#### ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ, ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

#### ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

#### ЭЛМУРОТОВА ДИЛНОЗА БАХТИЁРОВНА

## РАДИАЦИЯВИЙ-ИНДУЦИРЛАНГАН ZnO НАНОЗАРРАНИНГ ШАКЛЛАНИШИ ВА ZnSe КРИСТАЛЛАРИДА ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

01.04.07 – конденсирланган холат физикаси

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

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

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

## Contents of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

Элмуротова Дилноза Бахтиёровна	
Радиациявий-индуцирланган ZnO нанозарранинг шаклланиши ва	
ZnSe кристалларида электролюминесценция	3
Элмуротова Дилноза Бахтиёровна	
Радиационно-индуцированное формирование наночастиц ZnO и	
электролюминесценция в кристаллах ZnSe	25
Elmurotova Dilnoza Baxtiyorovna	
Radiation-induced formation of ZnO nanoparticles and	
electroluminescence in ZnSe crystals	47
Эълон қилинган ишлар рўйхати	
Список опубликованных работ	
List of published works	51

#### ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ, ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

#### ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

#### ЭЛМУРОТОВА ДИЛНОЗА БАХТИЁРОВНА

## РАДИАЦИЯВИЙ-ИНДУЦИРЛАНГАН ZnO НАНОЗАРРАНИНГ ШАКЛЛАНИШИ ВА ZnSe КРИСТАЛЛАРИДА ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

01.04.07 – конденсирланган холат физикаси

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.4.PhD/FM159 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш вебсахифаси (www.inp.uz) ва «Ziyonet» ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий рахбар:	Ибрагимова Эльвира Меметовна физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим					
Расмий оппонентлар:	Хидиров Ирсали физика-математика фанлари доктори, профессор Ташмухамедова Дилноза Артикбаевна физика-математика фанлари доктори, профессор					
Етакчи ташкилот:	У.А. Арифов номидаги Ион-плазма ва лазер технологиялари институти					
Миллий университети хузуридаййил соат	ро физикаси институти, Астрономия институти, Ўзбекистон ги DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 ракамли Илмий кенгашнинг 2019 даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент визикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-18; факс (+99871) 289-					
	физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиц рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент шахри, Улуғбен 31-19).					
	2019 йил « » куни тарқатилди. даги рақамли реестр баённомаси)					

М. Ю. Ташметов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор

Э.М.Турсунов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

И. Нуритдинов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш хузуридаги илмий семинар раиси ф.-м.ф.д., профессор

#### КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жахонда ярим ўтказгичли оптоэлектроника сохасида ярим ўтказгичли наноструктураларда электр энергиясини кўриш диапазонидаги нурланишга айлантириш самарадорлигини оширишнинг физикавий механизмларини ўрганиш энг мухим вазифалардан бири хисобланади. Кенг зонали кичик ўлчамли ярим ўтказгичли *p-n* гетероўтишлар хона хароратида электролюминесценцияга эга бўлиши, ихчамлиги, самарадорлиги туфайли люминесцент ва чўғланма чироклар ўрнини эгаллаб келмокда. Шу нуктаи назардан, юкори самарали ёруғлик таркатувчи кичик вольтли биполяр кенг зонали, хусусан ZnO/ZnSe наногетероўтишларни олиш муаммоси ўта долзарб масала бўлиб хисобланади.

Бугунги кунда жахонда наноструктуралардаги яримўтказгичли гетероўтишлар - квант қурилмалари бўлиб, улар зона кенглигини ўзгартира оладиган, ғайриоддий электронлар транспорти ва оптик эффектларга эга бўлган оптоэлектрон материаллар сифатида қўлланилади. Кўк/яшил нур тарқатувчи (p-n инжекцияли) диодлар ZnSe ва ZnTe асосида ишлаб чиқарилган бўлиб, юқори хусусий нурланиш самарадорлиги квант ўра шаклидаги наногетероструктуралар конфигурациясининг афзаллиги ва тўгри зонали ярим ўтказгич эканлиги билан боғлиқ. Уларнинг оптоэлектрон хусусиятлари нанозарраларнинг ўлчамига кучли боғлиқлиги аниқланди. Тўгри зонали кучланмаган наногетерожуфтликларда кичик кучланиш остида, хона хароратида ёркин ва баркарор (куёш нурининг ўрнини боса оладиган) нурни хосил қилиш муаммосининг ечими энг самарали нурланадиган марказлар рекомбинацияси ва нурланмайдиган каналлар рекомбинациясини ўрганиш билан боғликдир.

Мамлакатимизда дунё микёсидаги турли ўтказгичли ХИЛ ярим наногетероструктуралар ва нанотуркумлардан оптик нурни қабул киладиган фотодиод, фототранзистор ва фототиристор, инфра-кизил нурни кўриш айлантирадиган, диапазонидаги нурга оптоэлектрон гетеролазерларнинг фундаментал асосини ривожлантиришга катта эътибор қаратиляпти. Бу фундаментал тадқиқотлар ва йўналишлар мамлакатимиз ривожланишида катта ахамиятга эгадир. Уларнинг амалий татбиғи 2017-2021 йиларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Харакатлар стратегиясида<sup>1</sup> акс эттирилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Харакатлар стратегияси тўғрисида"ги, 2013 йил 1 мартдаги ПФ-4512-сонли "Муқобил энергия манбаларини янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида"ги Фармонлари, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли "Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва

5

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Харакатлар стратегияси тўғриси" даги Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

молиялаштиришни янада такомиллаштириш бўйича чора-тадбирлар тўгрисида"ги Қарорлари ҳамда ушбу соҳадаги бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада ҳизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот иши Ўзбекистон Республикасининг фан ва технологиялар ривожланишининг ІІ. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Хозирги вактда, жахоннинг таникли россиялик олимлари, жумладан: (Ж.И.Алферов, С.В.Иванов), америкалик (J.Schrier, A.P. Alivisatos), украиналик (В.Д.Рыжиков, В.Я.Дегода, С.С.Вильчинская), англиялик (G.D. Watkins, D.J.Dunstan, H.Morkos), молдавиялик (R.Scurtu, M. Popa) хиндистонлик (M.Shakir, M.A.Wahab), арабистонлик (S.Darwish, I.K. El Zawawi), хитойлик (P.Chen, Y.Wang, M.Kamruzzaman, Y.Zhang), ўзбекистонлик (М.У. Каланов, А.С. Саидов, А.А. Кист, Э.М. Ибрагимова, С. Курбонов, С.З. Зайнобиддинов) ва бошқалар томонидан рентген томография сохасида қўлланиладиган сцинтиляцион ва юкори нур чикарадиган кристалларни ўстириш, хамда ультра-бинафша нурнинг дозиметрияси учун Ni-ZnSe(Te,O)-In Шотки диодлари, лазер генерацияси учун CdSe/ZnSe квант оролчали структуралар, фотовальтаик қурилмалари учун кенг зонали ZnO/ZnSe, (1D-наносим) n-ZnO/p-ZnTe ва n-ZnO/p-ZnS гетероўтишлар ўрганилган.

Бу тадқиқотлар ZnSe монокристалларини Zn буғларида термо-ишлаш тугунлараро  $Zn_i$  марказлар ва барқарор  $(O_{se}{}^0Te_{se}{}^0V_{Zn})$  ва  $(O_{se}V_{Zn}Me^{III}{}_{Zn}Zn_i)$ ассоциатларнинг хосил бўлиши натижасида уларнинг электрик ва оптик хусусиятларини ортишига олиб келишини кўрсатди, хамда юпка ZnSe плёнкаларида тўғри рухсат этилган зоналараро ўтишларнинг досил бўлиши аниқланди; фотодетекторлар ва ёруғлик диоди сифатида қўлланиладиган ZnO/ZnSe гетеро-наноспирал, II тур n-ZnO/p-ZnSe гетероструктуралар ва фотоэффектни сезадиган ядро/қобик ZnO/ZnTe наностерженлар олинди. XX асрнинг 80-йиллари иккинчи ярмидан бошлаб, ЎзФА ЯФИда иссик нейтронлар ва рентген нурларининг сочилиш услубида қаттиқ жисмларнинг наноструктурасини аниклаш бўйича илмий тадқиқот ишлари оширилиб келинмокда. Хусусан, SiZnSe ва GaAsZnSe ярим ўтказгич бирикмаларида квант нуқталардан иборат бўлган наноструктуралар аникланган ва уларнинг электрик ва электролюминесцент хусусиятлари объектнинг фазовий йўналишини аниқлаш наностерженлар ўстирилган; радиациявий барқарорликни аниқлаш учун стехиометрланмаган ZnSe(Te):O,Zn кристалларининг сцинтилляцион хусусиятларига гамма ва реактор нурланишларининг таъсири ўрганилган.

Бироқ, наноструктураларнинг ҳолати ва электрон структураси, мумкин бўлган нанофазали қўшимчалар ва фотоэлектроактив марказларнинг шаклланишига хар ҳил турдаги ионлашган нурланишнинг таъсири, стехиометланмаганлик билан радиолиз орасидаги боғланиш, кислород

концентрацияси, самарали электролюминесценциянинг гетерочегарадаги панжара кучланиши ва чукур сатҳлар ўрни, энергетик сатҳларнинг йиғиндиси, ёрқин электролюминесценцияли ZnO/ZnSe(Te):O,Zn наногетероўтишларнинг ҳосил бўлиш имконияти батафсил ўрганилмаган.

Диссертация тадкикотининг диссертация бажарилган муассасаси илмий-тадкикот ишлари боғликлиги. Диссертация тадқикоти Ядро физикаси институтининг Ф-2.1.2 «Кўп бирикмали стехиометрланмаган намуналарнинг терморадиацион электрофизик, таъсирланишда структуравий, магнит хусусиятлари» (2003–2007); 4-04 «LiF ва ZnSe кристалларининг реактордаги индуцирланган гамма нурланиш таъсирида оптик хусусиятлари структурасининг ўзгариши» (2004–2005); 2-06 «Радиацион-индуцирланган нанотизимларнинг шаклланиши» (2006–2007); ФА-Ф2-Ф068 «Нанотизимли материалларнинг радиациявий мухандисияти» (2007-2011);ОТ-Ф2-26 «Электронлар манбаида функционал нанотизимларнинг шаклланиш механизмлари» (2017-2021)илмий-тадқиқот лойихалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади нурланиш таъсирида стехиометрланмаган ZnSe кристалларининг яқин сирт қатламидаги ZnO нанозарранинг ҳосил бўлиш механизмини ва самарали ёруғлик тарқатувчи наногетероўтишларнинг электрон структурасини аниқлашдан иборат.

#### Тадқиқотнинг вазифалари:

ZnO нанозарранинг Zn/Se нисбат ва Te, O ва Zn $_{\rm i}$  аралашмаларга боғлиқ ҳолда кристал структурасини, ўлчамини, шаклини ва ориентациясини аниқлаш;

ZnO нанозарранинг шаклланиши ва бузилишида ионловчи нурланиш энергияси ва мухитнинг (вакуум ёки хаво) таъсирини ўрганиш;

ZnSe нинг яқин сирт қатламидаги микроқаттиқликни ZnO нанозарра хусусиятларига боғлиқлигини ўрганиш;

фотоэлектрик хоссаларнинг аралашма ва Zn<sub>i</sub> марказларининг концентрациясига, ҳамда ZnO нанозарра ўлчами/шаклига боғлиқлигини ўрганиш;

оптик ютилиш, қайтиш, ўтказиш орқали электрон структурадаги сатҳларининг эгалланганлигини ва энергиясини нурланишдан олдин ва кейин аниҳлаш;

сиртий электрўтказувчанлик ва электролюминесценцияга аралашмалар Те, О, ва Zn<sub>i</sub> концентрацияси ва ZnO нанозарра ўлчами/шаклининг таъсирини ўрганиш;

ZnSe/ZnO:O наногетероструктуралар ёки ёруғлик тарқатувчи ZnSe(Te)/ZnO:O,Zn наногетероўтишларнинг ҳосил бўлишида ZnO нанозарра ўлчами/шаклнинг таъсирини ўрганиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида Те аралашмаси билан имплантацияланган, оксидли мухитда, цинк буғларида термо-ишлов

берилган ва турли хил шароитларда нурлантирилган сцинтиляцион ZnSe кристалларидаги ZnO нанозарра олинган.

Тадкикотнинг предмети бўлиб ZnSe да ZnO нанозарра ўсишининг радиацион-индуцирланган механизмлари ва турли хил геометрияли наногетеросруктура ва ёруғлик таркатувчи наногетероўтишларнинг шаклланиши, шунингдек, электролюминесценция ва фотоўтказувчанлик самарадорлигига таъсир киладиган омиллар хисобланади.

Тадкикотнинг усуллари. Элемент таркибининг рентгено-флуоресцент тахлили, рентген нурлар дифракцияси тахлили, инфракциял ва электрон микроскопияси, фотоэлектрик усуллар, микрокаттикликни, электр ўтказувчанликни ўлчаш усуллари, оптик спектроскопияси, электролюминесценция спектроскопияси усуллари.

#### Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

силлиқ наноплёнкали 27 нм (103)ZnO/(311)ZnSe:O,Zn, наноустунли чўтка 40 нм (110)ZnO/(220)ZnSe(0.2% Te):O,Zn ва наноустунчалар билан безатилган 50 нм (002)ZnO/(111)ZnSe(0.5% Te):Zn наногетероўтишлар интерфейсида панжара кучланишининг минимизация шартига асосан ZnO нанокристалларининг критик ўлчами, шакли ва ориентацияси ZnSe кристалтагликнинг мос ориентациясига боғлиқлиги аниқланган;

гамма  $^{60}$ Со нурлари таъсири натижасида электролюминесценцияси  $600\pm10$  нм ли кучланиш кутбига боғлиқ бўлмаган ва ZnSe нинг таъқиқланган зонадаги нуқсонлар йиғиндиси - Zn<sub>I</sub> марказ ва  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  ёки  $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$  ассоциат сатҳлари иштирокида ҳосил бўлган кичик волтли ёруғлик тарқатувчи ZnSe/ZnO:O,Zn (21 B,  $I_{El}$ =91), ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn (12 B,  $I_{El}$ =70) ва ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn (30 B,  $I_{El}$ =112) наногетероўтишлар олинган;

 $\sim$ 1.25 МэВ ли гамма нурлари таъсири натижасида ZnO наноустунчалар билан безатилган, қалинлиги 50 нм ли планар ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn наногетероўтишда бешта резонанс сатҳлар  $\Gamma_{6v}$ -5.76 эB,  $L_{1,3v}$ -4.85 эB, Zn<sub>i</sub>-3.39 эB, O<sub>Se</sub>- 3.17 эВ ва X=2.72 эВ ҳосил бўлиши, E<sub>g</sub> нинг 0.06 эВ қийматгача камайиши ва фотоўтказувчанликнинг  $10^{-6}$  Ом<sup>-1</sup> гача ошиши аниҳланган.

#### Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

радиолиз самарадорлиги ошишида ZnSe яқин сирт қатлами  $\sim$ 40 мкмда селен-танқис стехиометрланмаганликнинг ўрни ва тугунлараро Zn<sub>i</sub> катионда кислород адсорбцияси билан радиацион-индуцирланган гетероген нуклеация механизми буйича 1.2 нм ўлчамли аморф ZnO-нано зарра ҳосил бўлиши кўрсатилган;

Zn буғларида термо-ишлаш ва <sup>60</sup>Со гамма-нурлари таъсири натижасида ZnSe нинг яқин сирт қатламидаги ZnO-нано микдорининг ўсиш шартлари ва вакуумда 18 МэВ протон билан нурлантирилганда бузилиш шартлари, шу билан бир қаторда ядро реакторининг иссиқ колоннасидаги <sup>17</sup>О изотопидан 7 МэВ гамма-нурлари таъсири натижасида ZnSe панжара матрицасининг иккига ажралиши унинг релаксацияланиши ва ZnO нанонинг тартибланиши натижасида парчаланиш аниқланган;

гамма  $^{60}$ Со нурлари таъсири натижасида ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn наногетероўтишда кўндаланг ўлчами 400 нм ли ZnO наноустунлар чўткаси ва ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn да ZnO наноустунлар билан безатилган плёнка шаклланган бўлиб, ZnSe нинг ўтказувчанлик зонасида ҳосил бўлган резонанс сатҳларга заряд ташувчиларни термостимуляцион уриб чиқарилиши билан боғлиқ бўлган, чўқкили туннел ўтказувчанликли  $T_{\text{мак}}$ =356 ва  $T_{\text{мин}}$ =226- $T_{\text{мак}}$ =364 K;  $\sigma_{\text{мак}}$ =3·10-9 ва  $\sigma_{\text{мин}}$ =9·10-13- $\sigma_{\text{мак}}$ =6.2·10-7 Oм-1cм-1;  $E_a$ =0.57 ва  $E_a$ =0.1- $E_a$ =0.62 эВ ҳосил бўлиши аниҳланган.

ёруғлик диодларини ишлаб чиқаришда катта қизиқиш уйғотадиган *p-n-*ZnSe(0.2-0.5% Te)/ZnO:Zn,O наногетероўтишнинг икки қутбида ишчи кучланишининг 10 В гача камайишида электр энергиянинг ёруғлик энергиясига айланиш самарадорлиги 8.7% ли электролюминесценция ёрқинлигининг ўсиши аниқланган;

устунли фотодиодларни ишлаб чиқаришда катта қизиқиш уйғотадиган p-n ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn наногетероўтишда реакторнинг гамма-нурлари таъсири натижасидан фотоўтказувчанлик  $10^{-6}$  Oм $^{-1}$  қийматгача ўсиши аникланган;

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги бир-бирини тўлдирувчи замонавий аналитик усуллар мажмуасидан фойдаланилганлиги, катта статистикага эгалиги ва такрорланувчи амалий тажрибалар, мантиқий ва изчил натижалар ҳамда кенг зонали ярим ўтказгичларнинг умумий физик тасаввур хулосалари қўлланилганлиги ва уларнинг физик қонуниятлари ва моделлари таққосланганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий ахамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий ахамияти шундаки, аник ўзаро ориентацияли стехиометрланмаган ZnSe юзасида устун ёки плёнка шаклида радиациониндуцирланган ZnO нанокристалнинг ўсиши кучланмаган гетерогенли нуклеация механизмининг янги кўринишини ўзида мужассамлаштиради. Ютилиш спектрида ўлчанган резонанс энергетик сатхларнинг  $\Gamma_{6v}$ -5.76 эВ,  $L_{I.3\nu}$ -4.85 эВ,  $Zn_i$ -3.39 эВ,  $O_{Se}$ -3.17 эВ ва X =2.72 эВ тажрибавий қийматлари ўтказувчанлик зонасидаги қайтиш ўтказиш спектрларидаги ва қийматларининг ўсишига таъсир қилади, бу эса электронлар корреляциясини инобатга олган Хаббард параметри билан локал зичлик якинлашувидаги кенгайтирилган функционал зичлик усули асосида нано-ZnO ютилиш спектрларидаги хисоблар билан етарли даражада мос келади.

Илмий тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти кичик 10 В кучланишда сариқ-тўксариқ рангли юқори интенсивликда ёруғлик тарқатувчи ZnSe/ZnO:O,Zn ва ZnSe(Te)/ZnO:Zn наногетероўтишлар олишнинг радиацион технологик физикавий асосини яратишда қўлланилиши мумкинлиги билан изоҳланади. Олинган натижалар конденсирланган ҳолат физикасидаги янги наноструктура ва наноматериаллар физикаси соҳасининг ривожланишида фойдали бўлиши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Радиациявийиндуцирланган ZnO нанозарранинг шаклланиши ва ZnSe кристалларида электролюминесценцияни ўрганиш асосида:

ZnO нанокристалларининг критик ўлчами, шакли ва ориентациясининг боғлиқлиги ZnSe кристал-таглик ориентациясига мосланган бўлиб, 50 нм (002)ZnO/(111)ZnSe(0.5%Te):Zn наногетероўтиш ZnO наноустунлар билан интерфейсида панжара кучланишининг минимизациясига мосланганлиги, шу билан бир қаторда, <sup>60</sup>Со гамма-нури таъсири натижасида ZnSe кристалининг якин сирт қатламидаги ZnO-нано микдорининг ўсиш шарти A4-ФА-Ф156-сонли «ZnO-наноструктур ва органик ярим ўтказгичлар асосида юқори самарали гибрид қуёш элементлари технологиясини ишлаб чиқариш» (2012–2014) амалий лойихасида юпқа ZnO плёнканинг ўтказиш спектрларини аниклашда қўлланилган (Ўзбекистон Фанлар академиясининг 2/1255-3372-сонли декабридаги йилнинг 24 хати). натижаларнинг қўлланилиши юпқа ZnO плёнканинг микротасвирини тахлил қилиш ва сруктуравий характеристикаларини аниқлаш имконини берган;

ZnSe нинг таъқиқланган зонадаги нуқсонлар йиғиндиси Zn<sub>I</sub> марказ ва  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  ёки  $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$  ассоциат сатхлари иштирокидаги кичик вольтли ёруғлик тарқатувчи ZnSe/ZnO:O,Zn (21 B, I<sub>El</sub>=91) ва ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (12 В, Іы=70) наногетероўтишларнинг кучланиш кутбига боғлик бўлмаган ли электролюминесценция натижалари халкаро томонидан (халқаро илмий журналларда Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2011; Прикладная физика, 2011; Матеріали для сенсорів, 2011; Journal of Advances in Condensed Matter Physics, 2018; Journal of Applied Physics, 2018; Journal of Luminescence, 2018) фотоўтказувчанлигини, нанозарранинг фотолюминесценциясини, ZnO микротасвирини ва рентгенограммасини, ҳамда ZnSe ёруғлик диодларининг электро-фото-рентгено-люминесцент хусусиятларига гамма ва рентгент нурланишлар таъсирини тушунтиришда қўлланилган. Илмий натижаларнинг қўлланилиши ZnO нанозарранинг вюрцитли гексагональ структурасини, Vo фотолюминесценциянинг эмиссиясини, билан боғлиқ яшил фотоўтказувчанликни, хамда соф ZnSe кристалларининг юкори хароратли ўтказувчанлигини, люкс-ампер хусусиятининг рентгено рағбатлантирилган ўтказувчанликнинг боғликлигини ва ультра-бинафша фотоўтказувчанликни тушунтириш имконини берган;

~1.25 МэВ нурлари таъсири натижасида ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn наногетероўтишда Zn<sub>i</sub>-3.39 эВ, О<sub>Se</sub>-3.17 эВ резонанс сатҳларнинг бўлиши, нинг 0.06 эВ гача камайиши хосил  $E_{\mathfrak{g}}$  $Om^{-1}$ ошиши А4-ФА-Ф156-сонли  $10^{-6}$ фотоўтказувчанликнинг наноструктур ва органик ярим ўтказгичлар асосида юкори самарали гибрид қўёш элементлари технологиясини ишлаб чиқариш» (2012–2014) амалий лойихада ZnO нанотуркумнинг рентгенограмма тахлилини ўтказишда (Ўзбекистон Фанлар академияси йилнинг фойдаланилган 2018 декабридаги 2/1255-3372-сонли хати). Илмий натижаларнинг қўлланилиши нанотуркумларнинг фотовольтаик фотолюминесценция ZnO ва хусусиятларини аниклаш имконини берган.

**Тадкикот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадкикот 20 та халкаро ва 9 та республика микёсидаги конференциялар ва халкаро мактабларда мухокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 36 та илмий иш чоп қилинган, шулардан 7 таси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда илмий мақола, жумладан 3 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва хажми. Диссертация кириш, 5 та боб, хулоса, илова ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация асосий кисмининг хажми 120 бетни ташкил этади.

#### ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

"Радиациявий-индуцирланган ZnO нанозарранинг шаклланиши ва ZnSe кристалларида электролюминесценция" номли диссертациянинг кириш кисмида ўтказилган тадкикотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадкикотнинг максади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадкикотнинг илмий янгилиги хамда амалий натижалари баён килинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий ахамияти очиб берилган, тадкикот натижаларини амалиётга жорий килиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг "ZnO нанокристаллитларнинг, ядро/қобик ZnO/ZnSe гетероструктура ва гетероўтишларнинг, ZnSe монокристалларининг структуравий, фотоэлектрик ва оптик хоссалари хакида олиб борилган тадкикотлар ва уларнинг синтези" деб номланган биринчи боби ZnO нанокристалларини олишнинг хар хил усуллари, ZnO/ZnSe гетероструктура ва гетероўтишларнинг асосий хусусиятлари, турли хил ионловчи нурланиш таъсирида, катион ёки анионли панжара аралашмали ZnSe монокристаларининг структуравий, электрик, оптик ва сцинтилляцион хусусиятлари борасидаги жахон адабиётлари шархига бағишланган.

Диссертациянинг иккинчи боби «Намуналар ва тажрибавий тадкикот усуллари» деб номланиб, унда ZnSe асосида кристалларнинг олиниши, структуравий тахлил, фотоэлектрик, электрик ва оптик хусусиятларини усуллари келтирилган. Юзани радиациявий индуцирланган окисидланиши ёки тиклаши учун 60Со (~1.25 МэВ) манбанинг у-нурлари ёки реакторнинг хаводаги 7 МэВ ли фильтрланган иссик нейтронлар окимининг  $\gamma$ -компонентаси  $3.3 \cdot 10^{15} - 3.3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> яъни ( $10^8 - 5 \cdot 10^8$  Р) аралашмали нурлари,  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> оқимли 18 МэВ протонлар билан вакуумда шунингдек. нурлантиришлар қўлланилди. Кўп каналли анализатор Ge-детекторда рентгено-флуоресцент усули оркали якин сирт катламининг ўртача элемент тахлили (К дан бошлаб) аникланди. Кристалнинг стехиометрланмаганлик

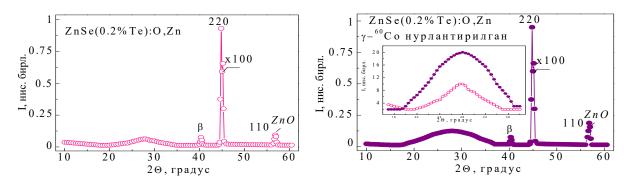
даражасини, яъни сирт якин катламнинг ~40 мкм гача Se/Zn нисбатини аниқлаш учун рентген - квантлари энергияси 22.1 кэВ ли <sup>109</sup>Cd изотопидан, 70 мкм гача Те аралашма концентрациясини аниклаш учун Х-квантлари энергияси 59.6 кэВ ли <sup>241</sup>Ат изотопидан фойдаланилди. Якин сирт қатламдаги микро- ва наноструктурларанинг локал таркибий таҳлили 2 мкм масштабида Aztec энергодисперсион системали электрон сканерлайдиган микроскоп EVO MA10 (Zeiss) да (Ве дан бошлаб) аникланди. Намуналарнинг структура ва фазовий таркиби  $2\Theta=10\div70^{0}$  бурчак оралиғида ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha}=0.1542$  нм нурланишда) қўшимча коллимация тарами билан такомиллашган ДРОН-3М қурилмасида рентген дифракцион усулида ўлчанди. Спектрлар орқали симметрияси, намунанинг кристаллар яқин сирт қатламидаги кристаллографик текислиги, фазовий таркиби, шу билан бир қаторда нанозарраларнинг ўлчами, структураси ва ориентацияси Нурлантирилган ва нурлантирилмаган юза қатламнинг микроқаттиқлиги 20÷200 грамм оғирликда ПМТ-3 қурилмада аниқланди. Олмосли пирамида санчилган яқин сирт қатламининг микротасвирлари МИК-1 микроскопида (тасвирни қайта ишлашда модернизацияланган компьютер дастуридан, 713XTV CARD ва B/W CAMERA фойдаланилган ампер характеристикаси 300 Фото-вольт электрўтказувчанлик 90÷390 К да икки контактли усул ёрдамида ўлчанди. Электролюминесценция ва вольт-ёркинлик боғланиш спектрлари SPM-2 (Zeiss) спектрал қурилмада ФЭК-100 билан тўлкин узунлиги 200÷900 нм оралиғида қайд қилинди. Оптик ютилиш спектрлари тулқин узунлиги 190÷1100 нм оралиғида, 6 нм тиркиш кенглигида, оптик зичлиги 5 гача бўлган СФ-56 (ЛОМО), ўтказиш ва қайтиш спектрлари эса 240÷830 нм оралиғида, 32 нм тирқиш кенглигида UV3600 (Shimadzu) қурилмасида ўлчанди. Катта статистика яъни (бир хил йўналишли  $10 \times 10 \times 1$  мм $^3$  ўлчамга эга бўлган 10 тача намуналарда такрорий 5 мартадан ўлчанди), ўлчов хатолиги 10% дан ошмади.

Диссертациянинг «ZnSe:O, ZnSe(0.2%Te):O, ZnSe(0.2 ва 0.5%Te) кристалларининг структуравий хусусиятларига Zn буғида ишлов бериш ва нурланишнинг таъсири» деб номланган учинчи бобида кристалларнинг ионловчи нурланишлар таъсиридан олдин ва кейин кристалл структураси, механик хоссалари ва микротасвири келтирилган. Соф кубик ZnSe:O монокристалларда релаксацияланган ZnSe панжара матрицасининг (311) рефлексидан ташқари ZnO аралашма фазанинг кичик симметриясида (103) рефлекси аникланди. Zn буғида термо-ишлов бериш, тугунлараро ҳолатни эгаллайдиган Zn атомлари билан диффузион бойитиш натижаси эластик кучланишлар ҳисобида сезиларли даражада (311) рефлексининг кенгайишига олиб келди. 60Со манбаида у-квантлари таъсири натижасида ZnSe/ZnO:O,Zn нинг панжара матрицасидаги кучланишнинг қисман камайиши (311) рефлекс кенглигининг торайишига ва ZnO аралашмали фазалар микдорининг ошиши (013) рефлекс интенсивлигининг ўсишига олиб келди. Қўшимча ZnO кристал

фазаларнинг латерал ўлчовлари Селяков-Шеррер формуласи орқали аниқланди.  $\beta_{hkl}$  — мос келган қайтишнинг ярим кенглиги (рад).

$$L = \frac{0.94 \,\lambda}{\beta_{hkl} \cos \theta_{hkl}} \tag{1}$$

Легирланган ZnSe(0.2%Te)/ZnO:О намунада ZnSe панжара матрицасининг (220) рефлекси ва ZnO аралашма фазасининг (110) рефлекси аникланди. Гамма-нурланиш таъсири натижасида структура сакланди, аралашма фаза микдори ўзгармади. Zn буғида термо-ишлов бериш юпқа структуранинг ўзгаришига олиб келди: ZnSe структурасида энг нуксонлиси хисобланган [111] кристаллографик ориентацияга якин жойлашган, ва унга перпендикуляр бўлган (111) атом текислигининг кичик бурчаклари остида кенг диффуз сочилиш кузатилди (1-расм).

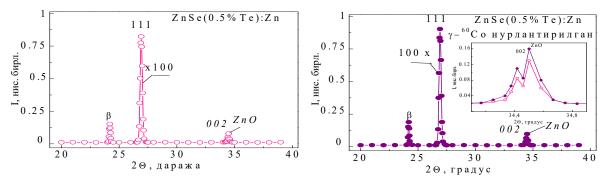


1-расм. ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn рентгенографикли фазавий тахлил

Бу ориентацияга  $20\approx27.2^{0}$  бурчак сочилиши тўғри келади, айнан шунинг атрофида селектив бўлмаган рефлекс кузатилди, эхтимол бу, жуда майда ўзаро таъсирлашмайдиган [111] ориентацияли аралашмали фазанинг муртакларига мослангандир. Бирок, ўлчамларнинг ўсиши ва улар орасидаги масофанинг камайишида, d/n=0.1626 нм ли (110) рефлексга масъул бўлган ZnO аралашма фазанинг кристал кўшимчалари ва чўкмалар бир-бири билан ўзаро таъсирланишни бошлайди. Гамма-нурланиш таъсирида  $\approx$ 40 нм эга бўлган (110)-ZnO нанозаррали ва 0.9 нм-ZnO аморф кўшимчали ZnSe(0.2% Te):O,Zn кристалининг якин сирт қатламидаги радиолиз, яъни Se нинг буғланиши ва унинг ўрни атмосферадаги О ва O<sub>3</sub> билан алмашиниши, натижасида аралашма фазанинг микдори ва ZnO зарра муртакларнинг ўлчами 1.2 нм гача ўсди.

2-расмда (111) кристаллографик ориентацияли 0.5% Те миқдорли ZnSe/ZnO:Znда, (002) дифракцион чўқкига тўғри келувчи ZnO аралашма фаза борлиги, бирок унда  $30^0$  атрофидаги диффуз сочилиш йуқолганлиги кўрсатилган. Бу холат намуналарни оксидли мухитда термо-ишлаш ёки Те аралашманинг юкори концентрацияси билан легирлашга боғлиқлиги хақида далолат беради.  $^{60}$ Co  $\gamma$ -квантлари билан нурлантириш хажмий эластик кучланиш даражасини сақлаган холда ZnO фаза миқдорини 2 баробарга оширди. ZnO нанокристалларининг (002) чўқки орқали аниқланган

ўлчамлари ~52 нм ни ташкил этади. Яқин сирт қатламига киритилган Zn<sub>i</sub> марказлари О билан кимёвий боғланишга киришиб, шаклланган аралашмали нанокристал қушимчаларида янги ZnO қатламини ҳосил қилиши (002) рефлекснинг усишида намоён булади.



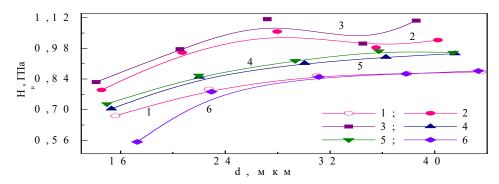
2-расм. ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn рентгенографикли фазавий тахлил

Нурланиш Zn-Se боғининг радиолизига олиб келди, натижада Se буғланди ва  $Zn_i^{2+}$  ҳаводаги  $O^-$  анионлар билан боғланди. Реакторнинг иссиқ колоннасидаги  $^{17}$ О изотопидан 7 MэB энергияли  $\gamma$ -компонентали нурланиши ZnSe/ZnO:O,Zn нинг яқин сирт қатламидаги ZnO оксидли қатламнинг парчаланиши ва ZnSe панжара матрицасининг иккига ажралиши радиацион нуқсонларнинг тартибга солиниши тўғрисида далолат беради. Вакуумдаги 18 МэВ протонли нурлаш таъсирида эса ZnO қатламнинг қисман парчаланиши содир бўлди.

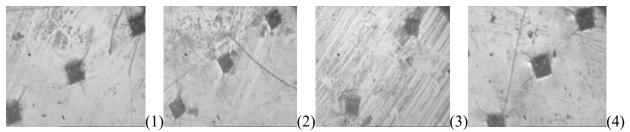
ZnSe/ZnO:O ва ZnSe/ZnO:O,Zn да  $H_{\mu}$  микроқаттиқлик қийматлари ва  $\alpha$ =136 $^{0}$  икки қирра бурчакли олмос-квадрат пирамиданинг l чуқурликкача кириши қуйидаги формула бўйича ҳисобланади:

$$H_{\mu} = 1.854 \cdot (P/d^2)$$
 Ba  $\ell = \frac{d}{2tg(\alpha/2)}$  (2)

Хар хил турдаги ионловчи нурланиш таъсиридан олдин ва кейин  $50 \div 200$  гр оғирликдаги мироқаттиқлик боғланиши ва микротасвирлар 3 ва 4-расмларда келтирилган.

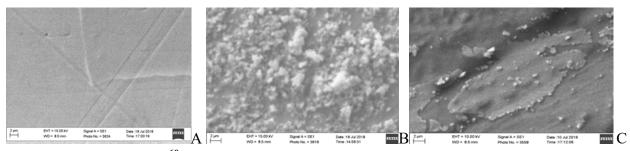


 $1-{\rm ZnSe/ZnO:O}, 2-{\rm ZnSe/ZnO:O}, {\rm Zn}, 3-{}^{60}{\rm Co}$   $\gamma$ -нурланишдан,  $4-{\rm олд}$  ва  $5-{\rm орка}$  томони протонли  $10^{15}$  см $^{-2}$  нурланишдан,  $6-{\rm реактордаги}$   $6.6\cdot 10^{16}$  см $^{-2}$   $\gamma$ -нурланишдан сўнг **3-расм. С-пирамиданинг кириш чукурлигига микрокаттикликнинг боғликлиги** 



(1) — соф ZnSe/ZnO:O,Zn юзаси; (2) —  $^{60}$ Co  $\gamma$ -нурланишидан; (3) — протон нурланишидан; (4) —реакторнинг  $\gamma$ -нурланишидан сўнг. Тасвир масштаби  $400\times400$  мкм. **4-расм. С-пирамида санчилган якин сирт катламнинг микротасвирлар** 

3- ва 4-расмлардаги маълумотларни солиштириш, <sup>60</sup>Со *у*-нурланиш таъсирида (2) санчилган уколлар ўлчамининг камайишини ( $H_{\mu}$  ўсишини), реакторнинг у-нурлари таъсирида эса **(4)** санчилган уколлар чуқурлашганини ( $H_{\mu}$  камайишини), шу билан бир қаторда майда қорамтир чўкмалар хосил бўлишини кўрсатди. Шундай қилиб, ZnO нанозарранинг <sup>60</sup>Co у-нурланиш таъсири натижасида ўсиши билвосита исботланди. Тўгридантўғри далиллар эса 5-расмда ва 1-жадвалда келтирилган. Намуналарнинг нурлантирилмаган юзаларида факатгина дислокацион тўр хосил бўлиши қайта-ишланган гамма-нурлари аникланди. Zn буғида ва нурлантирилган наногетероўтишнинг фототасвирларини солиштириш: оксидловчи мухитда қайта терма ишлов берилган (РСТ аниқланган) 27 нм ZnO нанокристали намуналарда юпқа қалинликдаги шаклланишини (5-расм, А), 0.2% Те билан легирланган 40 нм ZnO нанокристалли ва 1.2 нм ZnO аморф фазали намуналарда кўндаланг ўлчами 200÷400 нм бўлган ZnO наноустунли чўтка хосил бўлиши (В) кўрсатилган. Тикланаётган аргонли атмосферасида ўстирилган 0.5% ли Те билан легирланган, қалинлиги 52 нм ZnO нанокристалли намуналар эса ZnSe/ZnO ли текис (>10×10 мкм) интерфейсларга эга бўлиб, уларда ZnO наноустунлар билан безатилган пленка шаклланиши (С) келтирилган.



5-расм. Гамма <sup>60</sup>Co 500 MP билан нурлантирилган ZnSe/ZnO:O,Zn (A), ZnSe/ZnO(0.2% Te):O,Zn (B) ва ZnSe/ZnO(0.5% Te):Zn (C) микротасвирлари

1-жадвалда нурланиш таъсиридан сўнг бу якин сирт катламларда О микдорининг - айникса адсорбирланган О<sub>3</sub> иштирокида ва ZnO фазанинг аморф 2D-плёнка ва 1D-устунли кристаллар кўринишида, (детектор AZtec) ўсишини (РФТ да) тасдикловчи элемент тахлиллар келтирилган. Радиолиз вактида чикарилган катламнинг (Li)Si детектори ёрдамида ўрганилган таркибий тахлили О микдорини аниклаш имконини бермади.

1 -жадвал Намуналарда <sup>60</sup>Co 500 MP нурланиш таъсири натижасида радиолиз жараёнида якин сирт катламдан чиккан ва колган элементлар тахлили ва ZnO нанокристаллар ўлчами

Элемент	ZnSe	ZnSe:O,Zn		ZnSe(0.2% Te):O,Zn		ZnSe(0.5% Te):Zn	
(оғ.%)		Чиққан	Қолган	Чиққан	Қолган	Чиққан	Қолган
ZnO нм >	≺инт.	27×2		40 ×2 +аморф.1.2		52 ×2	
O K	0	4.2	-	69.5	-	5. 9	-
Zn L	47	45.0	55.3	16.3	61.1	43.7	26.5
Se L	53	50.8	44.7	14.2	38.9	49.9	73.5
Te L	0	0		0	0.2	0.4	0.5

Жадвалда  $^{60}$ Со гамма квантлари таъсири натижасида ZnSe/ZnO(0.2% Te):О,Zn наногетероўтишларнинг яқин сирт қатламидаги Se миқдорининг камайиши, О микдорининг 70 барабаргача ошишига олиб келиши кўрсатилган.

Диссертациянинг тўртинчи боби «ZnSe/ZnO:O, ZnSe(0.2 и 0.5% Te)/ZnO наногетероструктуралар ва ZnSe/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.2 ва 0.5% Te)/ZnO:O,Zn наногетероўтишларнинг нурланишдан олдин ва кейин фотоэлектрик хусусиятлар ва электрўтказувчанлиги» деб номланади. Адабиётлардаги маълумотларга кўра, ZnSe намуналарида  $V_{Se}$  мавжудлиги сабабли n-тур ўтказувчанликка ва юкори солиштирма каршиликга  $\rho$ ~ $(10^{10}-10^{12})$  Ом·см эгадир. Zn буғларида термо-ишлов бериш ZnSe кристалларида  $V_{Zn}$  марказлари билан боғлиқ чукур сатҳни ҳосил бўлиши натижасида ўтказувчанликни p-турга ўзгариши ва  $\rho$  ни ~ $(10^4-10^5)$  Ом·см гача камайишига олиб келиши аникланган, аммо турли хил ионловчи нурланишларнинг таъсири ўрганилмаган.

2-жадвалда реакторнинг 7 МэВ  $\gamma$ -нурланишдан олдин ва кейин қоронғуликдаги ( $\rho_T$ ) ва ёруғликдаги ( $\rho_C$ ) солиштирма қаршилик қийматлари, ва уларга тегишли (+R/-R) поляризация ва ( $\sigma_{\Phi y}$ ) фотоўтказувчанлик қийматлари келтирилган. Фотоўтказувчанлик  $\sigma_{\Phi y}$  қуйидагича хисобланди:

$$\sigma_{\phi\Pi} = \frac{(R_T - R_C)}{R_T \cdot R_C}$$
 (3)

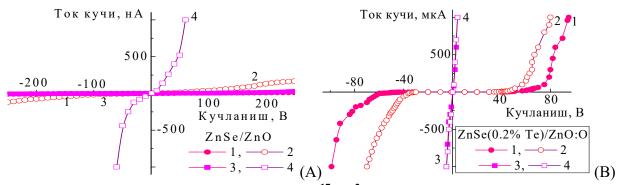
Жадвалдан кўриниб тургандек соф ZnSe/ZnO:O, ZnSe(0.2% Te)/ZnO ва ZnSe(0.5% Te)/ZnO наногетероструктура  $\rho_T$ ,  $\rho_C$ ,  $\sigma_{\phi \ddot{y}}$  ва (+R/-R) нинг юқори қийматларига эга. ZnSe/ZnO:O ни 0.2% Те аралашмаси билан бойитиш Zn<sub>i</sub> ва  $V_{Se}$  ҳосил қилади, натижада қутбларга боғлиқ ҳолда  $\rho_T$  ва  $\rho_C$  бир даража камаяди, бунга мос ҳолда  $\sigma_{\phi \ddot{y}}$  бир даражага ўсади. Барча намуналарни Zn буғида термо-ишлов бериш,  $(O_{se}^0+V_{Zn}^-)$ ,  $(O_{se}^0$   $Te_{se}^0V_{Zn})$  ассоциатлари билан Zn<sub>i</sub> марказни ва p-n-ўтишнинг ҳосил бўлишига,  $\rho_T$  ва  $\rho_C$  2÷4 тартибгача камайишига, қутбланиш қийматининг тушишига,  $\sigma_{\phi \ddot{y}}$   $10^4$  мартагача ўсишига олиб келди. Нурланишнинг барча турлари, айниқса реакторнинг  $\gamma$ -нурлари

таъсирида натижасида Френкел жуфтларининг хосил бўлиши  $\sigma_{\phi \circ v} \sim 20 \div 10^4$  бараваргача ошишига олиб келди.

2-жадвал Қоронғулик ( $ho_T$ ) ва ёруғликдаги ( $ho_C$ ) солиштирма қаршилик, поляризация (+R/-R), фотоўтказувчанлик ( $\sigma_{\phi}$ ў) қийматлари, ZnO нанокристал ўлчамлари ва Zn/Se

Намуналар		$ ho_{ m T},{ m Om}$	+R/-R	hoс, Ом	+R/-R	σφп, Ом <sup>-1</sup>
ZnSe/ZnO:O нан	$+4.8 \cdot 10^9$	0.87	$+1.1 \cdot 10^9$	0.81	$+0.7 \cdot 10^{-10}$	
структура 27 нм	ва 0.84	$-5.5 \cdot 10^9$		$-1.3 \cdot 10^9$		$-0.6 \cdot 10^{-10}$
Реакторнингу-	$3.3 \cdot 10^{17}$	$+1.1 \cdot 10^9$	0.23	$+3.7 \cdot 10^7$	0.92	$+0.3 \cdot 10^{-8}$
нурлари	см <sup>-2</sup>	$-4.8 \cdot 10^9$		$-4.10^7$		-0.3·10 <sup>-8</sup>
ZnSe(0.2% Te)/ZnO:0	нано-	$+6.9 \cdot 10^{8}$	0.25	$+1.4 \cdot 10^{8}$	0.2	$+0.6 \cdot 10^{-9}$
гетероўтиш 40 нм ва	$-2.7 \cdot 10^9$		$-7.1 \cdot 10^8$		$-0.1 \cdot 10^{-9}$	
Реакторнинг	3.3·10 <sup>17</sup> см <sup>-2</sup>	$+2.6 \cdot 10^3$	0.45	$+2.5 \cdot 10^3$	0.48	$+0.1\cdot10^{-5}$
ү-нурлари		$-5.8 \cdot 10^3$		$-5.2 \cdot 10^3$		$-0.2 \cdot 10^{-5}$
ZnSe(0.2% Te)/Z	$+2.2 \cdot 10^{5}$	0.07	$+2.1 \cdot 10^{5}$	0.08	$+0.2 \cdot 10^{-7}$	
40 нм (0.9) ва	-29·10 <sup>5</sup>		$-26 \cdot 10^5$		-0.3·10 <sup>-8</sup>	
Реакторнинг	3.3·10 <sup>17</sup> см <sup>-2</sup>	$+3.2 \cdot 10^3$	0.84	$+2.10^{3}$	0.54	0.2·10 <sup>-4</sup>
ү-нурлари		$-3.8 \cdot 10^3$		$-3.7 \cdot 10^3$		$0.1 \cdot 10^{-5}$
ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn		$+5.6 \cdot 10^6$	0.62	$+1.3 \cdot 10^6$	0.15	$+0.6 \cdot 10^{-7}$
52 нм ва 0.86		-9·10 <sup>6</sup>		$-8.3 \cdot 10^6$		$-0.8 \cdot 10^{-8}$
Реакторнинг	$3.3 \cdot 10^{17}  \text{cm}^{-2}$	$+5.10^4$	0.88	$+3.10^{3}$	1	0.2·10 <sup>-4</sup>
ү-нурлари		$-9.9 \cdot 10^4$		$-3.10^3$		$0.2 \cdot 10^{-4}$

6-расмда реакторнинг  $\gamma$ -нурланишидан олдин ва кейин юқори қаршиликли ZnSe/ZnO:O наногетероструктуралар ва ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O наногетероўтишларнинг фото-вольт-ампер-характеристикалари келтирилган.



6-расм. Реакторнинг  $\gamma$ -нурлари  $3.3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> окимидан олдин ва сўнг Фото-ВАХ коронғуликда (кора) ва ёруғликда (ёруғ).

ZnSe/ZnO:О наногетероструктура омик Фото-вольт-ампер-характеристикага эга бўлиб, реакторнинг  $\gamma$ -нурланиши таъсири натижасида унда фото яримўтказгичли структура шаклланиши кузатилди. ZnSe(0.2% Te)/ZnO:О наногетероўтишни 0.2% Те аралашмалари билан бойитиш, U $\approx$ 70 В беркитувчи кучланишли яримўтказгичли структуранинг шаклланишига олиб келди. Реакторнинг  $\gamma$ -нурланиши таъсири натижасида намуналарда Френкел

жуфтлари билан  $Zn_i^{2+}$  ва  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  комплекслар хосил бўлиши,  $U\approx 1$  В гача камайишига ва  $\sigma_{\Phi \tilde{y}}$   $10^4$  мартагача ошишига олиб келди (6-расм, В).

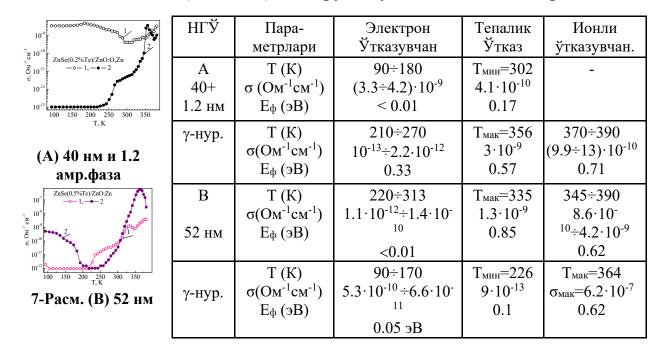
7-расмда ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn (A) ва ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn (B) наногетероўтишларнинг 90÷390 К ораликдаги сиртий электрўтказувчанлигининг хароратга боғликлиги  $\sigma(T)$  келтирилган. Бу оралик одатда учта хароратли интервалга бўлинади, унда экспоненциал ва чўккили боғланиш кузатилади:

$$E_{\phi} = \frac{k \ln(\rho_{1}/\rho_{2})}{(1/T_{2}-1/T_{1})} \quad \text{Ba} \quad E_{\phi} = G \left[\frac{kT_{m}(T_{m}-\Delta T)}{\Delta T}\right]$$
(4)

Қалинлиги 40 нм ZnO нанокристалли ва 0.9 нм ZnO аморф фазали ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn (A) наногетероўтиш, паст (90÷180 К) хароратларда  $\sigma(T) = (3.3 \div 4.2) \cdot 10^{-9}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> энергия узатишнинг фаоллашув энергияси  $E_{\phi} < 0.01$  эВ ли электрон ўтказувчанлик (Ферми сатхи якинида тепки ўтказувчанлик),  $180 \div 390 \text{ K}$  ораликда эса  $T_{\text{мин}} = 302 \text{ K}$  ли  $\sigma_{\text{мин}} = 4.1 \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{см}^{-1}$ ва  $E_{\phi}$ =0.17 эВ ли чўккили пасайишга эга. Бундай холат балким ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn чегарасида ZnO қўшимчаларнинг хосил бўлиш ва VznTeseZni нуқсонлар концентрациясининг ўсиши билан боғлиқ бўлиши мумкин. Гамма нурланиш таъсиридан сўнг 90÷210 К ораликда хароратга боғлик бўлмаган холда σ(Т) 4 тартибгача камайди, хароратнинг 270 К гача ўсиш оралиғида эса  $\sigma(T)=10^{-13}\div 2.2\cdot 10^{-12}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$  ва  $E_{\phi}=0.33$  эВ гача ортди, 270÷370 К ораликда  $\sigma_{\text{мак}}$ =3·10<sup>-9</sup> Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> ва  $E_{\Phi}$ =0.57 эВ ли  $T_{\text{мак}}$ =356 К да чўккили ўсиш кузатилди (3-жадвал ва 7-расм). Ионли  $\sigma(T)=(9.9\div13)\cdot10^{-10}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> ўтказувчанлик  $370 \div 390 \text{ K}$  ораликда  $E_{\phi}$ =0.71 эВ кийматга тенглиги хисобланди, эхтимол бу қиймат, 1.2 нм ўлчамли аморф ZnO нанофазали ZnSe чегаралари буйлаб  $Zn_i^+$ харакати, О микдорининг 70 мартагача ўсиши ва ZnO наноустунлар чўткасининг хосил бўлиши билан боғлиқдир. 52 нм ZnO нанокристалли ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (B) наногетероўтишнинг  $\sigma(T)$  қиймати  $90 \div 220$  К ораликда хароратга боғлиқ эмаслиги, аммо хароратнинг 313 К гача ошишида  $\sigma(T)$  нинг  $1.1 \cdot 10^{-12} \div 1.4 \cdot 10^{-10}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> билан  $E_{\phi} < 0.01$  эВ қийматигача ўсиши, хароратнинг 345 К гача кўтарилишида эса  $\sigma_{\text{мак}}=1.3\cdot10^{-9}~\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$  ва  $E_{\Phi}=0.85$ эВ ли Т<sub>мак</sub>=335 К да чўққили туннел электрўтказувчанлик ва 345÷390 К да  $E_{\phi}$ =0.62 эВ ли ион ўтказувчанлик хосил бўлиши кузатилди. Гамма квантлари билан нурлантириш  $\sigma(T)$  нинг  $90 \div 170$  К да  $5.3 \cdot 10^{-10} \div 6.6 \cdot 10^{-11}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ ,  $E_{\phi}$ <0.05 эВ гача ошишини, 345 К гача қиздириш эса  $T_{\text{мин}}$ =226 К да,  $E_{\phi}$ =0.1 эВ,  $\sigma_{\text{мин}} = 9 \cdot 10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \text{см}^{-1}$  да чўккили пасайишни,  $345 \div 390 \text{ K}$  ораликда  $T_{\text{мак}} = 364 \text{ K}$ да,  $E_a=0.62$  эВ,  $\sigma_{\text{мак}}=6.2\cdot10^{-7}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> қийматга эга бўлган чўккили ўсишни хосил бўлишига олиб келди (3 - жадвал). Бу холатлар заряд ташувчиларни ўтказувчанлик зонасида шаклланган резонанс сатхларга термостимуляциявий уриб чиқарилиши ва  $V_{Zn}Te_{Se}Zn_i$  ассоциатларнинг тақиқланган зонадаги сатхлари билан боғлиқ холда, О микдорининг ўсиши ва ZnO наноустунлар билан безатилган наноплёнканинг хосил бўлиши (5-расм, С) билан боғлиқдир.

3-жадвал ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (A) ва ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (B) аногетероўтишла нурданишлан оддин (1) ва кейин (2) якин сирт

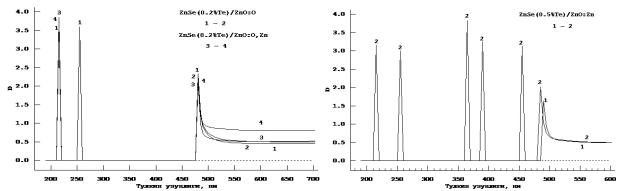
наногетероўтишда нурланишдан олдин (1) ва кейин (2) якин сирт
қатламдаги (90÷390 K) электрўтказувчанлик қийматлари



Диссертациянинг бешинчи боби «ZnSe-ZnO:O, ZnSe(0.2-0.5% Te)-ZnO наногетероструктуралар ва ZnSe-ZnO:O,Zn, ZnSe(0.2% Te)-ZnO:O,Zn, ZnSe(0.2-0.5% Te)-ZnO:Zn наногетероўтишларнинг нурланишдан олдин хусусиятлари» кейин электро-оптик деб номланган. легирланишдан, термо-ишлов беришдан, шунингдек турли хил ионловчи нурланишлар таъсиридан олдин ва кейин хосил булган резонанс оптик ўтишлар ва Смакула формуласи ёрдамида хар бир шаклланган сатхлардаги фотокўзғатилган электронлар  $(N_e)$ концентрациясининг қийматлари келтирилган. Т.В. Горковенконинг назарий хисоблари тўгри зонали ZnSe монокристалнинг  $E_g$ =2.7 эВ қийматидан юқори бир қанча  $\Gamma_{6v}$ -5.76 эВ,  $L_{I,3y}$ -4.85 эВ ва  $M_{4V}$ -5.16 эВ мумкин бўлган резонанс сатхларни хосил бўлишини кўрсатди.

$$N = 1.28 \cdot 10^{-17} \frac{n}{(n^2 + 2)^2} \cdot \frac{K_m H}{f}$$
 (5)

Куйида 8-расм (чап) да, ZnSe(Te)/ZnO:О наногетероўтиш (1)-спектри  $\Gamma_{6v}$ -5.76 (215 нм) эВ ва  $L_{l,3v}$ -4.85 (255 нм) эВ резонанс сатҳларни ўз ичига олиши, шунингдек ютилиш чегараси  $E_g$ =2.58 эВ (480 нм) лиги келтирилган. Смакула формуласи бўйича резонанс сатхлар  $E_{\varphi}$ (фотоўтказувчанликдаги электронлар концентрацияси) хисобланган қийматлар йиғиндиси 4-жадвалда кўрсатилгандек  $N_e$ =4.4·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup> ни беради. Гамма квантлари билан нурлантириш резонанс сатҳларнинг бузилишига (2спектр) олиб келди, натижада  $N_e$  нинг қиймати бир тартибга  $4.6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> камайди.



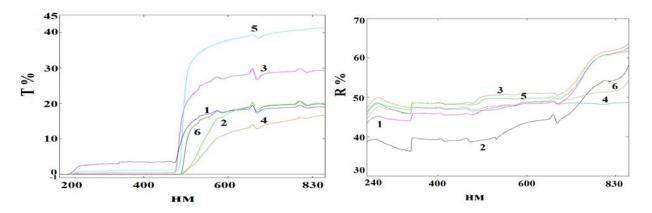
ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (чапда) ва ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (ўнгда) наногетероўтишларни  $\gamma$ -квантлар  $^{60}$ Со билан нурлантиришдан олдин (1,3) ва кейин (2,4). **8-расм. Оптик зичлик спектрлари** 

4-жадвал ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O (A), ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn (B) ва ZnSe(0.5% Te)-ZnO:Zn (C) наногетероўтишларда резонанс сатхлар энергияси (эВ) ва электронлар концентрациясининг  $N_e$  (см<sup>-3</sup>) қийматлари

НГЎ ва НК	Г6у эВ	L <sub>1,3v</sub> эВ	Zn <sub>i</sub> 3B	Ose эВ	ХэВ	Ед эВ	N <sub>e</sub> см <sup>-3</sup>
ZnO	$N_{\Gamma_{6V}}$ cm <sup>-3</sup>	$N_{L_{1,3}}$ cm <sup>-3</sup>	$N_{Zn_i}  \mathrm{cm}^{-3}$	$N_{O_{Se}~{ m cm}^{-3}}$	$N_{x \text{ cm}^{-3}}$	$N_{E_g}$ cm <sup>-3</sup>	
А-40 нм	5.76	4.85				2.58	$4.4 \cdot 10^{16}$
	$2.2 \cdot 10^{16}$	$1.6 \cdot 10^{16}$				$0.5 \cdot 10^{16}$	
<sup>60</sup> Co γ		-				2.58	$0.5 \cdot 10^{16}$
40 нм						$0.5 \cdot 10^{16}$	
В-40 и	5.76					2.58	$2.8 \cdot 10^{16}$
0.9 нм	$2.4 \cdot 10^{16}$					$0.3 \cdot 10^{16}$	
<sup>60</sup> Со у 40 и	5.76					2.58	$2.9 \cdot 10^{16}$
1.2 нм	$2.4 \cdot 10^{16}$					$0.5 \cdot 10^{16}$	
С-52 нм						2.52	$0.3 \cdot 10^{16}$
						$0.3 \cdot 10^{16}$	
<sup>60</sup> Co γ	5.76	4.85	3.39	3.17	2.72	2.55	$5.8 \cdot 10^{16}$
52 нм	$2 \cdot 10^{16}$	$1.4 \cdot 10^{16}$	$0.9 \cdot 10^{16}$	$0.8 \cdot 10^{16}$	$0.4 \cdot 10^{16}$	$0.3 \cdot 10^{16}$	

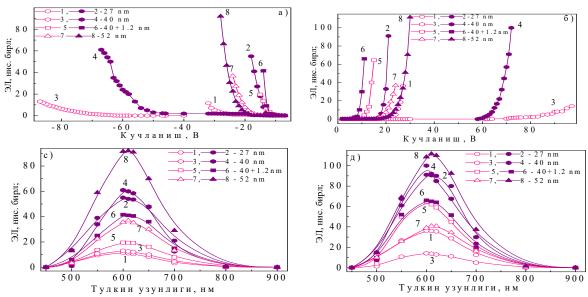
ZnSe(Te)/ZnO:O,Zn наногетероўтишни (3-спектр) Zn буғларида термоишлов бериш фақатгина  $L_{1,3v}$  резонанс сатҳнинг бузилишига олиб келди, натижада бу холат хам  $N_e$  нинг  $2.78\cdot10^{16}$  см<sup>-3</sup> гача камайишига олиб келди. Нурлантириш (4-спектр)  $N_e$  бир оз  $2.9 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> гача ўсишига ва 480 - 1100 нм оралиқда λ га боғлиқ бўлмаган, аммо заиф боғланган ташувчилар билан боғлиқ бўлган тарқалиш кузатилди, бу эса ZnSe яқин сирт қатламида ZnO нанотуркумнинг (наноустунлар) хосил бўлишига мос келади (5-расм (В)). ZnSe(0.5% Te)-ZnO:Zn наногетероўтишни 0.5% Те билан бойитиш, Zn буғида термо-ишлов бериш  $E_g$  ни 0.06 эВ гача ва  $N_e$  ни  $0.3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> гача камайишига олиб келди, балким бу ZnO нанозарра ўлчамининг 52 нм гача ўсиши билан ўнг). Нурланиш (2-спектр) боғликдир (8-расм, ЭХТИМОЛ интерфейсда, бешта резонанс сатхларни шаклланишига,  $E_g$  ни 0.03 эВ га ва  $N_e$ =5.8·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup> ни 17.6 марта ошишига олиб келди (5-расм, С).

9-расмда 40 нм ўлчамли ZnO нанокристалли ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O наногетероўтиш >3% дан юкори колдикли ва ўтказувчанлик зонаси чегарасидан <20% дан паст ўтиш спектрига, қайтиш спектрининг 240–670 нм ораликда <20% дан юкори ва 750 нм дан 60% гача ўсувчи кайтиш спектрига эгалиги тасвирланган. Нурланиш таъсирида кесими 200-400 нм асосли алохида ZnO устунларнинг ўсиши, чегаравий ўтказишнинг кенгайишига ва силжишига, улардан келадиган сочилиш эса қайтишнинг сезиларли даражада камайишига олиб келди. Zn буғида термо-ишлов бериш (ZnSe(0.2%) Te)/ZnO:O,Zn) ZnO плёнка сиртини текисланди, <Eg да ўтказишни ва қайтишни оширди. Нурланиш таъсирида эса зич наноустунли чўтка ўсди (5расм, В), натижада ўтказиш 2 каррага ва қайтиш (>670 нм) гача камайди, шу билан бир қаторда <Eg да ютилиш ортди. Ar ли мухитда ўстирилган 52 нм ўлчамли ZnO нанокристалли ZnSe(0.5% Те)/ZnO:Zn наногетероўтиш энг юқори ўтказиш ва қайтишга эгалиги 9-расмда келтирилган. Нурланиш таъсирида ZnO наноустунлар билан безатилган наноплёнкани ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn наногетероўтишнинг якин сирт катламида шаклланиши (5-расм, С), ўтказиш ва кайтишни камайтирди.



ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O соф (1), нурлантирилган (2); ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn соф (3), нурлантирилган (4); ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn соф (5), нурлантирилган (6). 9 — расм. 60-Co 500 MP нурланишдан олдин ва кейин ўтиш ва қайтариш спектрлари

Куйида 10-расмда  $^{60}$ Со  $\gamma$ -нурланишдан олдин ва кейин ZnSe/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O, ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn наногетероўтишларнинг вольт-ёруғлик боғланиши ва электролюминесценция спектрларининг натижалари келтирилган. Легирланмаган ва термо ишлов берилмаган юқори қаршиликли ZnSe/ZnO:O наногетероструктураларда электролюминесценция кузатилмади. Бирок изовалент аралашма Те билан 0.2% гача бойитиш ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O, ва Zn буғларида термо-ишлов бериш ZnSeZnO:O,Zn, ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.2-0.5% Te)/ZnO:Zn наногетероўтишларни ҳосил қилди. Шаклланган гетероўтишлар чукур Zni сатҳ ва  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  ёки  $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$  комплекслари билан боғлиқ бўлган  $\lambda_{\text{мак}}$ =600 нм ( $\pm$ 20 нм) ли электролюминесценцияга эга эканлиги аникланди. Расмда тасвирлангандек электролюминесценция ҳосил бўлиши бўсағавий кучланиш қутбларга боғлиқ бўлиб, бу боғланиш даражали характерга эга.



10-расм. <sup>60</sup>Со гамма-нурланишдан олдин (1) ва кейин (2) ZnSeZnO:O,Zn, ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O, ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn наногетероўтишларнинг (а, б) вольт-ёруғлик боғланиши ва (с, д) электролюминесценция спектрлари (а) тескари ва (б) тўғри кучланиш қутбларида

кучланишларда гистерезис пайдо бўлиши Юкори потенциал тўсикларнинг асимметрик эканлигидан далолат беради. Бу 5. С-расмда ZnO наноустунлар безатилган келтирилган билан пленкали наногетероўтишларнинг геометрияси билан мос тушади. Электролюминесценция интенсивлигидан олинган чизикли бўлмаган вольтёруғлик боғланиш қўйидаги кўринишга эга:

$$I_{EL} \approx \exp \left(-const / \sqrt{V}\right)$$
 (6)

Кучланиш қутбининг тўлиқ циклидаги электролюминесценция спектрлари (с атрофидаги кенг  $\lambda_{\text{Max}} = 600 \pm 10$ HM полосадан иборатдир. Электролюминесценция интенсивлиги сарфланган кучланиш катталигига боғлиқ бўлиб, тўсикли тешилиш олди механизми оркали тушунтирилади. Катталиклар фаркидан ва кучланишининг кўзғатиш кутбидан максимуми 560, 600 ва 700 нм ли учта турли хил полосаларни устма-уст қўйилганлигини ажратиш мумкин. 10 расмда кўрсатилгандек 40 нм ZnO нанокристалли ZnSe/ZnO:O,Zn наногетероўтишда электролюминесценция интенсивлигига U=-32~B да  $I_{ЭЛ}=11.5$  ни, U=27~B да эса  $I_{ЭЛ}=36.3$  ни берди, гамма  $^{60}\mathrm{Co}$ нурланиш таъсиридан сўнг U= -18 В да  $I_{ЭЛ}$ =60 гача ва U=21 В да  $I_{ЭЛ}$ =91 гача ошди, бу холат ZnO фаза рефлексининг ўсиши ва ZnO юпқа пленканинг шаклланиши билан боғлиқдир; ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O да U= -87 В остида  $I_{Эл}=13$  га ва U=97 В да  $I_{Эл}=14$  гача кўтарилди, нурланиш таъсири натижасида ZnSe нинг якин сирт қатламида ZnO наноустунли пленканинг шаклланиши эса электролюминесценция интенсивлигининг I<sub>Эл</sub>=61 гача U= -67 В да ва  $I_{\text{Эл}}=100$  гача U=72 В да ошишига олиб келди; ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn да  $U=\pm 15~B$  остида  $I_{\ni \Pi}=19.5$  гача ва 64.5 гача ўсди, нурланишдан сўнг якин сирт қатламидаги ZnO наноустунли чўтканинг шаклланиши ва 22

микдорининг ошиши электролюминесценция интенсивлигининг U= -14 B да  $I_{ЭЛ}\!\!=\!\!42$  гача ва U=11 В да  $I_{ЭЛ}\!\!=\!\!66$  гача кўтарилишига олиб келди; ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn да U= -28 В остида Іэл=40 гача ва U=24 В да Іэл=36.8 гача кўтарилди, нурланишдан сўнг ZnSe нинг якин сирт катламидаги ZnO нанокристал рефлексининг интенсивлигининг ошиши ва ZnO наноустунлар натижасида билан безатилган наноплёнканинг шаклланиши электролюминесценция интенсивлиги U= -28 B да  $I_{ЭЛ}$ =92 гача ва U=30 B да  $I_{\text{ЭЛ}}=112$  гача ўсди. Юқоридаги олинган натижалардан кўриниб тургандек, гамма нурланишдан сўнг энг юкори электролюминесценция интенсивлигига қалинлиги 52 нм бўлган ZnO нанокристалли ва кўндаланг ўлчами 200÷400 нм гача бўлган ZnO наноустунчалар билан безатилган плёнкали ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn наногетероўтиш эга бўлди. 60Co гамма-нурланиш спектрга сезиларли таъсир килмади, аммо у-нурининг иккиламчи электронларининг зарбавий қўзғатилиши ва  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  ёки  $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$  комплекслари билан  $Zn_i$ концентрациясининг ошиши натижасида кутбларга боғлиқ холда  $I_{ЭЛ}$ электролюминенсценция интенсивлигини 2-8 каррагача ўсиши кузатилди.

Иловада қўлланилган ўлчов усулларининг схемаси ва тафсифлари келтирилган.

#### ХУЛОСА

«Радиациявий-индуцирланган ZnO нанозарранинг шаклланиши ва ZnSe кристалларида электролюминесценция» мавзусидаги диссертация ишининг натижалари асосида куйидаги хулосалар келтирилади:

- Биринчи марта рентгено-структуравий тахлил ва сканерлайдиган электрон микроскоп қурилмаларида ZnSe нинг яқин сирт қатламидаги (0.85-0.86)стехиометрияланмаганлик ва хосил бўлган ZnO нанокристаллитларининг критик ўлчамлар орасида тўгридан тўгри корреляцияси қуйидаги ориентацияларда ўрнатилди (термо-ишлов ва гамма-нурланиш таъсирида): плёнка (103)ZnO~27 нм (311)ZnSe/ZnO:Zn ёнида, наноустунли (110)ZnO~40 нм (220)ZnSe(0.2% Te)/ZnO:Zn ёнида, безатилган плёнкали  $(002)ZnO\sim52$ наноустунлар билан (111)ZnSe(0.5% Те)/ZnO:Zn ёнида. Бундай ўзаро ориентация, шакл ва ўлчамларда ZnSe/ZnO интерфейсларидаги механик кучланишнинг минималлиги кучланмаган гетероген нуклеация механизми орқали тушунтирилади наногетероўтишларнинг ва баркарорлигини таъминлайди. Вакуумдаги 18 МэВ протонлар ZnO фазанинг бузилишига, <sup>17</sup>О изотопининг ~7 МэВ ли гамма-нури эса якин сиртдаги ZnO қатламнинг парчаланишига ва ZnSe панжара матрицасининг иккига ажралишига олиб келади.
- 2. Юкори қаршиликли *n*-тур омик вольт-ампер-характеристикали ZnSe/ZnO:О намуналарни Те билан бойитиш ва оксидловчи мухитда уларда р-п-наногетероўтишлар термо-ишлов бериш натижасида шаклланиши ва қаршиликлар сезиларли даражада (104 мартагача) камайиши кўрсатилган. Гамма (1-7 МэВ) ва протон

нурланишлари намуналарда радиолиз, иккала панжарада ҳам Френкел ва электрон тешик жуфтларининг генерацияси, марказларнинг зарядланиши натижасида вольт-ампер-характеристикасидаги беркитувчи кучланишининг камайишига олиб келди. Реакторнинг гамма-нурлари таъсиридан сўнг ZnSe(0.2%Te)/ZnO:О наногетероўтишда фото-вольт-ампер-характеристикасидаги беркитувчи кучланиш 10 В гача камайиши натижасида фотоўтказувчанлик 4 тартибга ошади.

- 3.  $^{60}$ Со гамма нурланишдан сўнг ZnO нанофаза интенсивлигини ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn наногетероўтишда ZnO наноустунли чўтка, ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn эса ZnO наноустунлари билан безатилган плёнка кўринишида ўсиши, ZnSe ўтказувчанлик зонасида ҳосил бўлган резонанс сатҳларда заряд ташувчиларни термостимуляциявий уриб чиҳарилиши билан боғлиқ бўлган, планарли интерфейслар орҳали ҳосил бўлган:  $T_{\text{мак}}$ =356 ва  $T_{\text{мин}}$ =226- $T_{\text{мак}}$ =364 K да  $\sigma_{\text{мак}}$ =3·10-9 ва  $\sigma_{\text{мин}}$ =9·10-13,  $\sigma_{\text{мак}}$ =6.2·10-7 Oм-1см-1 ва  $E_{\phi}$ =0.57 ва  $E_{\phi}$ =0.1-0.62 эВ чўҳҳили туннел ўтказувчанликнинг ҳосил бўлишига олиб келди.
- 4. Биринчи марта ўтказиш ва қайтиш спектрлар комплексида ZnO нанозарранинг хар хил шакл/ўлчовда намоён бўлиши ўрганилди. Юқори-ютилувчи объектлар режимидаги оптик ютилиш спектрларида назарий хисобларда тасдиқланган гамма-нурланиш таъсиридан сўнг радиациявий киритилган бешта  $\Gamma_{6v}$ -5.76 эВ,  $L_{I,3v}$ -4.85 эВ,  $Zn_i$ -3.39 эВ  $O_{Se}$ -3.17 эВ ва X-2.72 эВ резонанс сатхларнинг аникланиши умумий фотоэлектронлар концентрациясининг  $N_e$ =5.8·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup> гача, яъни 17 мартагача ошишига олиб келди.
- 60Со гамма нурланиш ZnSe(0.2%Te)/ZnO:О наногетероўтишларда ZnO 5. наноустунларни хосил қилиш билан бирга, нурланувчи марказ Zn<sub>i</sub> ва  $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$  ассоциатлар билан боғлиқ бўлган кенг полосали  $\lambda_{\text{мак}}$ =600 нм нурланишли электролюминесценция ёркинлигини 8-карра ошишига, ZnO наноустунлар билан безатилган плёнкали ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn наногетероўтишларда эса 4 карра ошишига олиб Электролюминесценция полосасининг максимум холати электр майдон кучланишига эмас, тўсикли тешилиш олди механизмига боғликдир. Тўсик олди ва ишчи кучланишнинг 24 В дан 12 В гача иккала қутбланишда ҳам камайишида электролюминесценциянинг қўзғалиши ZnO нанокристалларининг шакли, ориентацияси ва ўлчами билан боғлиқдир.

Шундай қилиб: стехиометрланмаган ZnSe(Te)/ZnO:Zn наногетероўтишланинг интерфейсида ўзаро ориентацияли ва тартибланган муайян шаклли радиациявий-индуцирланган ZnO нанокристаларининг микдорий ўсиши аникланган. Бу ҳолат ишчи кучланишнинг 10 В гача камайишида тўсикли тешилиш олди туридаги электролюминесценция интенсивлигининг ўсишини таъминлайди ва кенг зонали ёруғлик диодларини ишлаб чиқаришда амалий қизикиш уйғотади.

# НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/Т.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ, НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА

#### ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

#### ЭЛМУРОТОВА ДИЛНОЗА БАХТИЕРОВНА

#### РАДИАЦИОНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ ZnO И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В КРИСТАЛЛАХ ZnSe

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Ташкент-2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.4.PhD/FM159.

Докторская диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академия наук Республики Узбекистан.

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

Научный руководитель:	Ибрагимова Эльвира Меметовна доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Официальные оппоненты:	<b>Хидиров Ирсали</b> доктор физико-математических наук, профессор
	Ташмухамедова Дилноза Артикбаевна доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова
Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.33	
	Информационно-ресурсном центре Института ядерной с диссертацией можно ознакомиться в ИРЦ (Адрес: Уз. Тел. (+99871) 289–31–19).
Автореферат диссертации разослан «	«» 2019 г.
(Протокол рассылки № от	2019 г.).

М. Ю. Ташметов

председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Э.М. Турсунов

ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

#### И. Нуритдинов

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 исследование физических механизмов повышения эффективности преобразования электроэнергии в излучение видимого диапазона в полупроводниковых наноструктурах является одной из наиболее области полупроводниковой залач оптоэлектроники. важных Широкозонные низкоразмерные полупроводники с *p-n*-гетеропереходом, обладающие электролюминесценцией при 300 К, своей компактностью и экономичностью заменяют лампы люминесцентные и накаливания. С этой точки зрения актуальной становится задача получения высокоэффективных светоизлучающих низковольтных биполярных широкозонных наногетеропереходов, в частности ZnO/ZnSe.

гетеропереходы Полупроводниковые В наноструктурах-квантовых приборах, применяемые сегодня в мире в качестве оптоэлектронных материалов с перестраиваемой шириной зоны, имеют необычный транспорт электронов и оптические эффекты. Высокая собственная излучательная эффективность голубых/зеленых светоизлучающих диодов (p-n-инжекция), разрабатываемых на базе ZnSe и ZnTe обусловлена преимуществами конфигурации наногетероструктур в виде квантовой ямы и тем, что они полупроводниками. являются иминновомки Отмечается сильная зависимость их оптоэлектронных характеристик от размеров наночастиц. Решение проблемы создания прямозонной ненапряженной наногетеропары для достижения яркого и стабильного свечения (имитирующего солнечный свет) при низком приложенном напряжении и комнатной температуре непосредственно связано с исследованием наиболее эффективных центров излучательной и каналов безызлучательной рекомбинации.

республике большое В внимание уделяется разработке фундаментальных основ изготовления различных типов полупроводниковых наногетероструктур и нанородов для создания приёмников оптического излучения фотодиодов, фототранзисторов И фототиристоров, преобразователей инфракрасной - излучении в видимое, оптоэлектронных гетеролазеров на мировом уровне. Направления фундаментальных исследований и разработок, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и их практического применения, отражены в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017 - 2021 годы<sup>1</sup>.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, соответствуют задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП–4512 от 1 марта 2013 года «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии», № УП-4947 от 2 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017 г.

Узбекистан на 2017–2021 годы», Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП–2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование проведено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан — II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. Исследования ПО кристаллов ZnSe c высоким сцинтилляционных световыходом ДЛЯ рентгеновской томографии, фотодиодов Шоттки для дозиметрии УФизлучений и лазерной генерации, широкозонных гетеропереходов для фотовольтаических устройств проводились многими учеными например, российскими (Ж.И. Алферов, С.В. Иванов), американскими (Ј. Schrier, A.P. Alivisatos), украинскими (В.Д. Рыжиков, В.Я. Дегода, С.С. Вильчинская), английскими (G.D. Watkins, D.J. Dunstan, H. Morkos), молдавскими (R. Scurtu, M. Popa), индийскими (M. Shakir, M.A. Wahab), арабскими (S. Darwish, I.K. El Zawawi), китайскими (P. Chen, Y. Wang, M. Kamruzzaman, Y. Zhang), узбекскими (М.У. Каланов, А.С. Саидов, А.А. Кист, Ибрагимова, C. Курбонов, C.3. Зайнобиддинов) специалистами.

В результате этих исследований показано, что термообработка в парах Zn монокристаллов ZnSe улучшает электрические и оптические свойства за счет образования  $Zn_i$  центров и стабильных ассоциатов ( $O_{se}{}^0Te_{se}{}^0V_{Zn}$ ) и  $(O_{se}V_{Zn}Me^{III}_{Zn}Zn_i)$ ; обнаружены прямые разрешенные межзонные переходы в тонких пленках ZnSe; получены гетеро-наноспирали гетероструктуры II типа n-ZnO/p-ZnSe для применения фотодетекторов и светодиодов, наностержни гетероструктур ядро/оболочка ZnO/ZnTe для сенсибилизации фотоэффекта. Начиная со второй половины 80-х годов XX века в ИЯФ АН РУз проводятся научно-исследовательские работы по определению наноструктуры твердых тел методом рассеяния рентгеновских лучей И тепловых нейтронов. В полупроводниковых соединениях SiZnSe и GaAsZnSe были найдены наноструктуры, состоящие их квантовых точек, изучены их электрические и электролюминесцентные свойства; выращены наностержни определения пространственной ориентации объектов; изучено воздействие гамма- и реакторного излучений на сцинтилляторные характеристики кристаллов ZnSe(Te,O,Zn)нестехиометричных для определения радиационной стойкости.

Однако не были проведены следующие детальные исследования: состояния наноструктур и электронной структуры, влияние различных видов ионизирующих излучений на образование возможных нанофазных

включений и фотоэлектроактивных центров, связь радиолиза с нестехиометрией, концентрация кислорода, роль решеточных напряжений и глубоких уровней на гетерограницах, возможность создания наногетеропереходов ZnO/ZnSe(Te):O,Zn с яркой светоизлучающей структурой.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнялась в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики АН РУз по темам: Ф-2.1.2 «Структура, электрофизические, магнитные И механические свойства многокомпонентных нестехиометричных материалов при воздействиях» (2003-2007),ФА-Ф2-Ф068 терморадиационных «Радиационная инженерия наноструктурных материалов» (2007–2011), ОТ-Ф2-26 «Механизмы формирования функциональных наноструктур в пучке электронов» (2017–2021), грантов Фонда поддержки фундаментальных исследований Академии Республики **Узбекистан** наук «Индуцированные гамма-излучением реактора изменения структуры и оптических свойств кристаллов LiF, ZnSe» (2004–2005) и 2-06 «Радиационноиндуцированное формирование наноструктур» (2006–2007).

**Целью исследования** является определение механизмов образования ZnO наночастиц в нестехиометричном приповерхностном слое монокристаллов ZnSe при облучении и электронной структуры для эффективных светоизлучающих наногетеропереходов.

#### Задачи исследования:

определить кристаллическую структуру, размеры, форму и ориентацию наночастиц ZnO в зависимости от отношения Zn/Se и примесей Te, O и  $Zn_i$ ;

изучить влияние энергии ионизирующих излучений и среды (вакуум и воздух) на образование и разрушение наночастиц ZnO;

изучить зависимость микротвердости приповерхностного слоя ZnSe от характеристик наночастиц ZnO;

исследовать зависимость фотоэлектрических характеристик от концентрации примесных и  $Zn_i$  центров, а также от размеров/формы наночастиц ZnO;

определить энергию и заселенность уровней электронной структуры по оптическому поглощению, отражению, пропусканию до и после облучения;

изучить влияние концентрации примесей Te, O, Zn<sub>i</sub> и размеров/формы HЧ ZnO на поверхностную электропроводность и электролюминесценцию;

изучить влияние размера/формы наночастиц ZnO на образование наногетероструктур ZnSe/ZnO или светоизлучающих наногетеропереходов ZnSe(Te)/ZnO.

**Объектом исследования** являются наночастицы ZnO в сцинтилляторных кристаллах ZnSe, подвергнутых имплантации теллуром, термообработке в парах цинка и окислительной среде и облученных в разных условиях.

**Предметом исследования** являются радиационно-индуцированные механизмы роста наночастиц ZnO на ZnSe и образования наногетероструктур и светоизлучающих наногетеропереходов с разной геометрией, а также факторы, влияющие на эффективность электролюминесценции и фотопроводимости.

**Методы исследования.** Рентгено-флуоресцентный анализ элементного состава, рентгено-дифракционный анализ, инфракрасная и электронная микроскопия, фотоэлектрические методы, методы измерения микротвердости, электропроводности, оптической спектроскопии, спектроскопии электролюминесценции.

#### Научная новизна исследования заключается в следующем:

обнаружена зависимость критических размеров, формы и ориентации нанокристаллов ZnO от соответствующей ориентации ZnSe кристалла-подложки, обусловленная минимизацией решеточных напряжений на интерфейсах наногетеропереходов: 27 нм (103)ZnO/(311)ZnSe:O,Zn с плоской нанопленкой ZnO, 40 нм (110)ZnO/(220)ZnSe(0.2%Te):O,Zn с щеткой из наностолбиков ZnO и 50 нм (002)ZnO/(111)ZnSe(0.5%Te):Zn с декорированными наностолбиками ZnO;

получены низковольтные светоизлучающие наногетеропереходы ZnSe/ZnO:O,Zn (до 21 B,  $I_{Ei}$ =91), ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (до 12 B,  $I_{Ei}$ =70) и ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (до 30 B,  $I_{Ei}$ =112) после  $^{60}$ Co гамма-облучения с электролюминесценцией в  $600\pm10$  нм независимо от полярности напряжения при участии дефектных Zn<sub>i</sub> центров и стабильных ассоциатов  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  или  $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$  в запрещенной зоне ZnSe;

обнаружено, что после ~1.25 МэВ гамма-облучения образуется электронная структура из пяти резонансных уровней  $\Gamma_{6\nu}$  – 5.76 эВ,  $L_{I,3\nu}$  – 4.85 эВ,  $Zn_i$  – 3.39 эВ,  $O_{Se}$  – 3.17 эВ и X=2.72 эВ, происходит снижение  $E_g$  на 0.06 эВ и рост фотопроводимости до  $10^{-6}$  Ом $^{-1}$  в планарном наногетеропереходе ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn толщиной ZnO 50 нм, который декорирован наностолбиками ZnO.

#### Практические результаты исследования заключаются в следующем:

показана роль ростовой селен-дефицитной нестехиометрии приповерхностного слоя  $ZnSe \sim 40$  мкм в повышении эффективности радиолиза и адсорбции кислорода на междоузельных катионах  $Zn_i$  с образованием аморфных нано-ZnO частиц размерами до 1.2 нм по механизму радиационно-индуцированной гетерогенной нуклеации;

найдены условия роста содержания нано-ZnO в приповерхностном слое ZnSe в результате обработки в парах Zn и <sup>60</sup>Co гамма-облучения и разрушения при облучении 18 МэВ протонами в вакууме, а также двойникования матричной решетки ZnSe за счет ее релаксации и упорядочения нано-ZnO в результате распыления при облучении 7 МэВ гамма-лучами от изотопа <sup>17</sup>O в тепловой колонне ядерного реактора;

показано, что  $^{60}$ Со гамма-облучение привело к появлению пиковой туннельной проводимости при  $T_{\text{мак}}$ =356 и  $T_{\text{мин}}$ =226,  $T_{\text{мак}}$ =364 К;  $\sigma_{\text{мак}}$ =3·10<sup>-9</sup> и

 $\sigma_{\text{мин}}$ =9·10<sup>-13</sup>,  $\sigma_{\text{мак}}$ =6.2·10<sup>-7</sup> Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> и  $E_a$ =0.57 и  $E_a$ =0.1,  $E_a$ =0.62 эВ в наногетеропереходах ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn и ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn с формированием щетки наностолбиков ZnO и декорированной наностолбиками пленки, с поперечными размерами 400 нм, которая связана с термостимулированным выбросом носителей зарядов на резонансные уровни, сформированные в зоне проводимости ZnSe.

выявлен рост яркости электролюминесценции при снижении рабочего напряжения обеих полярностей до 10~B эффективностью до 8.7~% преобразования электрической энергии в световую в p-n-наногетеропереходе ZnSe(0.2-0.5%Te)/ZnO:Zn,O, представляющий интерес для изготовления светодиодов;

обнаружен рост фотопроводимости наногетеропереходов p-n ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn до  $10^{-6}$  Ом $^{-1}$  после реакторного гамма-облучения, представляющий интерес для изготовления столбиковых фотодиодов;

Достоверность результатов исследования обосновывается использованием комплекса взаимодополняющих современных методов, большой статистикой хорошей аналитических воспроизводимостью измерений; логичностью и непротиворечивостью результатов и выводов общим физическим представлениям о широкозонных полупроводниках; сопоставлением их с физическими закономерностями и моделями.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость работы заключается в том, что обнаруженный радиационно-индуцированный рост нанокристаллитов ZnO в виде столбиков или пленки на нестехиометрической поверхности ZnSe в определенной взаимной ориентации представляет собой новую разновидность механизма ненапряженной гетерогенной нуклеации. Экспериментальные значения резонансных энергетических уровней  $\Gamma_{6v} - 5.76$  эB,  $L_{I,3v} - 4.85$  эB, Zn<sub>i</sub> - 3.39 эB,  $O_{Se} - 3.17$  эВ и X=2.72 эВ, полученных из спектров поглощения и дающих вклад в рост пропускания и отражения в зоне проводимости, хорошо согласуются с расчетными спектрами поглощения нано-ZnO на основе расширенного метода функционала плотности в приближении локальной плотности с параметром Хаббарда, учитывающим электронные корреляции.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что они могут быть использованы для создания физической основы радиационной технологии получения наногетеропереходов ZnSe/ZnO:O,Zn и ZnSe(Te)/ZnO:Zn, излучающих желто-оранжевый свет высокой интенсивности при низких напряжениях до 10 В. Результаты могут также быть полезны для развития новой области физики наноструктур и наноматериалов в физике конденсированного состояния.

**Внедрение результатов исследования**. На основе полученных результатов исследования радиационных процессов в наногетероструктурах ZnSe(Te)/ZnO и наногетеропереходов ZnSe(Te)/ZnO:O,Zn:

зависимость критических размеров, формы и ориентации

нанокристаллов ZnO от соответствующей ориентации ZnSe кристаллаподложки, обусловленная минимизацией решеточных напряжений на
интерфейсах наногетеропереходов 50 нм (002)ZnO/(111)ZnSe(0.5%Te):Zn с
декорированными наностолбиками ZnO, а также условия роста содержания
нано-ZnO в приповерхностном слое ZnSe в результате <sup>60</sup>Co гамма-облучения
использованы для определения спектров пропускания тонких пленок ZnO в
рамках прикладного проекта A4-ФА-Ф156 «Разработка технологии создания
высокоэффективных гибридных солнечных элементов на основе ZnOнаноструктур и органических полупроводников» (2012–2014) (Письмо
Академии наук Республики Узбекистан № 2/1255-3372 от 24 декабря 2018 г.).
Использование результатов позволило проанализировать микрофотографии
тонких пленок ZnO и определить их структурные характеристики;

полученные низковольтные светоизлучающие наногетеропереходы ZnSe/ZnO:O,Zn (до 21 B, I<sub>EI</sub>=91) и ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (до 12 B, I<sub>EI</sub>=70) после <sup>60</sup>Со гамма-облучения с электролюминесценцией в 600±10 нм независимо от полярности напряжения при участии дефектных Zn<sub>i</sub> центров и стабильных ассоциатов  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  или  $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$  в запрещенной зоне использованы зарубежными исследователями (ссылки в международных научных журналах Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2011; Прикладная физика, 2011; Матеріали для сенсорів, 2011; Journal of Advances in Condensed Matter Physics, 2018; Journal of Applied Luminescence, Physics, 2018: Journal of 2018) объяснения ДЛЯ фотопроводимости, фотолюминесценции, микрофотографий рентгенограмм наночастиц ZnO; а также влияния гамма-облучения и рентгеновского излучения на электро-, фото- и рентгенолюминесцентные свойства светодиодов ZnSe. Использование результатов позволило объяснить вюрцита, гексагональную структуру зеленую фотолюминесценции, связанную с V<sub>O</sub>, фотопроводимость наночастиц ZnO, а также высокотемпературную проводимость, зависимости люкс - амперной рентгеностимулированной характеристики проводимости фотопроводимости в чистых кристаллах ZnSe;

образование после  $\sim$ 1.25 МэВ гамма - облучения резонансных уровней  $Zn_i-3.39$  эВ,  $O_{Se}-3.17$  эВ, снижение  $E_g$  на 0.06 эВ и рост фотопроводимости до  $10^{-6}$  Ом $^{-1}$  в планарном наногетеропереходе ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn использованы при анализе рентгенограмм ZnO наноструктур в рамках прикладного проекта  $A4-\Phi A-\Phi 156$  «Разработка технологии создания высокоэффективных гибридных солнечных элементов на основе ZnO-наноструктур и органических полупроводников» (2012—2014) (Письмо Академии наук Республики Узбекистан № 2/1255-3372 от 24 декабря 2018 г.). Использование результатов позволило определить фотовольтаические и фотолюминесцентные свойства нанородов ZnO.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследований были обсуждены на 20 международных и 9 республиканских конференциях и в международных школах.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 36 научных работ, в том числе 7 научных статей, 3 из них в международных научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации доктора философии (PhD).

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 120 страниц.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Bo обоснованы И введении актуальность востребованность проведённых исследований. Показана связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике. Обсуждена степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выбраны объекты, определен предмет исследований и описаны методы исследования. Изложена научная новизна, обоснована достоверность полученных результатов. Выявлена научная и практическая значимость результатов исследования. Приведены краткие сведения об апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

первой главе «Обзор работ по синтезу и исследованию нанокристалитов ZnO, гетероструктур и гетеропереходов ядро/оболочка ZnO/ZnSe, монокристалла ZnSe и их структурные фотоэлектрические и оптические свойства» рассмотрены разные способы получения нанокристалов ZnO, монокристаллов ZnSe, гетероструктур гетеропереходов ZnO/ZnSe и их основные характеристики, опубликованные в мировой литературе. Проведен анализ влияния разных видов ионизирующих излучений на структурные, электрические, оптические и сцинтилляционные свойства кристаллов ZnSe с примесями в катионной или анионной подрешетке. Определены нерешенные проблемы, на основе которых сформулированы цель и задачи данной работы.

Во второй главе «Объекты и экспериментальные методы исследований» описаны методики получения кристаллов на основе ZnSe, измерения и анализа их структуры, фотоэлектрических, электрических и оптических свойств. Для радиационно индуцированного окисления или восстановления поверхности использовали гамма-облучение от источника  $^{60}$ Co ( $\sim$ 1.25 MэB) или реактора (до 7 МэВ), смешанное облучение фильтрованными флюенсами тепловых нейтронов и гамма-компоненты  $3.3\cdot10^{15}$ – $3.3\cdot10^{17}$  см<sup>-2</sup> ( $10^8$ - $5\cdot10^8$  P) в воздухе, а также флюенсом 18 МэВ протонов  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> в вакууме.

Рентгено-флуоресцентным методом на многоканальном анализаторе с Ge-детектором определен средний по приповерхностному слою элементный состав (начиная от K). Для определения степени нестехиометрии кристалла, т.е. отношения Se/Zn в приповерхностном слое  $\sim$ 40 мкм, использовался изотоп  $^{109}$ Cd с энергией X-квантов 22.1 кэB, а для нахождения концентрации

примеси Те в слое 70 мкм – изотоп <sup>241</sup>Ат с энергией Х-квантов 59.6 кэВ. Локальный элементный состав приповерхностных микро- и наноструктур определяли на электронном сканирующем микроскопе EVO MA10 (Zeiss) в масштабе до 2 мкм с энергодисперсионной системой Aztec (начиная от Be). Структуру и фазовый состав образцов исследовали методом рентгеновской дифракции на установке ДРОН-3М (излучение  $\lambda_{\text{СиК}\alpha}$ =0,1542 нм) в интервале усовершенствованной  $2\Theta = 10 \div 70^{\circ}$ дополнительной VГЛОВ коллимацией пучка. По спектрам определяли симметрию кристалла, кристаллографическую плоскость поверхности образца, фазовый состав, а также размеры, структуру и ориентацию наночастиц. Микротвердость исходного и облученного приповерхностного слоя определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузках 20÷200 граммов. Микрофотографии поверхности с уколами алмазной пирамидки получены на модернизированном микроскопе МИК-1 с использованием 713XTV CARD и B/W CAMERA и компьютерной обработки изображения. программы ДЛЯ Двухконтактный использовали для измерений фото-ВАХ при 300 К и электропроводности от Спектры электролюминесценции (ЭЛ) и вольт-яркостной зависимости регистрировали на спектральном приборе SPM-2 (Zeiss) с ФЭУ-100 в интервале длин волн 200-900 нм. Спектры оптического поглощения снимали на приборе СФ-56 (ЛОМО) при ширине щели 6 нм в интервале длин волн 190-1100 нм и оптических плотностей до 5, а спектры пропускания и отражения снимали на UV3600 (Shimadzu), но в 240-830 нм при щелях от 5 до 32 нм. Благодаря большой статистике (по 10 образцам размерами 10×10×1 мм<sup>3</sup> одинаковой ориентации и 5 повторов измерений) ошибки всех измерений не превышали 10%.

В третьей главе «Влияние обработки в парах Zn и облучений на структурные характеристики кристаллов ZnSe:O, ZnSe(0.2%Te):O, ZnSe(0.2 и 0.5%Te)» описаны кристаллическая структура, механические свойства и микрофотографии указанных выше кристаллов до и после облучения ионизирующими излучениями.

В необработанных кубических монокристаллах ZnSe:O, кроме рефлекса (311) от релаксированной матричной решетки ZnSe, обнаружен рефлекс (103) от низкосимметричной примесной фазы ZnO. Термообрабока в парах Zn привела к заметному уширению рефлекса (311) за счет упругих напряжений при диффузионном допировании атомами Zn, занимающими междоузельные положения. Облучение гамма-квантами ZnSe/ZnO:O,Zn в источнике <sup>60</sup>Co привело к уменьшению ширины рефлекса (311), что свидетельствует о частичном снятии напряжений матричной решетки, и увеличению интенсивности рефлекса (103) из-за роста содержания примесной фазы ZnO. Латеральные размеры включений кристаллической фазы ZnO, определенные по формуле Селякова—Шеррера,

$$L = \frac{0.94 \lambda}{\beta_{hkl} \cos \theta_{hkl}} \tag{1}$$

где  $\beta_{hkl}$  – полуширина соответствующего отражения, в рад.

Легированные ZnSe(0.2%Te)/ZnO:О давали рефлекс матричной решетки (220) и рефлекс (110) примесной фазы ZnO. После гамма-облучения структура сохраняется, содержание примесной фазы не меняется. ТО в парах Zn привела к изменению тонкой структуры: при малых углах наблюдается широкое диффузное рассеяние (рис. 1), сосредоточенное вблизи кристаллографического направления [111], перпендикулярная ему атомная плоскость (111) в структуре ZnSe является самой дефектной.

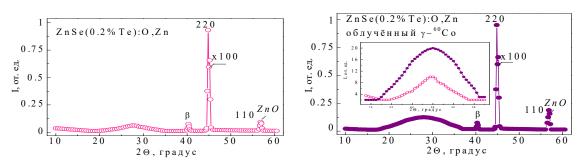


Рис. 1. Рентгенографический фазовый анализ ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn до и после гамма-облучения  $^{60}$ Co

Этому направлению соответствует угол рассеяния 20≈27.2°, именно около него наблюдается неселективный рефлекс, видимо, обусловленный взаимодействующими между собой мелкими не примесной фазы по направлению [111]. Однако при увеличении их размеров уменьшении расстояния между ними преципитаты начинают взаимодействовать собой между И имеющимися включениями кристаллической примесной фазы ZnO, ответственной за рефлекс (110) с d/n=0.1626результате размеры включений HM, HЧ ZnO-(110) имели размер ≈40 нм, ZnSe(0.2%Te):O,Zn,включения ZnO до облучения составляли 0.9 нм, а после гамма-облучения 1.2 нм за счет радиолиза поверхности кристалла с испарением Se и его замещением О и О<sub>3</sub> из атмосферы, что привело к увеличению размеров зародышей ZnO и содержания примесной фазы. Рис. 2 показывает, что при содержании 0.5%Te ZnSe/ZnO:Zn с кристаллографической ориентацией (111) имеет ZnO примесную фазу, ответственную за дифракционный пик (002), однако диффузное рассеяние около 30 градусов отсутствует. Это может быть связано с термообрабокой образцов в окислительной среде или с более высокой концентрацией Те.

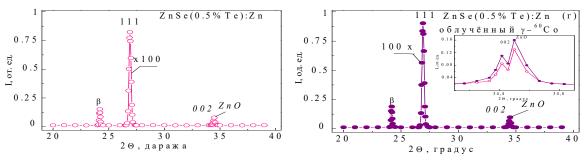


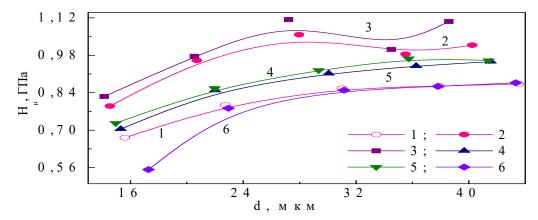
Рис. 2. Рентгенографический фазовый анализ ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn до и после гамма-облучения  $^{60}$ Co

Облучение <sup>60</sup>Со гамма-квантами увеличило в 2 раза содержание фазы ZnO при сохранении степени объемного упругого напряжения. Размер ZnO нанокристаллов, определенный по пику (002), составляет ~52 нм. Центры Zn<sub>i</sub>, введенные в приповерхностный слой и вступившие в химическую связь с О, слои ZnO сформированных образовали новые на нанокристалических включениях, что проявилось в росте рефлекса (002). Облучение привело к радиолизу связи Zn-Se, в результате Se улетучился и  $Zn_i^{2+}$  связался с анионами О из воздуха. Облучения ZnSe/ZnO:O,Zn гаммакомпонентой реакторного излучения энергией до 7 МэВ от изотопа <sup>17</sup>О в тепловой колонне вызвали распыление поверхностного оксидного слоя ZnO и двойникование решетки ZnSe, свидетельствующее об упорядочении радиационных дефектов, а в случае 18 МэВ протонов в вакууме произошло частичное распыление.

Значения числа  $H_{\mu}$  и глубины l проникновения алмазной — квадратной пирамиды с двугранным углом  $\alpha$ =136 $^{0}$  в ZnSe/ZnO:O и ZnSe/ZnO:O,Zn рассчитывали по формуле

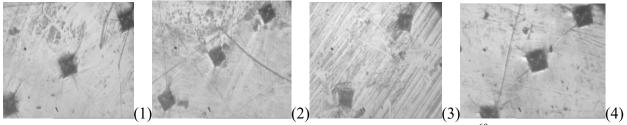
$$H_{\mu} = 1.854 \cdot (P/d^2)$$
  $\Psi = \frac{d}{2tg(\alpha/2)}$  (2)

в зависимости от нагрузки от 50÷200 г, микрофотографии до и после облучения разными ионизирующими излучениями приведены на рис. 3, 4.



 $1-ZnSe/ZnO:O, 2-ZnSe/ZnO:O,Zn, 3-гамма-облучение <math>^{60}Co, 4-передняя$  и 5-тыльная сторона облученного протонами  $10^{15}$  см $^{-2}, 6-гамма-облучение$  в реакторе  $6.6\cdot10^{16}$  см $^{-2}$ 

Рис. 3. Зависимость микротвердости от глубины проникновения алмазной пирамиды



(1) — поверхность исходного ZnSe/ZnO:O,Zn; (2) — гамма-облучение  $^{60}$ Co, (3) — облучение протонами и (4) — гамма-облучение в реакторе. Масштаб фото  $400\times400$  мкм

Рис. 4. Микрофотографии поверхности с уколами С-пирамиды

Сопоставление данных на рис. 3 и 4 показало, что 60Со гамма-облучение (2) уменьшило размеры уколов ( $H_{\mu}$  выросла), а гамма-лучами реактора (4) привело к углублению следа уколов ( $H_{\mu}$  уменьшилась), а также к образованию мелких темных преципитатов. Таким образом, косвенно доказан рост НЧ ZnO после <sup>60</sup>Co гамма-облучения. Прямое доказательство видно на рис. 5, в табл. 1. На необлученных поверхностях видна только дислокационная сетка. Сравнение снимков термообработанных в парах Zn и показывает, гамма-облученных наногетеропереходов что образце, окислительной среде (А) с толщиной 27 нанокристаллов (определен по РСА), образовалась тонкая пленка, а последующее легирование до 0.2%Те (В) с ZnO нанокрситалами 40 нм и аморфной фазой ZnO до 1.2 нм привело к формированию щётки наностолбиков ZnO с поперечными размерами в основании 200-400 нм.

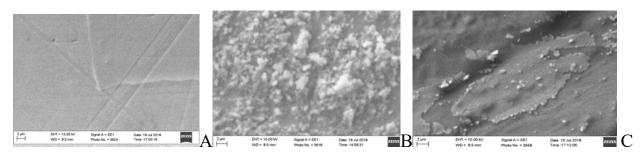


Рис. 5. Микрофотографии ZnSe/ZnO:O,Zn (A), ZnSe/ZnO (0.2%Te):O,Zn (B) и ZnSe/ZnO(0.5%Te):Zn (C) наногетеропереходов гамма-облученных  $^{60}$ Co 500 MP

Образцы, выращенные в восстановительной атмосфере аргона (C) с 0.5%Те и 52 нм ZnO нанокрситалов имели плоские (> $10\times10$  мкм) интерфейсы ZnSe/ZnO, декорированные наностолбиками ZnO.

В табл. 1 приведен элементный состав (определен по РФА) этих поверхностей, который подтверждает рост содержания кислорода (детектор AZtec) после облучения, особенно в присутствии адсорбированного  $O_3$  и фазы ZnO в виде аморфных 2D-пленок и кристаллических 1D-столбиков. Анализ состава удаленных при радиолизе слоев не позволил определить содержание О с помощью Si(Li)-детектора. Видно, что облучение гамма квантами  $^{60}$ Со привело к росту содержания О в 70 раз за счет уменьшения содержание Se в наногетеропереходах ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn.

Таблица 1 Элементный состав удаленного при радиолизе и оставшегося приповерхностного слоя и размеры нанокристаллов ZnO в наногетеропереходах до и после <sup>60</sup>Co 500 MP

Элемент,	ZnSe	ZnSe:O,Zn		ZnSe(0.2%Te):O,Zn		ZnSe(0.5%Te):Zn	
вес.%		Остаток	Удален	остаток	удален	Остаток	Удален
ZnO нм ×и	нтен.	27×2		40 ×2 +аморф.1.2		52 ×2	
O K	0	4.2	-	69.5	-	5. 9	-
Zn L	47	45.0	55.3	16.3	61.1	43.7	26.5
Se L	53	50.8	44.7	14.2	38.9	49.9	73.5
Te L	0	0		0	0.2	0.4	0.5

Четвертая глава «Фотоэлектрические свойства названа И ZnSe/ZnO:O, электропроводность наногетероструктур **ZnSe(0.2** И 0.5%Te)/ZnO наногетеропереходов ZnSe/ZnO:O,Zn, **ZnSe(0.2** И 0.5%Te)/ZnO:O,Zn до и после облучений». По литературным данным известно, что образцы ZnSe имеют проводимость *n*-типа и очень высокое значение удельного сопротивления  $\rho$ ~ $(10^{10}$ - $10^{12})$  Ом·см из-за наличия  $V_{Se}$ . Термообработка в парах Zn изменяет проводимость на p-тип и снижает  $\rho$  до  $\sim (10^4 - 10^5)$  Ом·см за счет образования глубоких уровней, связанных с центрами V<sub>Zn</sub>, но не было изучено влияние разных видов ионизирующих излучений.

Таблица 2 Значения удельного сопротивления, измеренные в темноте ( $\rho_T$ ) и на свету ( $\rho_C$ ), а также соответствующие расчеты поляризации (+R/-R), фотопроводности ( $\sigma_{\Phi\Pi}$ ), размеры нанокристаллов ZnO и Zn/Se (0.832) в ZnSe

Образел	$ ho_{ m T}$ , Ом	+R/-R	<i>р</i> с, Ом	+R/-R	σφп, Ом <sup>-1</sup>	
Наногетерост	$+4.8 \cdot 10^9$	0.87	$+1.1 \cdot 10^9$	0.81	$+0.7 \cdot 10^{-10}$	
ZnSe/ZnO:O 2	ZnSe/ZnO:O 27 и 0.84			$-1.3 \cdot 10^9$		-0.6·10 <sup>-10</sup>
ү-Лучи реактора	$3.3 \cdot 10^{17}$	$+1.1 \cdot 10^9$	0.23	$+3.7 \cdot 10^7$	0.92	$+0.3 \cdot 10^{-8}$
	см <sup>-2</sup>	$-4.8 \cdot 10^9$		$-4.10^7$		$-0.3 \cdot 10^{-8}$
Наногетеропереход	Наногетеропереход ZnSe			$+1.4 \cdot 10^{8}$	0.2	$+0.6 \cdot 10^{-9}$
(0.2%Te)/ZnO:O 40 и 0.85		$-2.7 \cdot 10^9$		$-7.1 \cdot 10^8$		$-0.1 \cdot 10^{-9}$
γ-Лучи реактора	3.3·10 <sup>17</sup> см <sup>-</sup>	$+2.6 \cdot 10^3$	0.45	$+2.5 \cdot 10^3$	0.48	$+0.1 \cdot 10^{-5}$
	2	$-5.8 \cdot 10^3$		$-5.2 \cdot 10^3$		-0.2·10 <sup>-5</sup>
ZnSe(0.2%Te)/Zn	$+2.2 \cdot 10^{5}$	0.07	$+2.1 \cdot 10^{5}$	0.08	$+0.2 \cdot 10^{-7}$	
(0.9) и 0.	$-29 \cdot 10^5$		$-26 \cdot 10^5$		$-0.3 \cdot 10^{-8}$	
γ-Лучи реактора	3.3·10 <sup>17</sup> см <sup>-</sup>	$+3.2 \cdot 10^3$	0.84	$+2.10^{3}$	0.54	$0.2 \cdot 10^{-4}$
	2	$-3.8 \cdot 10^3$		$-3.7 \cdot 10^3$		$0.1 \cdot 10^{-5}$
ZnSe(0.5%Te)/	$+5.6 \cdot 10^6$	0.62	$+1.3 \cdot 10^6$	0.15	$+0.6 \cdot 10^{-7}$	
52 и 0.8	$-9.10^{6}$		$-8.3 \cdot 10^6$		$-0.8 \cdot 10^{-8}$	
γ-Лучи реактора	3.3·10 <sup>17</sup> см <sup>-</sup>	$+5.10^4$	0.88	$+3.10^{3}$	1	0.2·10 <sup>-4</sup>
	2	$-9.9 \cdot 10^4$		$-3.10^3$		$0.2 \cdot 10^{-4}$

В табл. 2 приведены ( $\rho_T$ ) в темноте и ( $\rho_C$ ) на свету, а также соответствующие расчеты поляризации (+R/-R) и фотопроводимости ( $\sigma_{\Phi\Pi}$ ) до и после реакторного 7 МэВ гамма-облучения  $3.3\cdot10^{17}\,\mathrm{cm}^{-2}$ . Фотопроводимость определяли из соотношения

$$\sigma_{\Phi\Pi} = \frac{(R_T - R_C)}{R_T \cdot R_C} \tag{3}$$

Видно, что наногетероструктура ZnSe/ZnO:О имела высокие значения  $\rho_T$ ,  $\rho_C$ ,  $\sigma_{\Phi\Pi}$  и (+R/-R), допирование до 0.2% Те привело к снижению  $\rho_T$  и  $\rho_C$  на порядок в зависимости от ( $\pm$ V) и поляризации, соответственно  $\sigma_{\Phi\Pi}$  выросла на порядок, что связано с образованием Zn<sub>i</sub> и V<sub>Se</sub>. Наногетероструктуры

ZnSe(0.2%Te)/ZnO и ZnSe(0.5%Te)/ZnO имели высокие  $\rho_T$  и  $\rho_C$  и низкую  $\sigma_{\Phi\Pi}$ . Термообработка в парах Zn во всех образцах снизила  $\rho_T$  и  $\rho_C$  на 2÷4 порядка, уменьшилась полярность с ростом  $\sigma_{\Phi\Pi}$  до  $10^4$  раз за счет образования Zn<sub>i</sub> с ассоциатами (O<sub>se</sub><sup>0</sup>+V<sub>Zn</sub>-), (O<sub>se</sub><sup>0</sup> Te<sub>se</sub><sup>0</sup>V<sub>Zn</sub>) и *p-n*-перехода, все виды облучения привели к росту  $\sigma_{\Phi\Pi}$ , особенно γ-реакторная от ~20 раз до  $10^4$  раз с образованием пар Френкеля (табл. 2).

На рис. 6 показаны фото-BAX высокоомных наногетероструктур ZnSe/ZnO:О и наногетеропереходов ZnSe(0.2%Te)/ZnO:О до и после реакторного гамма-облучения. Видно, что наногетероструктура ZnSe/ZnO:О имела омическую Фото-BAX, где реакторная гамма облучения привело к образованию фото-полупроводниковую структуру.

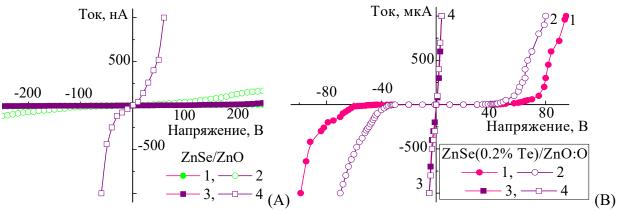


Рис. 6. Фото-ВАХ в темноте (темные) и на свету (светлые) до и после облучения потоком гамма-лучей реактора 3.3·10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>

Допирование 0.2% Те в наногетеропереходах ZnSe(0.2% Те)/ZnO:О привело к формированию полупроводниковой структуры с запирающим U $\approx$ 70 В, гамма-облучение в реакторе снизило U $\approx$ 1 В, при этом значительно выросла  $\sigma_{\Phi\Pi}$  до  $10^4$  раз за счет образования пар Френкеля с  $Zn_i^{2+}$  и комплексом  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  (рис. 6, В).

На рис. 7 показаны температурные зависимости приповерхностной электропроводности  $\sigma(T)$  в пределах  $90\div390$  К наногетеропереходов ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (A) и ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (B), которые условно разделяются на три интервала температур, где наблюдаются как экспоненциальные, так и пиковые зависимости:

$$E_{\phi} = \frac{k \ln(\rho_{1}/\rho_{2})}{(1/T_{2}-1/T_{1})} \quad \text{W} \quad E_{\phi} = G \left[ \frac{kT_{m}(T_{m}-\Delta T)}{\Delta T} \right]$$
 (4)

Наногетеропереход ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (A) с нанокристалитами ZnO 40 нм и аморфной фазой толщиной до 0.9 нм в низко температурной (90÷180 K) части имеет  $\sigma$ =(3.3÷4.2)·10<sup>-9</sup> Oм<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> с энергией активации электропереноса  $E_a$ <0.01 эB, т.е. электронную проводимость (прыжковая проводимость около уровня Ферми) (кр.1-A), но при 180÷390 K произошел пиковый спад при  $T_{\text{мин}}$ =302 K,  $\sigma_{\text{мин}}$ =4.1·10<sup>-10</sup> Oм<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> с  $E_a$ =0.17 эB, что может

быть связано с повышением концентрации дефектов  $V_{Zn}Te_{Se}Zn_i$  на границе с образованием включений, гамма-облучение привело к снижению  $\sigma(T)$  на 4 порядка и ее независимости от температуры в интервале  $90\div210$  К, при росте до 270 К наблюдалось увеличение  $\sigma=10^{-13}\div2.2\cdot10^{-12}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> с  $E_a=0.33$  эВ, в интервале  $270\div370$  К наблюдался пиковый рост  $\sigma_{\text{мак}}=3\cdot10^{-9}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> при  $T_{\text{мак}}=356$  К с  $E_a=0.57$  эВ (табл. 3 и рис. 7).

Таблица 3 Характеристики приповерхностной электропроводности наногетеропереходов ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (A) и ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (B) до (1) и после (2) облучения

109	НГП	Параметр	Электронная Проводимость	Пиковая провод.	Ионная провод.
To 10 <sup>-10</sup> ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn  O 10 <sup>-11</sup> O 10 <sup>-12</sup>	А 40+ 1.2 нм	Τ (K) σ (Om <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> ) Ε <sub>a</sub> (эB)	90÷180 (3.3÷4)·10 <sup>-9</sup> < 0.01	Т <sub>мин</sub> =302 4.1·10 <sup>-10</sup> 0.17	-
100 150 200 250 300 350 Т, к (A) — 40 нм и 1.2 амр. фаза;	ү-обл.	T (K) σ(Om <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> ) E <sub>a</sub> (эB)	210÷270 10 <sup>-13</sup> ÷2·10 <sup>-12</sup> 0.33	$T_{\text{MAK}} = 356$ $3 \cdot 10^{-9}$ $0.57$	370÷390 (10÷13)·10 <sup>-10</sup> 0.71
7	В 52 нм	Τ (K) σ(Οм <sup>-1</sup> cм <sup>-1</sup> ) Ε <sub>a</sub> (эВ)	220÷313 10 <sup>-12</sup> ÷10 <sup>-10</sup> <0.01	Т <sub>мак</sub> =335 1.3·10 <sup>-9</sup> 0.85	345÷390 8·10 <sup>-10</sup> ÷4·10 <sup>-9</sup> 0.62
10 <sup>-11</sup> 10 <sup>-12</sup> 100 150 200 250 300 350 T, K	γ-обл.	T (K) σ(Om <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> ) E <sub>a</sub> (эB)	90÷170 5·10 <sup>-10</sup> ÷6·10 <sup>-11</sup> 0.05 aB	Т <sub>мин</sub> =226 9·10 <sup>-13</sup> 0.1	$T_{\text{Mak}} = 364$ $\sigma_{\text{Mak}} = 6.2 \cdot 10^{-7}$ $0.62$

Ионная проводимость с  $\sigma = (9.9 \div 13) \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{см}^{-1}$  при  $370 \div 390 \text{ K}$  с

 $E_a$ =0.71 эВ, вероятно, связана с движением  $Zn_i^+$  по границам ZnSe с аморфной нанофазой ZnO с размерами до 1.2 нм, значительным ростом содержания О до 100 раз и образованием щетки наностолбиков ZnO над поверхностью ZnSe. Величина  $\sigma(T)$  в ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (B) с нанокристалитами ZnO 52 нм не зависит от температуры при 90÷220 K, с ростом температуры до 313 К наблюдается увеличение  $\sigma$  от  $1.1 \cdot 10^{-12} \div 1.4 \cdot 10^{-10}$ Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> с  $E_a$ <0.01 эВ, а до 345 К пиковая туннельная ЭП при  $T_{\text{мак}}$ =335 К с  $E_a=0.85 \ \text{эВ}, \ \sigma_{\text{мак}}=1.3 \cdot 10^{-9} \ \text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и ионная электропроводности при  $345 \div 390$ эВ, облучение гамма-квантами  $E_{a}$ =0.62 привело к росту электропроводности от  $5.3 \cdot 10^{-10} \div 6.6 \cdot 10^{-11}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> с  $E_a < 0.05$  эВ при  $90 \div 170$  K, а нагрев до 345 К, наоборот, привел к пиковому спаду электропроводности при  $T_{\text{мин}}$ =226 K,  $E_a$ =0.1 эВ с  $\sigma_{\text{мин}}$ =9·10<sup>-13</sup> Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>, тогда как в интервале  $345 \div 390$  К наблюдался пиковый рост при  $T_{\text{мак}} = 364$  К,  $E_{\text{a}} = 0.62$  эВ с  $\sigma_{\text{мак}} = 6.2 \cdot 10^{-7}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> (табл. 3) за счет увеличения содержания О и образования нанопленки, декорированной наностолбиками ZnO (рис. 5, C), связанной с термостимулированным выбросом носителей зарядов на

резонансные уровни, сформированные в зоне проводимости, и ассоциатов

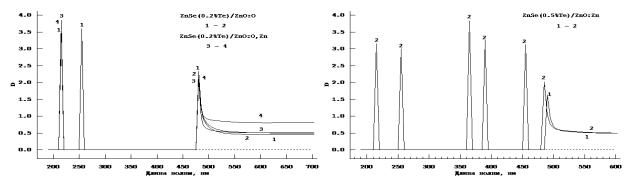
 $V_{Zn}Te_{Se}Zn_i$  с уровнем в запрещенной зоне ZnSe.

Рис. 7. (В) – 52 нм

В пятой главе «Электрооптические свойства наногетероструктур ZnSe/ZnO:O, ZnSe(0.2-0.5%Te)/ZnO и наногепереопереходов ZnSe/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.2-0.5%Te)/ZnO:Zn до и после облучений» приведены резонансные оптические переходы, рассчитанные по формуле Смакулы концентрации фотовозбужденных электронов ( $N_e$ ) на каждом созданном уровне до и после легирования, термообработки, а также после облучения разными видами ионизирующих излучений. Теоретические расчеты Т.В. Горковенко показали, что в прямозонном кристалле ZnSe величина  $E_g$ =2.7 эВ, выше которой возможно несколько резонансных уровней  $\Gamma_{6v}$  – 5.76 эВ,  $L_{1,3v}$  – 4.85 эВ и  $M_{4v}$  – 5.16 эВ.

$$N = 1.28 \cdot 10^{17} \frac{n}{\left(n^2 + 2\right)^2} \cdot \frac{K_m H}{f}$$
 (5)

Ниже на рис. 8, слева, видно, что спектр наногетероперехода ZnSe(Te)/ZnO:O (1) содержит резонансных уровеней  $\Gamma_{6v}$  – 5.76 (215 нм) эВ и  $L_{I,3v}$  – 4.85 (255 нм) эВ, а также край поглощения  $E_g$ =2.58 эВ (480 нм).

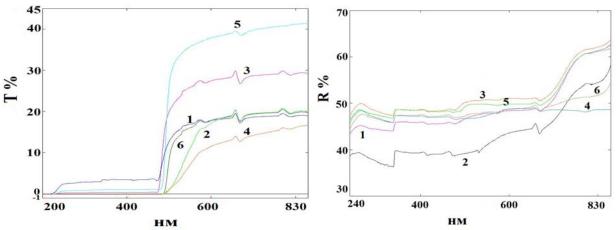


Слева: Наногетеропереходы ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn; справа: ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn до (1,3) и после (2,4) облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}$ Со **Рис. 8. Спектры оптической плотности** 

Таблица 4 Энергии (эВ) уровней и расчеты  $N_e$  в наногетеропереходах ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O (A), ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (B) и ZnSe(0.5%Te)-ZnO:Zn (C)

НГУ и НК	Г6ч эВ	L <sub>1,3v</sub> эВ	Zn <sub>i</sub> эB	Оѕе Эв	ХэВ	Ед эВ	Ne cm <sup>-3</sup>
ZnO	$N_{\Gamma_{6V}}$ cm <sup>-3</sup>	$N_{I_{1,3}}$ cm <sup>-3</sup>	$N_{Zn_i}$ cm <sup>-3</sup>	$N_{O_{Se}~{ m CM}}$ -3	$N_{x \text{ cm}^{-3}}$	$N_{E_g}$ cm <sup>-3</sup>	
А-40 нм	5.76	4.85				2.58	$4.4 \cdot 10^{16}$
	$2.2 \cdot 10^{16}$	$1.6 \cdot 10^{16}$				$0.5 \cdot 10^{16}$	
<sup>60</sup> Co γ		-				2.58	$0.5 \cdot 10^{16}$
40 нм						$0.5 \cdot 10^{16}$	
B-40	5.76					2.58	$2.8 \cdot 10^{16}$
и 0.9 нм	$2.4 \cdot 10^{16}$					$0.3 \cdot 10^{16}$	
<sup>60</sup> Со у 40 и	5.76					2.58	$2.9 \cdot 10^{16}$
1.2 нм	$2.4 \cdot 10^{16}$					$0.5 \cdot 10^{16}$	
С-52 нм						2.52	$0.3 \cdot 10^{16}$
						$0.3 \cdot 10^{16}$	
<sup>60</sup> Co γ	5.76	4.85	3.39	3.17	2.72	2.55	$5.8 \cdot 10^{16}$
52 нм	$2 \cdot 10^{16}$	$1.4 \cdot 10^{16}$	$0.9 \cdot 10^{16}$	$0.8 \cdot 10^{16}$	$0.4 \cdot 10^{16}$	$0.3 \cdot 10^{16}$	

Расчетное значение суммарной заселенности на резонансных уровней и  $E_g$  (концентрации электронов фотопроводимости) по формуле Смакулы дает значение  $N_e = 4.4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, что приведено в табл. 4. Облучение привело к снижению  $N_e$  на порядок  $4.6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> за счет разрушения резонансных Термообработка парах Zn наногетероперехода В ZnSe(Te)/ZnO:O,Zn (3) привела только к разрушению резонансного уровня  $L_{1,3\nu}$ , в результате  $N_e$  уменьшилась до  $2.78\cdot10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Облучение гаммаквантами (4) привело к незначительному росту  $N_e$ =2.9·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>, также наблюдалось увеличение рассеяния, независящее от λ-длины волны в интервале 480–1100 нм, связанное с рассеянием на слабосвязанных носителях, что согласуется с образованием нанородов (наностолбиков) ZnO в (рис. слое ZnSe 5, B). Допирование приповерхностном термообработка в парах Zn ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn привело к снижению  $E_g$  на  $0.06 \text{ эВ и } N_e = 0.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , что может быть связано с увеличением размера наночастиц ZnO до 52 нм (рис. 8, справа). Облучение (2) привело к образованию пяти резонансных уровней и росту  $E_g$  на 0.03 эВ и  $N_e$ = $5.8 \cdot 10^{16}$ см-3 в 17.6 раза, по-видимому, на планарном интерфейсе (рис. 5, С).



Наногетеропереходы ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O исходный (1), облученный (2); ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (3), облученный (4); ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (5), облученный (6) **Рис. 9. Спектры пропускания и отражения до и после 60-Co 500 MP** 

Из видно, что исходный наногетеропереход данных рис. ZnSe(0.2%Te)/ZnO:О с размерами ZnO нанокристалитов 40 нм имеет остаточное пропускание >3% выше и <20% ниже края зоны проводимости, а отражение <20% в интервале 240-670 нм и рост до 60% при 750 нм. При облучении выросли отдельные столбики ZnO с сечением в основании 200-400 нм, что привело к уширению и сдвигу края пропускания и значительному уменьшению отражения в результате рассеяния от них. Термообработка в парах Zn (ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn) сгладила поверхность нанопленки ZnO, увеличила пропускание <Eg и отражение. А при облучении выросла плотная щетка наностолбиков (рис. 5, В), что привело к 2-кратному уменьшению пропускания и отражения (>670 нм), а также росту поглощения <E<sub>g</sub>. Наибольшее пропускание и отражение имеет ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn,

выращенный в Ar с размерами нанокристалитов ZnO 52 нм. Облучение сформировало нанопленку, декорированную наностолбиками ZnO (рис. 5, C), что также уменьшило пропускание и отражение.

Далее на рис. 10 приведены результаты исследований вольт-яркостьной электролюминесценции спектров наногетеропереходов зависимости ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, ZnSe/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn,ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn до и после 60Co гамма-облучения. В нелегированных и необработанных высокоомных наногетероструктурах ZnSe/ZnO:О никакой электролюминесценции не наблюдалось. Однако допирование изовалентной примесью Те до 0.2% образовало наногетероперехода ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, а термообработка парах Zn наногетеропереходов ZnSeZnO:O,Zn, ZnSe(0.2-0.5%Te)/ZnO:Zn, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Znобладает которая широкой полосы электролюминесценцию около  $\lambda_{\text{мак}}=600$  нм ( $\pm 20$  нм), что связано глубокими уровнями  $Zn_i$  с комплексами  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  или  $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$ . Видно, что зависимости в обеих полярностях носят степенной характер, а пороговое напряжение для возбуждения электролюминесценции зависело от Получаемая нелинейная полярности. вольт-яркостьная зависимость интенсивности электролюминесценции имеет вид:

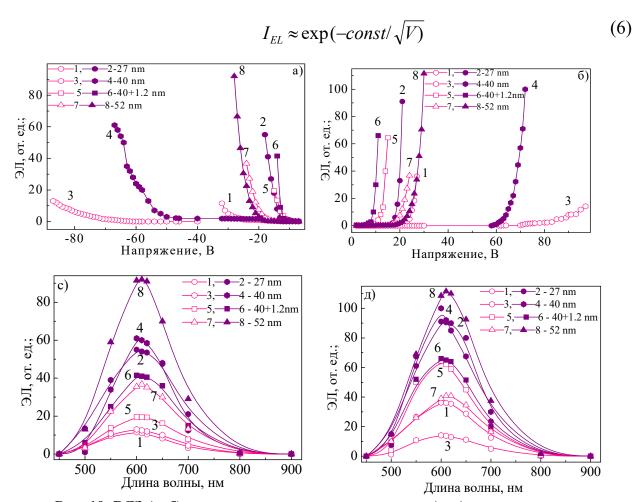


Рис. 10. ВЯЗ (а, б) и спектр электролюминесценции (с, д) наногетеропереходов ZnSe/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn до (1) и после (2) 60Со гамма-облучения: при обратной(а) и прямой (б) полярности напряжений

Гистерезис проявляется при высоких напряжениях и свидетельствует о несимметричности потенциальных барьеров. Это согласуется с геометрией наногетеропереходов, показанной на рис. 5, С, где пленка декорирована наностолбиками ZnO. Интенсивность электролюминесценции (с и д) при полном цикле полярности зависит от величины приложенного напряжения, что объясняется барьерным предпробойным механизмом. При вариации величины и полярности возбуждающего напряжения можно различить наложение трех разных полос с максимумами около 560, 600 и 700 нм. Из рис 10. видно, что наногетеропереход ZnSe/ZnO:O,Zn с нанокристаллами ZnO до 40 нм, давал  $I_{Эл}=11.5$  при U= -32 B, и  $I_{Эл}=36.3$  при U=27 B, где U=21 В, что связано с увеличением интенсивности рефлекса ZnO фазы и формированием тонкой пленки ZnO; в ZnSe(0.2%Te)/ZnO:О достигалась  $I_{ЭЛ}=13$  при U= -87 B и  $I_{ЭЛ}=14$  при U=97 B, а после облучения  $I_{ЭЛ}=61$  при U= -67 В и І<sub>Эл</sub>=100 при U=72 В, за счет образования пленки с наностолбиками ZnO в приповерхностном слое ZnSe; в ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn  $I_{ЭЛ}=19.5$  и 64.5 при U= $\pm 15$  B, а после  $I_{2/7}$ =42 при U= -14 B и  $I_{2/7}$ =66 при U=11 B, что связано с образованием пленки со щеткой из наностолбиков ZnO и высоким содержанием кислорода; в ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn  $I_{Эл}=40$  при U=-28 В и  $I_{ЭЛ}=36.8$  при U=24 B, а после облучения  $I_{ЭЛ}=92$  при U=-28 B и  $I_{ЭЛ}=112$  при U=30соответственно увеличилась интенсивность рефлекса нанокристаллов ZnO формированием декорированной c нанопленку наностолбиками ZnO. Видно, интенсивную что самую электролюминесценцию давал наногетеропереход ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Znпосле гамма-облучения с толщиной нанокристалитов ZnO до 52 нм и с нанопленкой, декорированной наностолбиками с поперечными размерами в основании от 200 до 400 нм. Гамма-облучение <sup>60</sup>Со существенным образом не повлияло на спектр, но привело к 2–8-кратному росту  $I_{ЭЛ}$  в зависимости от полярности за счет роста концентрации  $Zn_i$  с комплексами  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  или  $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$  и ударного возбуждения вторичными электронами от гаммалучей.

В приложениях приведены описания и схемы методов измерений.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основе полученных результатов исследования, проведенного по теме диссертации доктора философии (PhD) «Радиационо-индуцированное формирование наночастиц ZnO и электролюминесценция в кристаллах ZnSe», представлены следующие выводы.

1. Впервые методами рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии установлена прямая корреляция между нестехиометрией приповерхностного слоя ZnSe (0.85-0.86) и

критическими размерами образованных ZnO нанокристаллитов (при обработках и гамма-облучении) с ориентацией: пленка (103)ZnO~27 нм на грани (311) ZnSe-ZnO:Zn, наностолбики (110)ZnO~40 нм на грани (220) ZnSe(0.2%Te)/ZnO:Zn, пленка, декорированная наностолбиками (002) ZnO~52 нм, на грани (111) ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn. При таких взаимных ориентациях, формах и размерах механические напряжения на интерфейсах ZnSe/ZnO минимальны, что объясняется механизмом ненапряженной гетерогенной нуклеации и обеспечивает стабильность наногетеропереходов. Протоны 18 МэВ в вакууме приводят к разрушению ZnO, а гамма ~7 МэВ от <sup>17</sup>O распыляет приповерхностный слой ZnO и образует двойники в матричной решетке ZnSe.

- 2. Показано, что в высокоомных образцах ZnSe/ZnO:О *n*-типа с омической ВАХ после допирования Те и термообработки в окислительной среде образуются *р-п*-наногетеропереходы и значительно (до снижается сопротивление. Гамма (1-7 МэВ) и протонное облучения образцов приводят к снижению запирающего напряжения ВАХ за счет радиолиза, генерации пар Френкеля в обеих подрешетках и электронпар И перезарядки центров. Фотопроводимость наногетеропереходов, особенно ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, усиливается на 4 за счет порядка после реакторного гамма-облучения запирающего напряжения фото-ВАХ до 10 В.
- 3. Рост интенсивности нанофазы ZnO после гамма-облучения  $^{60}$ Co в виде щетки наностолбиков в наногетеропереходах ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn и пленки, декорированной наностолбиками ZnO в ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn, привел к появлению пиковой туннельной проводимости через планарные интерфейсы при  $T_{\text{мак}}$ =356 и  $T_{\text{мин}}$ =226- $T_{\text{мак}}$ =364 K;  $\sigma_{\text{мак}}$ =3·10<sup>-9</sup> и  $\sigma_{\text{мин}}$ =9·10<sup>-13</sup>,  $\sigma_{\text{мак}}$ =6.2·10<sup>-7</sup> Oм<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> и  $E_a$ =0.57 и  $E_a$ =0.1-0.62 эB, которая связана с термостимулированным выбросом носителей зарядов на резонансные уровни, сформированные в зоне проводимости.
- 4. Впервые исследовано проявление наночастиц ZnO разной формы/размеров в комплексных спектрах пропускания и отражения. В спектрах оптического поглощения в режиме сильнопоглощающих объектов определены пять радиационно наведенных резонансных уровней  $\Gamma_{6v} 5.76$  эB,  $L_{I,3v} 4.85$  эB,  $Zn_i 3.39$  эВ  $O_{Se} 3.17$  эВ, X 2.72 эВ, образованных гамма-облучением, которые подтверждают расчеты, и рост общей концентрации фотоэлектронов до  $N_e$ =5.8·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup> в >17 раз.
- 5. Гамма-облучение  $^{60}$ Со в наногетеропереходах ZnSe(0.2%Te)/ZnO:О с образованием наностолбиков ZnO привело к 8-кратному увеличению яркости электролюминесценции с широкой полосой излучения  $\lambda_{\text{мак}}$ =600 нм, а в наногетеропереходах ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn, где пленка декорирована наностолбиками, к 4-кратному, что связано с излучательным центром Zn<sub>i</sub> с асооциатами  $V_{\text{Zn}}$ Zn<sub>i</sub>Te<sub>Se</sub>. Положение

максимума полосы электролюминесценции не зависит от величины электрического поля, что обусловлено механизмом возбуждения предпробойного типа. Снижение порогового и рабочего напряжения от 24 до 12 В в обеих полярностях возбуждения электролюминесценции коррелирует с формой, ориентацией и размерами нанокристаллов ZnO.

Обнаружен радиационно-индуцированный рост содержания нанокристаллов ZnO на нестехиометричном интерфейсе ZnSe(Te)/ZnO:Zn с определенной формой (столбик или пленка), взаимной ориентацией и упорядочением, что обеспечивает увеличение интенсивности электролюминесценции предпробойного типа при снижении рабочего напряжения до 10 В и представляет практический интерес для изготовления широкозонных светодиодов.

# SCIENTIFIC COUNCIL No.DSC.27.06.2017.FM/T.33.01 ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS, ASTRONOMICAL INSTITUTE, NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

#### **INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

#### ELMUROTOVA DILNOZA BAHTIYOROVNA

# RADIATION- INDUCED FORMATION OF ZnO NANOPARTICLES AND ELECTROLUMINESCENCE IN ZnSe CRYSTALS

01.04.07 – Condensed matter physics

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

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No.B2017.4.PhD/FM159.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of "Ziyonet" Information and Educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor:	<b>Ibragimova Elvira Memetovna</b> Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher
Official opponents:	Khidirov Irsali Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
	<b>Tashmukhamedova Dilnoza Artikbaevna</b> Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Leading organization:	Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A.Arifov
the Scientific Council No.DSc.27.06.2017.FI	e held on "" 2019, at at the meeting of M/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, Astronomical (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. 6-65; e-mail: info@inp.uz).
	e looked through at the Information Resource Centre of the der No) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124
The abstract of dissertation was distribed (Registry record No dated ""	

M.Yu. Tashmetov

Chairman of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, D.Ph.-M.S., Professor

#### E.M. Tursunov

Scientific Secretary of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, D.Ph.-M.S., Senior Researcher

#### I. Nuritdinov

Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, D.Ph.-M.S., Professor

### INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the research is to reveal mechanisms of formation of ZnO nanoparticles in the nonstoichiometric near-surface layer of ZnSe single crystals upon irradiation and electronic structure for efficient light-emitting nanoheterojunctions.

#### The tasks of the research are:

determining the crystal structure, size, shape and orientation of ZnO nanoparticles, depending on the Zn/Se ratio and dopants Te, O, and Zn<sub>i</sub>;

studying the effect of ionizing radiation energy and medium (vacuum and air) on the formation and destruction of ZnO nanoparticles;

studying the dependence of the microhardness of the near-surface ZnSe layer on the characteristics of ZnO nanoparticles;

investigating the dependence of the photoelectric characteristics on the concentration of dopant and Zn<sub>i</sub> centers, as well as on the ZnO size/shape;

determining the energy and population levels, electronic structure by optical absorption, reflection, transmission before and after irradiation;

studying the influence of the concentration of dopants Te, O, Zn<sub>i</sub> and the ZnO size/shape on the surface conductivity and electroluminescence;

studying the influence of the ZnO size/shape on the formation of ZnSe/ZnO nanoheterostructure or light-emitting ZnSe (Te)/ZnO nanoheterojunction.

The object of the research: ZnO nanoparticles in ZnSe scintillator crystals subjected to Tellurium implantation, heat treatment in zinc vapor and an oxidizing medium, and irradiation under different conditions.

The subject of the research: the radiation-induced growth mechanisms of ZnO nanoparticles on ZnSe and the formation of nanoheterostructures and light-emitting nanoheterojunctions with different geometries, as well as factors influensing the efficiency of electroluminescence.

### The scientific novelty of the research is as follows:

The dependence of the critical size, shape and orientation of ZnO nanocrystals on the corresponding ZnSe crystal-substrate orientation has been found, which is due to the minimization of the lattice stress at the nanoheterojunction interfaces: 27nm(103)ZnO/ZnSe:O,Zn with ZnO nanofilm; 40nm (110) ZnO/(220)ZnSe(0.2% Te):O,Zn with a brush made from ZnO nano-hillox, and 50nm (002)ZnO/(111)ZnSe(0.5%Te):Zn with decorated nano-hillox ZnO;

Low-voltage light-emitting effect has been obtained in nanoheterojunctions of ZnSe/ZnO:O,Zn (below 21 V, max  $I_{El}$ =91), ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (below 12 V, max  $I_{El}$ =70) and ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (below 30 V, max  $I_{El}$ = 112) after  $^{60}$ Co of gamma irradiation with electroluminescence at 600 and 620 nm, regardless the voltage polarity, with the participation of defective  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  or  $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$  complexes with levels in the forbidden zone;

It has been found that after  $\sim 1.25$  MeV gamma irradiation, five resonance levels are formed at  $\Gamma_{6v}$ -5.76 eV,  $L_{I,3v}$ -4.85 eV,  $Zn_i$ -3.39 eV,  $O_{Se}$ -3.17 eV and X=2.72 eV,  $E_g$  decreases by 0.06 eV and the photoconductivity increases to  $10^{-6}$ 

Ohm<sup>-1</sup> in a planar nanoheterojunctions of ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn with 50 nm thickness of ZnO film decorated with ZnO nano- hillox.

**Implementation of the research results.** Based on the obtained results on the study on radiation processes in NHS ZnSe(Te)/ZnO and NHJ ZnSe(Te)/ZnO:O,Zn:

the dependence of the critical size, shape and orientation of ZnO nanocrystals on the corresponding ZnSe orientation of the crystal substrate, due to minimization of lattice strains at the interfaces of 50nm(002)ZnO/(111)ZnSe(0.5%Te):Zn nanoheterojunctions with decorated ZnO nano- hillox as well as the conditions for the growth of nano-ZnO in the near-surface ZnSe layer as a result of <sup>60</sup>Co gamma irradiation were used to determine the transmission spectra of ZnO thin films as part of the applied project No.A4-FA-F156 "Development of technology for creating highly efficient hybrid solar cells based on ZnO nanostructures and organic semiconductors" (2012-2014) (Letter No.2/1255-3372 of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan of 24 December 2018). Using the results allowed to analyze micrographs of thin ZnO films and determine their structure;

the obtained low-voltage light-emitting nanoheterojunctions ZnSe/ZnO:O,Zn (up to 21 V, I<sub>EI</sub>=91) and ZnSe (0.2%Te)/ZnO:O,Zn (up to 12 V, I<sub>EI</sub>=70) after <sup>60</sup>Co gamma irradiation with electroluminescence at 600±10 nm, regardless of the voltage polarity, which involves Zn<sub>i</sub>- defect centers and stable associates V<sub>Zn</sub>Zn<sub>i</sub>O<sub>Se</sub> or V<sub>Zn</sub>Zn<sub>i</sub>Te<sub>Se</sub> in the forbidden zone, used by foreign researchers (reference in the European journal Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2011; Applied Physics, 2011; Materials for Sensors, 2011; Journal of Advances in Condensed Matter Physics, 2018; Journal of Applied Physics, 20 18; Journal of Luminescence, 2018) for explaining photoconductivity, photoluminescence, microstructure and X-ray-diffication patterns of ZnO nanoparticles, and also the effects of gamma irradiation and X-rays on the photo-electro- and x-ray luminescent properties of ZnSe light-emitting-diodes. Using the results made it possible to explain the hexagonal structure of wurtzite, green photoemission related with V<sub>0</sub> in ZnO, the high-temperature conductivity, the dependences of the lux-ampere characteristic of X-ray-stimulated conductivity photoconductivity in pure ZnSe crystals;

formation of resonant levels of  $Zn_i$ -3.39 eV,  $O_{Se}$ -3.17 eV after ~1.25 MeV gamma irradiation, decrease in  $E_g$  by 0.06 eV, and increase in photoconductivity up to  $10^{-6}$  Ohm<sup>-1</sup> in planar nanoheterojunction ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn were used for X-ray analysis of ZnO nanostructures as part of the applied project No.A4-FA-F156 "Development of technology for creating highly efficient hybrid solar cells based on ZnO nanostructures and organic semiconductors" (2012-2014) (Letter No.2/1255-3372 of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan of 24 December 2018). Using the results allowed to determine the photovoltaic and photoluminescent properties of ZnO nanorods.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation was presented on 120 pages consisting of an introduction, five chapters, conclusions and a list of used literature.

# ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ LIST OF PUBLISHED WORKS

## І бўлим (часть I; Part I)

- 1. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Вольт-амперные характеристики и микротвердость кристаллов ZnSe:Te после гамма-облучения // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2004. № 1 (6). С. 33-39 (01.00.00. №5).
- 2. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M. Intensification of Electroluminescence of ZnSe(Te,O) Crystals as a Result of Irradiation with γ-Ray Photons // Semiconductors. St. Petersburg, 2007. № 10 (41). P.1135-1139. (№ 39. Impact Factor Search; IF =0.83).
- 3. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Влияние гамма-облучения на электролюминесцентные свойства кристаллов ZnSe:Zn,Te // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2007.- № 5 (9). С. 345–349 (01.00.00. №5).
- 4. Эльмуротова Д.Б., Каланов М.У., Ибрагимова Э.М., Вахидов Ш.А. Адсорбция кислорода и рост ZnO фазы на поверхности ZnSe:Zn,Te кристаллов при гамма-облучении // Доклады Академии наук РУз. Ташкент, 2008. № 2. С. 28–31 (01.00.00. №7).
- 5. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M. Kalanov M. U., Tursunov N. A. Radiation-Induced Formation of ZnO Nanoparticles on the ZnSe Single-Crystal Surface // Physics of the Solids State. St. Petersburg, 2009. № 3 (51). P.456-464. (№ 39. Impact Factor Search; IF =0.77).
- 6. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M. Optical Absorption and Photoconductivity in γ-Irradiated Zinc Selenide Crystals // Technical Physics Letters. St. Petersburg, 2010.- № 6(36).-P. 517-520.(№ 39. Impact Factor Search; IF =0.73).
- 7. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М., Сандалов В.Н. Перенос заряда в наногетероструктурах ZnSe/ZnO:О и ZnSe(Te)/ZnO // Доклады Академии наук РУз. Ташкент, 2018. № 2. С. 61–64 (01.00.00. №7).

# II бўлим (часть II; Part II)

- 8. Elmurotova D.B., Karimov M., Ibragimova E.M. Volt-Amper characteristics and microhardness of ZnSe:Te crystals after gamma-irradiation // Modern Problems of Nuclear Physics: Abst. 3<sup>th</sup> Int. Conf. Samarkand, August 12-15, 2003. Tashkent, 2003. P. 175.
- 9. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Вольт-амперные характеристики и микротвёрдость ZnSe:Те кристаллов после протонного-облучения // Фундаментальные и прикладные вопросы физики, посвящ. 60-летию ФТИ АН РУз. Рес. конф. 27-28 ноября 2003.-Ташкент, 2003.- С. 415–417.

- Д.Б., Ибрагимова Э.М. 10. Эльмуротова Влияние радиолиза фотоэлектрические свойства кристаллов ZnSe(Te,O) облученных протонами // Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах: Труды IV Меж. науч. конф. 12-19 августа 2004. – Томск, 2004. – С. 106–109.
- 11. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M. Specific light yield at <sup>241</sup>Am X–excitation and photo-resistivity of ZnSe(Te,O) crystals // Applications of Nuclear Techniques: Abst. 8<sup>th</sup> Int. Conf. September 12-18, 2004. Creece, 2004.- P. 9.
- 12. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M. Effect of the reactor gamma-radiation on photosensitivity of ZnSe(Te,O) semiconductors // Nuclear science and its application. Abst. 3<sup>th</sup> Eurasian Conf. October 5-8, 2004. Tashkent, 2004. P. 275.
- 13. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M., Kalanov M.U. Effect of gamma-radiation on photoelectric active centres in ZnSe(Te,O) crystals // Nuclear and Radiation Physics: Abst. of 5<sup>th</sup> Int. Conf. September 26-29, 2005. Almaty, 2005. P. 221-222.
- 14. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Изменение электролюминесцентных свойств кристаллов ZnSe(Te,O) после протонного облучения // Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах: Труды Меж. науч. конф. 28 июля—4 август 2006. Томск, 2006. С. 105—109.
- 15. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M. Intensification of electroluminescence of ZnSe(Te,O) crystals after gamma-irradiation // Modern problems of Nuclear physics, 6<sup>th</sup> Int. Conf. September 19-22, 2006. Tashkent, 2006. P.181.
- 16. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Влияние примеси теллура на фотоэлектрические и электролюминесцентные свойства кристаллов ZnSe // Фундаментальные и прикладные вопросы физики: Мат. 3 Межд. конф. 26-27 октября, 2006. Ташкент, 2006. С. 309—311.
- 17. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M. Electroluminescence of ZnSe(Te,O) crystals after reactor irradiation // Nuclear science and its application: 4<sup>th</sup> Eurasian Conf. 31 October-03 November 2006. Baky, 2006. P. 136.
- 18. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Влияние гамма-облучения на оптическую плотность кристаллов ZnSe // Сб. докл. II Рес. конф. молодых физиков Узбекистана. Ташкент, 2008. С. 150–155.
- 19. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M. Influence of gamma-induced ZnO nanoparticles on photoconductivity of ZnSe(Te) crystals // Modern Problems of Nuclear Physics: 7<sup>th</sup> Int. Conf. September 22-25, 2009. Tashkent, 2009. P. 150-151.
- 20. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Изучение влияния примеси Те на рост нанофазы ZnO по оптическим свойствам кристаллов ZnSe // Физическая электроника UzPEC-5: Рес. конф. 28–30 октября, 2009. Ташкент, 2009. С. 182.
- 21. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Оптическое поглощение кристаллов ZnSe(Te) после протонного облучения // Современная физика и ее

- перспективы: Мат. Рес. конф. 12-13 ноября, 2009. Ташкент, 2009. С. 238–241.
- 22. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Рост концентрации электронов и краевого поглощения кристаллов ZnSe(Te):Zn, гамма-облученных в реакторе // Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах: Мат. II Межд. конф. 12–14 ноября, 2009. Ташкент, 2009. С. 44–46.
- 23. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M., Kalanov M.U., Rustamova V.M. Radiation induced ZnO nanocrystals on the surface of non-stoichiometric ZnSe:Te crystals // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy. 3<sup>th</sup> Int. Conf. June 7-12, 2010. Keiv, 2010. P. 136.
- 24. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M., Kalanov M.U. Electroluminescence of gamma-irradiated of ZnSe crystals with ZnO nanoparticles // Nanoscience Problems and prospects quantum function materials and devices, 9<sup>th</sup> Joint Uzbek-Korea Symposium November 2-5, 2010. Ташкент, 2010. С. 25.
- 25. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Энергетические уровни в кристаллах ZnSe(0.2%Te)-ZnO и ZnSe(0.5%Te)-ZnO // Замонавий физика ва астрономиянинг долзарб муаммолари. II Рес. Илмий конф. матер. 21 май, 2010. Қарши, 2010. С. 12–14.
- 26. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Расчеты концентрации электронов электрооптическими методами после протонного облучения кристаллов ZnSe-ZnO:O,ZnO // Сб. док. III Рес. конф. молодых физиков «Ядерная физика и ядерные технологии», 1-2 декабря 2010. Ташкент, 2010. С. 207—214.
- 27. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Влияние нанокристаллитов ZnO на оптоэлектронные свойства кристаллов ZnSe(Te):O и ZnSe(Te):O,Zn // Физика и физическое образование: достижения и перспективы развития: 3 Межд. науч. конф. 19–25 августа 2011. Бишкек, 2011. С. 31-32.
- 28. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Усиление электролюминесценции гетеропереходов ZnSe(0.2%Te)-ZnO:О после протонного облучения // Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микрои наноструктурах: II Меж. конф. 8-9 сентября 2011. Фергана, 2011. С. 133—136.
- 29. Ibragimova E.M., Kalanov M.U., Mussaeva M.A., Elmurotova D.B., Rustamova V.M. Radiation induced nanostructures in crystals matrices // Recent Advances in the Physics of Low-Dimensional Nanoscale Systems: Int. Workshop 10-11.11.2011. Tashkent, 2011.-P.71-80.
- 30. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Влияние примеси Те и рост нанокристалитов ZnO на электролюминесценцию в наногетеропереходах ZnSe-ZnO:O,Zn // Современные проблемы физики полупроводников СПФП-2011. Мат. Рес. конф., 23–25 ноября 2011. Нукус, 2011. С. 117–119.
- 31. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Формирование наночастиц ZnO и электролюминесценция на поверхности монокристаллов ZnSe(0.5%Te) //

- Нанотехнология ва кайта тикланадиган энергия манбалари: муаммолар ва ечимлар: Рес. илмий-амалий конф. мат. 27-28 апрель, 2012. Қарши, 2012. С. 206–208.
- 32. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M. Structure properties of formation of ZnO nanoparticles on the ZnSe surface // Dubna-nano 2012, Application of nanosystems, Int. Conf. July 9-14, 2012. Dubna, Russia, 2012. P. 12.
- 33. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М., Сандалов В.Н. Перенос заряда в гамма-облученных наногетероструктурах ZnSe/ZnO:O и наногетеропереходах ZnSe/ZnO:O,Zn // Фундаментальные и прикладные вопросы физики, посвященной 100-летию академика С.А. Азимова. Рес. конф., 6-7 ноября 2014. Ташкент, 2014. С. 140—142.
- 34. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М., Сандалов В.Н. Транспорт носителей заряда в наногетероструктурах ZnSe/ZnO:O и наногетеропереходах ZnSe/ZnO:O,Zn // Сб. тез. докл. Респ. научнопрактической конф. молодых ученых, 18декабря 2014. Ташкент, 2014. С. 70.
- 35. Эльмуротова Д. Б., Ибрагимова Э. М. Влияния гамма-облучения на перенос заряда в наногетеропереходах ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O // Современные проблемы физики полупроводников: Мат. Респ. науч. конф., 26-27октября 2018. Ташкент НУУз, 2018. С. 212-214.
- 36. Эльмуротова Д. Б., Ибрагимова Э. М. Перенос заряда в наногетероструктурах ZnSe/ZnO:O и наногетеропереходах ZnSe/ZnO:O,Zn // Фан ва таълимни ривожлантиришда ёшларнинг ўрни. ЎзР ФА 75 йиллик юбилейига бағишланган Респ. Илмий ва амалий конф. 20.12.2018. Ташкент–Навоий, 2018. С. 72–74.

Автореферат "Тил ва адабиёт таълими" журнали тахририятида тахрирдан ўтказилиб, унинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро мувофиклаштирилди (15.02.2019 йил).

Бичими  $60x84^{1}/_{16}$ . Ризограф босма усули. Times гарнитураси. Шартли босма табоғи:3,5. Адади 100. Буюртма № 43.

«Тошкент кимё-технология институти» босмахонасида чоп этилган. Босмахона манзили: 100011, Тошкент ш., Навоий кўчаси, 32-уй.