена в Ургенчском государственном университете и Физико-техническом институте.

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

Научный руководитель: Усмонов Шукрулло Негматович
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Шаробаев Носир Юсупжонович
доктор физико-математических наук, профессор

Тургунов Нозимжон Абдуманнопович
доктор физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: Ташкентский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «22» мая 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 Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № 22) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-59

Автореферат диссертации разослан «10» мая 2021 г.
(реестр протокола рассылки № 22 от 10 мая 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

З. Т. Азаматов
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 в мировой практике в области полупроводникового материаловедения и оптоэлектронного приборостроения наряду с элементарными полупроводниками широко применяются и твердые растворы (ТР) бинарных соединений $A^{III}B^V$. Среди них полупроводниковые материалы с областью фундаментального поглощения, соответствующей ближнему (с длиной волны до 3 мкм) и среднему (8÷11 мкм) инфракрасному диапазону спектра излучения имеют свое место. Такие материалы имеют особое значение в разработке термофотоэлектрических генераторов, термовольтаических элементов, датчиков инфракрасного излучения, тепловизоров и т.п.

На мировом уровне при выращивании эпитаксиальных пленок узкозонных полупроводниковых твердых растворов перспективными материалами являются: германий (Ge) (с шириной запрещенной зоны - $E_g = 0.67$ эВ) и его твердый раствор с оловом (Sn) (с $E_g < 0.67$ эВ), а также антимонид индия (InSb) (с $E_g = 0.18$ эВ) и его твердый раствор с Sn (с $E_g < 0.18$ эВ). Поэтому проводятся научные исследования по выращиванию эпитаксиальных пленок многокомпонентных полупроводниковых твердых растворов с управляемым составом и кристаллическим совершенством, а также изучаются их структурные, электрофизические и фотоэлектрические свойства. В связи с этим особое внимание уделяется разработке технологий выращивания твердых растворов $Ge_{1-x}Sn_x$ и $(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ из жидкой фазы.

В нашей республике достигнуты определенные результаты в технологии получения эпитаксиальных слоев твердых растворов, а также в комплексном исследовании свойств полупроводниковых материалов и структур на их основе. В связи с этим растет потребность в выращивании монокристаллических эпитаксиальных слоев узкозонных полупроводниковых твердых растворов на различных инородных подложках и получении на их основе многослойных структур с высокой чувствительностью в инфракрасной области. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан отмечены задачи «...освоение выпуска принципиально новых видов продукции и технологий, обеспечение на этой основе конкурентоспособности отечественных товаров на внешних и внутренних рынках»¹. В данном направлении создание новых полупроводниковых материалов – твердых растворов для разработки микроэлектронных приборов с востребованными электрофизическими свойствами имеет особое научное значение.

Данное диссертационное исследование соответствует задачам, обозначенным в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской

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

деятельности» от 17 февраля 2017 года, № ПП-3855 «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности» от 14 июля 2018 года, № ПП-4348 «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала отрасли» от 30 мая 2019 года, 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. До настоящего времени проблемы выращивания и исследования структурных и фотоэлектрических свойств эпитаксиальных пленок узкозонных твердых растворов на основе Ge, Sn, InSb и InAs изучались в следующих научных центрах: Max Planck Institute of Microstructure Physics, Institute of Physics, Martin Luther University Halle Wittenberg (Германия), Eco Topia Science Institute, Nagoya University, Department of Crystalline Materials Science, Graduate School of Engineering, Institute for Advanced Research (Япония), Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, Department of Physics and Astronomy, Rutgers University (США), в Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе, в Институте физики микроструктур РАН (Россия) и в Физико-техническом институте АН РУз (Узбекистан).

Слои твердых растворов $Ge_{1-x}Sn_x$ с высоким содержанием Sn выращивались разными методами. Американские ученые Nupur Bhargava, Matthew Coppinger, Jay Prakash Gupta методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при температурах ниже 250°C на подложках Ge (001) выращивали эпитаксиальные пленки $Ge_{1-x}Sn_x$ ($0 \leq x \leq 0.145$). Структура пленок была когерентная, высококачественная, напряженная. Количество атомов Sn, находящихся в узлах кристаллической решетки, во всем интервале изменения $0 \leq x \leq 0.145$ составляло выше 90%. Японскими учеными Osamu Nakatsuka, Yosuke Shimura и Wakana Takeuchi получены тонкие эпитаксиальные слои $Ge_{1-x}Sn_x$ с высоким содержанием Sn (до 27%) на подложках Si (110), Ge (001) и InP (001) методом МЛЭ. Несмотря на большое количество исследований эпитаксиальных пленок $Ge_{1-x}Sn_x$ остаются не в полной мере изученными особенности эпитаксии совершенных монокристаллов $Ge_{1-x}Sn_x$, их структурные и фотоэлектрические свойства, а также механизмы переноса электрического тока в *p-n*- структурах, созданных на их основе.

В мировой практике мало работ, посвященных выращиванию и исследованию эпитаксиальных пленок твердых растворов $(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$. Возможности выращивания эпитаксиальных слоев твердых растворов

$(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ из жидкой фазы были показаны учеными нашей республики под руководством проф. А.С. Саидова. Однако, электрофизические и структурные свойства этих пленок детально не были исследованы.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена по плану научно-исследовательских работ Физико-технического института по темам: № ФА-Ф2-Ф030+Ф096 «Выращивание твердых растворов на основе ZnS, ZnSe, ZnTe, GaSb, Si, Ge, SiC и их фотоэлектрические и люминесцентные свойства»; Ф2-ФА-0-43917 «Вольтаические, излучательные свойства, нанодфекты новых твёрдых растворов и гетероструктур на основе Si, Ge, GaSb, InSb, GaP, GaAs, ZnSe, ZnS, SiC, алмаза».

Целью исследования является определение структурных, электрофизических и фотоэлектрических свойств твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) и $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) и *p-n* гетероструктур на их основе.

Задачи исследования:

разработка режимов получения твердых растворов замещения $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$;

выращивание эпитаксиальных пленок твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) на Ge (111) и $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) на GaAs (100), Ge (100) и GaP (111) подложках из жидкой фазы;

определение химического состава и кристаллического совершенства эпитаксиальных пленок твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$;

изготовление *n-Ge-p-Ge* $_{1-x}\text{Sn}_x$, *n-GaAs-p-(InSb)* $_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$, *n-Ge-p-(InSb)* $_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$, *n-GaP-p-(InSb)* $_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$, гетероструктур с токосъемными контактами;

анализ механизмов переноса тока и спектральных зависимостей фоточувствительности *p-n* гетероструктур, изготовленных на основе твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$.

Объектом исследования являются эпитаксиальные слои твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ и гетеропереходы на их основе.

Предметом исследования являются явления атомарного и молекулярного замещения компонентов твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$, а также механизмы переноса тока и фотовольтаические процессы в гетероструктурах, создаваемых на основе таких твердых растворов.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы следующие методы: структурное совершенство эпитаксиальных слоев твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ было исследовано методом дифракции рентгеновского излучения, химический состав и качественная оценка распределения атомов компонентов по поверхности и по толщине эпитаксиального слоя TP $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ были исследованы рентгеновским микрозондовым анализом, рельеф поверхности

эпитаксиальных пленок твердого раствора $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ изучен на атомно-силовом микроскопе, подвижность носителей заряда определена методом Холла, роли компонентов твердых растворов и спектральной фоточувствительности структур на основе твердых растворов были исследованы методом спектральной зависимости фотопоглощения, для оценки ширины запрещенной зоны ТР $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ были исследованы спектральные зависимости фотопоглощения, механизмы переноса тока в структурах на основе твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ были определены современными методами анализа вольт амперной характеристики.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан технологический режим выращивания твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) с совершенными монокристаллическими структурами, постоянной решетки 5.6812 \AA и с ориентацией (111) в интервале температуры $740 \div 450^\circ\text{C}$ и скорости охлаждения 1 град/мин ;

впервые выявлено, что при растворении в интервале температур $250 \div 325^\circ\text{C}$ бинарного соединения антимолида индия в индии, оно находится в виде молекулы InSb ;

впервые обнаружено, что на поверхности эпитаксиальной пленки $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) образуются отдельно расположенные нанокристаллиты диаметром $100 \div 400 \text{ нм}$ и высотой $5 \div 20 \text{ нм}$;

установлено, что под влиянием атомов Sn граница фоточувствительности структуры $n\text{-Ge-p-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) сдвигается на 0.27 эВ в длинноволновую область спектра излучения по сравнению с германиевым электронно-дырочным переходом и начинается с энергии фотонов 0.4 эВ ;

установлено, что за счет расположения атомов Sn в узлах кристаллической решетки ширина запрещенной зоны твердого раствора $(\text{InSb})_{0.95}(\text{Sn}_2)_{0.05}$ на 0.07 эВ меньше ширины запрещенной зоны бинарного соединения InSb и составляет 0.11 эВ .

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан оптимальный технологический режим получения эпитаксиальных слоев твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) из жидкой фазы на $n\text{-Ge}$ подложках;

определена возможность разработки чувствительных датчиков инфракрасного излучения и тепловизоров в диапазоне длин волн $8 \div 11 \text{ мкм}$ на основе эпитаксиальных слоев твердых растворов $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$).

Достоверность результатов исследования обосновывается применением современных измерительных средств и методов исследования, соответствием экспериментальных и расчетных данных с теоретическими результатами других авторов, а также трактовкой полученных результатов на основе современных физических моделей.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследований заключается в развитии и уточнении представлений о механизмах роста и структурных особенностях

эпитаксиальных пленок твердых растворов молекулярного замещения и механизмах переноса тока в электронно-дырочных переходах, изготовленных на основе узкозонных твердых растворов.

Практическая значимость результатов исследования заключается в применении твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$), выращенных на Ge подложках, для разработки эффективных фотопреобразователей, а твердых растворов $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$), выращенных на GaAs, Ge и GaP подложках, для разработки фотодатчиков и тепловизоров.

Внедрение результатов исследования.

На основе полученных научных результатов изучения структурных, электрофизических, фотоэлектрических свойств твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$), $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) и механизмов переноса тока в *p-n*-гетероструктурах:

метод выращивания совершенного монокристалла твердого раствора $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ с ориентацией (111), ПР 5.6812 Å и рассогласование параметров решетки твердого раствора и Ge подложки на величину 0.0044, методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) из Sn раствора-расплава в интервале температур $740 \div 450^\circ\text{C}$ и скорости охлаждения 1 град/мин, а также сдвиг fotocувствительности *n-Ge-p-Ge* $_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) гетероструктур под влиянием атомов Sn в длинноволновую сторону спектра излучения на 0.27 эВ по сравнению с германиевыми электронно-дырочными переходами были применены в Акционерном обществе «FOTON» при получении полупроводниковых пластин и гетеро электронно-дырочных переходов (Справка № 04-1/680 от 11 марта 2020 года АК Узэлтехсаноат). Использование научных результатов позволило изготовить опытные образцы ИК фотоприемников с электрофизическими параметрами на уровне аналогов;

рекомендации по применению твердых растворов $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$), выращенных на GaAs, Ge и GaP подложках, для разработки фотодатчиков и тепловизоров использованы в технологическом процессе изготовления фотоэлектрических преобразователей среднего диапазона инфракрасного излучения на заводе компании Italia Syntes Alloys. (Italia Syntesalloys S.p.A Codice Fiscale-Partita Iva 02494460021-Numero REA BI-192088, Biella, 28-01- 2021). Использование научных результатов позволило разработать эффективные фотодатчики инфракрасного излучения на длинах волн $8 \div 11$ мкм.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 28 научных трудах, из них 8 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 4 статьи в зарубежных международных реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения.

Текст диссертации изложен на 109 страницах, включая 33 рисунков и 3 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики, раскрыта степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, приведены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна и практическая значимость исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации и публикациях работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Современное состояние выращивания и исследования структурных, электрофизических и фотоэлектрических свойств узкозонных твердых растворов на основе германия, олова и бинарных соединений $A^{III}B^V$ »** приведен литературный обзор по возможностям образования твердых растворов на основе Ge, Sn и бинарных соединений InAs, InSb, GaSb; рассмотрены различные технологические методы выращивания таких твердых растворов (жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ), газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (ГФЭМОС) и молекулярно лучевая эпитаксия (МЛЭ)); проанализировано современное состояние выращивания твердых растворов, а также структурные и электрофизические свойства узкозонных полупроводниковых твердых растворов; изложены результаты исследования электрофизических и фотоэлектрических свойств пленок твердых растворов $Ge_{1-x}Sn_x$ и гетероструктур на их основе; приведены примеры применения узкозонных полупроводников в современном приборостроении, устройств, работающих в инфракрасной (ИК) области спектра излучения.

Во второй главе **«Особенности жидкофазной эпитаксии твердых растворов $Ge_{1-x}Sn_x$ и $(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ »** приведены результаты исследования по выращиванию эпитаксиальных слоев твердых растворов $Ge_{1-x}Sn_x$ и $(InSb)_{1-x}(Sn_2)_x$ методом ЖФЭ.

Твердые растворы $Ge_{1-x}Sn_x$ выращивались методом ЖФЭ из ограниченного объема Sn раствора-расплава в атмосфере водорода. ЖФЭ была проведена на вертикально расположенном кварцевом реакторе с горизонтально расположенными подложками. В качестве подложек были использованы Ge шайбы с кристаллографической ориентацией (111) и удельным сопротивлением 1.0 Ом·см. Диаметр подложки составлял 20 мм, а толщина – около 400 мкм. Эпитаксиальные пленки выращивались при различных значениях параметров технологического процесса жидкостной эпитаксии. Были варьированы: состав раствора-расплава, скорость принудительного охлаждения Sn раствора-расплава, начало температуры

кристаллизации, толщина раствора-расплава (расстояние между верхними и нижними подложками).

Содержание Sn в ТР зависит от температуры начала кристаллизации и состава раствора-расплава. При одинаковых прочих условиях наблюдается увеличение содержания атомов Sn в ТР $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ с повышением температуры начала кристаллизации. В ТР, выращенных из раствора-расплава $\text{Ge}+\text{Sn}+\text{ZnSe}$, содержание атомов Sn составляло до 10 ат.% при температуре начала кристаллизации 740°C , а при температуре 540°C – до 3 ат.%.

Качественные пленки выращивались при скоростях охлаждения $0.5\div 1.0$ град/мин. Совершенство эпитаксиальных пленок при прочих равных условиях также зависит от толщины раствора-расплава между верхними и нижними подложками. При значениях толщины раствора-расплава в интервале от 0.65 до 1 мм эпитаксиальные слои имели совершенную монокристаллическую структуру.

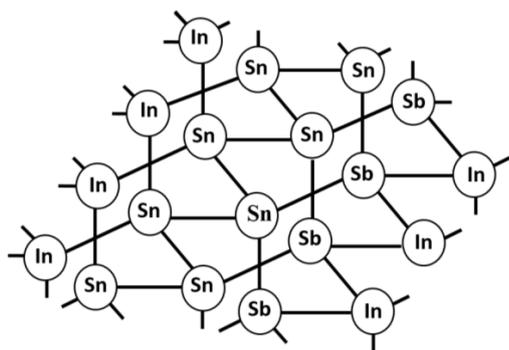


Рис. 1. Тетраэдрические связи твердого раствора замещения $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$.

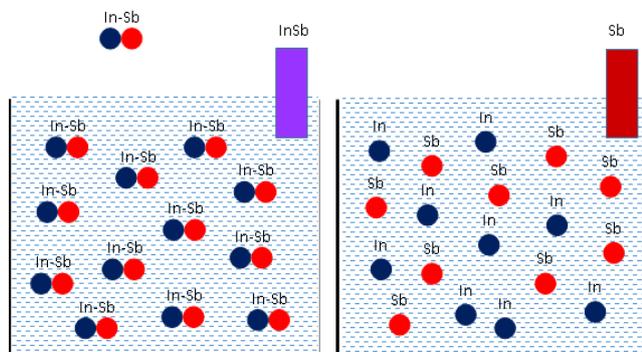


Рис 2. Растворение антимонида индия
а) в виде молекул InSb ,
б) в виде отдельных атомов In и Sb .

Возможности образования ТР молекул InSb и Sn_2 обусловлены тем, что сумма валентности ($z_{\text{In}} + z_{\text{Sb}} = z_{\text{Sn}} + z_{\text{Sn}} = 8$) и ковалентных радиусов ($r_{\text{In}} + r_{\text{Sb}} = r_{\text{Sn}} + r_{\text{Sn}} = 2.80 \text{ \AA}$) атомов этих молекул равны. На рис. 1 показаны тетраэдрические ковалентные связи атомов ТР $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$. Как видно из рис. 1, в тетраэдрической решетке, помимо основных ковалентных связей компонентов ТР – In-Sb и Sn-Sn , существуют ещё связи In-Sn и Sn-Sb .

Для выращивания ТР $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ между InSb и Sn необходимо создание условий для молекулярного замещения, т.е. InSb должны быть замещены молекулами Sn_2 .

Для ЖФЭ ТР $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ в качестве растворителя был использован In . Температура плавления In при нормальных условиях составляет 156.6°C , а InSb и Sn – 527°C и 231.9°C , соответственно. Растворимость InSb определялась методом потери веса образцов InSb , помещенных в жидкий In и выдержанных в нем до насыщения раствора в интервале температур от 220 до 400°C . При этом учитывалось влияние Sn на растворимость InSb . Экспериментальные результаты показывают, что растворимость InSb в In небольшая и при температуре 350°C составляет 7.4 моль.%.

Согласно модели проф. Саидова А.С., растворенный InSb в In при температуре 350°C находится в виде молекул InSb (рис. 2 а). Если бы молекулы InSb разделились на отдельные атомы In и Sb (рис. 2 б), то это было бы равно сильному растворению Sb в индии. При температуре 350°C Sb в In имеет растворимость ~ 12 моль %. Тогда, соответственно, растворимость InSb в In при 350°C должна была быть 12 моль %. Однако, этого не наблюдается, а растворимость InSb в In составляет 7.4 моль %. Следовательно, можно сказать, что растворенный InSb в In растворе при температуре 350°C находится в виде молекул InSb.

Твердые растворы $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ выращивались из In раствора-расплава в атмосфере H_2 . В качестве подложек были использованы GaAs, Ge и GaP шайбы с диаметром 2 см, толщиной 350÷400 мкм, n-типа проводимости. Концентрация носителей заряда в GaAs и GaP составляла $(4\div7)\cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Ge подложки имели удельное сопротивление 1.0 Ом·см. Эпитаксиальные слои TP $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ с зеркально-гладкими поверхностями и с высоким кристаллическим совершенством выращивались при толщине раствора-расплава между верхними и нижними подложками 1 мм, температурном интервале кристаллизации 325÷220°C и скорости охлаждения раствора-расплава 1 град/мин. Выращенные пленки имели монокристаллическую структуру с ориентацией (100) и дырочный тип проводимости.

В третьей главе «Структурные, электрофизические и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных слоев твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и структур на их основе» приведены результаты экспериментального исследования структурных, электрофизических и фотоэлектрических свойств слоя TP $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) и *p-n*- структур на его основе.

Результаты рентгеновского микронного анализа по поверхности и по сколу показали, что эпитаксиальные слои не содержат включений второй фазы и металлических включений. Распределение атомов Ge и Sn по поверхности и по сколу эпитаксиального слоя с точностью до микронных размеров было однородное. Ge и Sn по поверхности и по сколу эпитаксиального слоя с точностью до микронных размеров было однородное. Поверхность слоя была зеркально гладкая. На рис. 3 представлены растровые картины скола TP $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$). Рис. 3 б свидетельствует об образовании слоя TP $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$, обеспечивающего достаточную адгезию с Ge подложкой.

Структурное совершенство TP $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) было исследовано рентгеновским дифрактометром Дрон-УМ1 ($\text{Cu}_{K\alpha}$ -излучения с длиной волны $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). На рис. 4 представлена рентгенограмма слоя TP. Кристаллографическая ориентация эпитаксиальной пленки соответствует кристаллографической плоскости (111). Об этом свидетельствует присутствие на рентгенограмме узких, интенсивных, селективных рефлексов серии {222}.

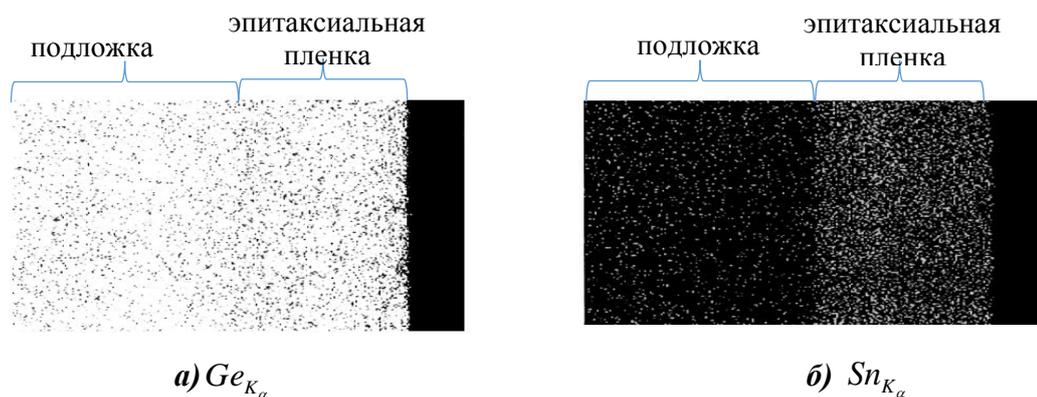


Рис. 3. Растровые картины скола эпитаксиального слоя ТР $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$).

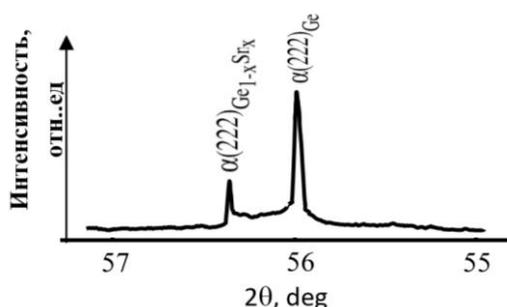


Рис. 4. Рентгенограмма эпитаксиального слоя ТР $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$).

Рефлекс $\alpha(222)_{\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x}$ при $2\theta = 56.36^\circ$, $d/n = 1.84 \text{ \AA}$ с гораздо меньшей интенсивностью обусловлен рассеянием рентгеновского излучения от плоскости серии $\{222\}$ подрешетки ТР $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и имеет полуширину $\omega_{\text{пол}} \approx 4.1 \cdot 10^{-4}$ рад. Узкая ширина селективных рефлексов и отсутствие диффузных отражений рентгеновского излучения свидетельствуют о высокой степени совершенства кристаллической решетки эпитаксиальной пленки.

Рельеф поверхности пленок $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ исследовался атомно-силовым микроскопом (АСМ). На гладкой поверхности пленки образуются отдельно расположенные «бугорки» различного размера (рис. 5). Диаметр основания «бугорков» меняется от ~ 100 до 400 нм, а высота от 5 до 20 нм. Шероховатость гладкой части поверхности не превышает ~ 3 нм. Узкие структурные рефлексы на дифрактограмме от плоскостей (222) , а также отсутствие других рефлексов и диффузного отражения свидетельствуют, что «бугорки», повидимому, являются нанокристаллами с ориентацией (111) и что они когерентно расположены с матрицей кристаллической решетки ТР. Возникновение наноразмерных «бугорков» является результатом самоорганизации процесса роста пленки из жидкой фазы. Нанокристаллы снимают механические напряжения кристаллической решетки, возникающие за счет отличия КР $r_{\text{Ge}} = 1.22 \text{ \AA}$ и $r_{\text{Sn}} = 1.40 \text{ \AA}$.

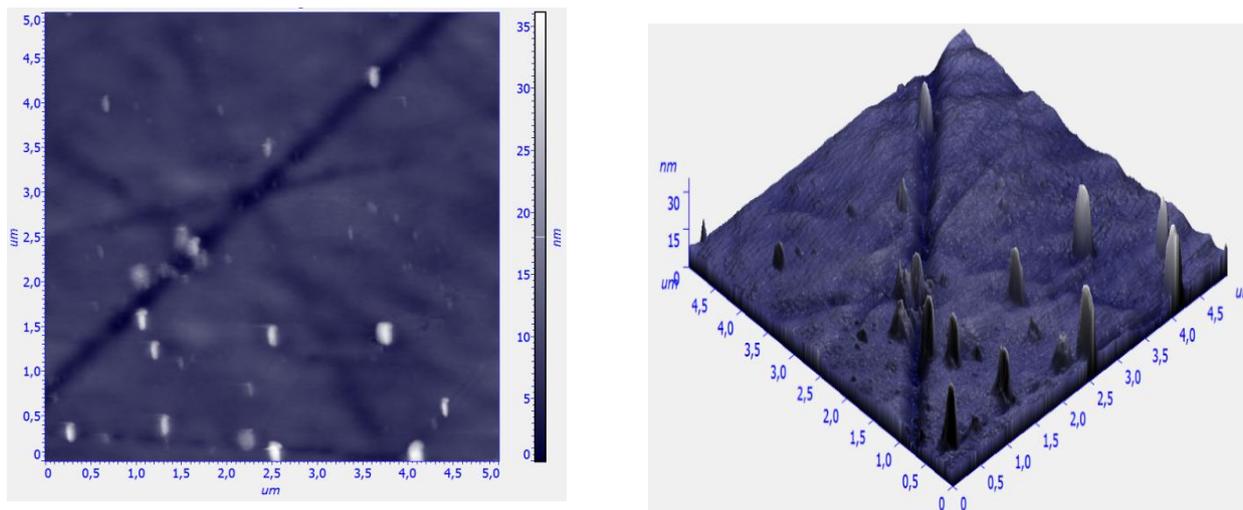


Рис. 5. Двухмерное (а) и трехмерное (б) АСМ изображения пленки TR $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$).

Была изучена вольт-амперная характеристика (ВАХ) $n\text{-Ge-p-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) гетероструктуры (рис.6) с базовой областью из $p\text{-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ слоя, с толщиной $d = 15$ мкм. Начальный участок ($V < 0.5$ В) прямой ветви ВАХ описывается зависимостью, представленной Стафеевым В.И., как

$$I = I_0 \exp(qV / ckT) \quad (1)$$

Зависимость (1) была уточнена проф. А.Ю. Лейдерманом и получено выражение:

$$c = \frac{2b + ch(d/L_n) + 1}{b + 1}, \quad (2)$$

где $b = \mu_n/\mu_p$, μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок, соответственно, L_n – диффузионная длина неосновных носителей в базовой области. На основе данных ВАХ было определено значение $c=20.8$.

Множитель I_0 в выражении (1) описывается формулой:

$$I_0 = \frac{kT}{q} \cdot \frac{S \cdot b \cdot ch(d/L_n)}{2(b+1) \cdot L_n \cdot \rho \cdot tg(d/2L_n)} \quad (3)$$

(S – площадь образца, ρ – удельное сопротивление). Значение тока I_0 оказалось равным $I_0=8.82 \cdot 10^{-3}$ А. Было также, найдено значение удельного сопротивления переходного слоя - $\rho = 2.2 \cdot 10^3$ Ом·см.

Удельное сопротивление эпитаксиального слоя, измеренное по методу Холла, составляло - $5.3 \cdot 10^{-3}$ Ом·см. По-видимому, между подложкой $n\text{-Ge}$ и эпитаксиальной пленкой $p\text{-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) образуется высокоомный переходной слой, и следовательно, исследованную структуру можно рассматривать как $n\text{-p-p}^+$ - переход.

На ВАХ за экспоненциальным участком следуют участки со степенными зависимостями (рис. 6 б): – в диапазоне $0.5 \div 0.9$ В наблюдается квадратичная зависимость – $I = 133 \cdot V^2$, – затем до величины 1.4 В - $I = 123 \cdot V^{1.3}$, – а при $V > 1.4$ В второй квадратичный участок - $I = 87 \cdot V^2$. Такую зависимость ВАХ

можно качественно объяснить в рамках модели двойной инжекции, для n - p - p^+ - структуры с омическими контактами к n - и p^+ - слоям, с помощью дрейфового механизма переноса тока в режиме омической релаксации с учетом инерционности электронного обмена внутри рекомбинационных комплексов. В этом случае основное уравнение, описывающее изменение концентрации (n) свободных неравновесных носителей заряда, имеет следующий вид:

$$\frac{J \cdot N_a}{q(b+1)^2 n^2} \cdot \frac{dn}{dx} + U = 0, \quad (4)$$

где J – плотность тока, U – скорость рекомбинации неравновесных носителей заряда.

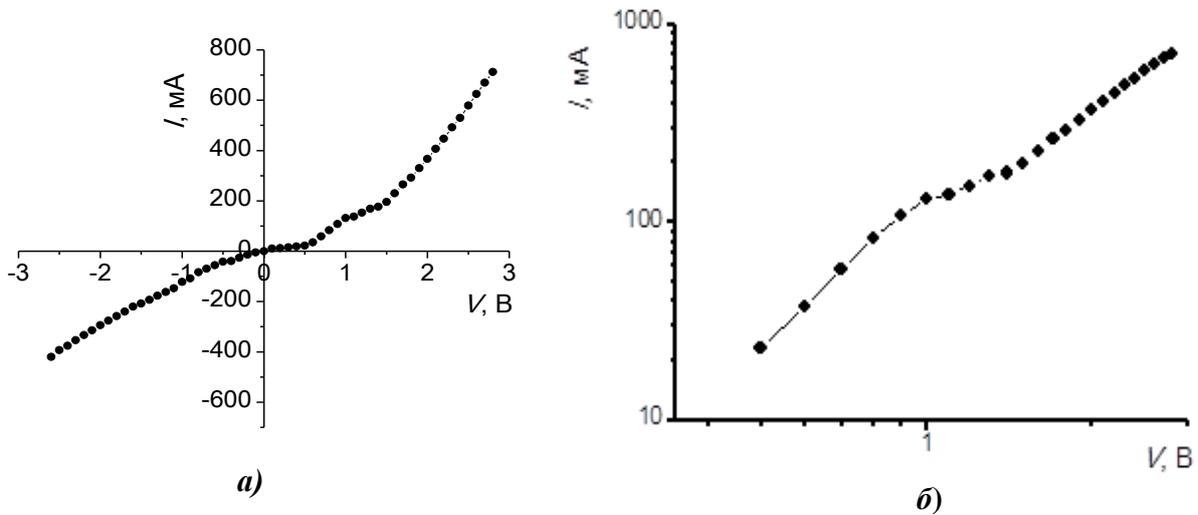


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика n -Ge- p -Ge $_{1-x}$ Sn $_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) гетероструктуры (а) и ее прямая ветвь (б).

Исследование данного режима рассмотрим для структуры n -Ge- p -Ge $_{1-x}$ Sn $_x$ - p^+ -Ge $_{1-x}$ Sn $_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) с высокоомной p - Ge $_{1-x}$ Sn $_x$ базой, содержащей рекомбинационные комплексы типа «вакансия + рекомбинационный примесный центр». В этом случае выражение для U будет иметь следующий вид:

$$U = N_R \cdot \frac{c_n c_p (np - n_i^2)}{c_n (n + n_1) + c_p (p + p_1) + c_n c_p \tau_{RS} np}, \quad (5)$$

где N_R - исходная концентрация рекомбинационно-активных центров, c_n и c_p - коэффициенты захвата электронов и дырок, соответственно, на эти центры, n , p - концентрации свободных электронов и дырок, соответственно, τ_{RS} - время рекомбинационно-стимулированной перестройки N_R , n_1 , p_1 - статистические факторы Шокли-Рида.

Когда выполняется условие $c_n(n+n_1)+c_p(p+p_1) \gg c_n c_p \tau_{RS} np$ выражение для скорости рекомбинации переходит в выражение статистики Шокли-Рида. Наступает лампертовский режим двойной инжекции. В этом случае решение уравнения(4) с учетом граничных условий - неидеальности инжектирующих контактов: $n(0) \sim \sqrt{J}$, $n(d) \sim \sqrt{J}$ (т.е. ток через n - p - переход определяется не

только чисто электронной составляющей, но и дырочной, и точно также ток через p-p⁺- переход определяется не только чисто дырочной составляющей, но и электронной) дает следующее выражение для вида ВАХ:

$$J = \frac{9}{8} \cdot \frac{q\mu_n\tau_n\mu_p N_a}{d^3} \cdot V^2, \quad (6)$$

Выражение (6) хорошо описывает квадратичный участок ВАХ – $I = 133 \cdot V^2$ в интервале 0.5÷0.9 В. Далее с ростом уровня инжекции наступает момент, когда $c_n(n+n_1)+c_p(p+p_1) > c_n c_p \tau_{RS} \cdot np$. В этом случае когда $c_n \approx c_p$, и $p \approx n$, то U имеет следующий приближенный вид:

$$U = \frac{p}{2\tau_n} - \frac{c_p \tau_{RS} p^2}{4\tau_n}. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) решение уравнение (4) описывает следующий вид ВАХ:

$$V = \sqrt{\frac{8d^3}{9q\mu_p\mu_n\tau_n N_a}} \cdot M(J) \cdot \sqrt{J}, \quad (8)$$

где

$$M(J) \approx 1 + 3m \left(2 + C \tau_{RS} c_p \sqrt{J} \right)^2. \quad (9)$$

Зависимость (8) показывает более слабую зависимость тока от напряжения, чем квадратичная, что соответствует зависимости $I = 123 \cdot V^{1.3}$ на ВАХ.

Когда $c_n(n+n_1)+c_p(p+p_1) \ll c_n c_p \tau_{RS} \cdot np$, скорость рекомбинации выходит на насыщение, и будет иметь следующий вид:

$$U = \frac{N_R}{\tau_{RS}}, \quad (10)$$

а ВАХ возвращается снова к квадратичному виду:

$$J = B_0 \cdot (V - V_0)^2 \quad (11)$$

Зависимость (11) описывает второй квадратичный участок ВАХ – $I = 87 \cdot V^2$ на участке $V > 1.4$ В.

Для изучения роли компонентов ТР была исследована зависимость фоточувствительности n -Ge- p -Ge_{1-x}Sn_x ($0 \leq x \leq 0.03$) структур от энергии фотонов с помощью ИК спектрометра ИКС-21. Фоточувствительность оценивалась по отношению тока короткого замыкания при различных значениях энергии фотонов ($I_{ph}(h\nu)$) к их максимальному значению ($I_{ph,max}$) – $I_{ph}(h\nu) / I_{ph,max}$. Фоточувствительность структур охватывает диапазон энергии фотонов от 0.4 до 1.4 эВ (рис. 7).

В четвертой главе «**Особенности структурных, электрофизических, термовольтаических и фотоэлектрических свойств эпитаксиальных слоев твердых растворов (InSb)_{1-x}(Sn₂)_x и гетероструктур на их основе**» приведены результаты исследования структурных, электрофизических, термовольтаических и фотоэлектрических свойств слоев ТР (InSb)_{1-x}(Sn₂)_x и гетероструктур на их основе.

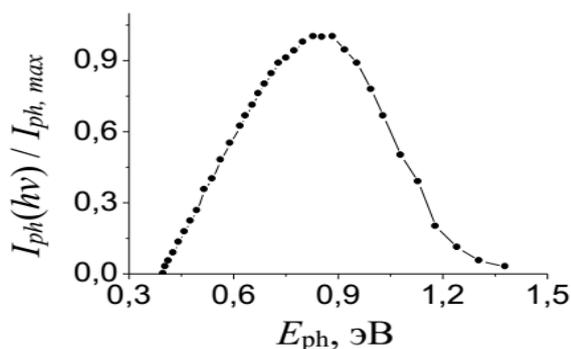


Рис. 7. Спектральная фоточувствительность n -Ge- p -Ge $_{1-x}$ Sn $_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) гетероструктуры

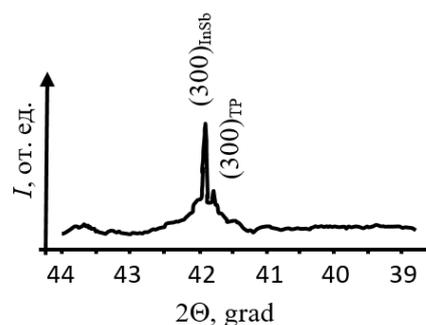


Рис. 8. Рентгенограмма слоя твердого раствора (InSb) $_{1-x}$ (Sn $_2$) $_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$).

Структурное совершенство пленок было оценено по результатам исследования рентгенограмм, полученных на дифрактометре ДРОН-УМ1. На рис. 8 представлена рентгенограмма слоя TP (InSb) $_{1-x}$ (Sn $_2$) $_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$), выращенного на GaAs(100) подложках.

На рентгенограмме присутствуют два ярко выраженных структурных рефлекса с очень большой (300) $_{\text{InSb}}$ и небольшой (300) $_{\text{TP}}$ интенсивностью. Интенсивная линия (300) $_{\text{InSb}}$ при $2\theta = 41.97^\circ$ с $d/n = 0.384 \text{ \AA}$ обусловлена рассеянием рентгеновского излучения от базовых плоскостей серии {300} решетки InSb и имеет узкую ширину $\omega \approx 1.62 \cdot 10^{-3}$ рад. Менее интенсивная линия при $2\theta = 41.85^\circ$ с $d/n = 0.385 \text{ \AA}$ обусловлена рассеянием рентгеновского излучения от плоскостей серии {300} решетки TP (InSb) $_{1-x}$ (Sn $_2$) $_x$ и имеет ширину $\omega \approx 8.61 \cdot 10^{-4}$ рад. Узкая ширина структурных линий и отсутствие других пиков в рентгенограмме свидетельствуют о высокой степени совершенства кристаллической решетки пленки. Эпитаксиальная пленка является монокристаллической с ориентацией (100). ПР подслоя InSb (a_{InSb}) и TP (InSb) $_{1-x}$ (Sn $_2$) $_x$ (a_{TP}), определенные по селективным рефлексам, составляли $a_{\text{InSb}} = 6.475 \text{ \AA}$ и $a_{\text{TP}} = 6.486 \text{ \AA}$, соответственно.

С целью изучения механизма переноса тока в n -GaP- p -(InSb) $_{1-x}$ (Sn $_2$) $_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) гетероструктуре была исследована ее ВАХ. Структура обладала слабой варизонностью, ширина запрещенной зоны (E_g) в ней менялась от $E_g(0) = 0.18 \text{ эВ}$ до $E_g(d) = 0.1 \text{ эВ}$ (рис. 9 а, б). Типичная ВАХ гетероструктуры показана на рис. 9, с. При напряжениях $0.08 \div 0.50 \text{ В}$ ВАХ хорошо описывается экспоненциальной зависимостью (см. выражение (1)) с значением показателя $c = 3.6$, при этом значение произведения подвижности на время жизни неосновных носителей заряда составляло $\mu_n \tau_n = 4.79 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{В}$. За экспоненциальным участком на ВАХ следуют степенные зависимости типа $I = A \cdot V^m$ с различными значениями показателя степени m и коэффициента A . При $V = (0.60 \div 0.80) \text{ В}$ наблюдается участок $I = A \cdot V^{3.1}$ с $A = 220 \text{ мА/В}^{3.1}$; при $V = (0.80 \div 0.90) \text{ В}$ – $I = A \cdot V^{2.5}$ с $A = 195 \text{ мА/В}^{2.5}$; при $V = (0.90 \div 1.40) \text{ В}$ – $I = A \cdot V^{2.1}$ с $A = 195 \text{ мА/В}^{2.1}$, при $V = (1.40 \div 1.80) \text{ В}$ – $I = A \cdot V^{1.5}$ с $A = 232 \text{ мА/В}^{1.5}$. Далее при $V = (2.10 \div 2.48) \text{ В}$ наблюдается сублинейный

участок, который может быть описан в рамках теории «эффекта инжекционного обеднения», предложенной проф. А.Ю. Лейдерманом:

$$V = V_0 \cdot \exp(Iad / S). \quad (12)$$

Такая ВАХ реализуется в структурах, содержащих высокие концентрации глубоких центров прилипания, в условиях встречных направлений амбиполярных диффузии и дрейфа свободных носителей заряда, причем $a = 1/(2kT\mu_p N_t)$, где N_t – концентрация глубоких центров прилипания. Значение параметра a составляло $a = 3.03 \cdot 10^3$ см/А, а произведение $\mu_p \cdot N_t = 4 \cdot 10^{16}$ см⁻¹·В⁻¹·с⁻¹. За сублинейным участком на ВАХ следует участок $I = 207 \cdot V^{1.38}$.

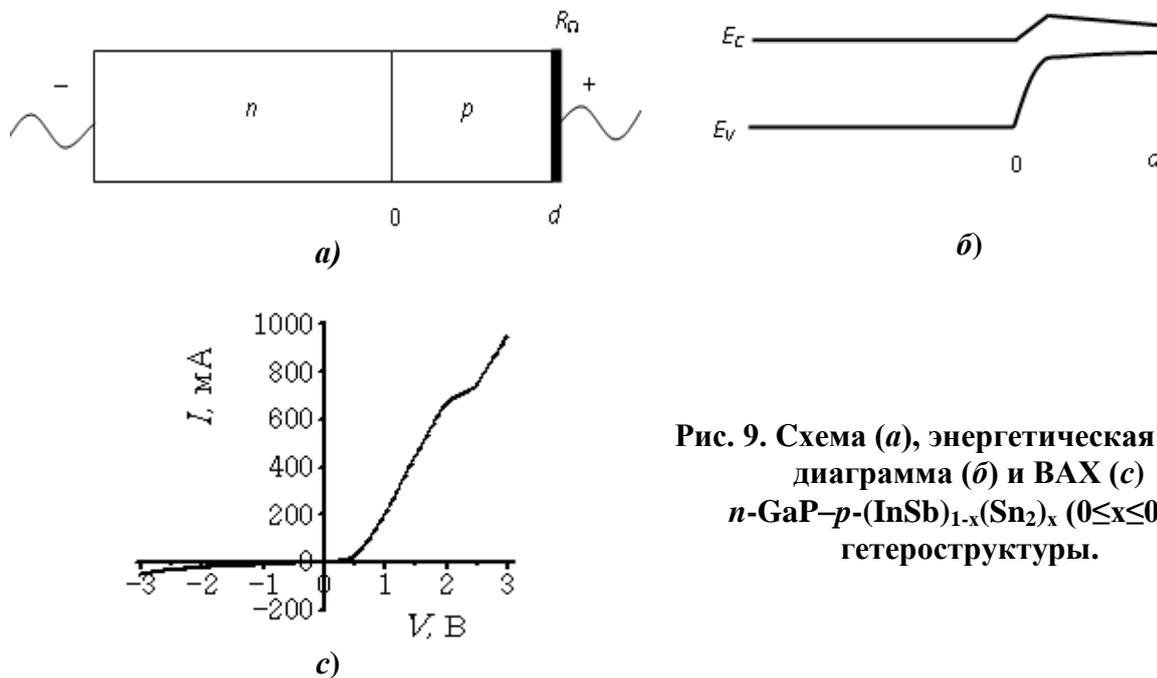


Рис. 9. Схема (а), энергетическая зонная диаграмма (б) и ВАХ (с) $n\text{-GaP-p-(InSb)}_{1-x}\text{(Sn}_2\text{)}_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) гетероструктуры.

Основное уравнение, описывающее распределение свободных носителей заряда в p -базе в стационарных условиях, можно записать в виде:

$$D_n \frac{d^2 n}{dx^2} - \mathcal{G}_a \frac{dn}{dx} - \frac{n - n_n}{\tau_n} = 0, \quad (13)$$

где \mathcal{G}_a – амбиполярная скорость дрейфа носителей заряда в p -базе, имеет следующий вид:

$$\mathcal{G}_a = \frac{\mu_p}{(b\gamma + b + 1)n} \left\{ N_a - \left[\frac{dE^*}{dx} p - p \frac{d^2 E^*}{dp^2} \right] + \left[N_t^- - n \frac{dN_t^-}{dn} \right] \right\} E_j \quad (14)$$

где $\gamma = N_t/n_t$ – фактор прилипания для электронов, N_a – концентрация мелких акцепторов, $E^* = \varepsilon \cdot E / (4\pi q)$, ε – диэлектрическая постоянная, $E_j = J / (q\mu_n(bn + p))$.

Были исследованы зависимости фоточувствительности $n\text{-GaAs-p-(InSb)}_{1-x}\text{(Sn}_2\text{)}_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) и $n\text{-GaP-p-(InSb)}_{1-x}\text{(Sn}_2\text{)}_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) гетероструктур от длины волны фотонов (рис. 10). Толщина слоев ТР $p\text{-(InSb)}_{1-x}\text{(Sn}_2\text{)}_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) у этих двух структур составляла ~ 15 мкм.

Ширины запрещенной зоны подложек GaAs и GaP составляют $E_{g, \text{GaAs}} = 1.43$ эВ и $E_{g, \text{GaP}} = 2.26$ эВ, соответственно, а ТР $\text{InSb}_{0.95}(\text{Sn}_2)_{0.05} - E_{g, \text{ТР}} = 0.11$ эВ.

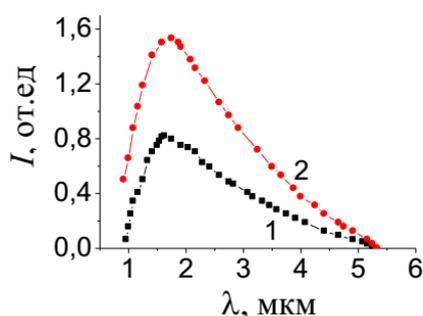
Из рис. 10 видно, что фоточувствительности этих двух структур идентичны и охватывают широкий диапазон длин волн - от 1.0 до 5.3 мкм с максимумом при 1.65 мкм. Однако, при прочих равных условиях величина фотоотклика в структуре $n\text{-GaP-}p\text{-(InSb)}_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ была два раза больше, чем в случае $n\text{-GaAs-}p\text{-(InSb)}_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$. Это, по-видимому, связано с отличием потенциальных барьеров, образованных в электронно-дырочном переходе между подложкой $n\text{-GaP}$, $n\text{-GaAs}$ и слоем $p\text{-(InSb)}_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$.

Для оценки ширины запрещенной зоны ТР $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ были исследованы зависимости коэффициента поглощения (α) от длины волны излучения (рис. 11). Коэффициент поглощения излучения оценивался по закону Бугера-Ламберта:

$$I(\lambda) = (1 - R(\lambda))^2 \cdot I_0(\lambda) \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot d}, \quad (15)$$

где $R(\lambda)$ - коэффициент отражения излучения от поверхности пленки, $I_0(\lambda)$ и $I(\lambda)$ - интенсивности монохроматического излучения, падающего на образец и проходящего через него, соответственно.

Полупроводниковая структура $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ является узкозонной, поэтому зависимость $\alpha = \alpha(\lambda)$ определялась методом оптического поглощения в ИК области спектра излучения на двухканальном компенсационном спектрофотометре SPECORD-71 IR. Из рис. 11 видно, что $\alpha(\lambda)$ охватывает широкий диапазон длин волн в ИК диапазоне и достигает ~ 14 мкм. Анализ длинноволнового края зависимости $\alpha = \alpha(\lambda)$ показывает, что ширина запрещенной зоны ТР ($E_{g, \text{ТР}}$) составляет $E_{g, \text{ТР}} = 0.11$ эВ, что меньше, чем $E_{g, \text{InSb}} = 0.18$ эВ. Уменьшение $E_{g, \text{ТР}}$ по сравнению с $E_{g, \text{InSb}}$ обусловлено атомами Sn, которые замещают атомы молекул InSb в узлах кристаллической решетки ТР.



1. $n\text{-GaAs-}p\text{-(InSb)}_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$)
2. $n\text{-GaP-}p\text{-(InSb)}_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

Рис. 10. Спектральная фоточувствительность.

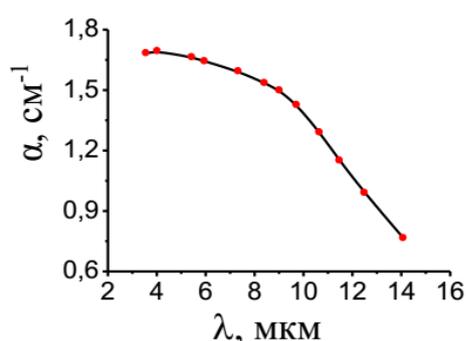


Рис. 11. Зависимость коэффициента поглощения слоя $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) от длины волны излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан технологический режим выращивания эпитаксиальных пленок твердого раствора $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$), имеющих р-тип проводимости

с удельным сопротивлением 5.3 мОм·см, постоянной решетки 0.56812 нм и монокристаллическую структуру с ориентацией (111) из Sn раствора-расплава на Ge (111).

2. Впервые установлено, что бинарное соединение антимонида индия при температурах ниже температуры плавления ($250 \div 325^\circ\text{C}$) в индиевом растворителе в основном находится в виде молекулы InSb, а не происходит полная диссоциация молекул на отдельные атомы.

3. Разработан технологический режим выращивания эпитаксиальных слоев твердого раствора $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$), имеющих р-тип проводимости, постоянной решетки 0.6486 нм и монокристаллическую структуру с ориентацией (100) на GaAs (100) подложках из In раствора-расплава при температурном интервале $325 \div 220^\circ\text{C}$, толщине раствора-расплава между верхними и нижними подложками 1 мм и скорости охлаждения 1 град/мин.

4. Впервые обнаружено, что на поверхности эпитаксиальной пленки $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) образуются отдельно расположенные нанокристаллиты различного размера, диаметр основания которых имеет размеры $100 \div 400$ нм, а высота – $5 \div 20$ нм.

5. Установлено, что перенос тока в $n\text{-Ge-p-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) структуре описывается диффузионным и дрейфовым механизмами в режиме омической релаксации с учетом инерционности электронного обмена внутри рекомбинационных комплексов типа «вакансия + рекомбинационный примесный центр».

6. Выявлено, что за счет атомами Sn область фоточувствительности $n\text{-Ge-p-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) структур сдвигается на ~ 0.27 эВ в сторону низкоэнергетических фотонов по сравнению с чисто германиевыми электронно-дырочными переходами, и охватывает спектральный диапазон энергии фотонов от 0.4 до 1.4 эВ.

7. Впервые на основе экспериментальных результатов спектральной зависимости коэффициента поглощения излучения определено, что ширина запрещенной зоны эпитаксиального слоя твердого раствора $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) составляет 0.11 эВ.

8. Полученные и исследованные твердые растворы $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) рекомендованы для изготовления термофотоэлектрических генераторов и фотодатчиков, работающих в области длин волн 1,5-3 мкм, а твердые растворы $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) рекомендованы для разработки тепловизоров и фотодатчиков, работающих в области длин волн 8-11 мкм.

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

**URGENCH STATE UNIVERSITY
PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE**

ASATOVA UMIDA PALVANOVNA

**NARROW-GAP SOLID SOLUTIONS $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$, $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ AND THEIR
PHOTOELECTRIC PROPERTIES**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2021

The theme of the dissertation of the 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 B2019.2.PhD/FM143.

The dissertation was carried out at the Urgench State University and the Physical-technical Institute
The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.ispm.uz and on the website of "ZiyoNet" Information and Educational Portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor: **Usmonov Shukrullo Negmatovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Official opponents: **Sharibayev Nosir Yusupjonovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Turgunov Nozimjon Abdumannopovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor

Leading organization: **Tashkent State Technical University**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "22" 05 2021, at 10⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz)

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No. 22). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on "10" 05 2021.
(Registry record No. 22 dated "10" 05 2021)



Sh. B. Utamuradova,
Chairwoman of the Scientific Council for the award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

J. J. Khamdamov,
Scientific Secretary of the Scientific Council for the award of scientific degrees, PhD

Z. T. Azamatov,
Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the research work is to study the structural, electrophysical and photoelectric properties of solid solutions $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) and $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) and *p-n* heterostructures based on them.

The object of investigation is the epitaxial layers of $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ and $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ solid solutions and heterojunctions based on them.

The scientific novelty of the research consists of the following:

a technological regime has been developed for growing $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) solid solutions with perfect single-crystal structures, lattice constant 5.6812 Å and orientation (111) in the temperature range 740÷450 °C and cooling rate 1 deg / min;

for the first time it was revealed that the binary compound indium antimonide, when dissolved in indium at temperatures of 250÷325°C, is in the form of InSb molecule;

for the first time it was discovered that on the surface of the $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) epitaxial film, separately located nanocrystallites of various sizes with a diameter of 100÷400 nm and a height of 5÷20 nm are formed;

it was found that under the influence of Sn atoms the photosensitivity n-Ge – p- $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) of heterostructures is shifted to the long-wavelength region of the emission spectrum by 0.27 eV in comparison with the germanium electron-hole junctions and begins with the photon energy of 0.4 eV;

it was found that due to the arrangement of Sn atoms at the sites of the crystal lattice, the band gap of the solid solution $(\text{InSb})_{0.95}(\text{Sn}_2)_{0.05}$ is 0.07 eV less than the band gap of the binary compound InSb and is 0.11 eV.

Implementation of research results. Based on the obtained scientific results of studying the structural, electrophysical, photoelectric properties of solid solutions Ge–p- $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$), $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) and mechanisms of current transfer in p-n-heterostructures:

the method of growing a perfect single crystal of the $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ solid solution with the orientation (111), PR 5.6812 Å and the lattice mismatch of the solid solution and the Ge substrate by 0.0044, by the method of liquid-phase epitaxy (LPE) from the Sn solution-melt in the temperature range 740 ÷ 450°C and a cooling rate of 1 deg / min, as well as a shift in the photosensitivity of n-Ge – p- $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) heterostructures under the influence of Sn atoms to the long-wavelength side of the emission spectrum by 0.27 eV in comparison with germanium electron-hole transitions were applied in Joint Stock Company "FOTON" when obtaining semiconductor wafers and hetero-electron-hole junctions (Reference No. 04-1 / 680 of March 11, 2020, JSC Uzeltehsanoat). The use of scientific results made it possible to manufacture prototypes of IR photodetectors with electrophysical parameters at the level of analogs;

recommendations for the use of solid solutions $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) grown on GaAs, Ge and GaP substrates for the development of photosensors and thermal imagers are used in the technological process of manufacturing

photoelectric converters in the mid-infrared range at the plant by Italia Syntes Alloys. (Italia Syntesalloys S.p. A Codice Fiscale-Partita Iva 02494460021-Numero REA BI-192088, Biella, 28-01-2021). The use of scientific results has made it possible to develop effective photosensors for infrared radiation at wavelengths of 8-11 microns.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and applications. The text of the dissertation consists of 109 pages, including 33 figures and 3 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Saidov A.S., Leyderman A.Yu, Usmonov Sh.N., Asatova U.P. Peculiarities of the Current–Voltage Characteristic of n-GaP–p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x Heterostructures // Technical Physics Letters, 2020 .– Vol. 46, No.11. – pp. 1124–1127. (№3 Scopus, IF = 0.773)

2. Saidov A., Usmonov Sh., Asatova U. Features of epitaxy of the layers of solid solutions (InSb)_{1-x}(Sn₂)_x on GaAs substrates // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – Tashkent, 2020. –Vol. 2, No.6. – pp. 36–39. (01.00.00; №16)

3. Саидов А.С., Усмонов Ш.Н., Асатова У.П. Особенности эпитаксии слоев твердых растворов (InSb)_{1-x}(Sn₂)_x на GaAs подложках // Труды международной конференции “Тенденции развития современной физики полупроводников: Проблемы, достижения и перспективы”. – Ташкент, 28-мая 2020г.– С. 263-269.

4. Asatova U. P., Features of current transfer in n-GaP–p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x heterostructure // Electronic journal of actual problems of modern science, education and training. – Urgench, 2019. – No.5. – pp. 25–33. (01.00.00; №10)

5. Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Asatova U.P., Ishniyozov T. Structural features of solid solutions (InSb)_{1-x}(Sn₂)_x films grown from a liquid phase on GaAs substrates and some photoelectric properties of heterostructures on their basis // Electronic journal of actual problems of modern science, education and training. – Urgench, 2019. – No.3. – pp. 7–23. (01.00.00; №10)

6. Saidov A.S, Usmonov Sh.N., Asatova U.P. Growth of Ge_{1-x}Sn_x Solid Solution Films and Studu of Their Structural Properties and Some of Their Photoelectric Properties // Semiconductors. – New York, 2012.–Vol.46, No.8. – pp. 1088–1095. (№3 Scopus, IF = 0.691)

7. Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Усмонов Ш. Н., Асатова У.П. Температурные особенности вольт-амперных характеристик n-GaP–p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x гетероструктур // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2010. – №5. – С.23–26. (01.00.00; №7)

8. Saidov A.S, Usmonov Sh.N., Asatova U.P. Active Solar Energy Material Science Thermoelectric Properties of n-Ge–p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x Heterostructures // Applied Solar Energy, 2010. – Vol. 46, No. 2. – pp. 104–106 (№3 Scopus)

II бўлим (II часть, part II)

9. Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Asatova U.P., Ismailov Sh.K. Growing and studying the photoelectric and electrical properties of epitaxial films Ge_{1-x}Sn_x

solid solutions // Scientific-Technical Journal Turin polytechnic university. – Tashkent, 2019. – No.1. – pp. 93–104.

10. Саидов А.С., Усмонов Ш.Н., Асатова У.П., Ишниязов Т., Некоторые фотоэлектрические свойства гетероструктур на основе эпитаксиальных слоев твердых растворов $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ полученных из жидкой фазы. Materials of international conference “The modern problems of renewable energy sources and sustainable environment”. – Tashkent, September 25-27, 2019. – pp. 42-47.

11. Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Asatova U.P., Ismailov Sh.K. Growth of $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ solid solution films by Liquid phase epitaxy and study of their photoelectric and structural properties // “2nd International Conference on Applied Science AeroSpace Engineering”. – Tokyo, Japan, June 24-25, 2019.

12. Асатова У.П., Усмонов Ш.Н. Исследование рельефа поверхности эпитаксиальной пленки TP $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.03$) // Respublika Ilmiy-Amaliy Konferensiyasi (RIAK-XII). – Tashkent, 18 may 2019. – С. 345–346.

13. Саидов А.С., Усмонов Ш.Н., Асатова У.П., Исмоилов Ш.К. О структуре TP $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ // Мухаммад Ал-Хоразмий издошлар мавзусидаги Республика-илмий техникавий анжуман материаллари. – Урганч, 2018. – С. 64–66.

14. Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Усмонов Ш. Н., Асатова У.П. Выращивание и исследование фотоэлектрических свойств эпитаксиальных пленок твердого раствора $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ с нанокристаллами. // Физика ва уни ўқитишнинг долзарб муаммолари мавзусидаги илмий ва илмий-методик маколалар туплами. – Гулистон, 2018. – С. 111–129.

15. Саидов А.С., Усмонов Ш. Н., Асатова У.П., Исмоилов Ш. К. О структуре TP $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ // Образование и воспитание. Международный журнал. – Казань, № 3.1. 2018. – С.24–26.

16. Саидов А.С., Усмонов Ш. Н., Асатова У.П. Структурные особенности TP $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 < x < 0.03$) // Труды международной конференции . – Ташкент, 13–14 июня 2017. – С.49–53.

17. Асатова У.П., Исмаилов Ш. К. О возможности синтеза узкозонных твердых растворов замещения $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ // Al-Xorazmiy nomli Urganch davlat universitetining Ilmiy-metodik jurnali Ilm sarchashmalari. – Urganch, 2015. – №12. – С. 14–17.

18. Асатова У.П. Выращивание пленок $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ на арсенид-галлиевых подложках методом жидкофазной эпитаксии // Республика ёш олимлар ва иктидорли талабалар мактаб-семинари материаллари. Замонавий физиканинг долзарб муаммолари. – Самарканд, 28-29 мая 2010. – С. 106–110

19. Асатова У.П., Усмонов Ш.Н. Спектральная фоточувствительность n-GaAs-p- $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ структур // Материалы Республиканской конференции «Современная физика и ее перспективы». – Ташкент, 12–13 ноября 2009. –С.247–249.

20. Саидов А.С., Усмонов Ш.Н., Асатова У.П. Спектральная фоточувствительность n-Ge-p- $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ структур // Тезисы докладов 2-

Международной научной конференции. Физика и Физическое образование: Достижения и перспективы развития. – Бишкек, 18-20 сентября 2008. – С.22.

21. Раззаков А.Ш., Асатова У.П., Исмоилов Ш.К. Синтез трехкомпонентных твердых растворов $(\text{Sn}_2)_x(\text{InSb})_{1-x}$ // Материалы Республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Композиционные материалы: Структура, свойства и применение». – Ташкент, 27-28 июня 2008. – С.136–138.

22. Саидов М.С., Саидов А.С., Асатова У. П., Исмоилов Ш.К. “Рост, свойства и применение кристаллов” // Материалы IV Республиканской научной конференции. – Андижан, 2008. – С. 37–38.

23. Saidov A.S, Ismoilov Sh.K, Asatova U.P. Liquid phase epitaxy of solid solutions. // Magnetic and Superconducting Materials MSM 07. – Khiva, 25 th-30 th September, 2007. – pp.100–101.

24. Saidov A.S, Asatova U.P., Ismoilov Sh. K. Growing of the $(\text{Sn}_2)_{1-x}(\text{InSb})_x$ epitaxial layers on the GaAs substrate from a liquid phase // Magnetic and Superconducting Materials MSM 07. – Khiva, 25 th-30 th September, 2007. – p.54.

25. Saidov A.S, Leyderman A.Yu, Ismoilov Sh.K., Asatova U.P. Electrical and photoelectrical properties of thin films on base n-GaAs-p- $(\text{Sn}_2)_{1-x}(\text{InSb})_x$ structures // Magnetic and Superconducting Materials MSM 07. – Khiva, 25 th-30 th September, 2007. – p. 54.

26. Саидов А.С, Кошчанов Э.А., Раззаков А.Ш., Асатова У.П. Токовые характеристики $\text{GaAs}-(\text{Sn}_2)_x(\text{InSb})_{1-x}$ гетероструктур // Труды конференции посвященной 60-летию Академии наук Республики Узбекистан и Физико-технического института «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». – Ташкент, 27-28 ноября 2003 . – С.342-343.

27. Саидов А.С., Раззаков А. Ш., Сапаров Д. В., Давлатов У.Т., Асатова У.П., Саидниёзов О. Некоторые электрофизические свойства nGaAs-p $(\text{Sn}_2)_{1-x}(\text{InSb})_x$ // Вестник ГулГУ. – Гулистон, 2002. – №2. – С.3–7.

28. Саидов А.С., Раззаков А. Ш., Кошчанов Э.А., Асатова У.П. Кристаллизация слоев полупроводниковых твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ из жидкой фазы // Труды второй международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». – Одесса, 28-31 мая 2001 . – С.273.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида
тахрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини
мослиги текширилди (07.05.2021 йил)

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

Автореферат “Тil va adabiyot ta’limi” - «Преподавание языка и литературы» илмий-методик журнали тахририятида тахрирдан
ўтказилиб, ўзбек ва рус инглиз тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди (07.05.2021)



