

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ
КЕНГАШ**

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ЭЛМУРОВА ДИЛНОЗА БАХТИЁРОВА

**РАДИАЦИЙ-ИНДУЦИРОВАННЫЙ ZnO НАНОСТРУКТУРНЫЙ
СЛОЙ В ZnSe КРИСТАЛЛЕ
ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ**

01.04.07 – конденсированное состояние физики

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

Тошкент – 2019

**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..... 26

Elmurotova Dilnoza Baxtiyorovna

Radiation-induced formation of ZnO nanoparticles and
electroluminescence in ZnSe crystals 48

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 52

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ЭЛМУРОВА ДИЛНОЗА БАХТИЁРОВА

**РАДИАЦИЯВИЙ-ИНДУЦИРЛАНГАН ZnO НАНОЗАРРАНИНГ
ШАКЛЛАНИШИ ВА $ZnSe$ КРИСТАЛЛАРИДА
ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ**

01.04.07 – конденсирланган ҳолат физикаси

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

Тошкент – 2019

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 веб-саҳифаси (www.inp.uz) ва «Ziyonet» ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

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:

Ион-плазма ва лазер технологиялари институти

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти, Астрономия институти, Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент шаҳри, Улуғбек қўрғони, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-18; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент шаҳри, Улуғбек қўрғони, ЯФИ. Тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2019 йил « ____ » _____ куни тарқатилди.
(2019 йил “ ____ ” _____ 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 ҳузуридаги илмий семинар раиси
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда ярим ўтказгичли оптоэлектроника соҳасида ярим ўтказгичли наноструктураларда электр энергиясини кўриш диапазонидаги нурланишга айлантириш самарадорлигини оширишнинг физикавий механизмларини ўрганиш энг муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Кенг зонали кичик ўлчамли ярим ўтказгичли *p-n* гетероўтишлар хона ҳароратида электролюминесценцияга эга бўлиши, ихчамлиги, самарадорлиги туфайли люминесцент ва чўгланма чироқлар ўрнини эгаллаб келмоқда. Шу нуқтаи назардан, юқори самарали ёруғлик тарқатувчи кичик вольтли биполяр кенг зонали, хусусан ZnO/ZnSe наногетероўтишларни олиш муаммоси ўта долзарб масала деб ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳонда 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 тўғри зонали ярим ўтказгич эканлиги билан боғлиқ. Уларнинг оптоэлектрон хусусиятлари нанозарраларнинг ўлчамига кучли боғлиқлиги аниқланди. Тўғри зонали кучланмаган наногетероужуфтликларда кичик кучланиш остида, хона ҳароратида ёрқин ва барқарор (куёш нурининг ўрнини боса оладиган) нурни ҳосил қилиш муаммосининг ечими энг самарали нурландиган марказлар рекомбинацияси ва нурланмайдиган каналлар рекомбинациясини ўрганиш билан боғлиқдир.

Мамлакатимизда дунё миқёсидаги турли хил ярим ўтказгичли наногетероструктуралар ва нанотуркумлардан оптик нурни қабул киладиган фотодиод, фототранзистор ва фототиристор, инфра-қизил нурни кўриш диапазонидаги нурга айлантирадиган, оптоэлектрон қурилмалар – гетеролазерларнинг фундаментал асосини ривожлантиришга катта эътибор қаратиляпти. Бу фундаментал тадқиқотлар ва йўналишлар мамлакатимиз ривожланишида катта аҳамиятга эгадир. Уларнинг амалий татбиғи 2017–2021 йиларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида¹ акс эттирилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар 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

¹ 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”даги Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

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

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтда, жаҳоннинг бир қатор таниқли олимлари, жумладан: россиялик (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) ҳиндистонлик (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 соҳасида қўлланиладиган сцинтиляцияон ва юқори нур чиқарадиган кристалларни ўстириш, ҳамда 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 ҳосил бўлиши натижасида уларнинг электрик ва оптик хусусиятларини ортишига олиб келишини кўрсатди, ҳамда юпқа ZnSe плёнкаларида тўғри рухсат этилган зоналараро ўтишларнинг ҳосил 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 иссиқ нейтронлар ва рентген нурларининг сочилиш услубида қаттиқ жисмларнинг наноструктурасини аниқлаш бўйича илмий тадқиқот ишлари амалга оширилиб келинмоқда. Хусусан, SiZnSe ва GaAsZnSe ярим ўтказгич бирикмаларида квант нуқталардан иборат бўлган наноструктуралар аниқланган ва уларнинг электрик ва электролюминесцент хусусиятлари ўрганилган; объектнинг фазовий йўналишини аниқлаш учун ZnO наностерженлар ўстирилган; радиациявий барқарорликни аниқлаш учун стехиометрланмаган ZnSe(Te):O,Zn кристалларининг сцинтиляцияон хусусиятларига гамма ва реактор нурланишларининг таъсири ўрганилган.

Бироқ, наноструктураларнинг ҳолати ва электрон структураси, мумкин бўлган нанофазали қўшимчалар ва фотоэлектроактив марказларнинг шаклланишига ҳар қил турдаги ионлашган нурланишнинг таъсири, стехиометрланмаганлик билан радиолиз орасидаги боғланиш, кислород концентрацияси, самарали электролюминесценциянинг гетерочегарадаги

панжара кучланиши ва чуқур сатҳлар ўрни, энергетик сатҳларнинг йиғиндиси, ёрқин электролюминесценцияли $\text{ZnO}/\text{ZnSe}(\text{Te})\text{:O,Zn}$ наногетероўтишларнинг ҳосил бўлиш имконияти батафсил ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ядро физикаси институтининг Ф-2.1.2 «Кўп бирикмали стехиометрланмаган намуналарнинг терморadiацион таъсирланишда структуравий, электрофизик, магнит ва механик хусусиятлари» (2003–2007); 4-04 «LiF ва ZnSe кристалларининг реактордаги индуцирланган гамма нурланиш таъсирида оптик хусусиятлари ва структурасининг ўзгариши» (2004–2005); 2-06 «Радиацион-индуцирланган нанотизимларнинг шаклланиши» (2006–2007); ФА-Ф2-Ф068 «Нанотизимли материалларнинг радиациявий муҳандисияти» (2007–2011); ОТ-Ф2-26 «Электронлар манбаида функционал нанотизимларнинг шаклланиш механизмлари» (2017–2021) илмий-тадқиқот лойиҳалари 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_i аралашмаларга боғлиқ ҳолда кристал структурасини, ўлчамини, шаклини ва ориентациясини аниқлаш;

ZnO нанозарранинг шаклланиши ва бузилишида ионловчи нурланиш энергияси ва муҳитнинг (вакуум ёки ҳаво) таъсирини ўрганиш;

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

фотоэлектрик хоссаларнинг аралашма ва Zn_i марказларининг концентрациясига, ҳамда ZnO нанозарра ўлчами/шаклига боғлиқлигини ўрганиш;

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

сиртий электрўтказувчанлик ва электролюминесценцияга аралашмалар Te, O, ва Zn_i 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 Te аралашмаси билан имплантацияланган, оксидли муҳитда, цинк буғларида термо-ишлов берилган ва турли хил шароитларда нурлантирилган сцинтиляцион ZnSe кристалларидаги ZnO нанозарра олинган.

Тадқиқотнинг предмети бўлиб ZnSe да ZnO нанозарра ўсишининг радиацион-индуцирланган механизмлари ва турли хил геометрияли наногетеросруктура ва ёруғлик тарқатувчи наногетероўтишларнинг шаклланиши, шунингдек, электролюминесценция ва фотоўтказувчанлик самарадорлигига таъсир қиладиган омиллар ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Элемент таркибининг рентгено-флуоресцент таҳлили, рентген нурлар дифракцияси таҳлили, инфрақизил ва электрон микроскопияси, фотоэлектрик усуллар, микрокаттикликни, электр ўтказувчанликни ўлчаш усуллари, оптик спектроскопияси, электролюминесценция спектроскопияси усуллари.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

силлиқ наноплёнкали 27 нм (013)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 кристал-тагликнинг мос ориентациясига боғлиқлиги аниқланган;

гамма ^{60}Co нурлари таъсири натижасида электролюминесценцияси 600 ± 10 нм ли кучланиш кутбига боғлиқ бўлмаган ва ZnSe нинг таъқиқланган зонадаги нуқсонлар йиғиндиси - Zn_I марказ ва $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_\text{i}\text{O}_{\text{Se}}$ ёки $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_\text{i}\text{Te}_{\text{Se}}$ ассоциат сатҳлари иштирокида ҳосил бўлган кичик волтли ёруғлик тарқатувчи ZnSe/ZnO:O,Zn (21 В, $I_{\text{EI}}=91$), ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn (12 В, $I_{\text{EI}}=70$) ва ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn (30 В, $I_{\text{EI}}=112$) наногетероўтишлар олинган;

~ 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 Γ_{6v} -5.76 эВ, $L_{1,3v}$ -4.85 эВ, Zn_i -3.39 эВ, O_{Se} - 3.17 эВ ва $X=2.72$ эВ ҳосил бўлиши, E_g нинг 0.06 эВ қийматгача камайиши ва фотоўтказувчанликнинг 10^{-6} Ом $^{-1}$ гача ошиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

радиолиз самарадорлиги ошишида ZnSe яқин сирт қатлами ~ 40 мкмда селен-танқис стехиометрланмаганликнинг ўрни ва тугунлараро Zn_i 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 ^{60}Co 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 ^{17}O изотопидан 7 МэВ гамма-нурлари таъсири натижасида ZnSe панжара матрицасининг иккига ажралиши унинг релаксацияланиши ва ZnO нанонинг тартибланиши натижасида парчаланиш аниқланган;

гамма ^{60}Co 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, чўққили туннел ўтказувчанликли $T_{\text{мак}}=356$ ва $T_{\text{мин}}=226$ - $T_{\text{мак}}=364$ К; $\sigma_{\text{мак}}=3 \cdot 10^{-9}$ ва $\sigma_{\text{мин}}=9 \cdot 10^{-13}$ - $\sigma_{\text{мак}}=6.2 \cdot 10^{-7}$ Ом⁻¹см⁻¹; $E_a=0.57$ ва $E_a=0.1$ - $E_a=0.62$ эВ ҳосил бўлиши аниқланган.

ёруғлик диодларини ишлаб чиқаришда катта қизиқиш уйғотадиган *p-n*-ZnSe(0.2-0.5% Te)/ZnO:Zn, O наногетероўтишнинг икки кутбида 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} Ом⁻¹ қийматгача ўсиши аниқланган;

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги бир-бирини тўлдирувчи замонавий аналитик усуллар мажмуасидан фойдаланилганлиги, катта статистикага эгалиги ва такрорланувчи амалий тажрибалар, мантикий 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 аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, аниқ ўзаро ориентацияли стехиометрланмаган ZnSe юзасида устун ёки плёнка шаклида радиацион-индуцирланган ZnO нанокристалнинг ўсиши кучланмаган гетерогенли нуклеация механизмининг янги кўринишини ўзида мужассамлаштиради. Ютилиш спектрида ўлчанган резонанс энергетик сатҳларнинг Γ_{6v} -5.76 эВ, $L_{1,3v}$ -4.85 эВ, Zn_i -3.39 эВ, O_{Se} -3.17 эВ ва X =2.72 эВ тажрибавий қийматлари ўтказувчанлик зонасидаги қайтиш ва ўтказиш спектрларидаги қийматларининг ўсишига таъсир қилади, бу эса электронлар корреляциясини инобатга олган Хаббард параметри билан локал зичлик яқинлашувидаги кенгайтирилган функционал зичлик усули асосида нано-ZnO ютилиш спектрларидаги ҳисоблар 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 олишининг 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. Радиациявий-индуцирланган 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 (013)ZnO/(311)ZnSe:O, Zn наногетероўтиш ZnO наноустунлар билан безатилган интерфейсида панжара кучланишининг минимизациясига

мосланганлиги, шу билан бир қаторда, ^{60}Co гамма-нури таъсири натижасида ZnSe кристаллининг яқин сирт қатламидаги ZnO -нано микдорининг ўсиш шарти А4-ФА-Ф156-сонли « ZnO -наноструктур ва органик ярим ўтказгичлар асосида юқори самарали гибрид қўёш элементлари технологиясини ишлаб чиқариш» (2012–2014) амалий лойиҳасида юпқа ZnO плёнканинг ўтказиш спектрларини аниқлашда қўлланилган (Ўзбекистон Фанлар академиясининг 2018 йилнинг 24 декабридаги 2/1255-3372-сонли хати). Илмий натижаларнинг қўлланилиши юпқа ZnO плёнканинг микротасвирини таҳлил қилиш ва сруктуравий характеристикаларини аниқлаш имконини берган;

ZnSe нинг таъқиқланган зонадаги нуқсонлар йиғиндиси Zn_i марказ ва $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{O}_{\text{Se}}$ ёки $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{Te}_{\text{Se}}$ ассоциат сатҳлари иштирокидаги кичик вольтли ёруғлик тарқатувчи $\text{ZnSe}/\text{ZnO}:\text{O},\text{Zn}$ (21 В, $I_{\text{EL}}=91$) ва $\text{ZnSe}(0.2\%\text{Te})/\text{ZnO}:\text{O},\text{Zn}$ (12 В, $I_{\text{EL}}=70$) наногетероўтишларнинг кучланиш қутбига боғлиқ бўлмаган 600 ± 10 нм ли электролюминесценция натижалари халқаро олимлар томонидан (халқаро илмий журналларда *Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2011; *Прикладная физика*, 2011; *Материали для сенсоров*, 2011; *Journal of Advances in Condensed Matter Physics*, 2018; *Journal of Applied Physics*, 2018; *Journal of Luminescence*, 2018) ZnO нанозарранинг фотоўтказувчанлигини, фотолуминесценциясини, микротасвирини ва рентгенограммасини, ҳамда ZnSe ёруғлик диодларининг электро-фото-рентгено-люминесцент хусусиятларига гамма ва рентген нурланишлар таъсирини тушунтиришда қўлланилган. Илмий натижаларнинг қўлланилиши ZnO нанозарранинг вюрцитли гексагональ структурасини, V_O билан боғлиқ фотолуминесценциянинг яшил эмиссиясини, фотоўтказувчанликни, ҳамда соф ZnSe кристалларининг юқори ҳароратли ўтказувчанлигини, люкс-ампер хусусиятининг рентгено рағбатлантирилган ўтказувчанликнинг боғлиқлигини ва ультра-бинафша фотоўтказувчанликни тушунтириш имконини берган;

гамма ~ 1.25 МэВ нурлари таъсири натижасида планар $\text{ZnSe}(0.5\%\text{Te})/\text{ZnO}:\text{Zn}$ наногетероўтишда Zn_i -3.39 эВ, O_{Se} -3.17 эВ резонанс сатҳларнинг ҳосил бўлиши, E_g нинг 0.06 эВ гача камайиши ва фотоўтказувчанликнинг 10^{-6} Ом $^{-1}$ ошиши А4-ФА-Ф156-сонли « ZnO -наноструктур ва органик ярим ўтказгичлар асосида юқори самарали гибрид қўёш элементлари технологиясини ишлаб чиқариш» (2012–2014) амалий лойиҳада ZnO нанотуркумнинг рентгенограмма таҳлилининг ўтказишда фойдаланилган (Ўзбекистон Фанлар академияси 2018 йилнинг 24 декабридаги 2/1255-3372-сонли хати). Илмий натижаларнинг қўлланилиши ZnO нанотуркумларнинг фотовольтаик ва фотолуминесценция хусусиятларини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот 20 та халқаро ва 9 та республика миқёсидаги конференциялар ва халқаро мактабларда муҳокамадан 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 ҳажми. Диссертация кириш, 5 та боб, хулоса, илова ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация асосий қисмининг ҳажми 120 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

“Радиациявий-индуцирланган ZnO нанозарранинг шаклланиши ва ZnSe кристалларида электролюминесценция” номли диссертациянинг кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ҳамда амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, 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 ҳақида олиб борилган тадқиқотлар ва уларнинг синтези”** деб номланган биринчи боби ZnO нанокристалларини олишнинг ҳар хил усуллари, ZnO/ZnSe гетероструктура ва гетероўтишларнинг асосий хусусиятлари, турли хил ионловчи нурланиш таъсирида, катион ёки анионли панжара аралашмали ZnSe монокристалларининг структуравий, электрик, оптик ва сцинтилляцион хусусиятлари борасидаги жаҳон адабиётлари шарҳига бағишланган.

Диссертациянинг иккинчи боби **«Намуналар ва тажрибавий тадқиқот усуллари»** деб номланиб, унда ZnSe асосида кристалларнинг олиниши, структуравий таҳлил, фотоэлектрик, электрик ва оптик хусусиятларини ўлчаш усуллари келтирилган. Юзани радиациявий индуцирланган оксидланиш ёки тиклаш учун ^{60}Co (~ 1.25 МэВ) манбанинг γ -нурлари ёки реакторнинг ҳаводаги 7 МэВ ли филтрланган иссиқ нейтронлар оқимининг γ -компонентаси $3.3 \cdot 10^{15}$ - $3.3 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$ яъни (10^8 - $5 \cdot 10^8$ Р) аралашмали нурлари, шунингдек, вакуумда 10^{15} см $^{-2}$ оқимли 18 МэВ протонлар билан нурлантиришлар қўлланилди. Кўп каналли анализатор Ge-детекторда рентгено-флуоресцент усули орқали яқин сирт қатламининг ўртача элемент таҳлили (К дан бошлаб) аниқланди. Кристалнинг стехиометрланмаганлик даражасини аниқлаш учун, яъни сирт яқин қатламнинг ~ 40 мкм гача Se/Zn нисбатини аниқлаш учун рентген - квантлари энергияси 22.1 кэВ ли ^{109}Cd изотопидан, 70 мкм гача Те аралашма концентрациясини аниқлаш учун Х-квантлари энергияси 59.6 кэВ ли ^{241}Am изотопидан фойдаланилди. Яқин сирт қатламдаги микро- ва наноструктурларанинг локал таркибий таҳлили 2 мкм масштабда Aztec энергодисперсион системали электрон сканерлайдиган

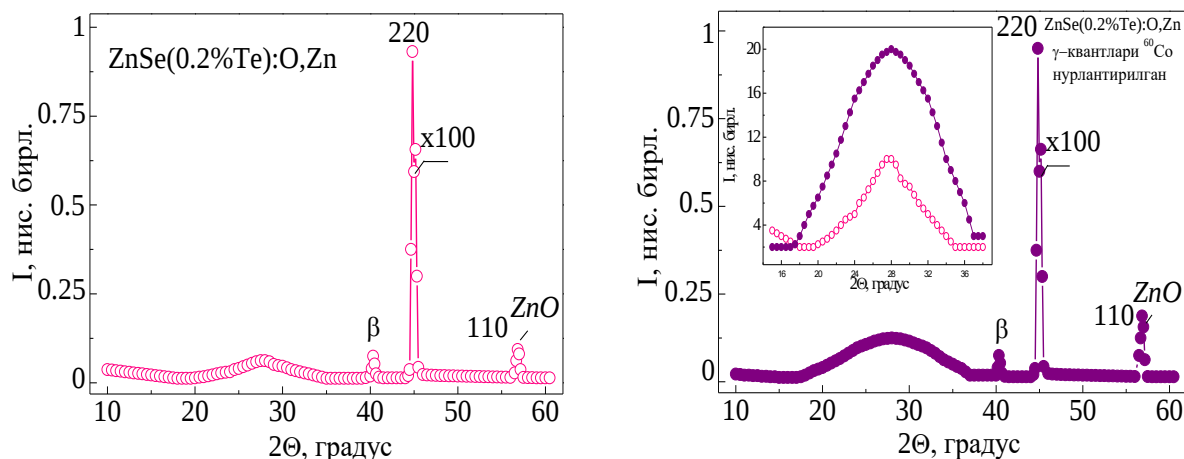
микроскоп EVO MA10 (Zeiss) да (Be дан бошлаб) аниқланди. Намуналарнинг структура ва фазовий таркиби $2\Theta=10\div70^\circ$ бурчак оралиғида ($\lambda_{\text{CuK}\alpha}=0.1542$ нм нурланишда) қўшимча коллимация тарами билан такомиллашган ДРОН-3М курилмасида рентген дифракцион усулида ўлчанди. Спектрлар орқали кристаллар симметрияси, намунанинг яқин сирт қатламидаги кристаллографик текислиги, фазовий таркиби, шу билан бир қаторда нанозарраларнинг ўлчами, структураси ва ориентацияси аниқланди. Нурлантирилган ва нурлантирилмаган юза қатламнинг микроқаттиқлиги $20\div200$ грамм оғирликда ПМТ-3 курилмада аниқланди. Олмосли пирамида билан санчилган яқин сирт қатламининг микротасвирлари модернизацияланган МИК-1 микроскопида (тасвирни қайта ишлашда компьютер дастуридан, 713XTV CARD ва B/W CAMERA фойдаланилган ҳолда) олинди. Фото-вольт ампер характеристикаси 300 К да ва электрўтказувчанлик $90\div390$ К да икки контактли усул ёрдамида ўлчанди. Электролюминесценция ва вольт-ёрқинлик боғланиш спектрлари SPM-2 (Zeiss) спектрал курилмада ФЭК-100 билан тўлқин узунлиги $200\div900$ нм оралиғида қайд қилинди. Оптик ютилиш спектрлари тўлқин узунлиги $190\div1100$ нм оралиғида, 6 нм тирқиш кенглигида, оптик зичлиги 5 гача бўлган СФ-56 (ЛОМО), ўтказиш ва қайтиш спектрлари эса $240\div830$ нм оралиғида, 32 нм тирқиш кенглигида UV3600 (Shimadzu) курилмасида ўлчанди. Катта статистика туфайли (бир хил йўналишли $10\times10\times1$ мм³ ўлчамга эга бўлган 10 та 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 (013) рефлекси аниқланди. 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 γ -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. β_{hkl} – мос келган қайтишнинг ярим кенглиги (рад).

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta_{hkl} \cos \theta_{hkl}} \quad (1)$$

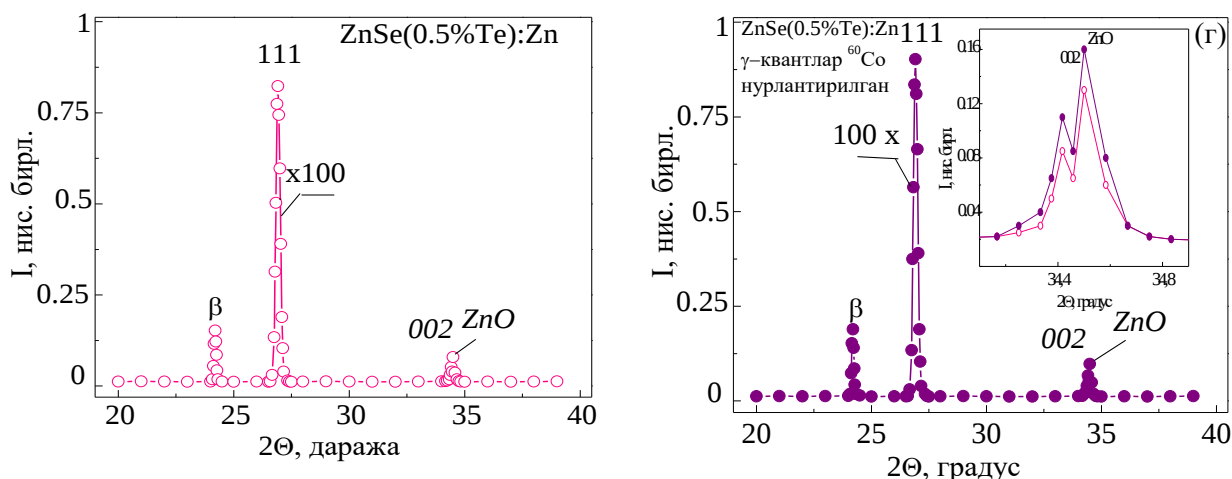
Легирланган ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O намунада ZnSe панжара матрицасининг (220) рефлекси ва ZnO аралашма фазасининг (110) рефлекси

аниқланди. Гамма-нурланиш таъсири натижасида структура сақланди, аралашма фаза миқдори ўзгармади. Zn буғида термо-ишлов бериш юпқа структуранинг ўзгаришига олиб келди: ZnSe структурасида энг нуқсонлиси ҳисобланган [111] кристаллографик ориентацияга яқин 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 таҳлил

Бу ориентацияга $2\theta \approx 27.2^\circ$ бурчак сочилиши тўғри келади, айнан шунинг атрофида селектив бўлмаган рефлекс кузатилди, эҳтимол бу, жуда майда ўзаро таъсирлашмайдиган [111] ориентацияли аралашмали фазанинг муртакларига мослангандир. Бироқ, ўлчамларнинг ўсиши ва улар орасидаги масофанинг камайишида, $d/n=0.1626$ нм ли (110) рефлексга масъул бўлган ZnO аралашма фазанинг кристал қўшимчалари ва чўкмалар бир-бири билан ўзаро таъсирланишни бошлайди. Гамма-нурланиш таъсирида ≈ 40 нм эга бўлган (110)-ZnO нанозаррали ва 0.9 нм-ZnO аморф қўшимчали ZnSe(0.2%Te):O,Zn кристаллининг яқин сирт қатламидаги радиолиз, яъни Se нинг буғланиши ва унинг ўрни атмосферадаги O ва O₃ билан алмашилиши, натижасида аралашма фазанинг миқдори ва ZnO зарра муртакларнинг ўлчами 1.2 нм гача ўсди.



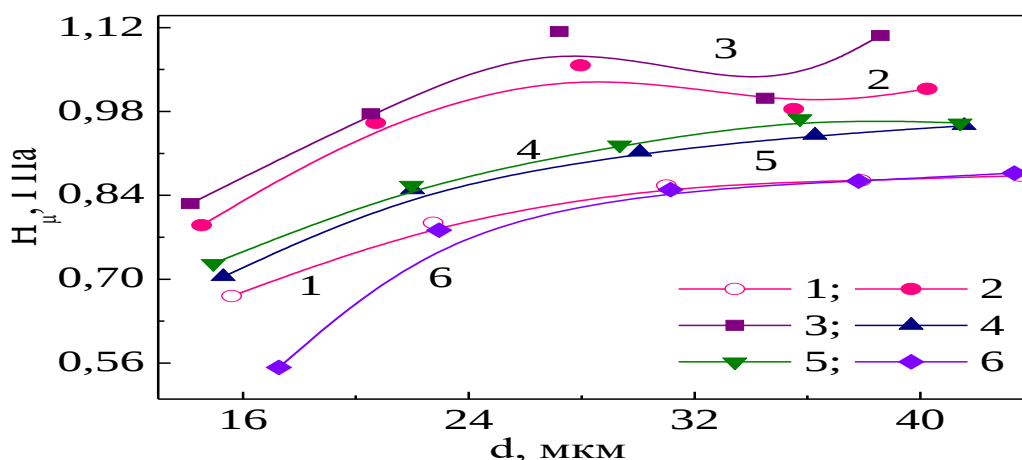
2-расм. ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn рентгенографикли фазавий таҳлил

2-расмда (111) кристаллографик ориентацияли 0.5% Те микдорли ZnSe/ZnO:Zn да, (002) дифракцион чўққига тўғри келувчи ZnO аралашма фаза борлиги, бироқ унда 30° атрофидаги диффуз сочилиш йуқолганлиги кўрсатилган. Бу ҳолат намуналарни оксидли муҳитда термо-ишлаш ёки Те аралашманинг юқори концентрацияси билан легирлашга боғлиқлиги ҳақида далолат беради. ^{60}Co γ -квантлари билан нурлантириш ҳажмий эластик кучланиш даражасини сақлаган ҳолда ZnO фаза микдорини 2 баробарга оширди. ZnO нанокристалларининг (002) чўққи орқали аниқланган ўлчамлари ~52 нм ни ташкил этади. Яқин сирт қатламига киритилган Zn_i марказлари О билан кимёвий боғланишга киришиб, шаклланган аралашмали нанокристал кўшимчаларида янги ZnO қатламини ҳосил қилиши (002) рефлекснинг ўсишида намоён бўлади. Нурланиш Zn-Se боғининг радиолизига олиб келди, натижада Se буғланди ва Zn_i^{2+} ҳаводаги O^- анионлар билан боғланди. Реакторнинг иссиқ колоннасидаги ^{17}O изотопидан 7 МэВ энергияли γ -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.

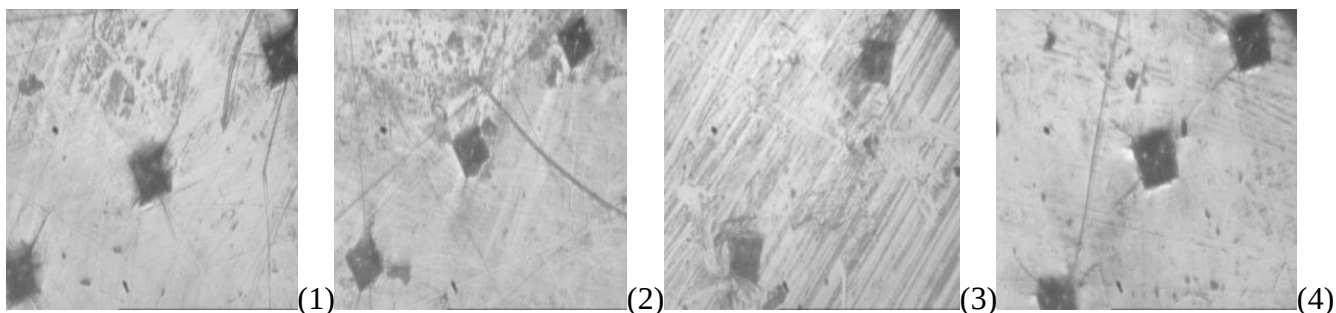
ZnSe/ZnO:O ва ZnSe/ZnO:O,Zn да H_μ микроқаттиқлик қийматлари ва $\alpha=136^\circ$ икки қирра бурчакли олмос-квадрат пирамиданинг l чуқурликкача кириши қуйидаги формула бўйича ҳисобланади:

$$H_\mu = 1.854 \cdot \frac{P}{d^2} \text{ ва } e = \frac{d}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad (2)$$

Хар хил турдаги ионловчи нурланиш таъсиридан олдин ва кейин 50÷200 гр оғирликдаги микроқаттиқлик боғланиши ва микротасвирлар 3 ва 4-расмларда келтирилган.



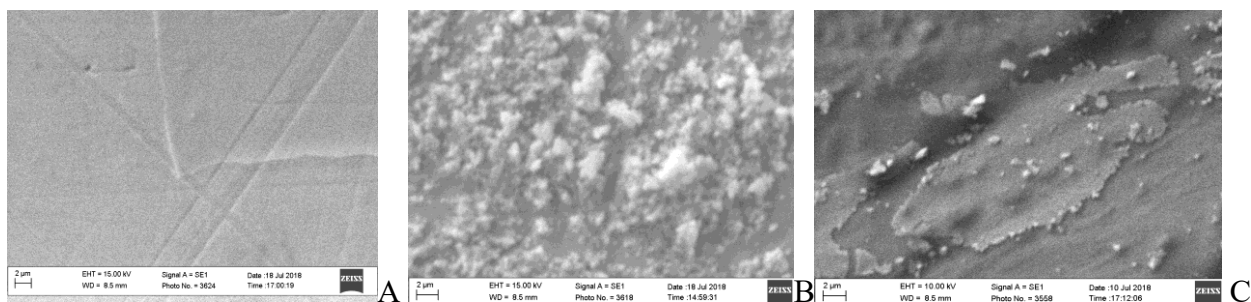
1 – ZnSe/ZnO:O, 2 – ZnSe/ZnO:O,Zn, 3 – ^{60}Co γ -нурланишдан, 4 – олд ва 5 – орқа томони протонли 10^{15} см^{-2} нурланишдан, 6 – реактордаги $6.6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ γ -нурланишдан сўнг
3-расм. С-пирамиданинг кириш чуқурлигига микроқаттиқликнинг боғлиқлиги



(1) – соф ZnSe/ZnO:O,Zn юзаси; (2) – ^{60}Co γ -нурланишидан; (3) – протон нурланишидан; (4) –реакторнинг γ -нурланишидан сўнг. Тасвир масштаби 400×400 мкм.

4-расм. С-пирамида санчилган яқин сирт қатламнинг микротасвирлар

3- ва 4-расмлардаги маълумотларни солиштириш, ^{60}Co γ -нурланиш таъсирида (2) санчилган уколлар ўлчамининг камайишини (H_μ ўсишини), реакторнинг γ -нурлари таъсирида эса (4) санчилган уколлар изи чуқурлашганини (H_μ камайишини), шу билан бир қаторда майда қорамтир чўкмалар ҳосил бўлишини кўрсатди. Шундай қилиб, ZnO нанозарранинг ^{60}Co γ -нурланиш таъсири натижасида ўсиши билвосита исботланди. Тўғридан-тўғри далиллар эса 5-расмда ва 1-жадвалда келтирилган. Намуналарнинг нурлантирилмаган юзаларида фақатгина дислокацион тўр ҳосил бўлиши аниқланди. Zn буғида қайта-ишланган ва гамма-нурлари билан нурлантирилган наногетероўтишнинг фототасвирларини солиштириш: оксидловчи муҳитда қайта терма ишлов берилган (РСТ аниқланган) 27 нм қалинликдаги ZnO нанокристалли намуналарда юпқа плёнканинг шаклланишини (5-расм, А), 0.2% Те билан легирланган 40 нм ZnO нанокристалли ва 1.2 нм ZnO аморф фаза намуналарда кўндаланг ўлчами 200÷400 нм бўлган ZnO наноустунли чўтка ҳосил бўлиши (В) кўрсатилган. Аргонли тикланаётган атмосферасида ўстирилган 0.5% ли Те билан легирланган, қалинлиги 52 нм ZnO нанокристалли намуналарда эса ZnO наноустунлар билан безатилган, ZnSe/ZnO ли текис (>10×10 мкм) интерфейсларга эғалиги кўрсатилган.



5-расм. Гамма ^{60}Co 500 МР билан нурлантирилган ZnSe/ZnO:O,Zn (А), ZnSe/ZnO(0.2% Те):O,Zn (В) ва ZnSe/ZnO(0.5% Те):Zn (С) микротасвирлари

1-жадвалда нурланиш таъсиридан сўнг бу яқин сирт қатламларда О миқдорининг - айниқса адсорбирланган O_3 иштирокида ва ZnO фазанинг аморф 2D-плёнка ва 1D-устунли кристаллар кўринишида, (детектор AZtec) ўсишини (РФТ да) тасдиқловчи элемент таҳлиллар келтирилган.

Намуналарда ^{60}Co 500 МР нурланиш таъсири натижасида радиолиз жараёнида яқин сирт қатламдан чиққан ва қолган элементлар таҳлили ва ZnO нанокристаллар ўлчами

Элемент (оғ.%)	ZnSe	ZnSe:O,Zn		ZnSe(0.2% Te):O,Zn		ZnSe(0.5% Te):Zn	
		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		0.4	
		0		0.2		0.5	

Радиолиз вақтида чиқарилган қатламнинг (Li)Si детектори ёрдамида ўрганилган таркибий таҳлили О микдорини аниқлаш имконини бермади. Жадвалда ^{60}Co гамма квантлари таъсири натижасида ZnSe/ZnO(0.2% Te):O,Zn наногетероўтишларнинг яқин сирт қатламидаги Se микдорининг 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 юқори солиштирма қаршилиққа $\rho \sim (10^{10} - 10^{12})$ Ом·см эгадир. Zn буғларида термо-ишлов бериш ZnSe кристалларида V_{Zn} марказлари билан боғлиқ чуқур сатҳни ҳосил бўлиши натижасида ўтказувчанликни p -турга ўзгариши ва ρ ни $\sim (10^4 - 10^5)$ Ом·см гача камайишига олиб келиши аниқланган, аммо турли хил ионловчи нурланишларнинг таъсири ўрганилмаган.

2-жадвалда реакторнинг 7 МэВ γ -нурланишдан олдин ва кейин коронгуликдаги (ρ_T) ва ёруғликдаги (ρ_C) солиштирма қаршилиқ қийматлари, ва уларга тегишли (+R/-R) поляризация ва ($\sigma_{фў}$) фотоўтказувчанлик қийматлари келтирилган. Фотоўтказувчанлик $\sigma_{фў}$ кўйидаги нисбатда хисобланган:

$$\sigma_{фП} = \frac{(R_T - R_C)}{R_T \cdot R_C} \quad (3)$$

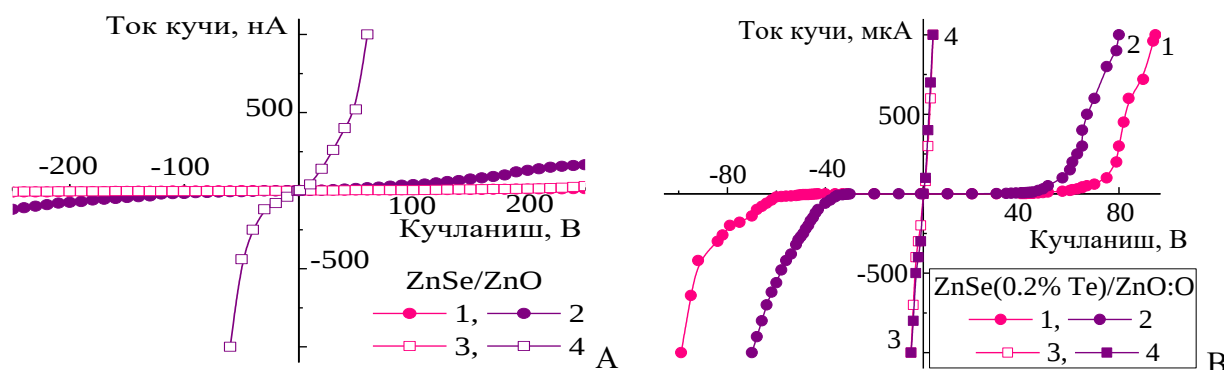
Жадвалдан кўриниб тургандек соф ZnSe/ZnO:O наногетероструктура ρ_T , ρ_C , $\sigma_{фў}$ ва (+R/-R) нинг юқори қийматларига эга бўлиб, уни 0.2% Te аралашмаси билан бойитиш Zn_i ва V_{Se} ҳосил қилади, натижада қутбларга боғлиқ ҳолда ρ_T ва ρ_C бир даража камаяди, бунга мос ҳолда $\sigma_{фў}$ бир даражага ўсади. ZnSe(0.2% Te)/ZnO ва ZnSe(0.5% Te)/ZnO наногетероструктуралар ҳам юқори ρ_T , ρ_C ва кичик $\sigma_{фў}$ қийматларига эгаллиги жадвалда келтирилган.

**Қоронғулик (ρ_T) ва ёруғликдаги (ρ_C) солиштирма қаршилик,
поляризация (+R/-R), фотоўтказувчанлик ($\sigma_{\Phi\check{y}}$) қийматлари, ZnO
нанокристал ўлчамлари ва Zn/Se**

Намуналар		ρ_T , Ом	+R/-R	ρ_C , Ом	+R/-R	$\sigma_{\Phi\Pi}$, Ом ⁻¹
ZnSe/ZnO:O наногетеро- структура 27 нм ва 0.84		+4.8·10 ⁹ -5.5·10 ⁹	0.87	+1.1·10 ⁹ -1.3·10 ⁹	0.81	+0.7·10 ⁻¹⁰ -0.6·10 ⁻¹⁰
Реакторнинг γ- нурлари	3.3·10 ¹⁷ см ⁻²	+1.1·10 ⁹ -4.8·10 ⁹	0.23	+3.7·10 ⁷ -4·10 ⁷	0.92	+0.3·10 ⁻⁸ -0.3·10 ⁻⁸
ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O нано- гетероўтиш 40 нм ва 0.85		+6.9·10 ⁸ -2.7·10 ⁹	0.25	+1.4·10 ⁸ -7.1·10 ⁸	0.2	+0.6·10 ⁻⁹ -0.1·10 ⁻⁹
Реакторнинг γ-нурлари	3.3·10 ¹⁷ см ⁻²	+2.6·10 ³ -5.8·10 ³	0.45	+2.5·10 ³ -5.2·10 ³	0.48	+0.1·10 ⁻⁵ -0.2·10 ⁻⁵
ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn 40 нм (0.9) ва 0.85		+2.2·10 ⁵ -29·10 ⁵	0.07	+2.1·10 ⁵ -26·10 ⁵	0.08	+0.2·10 ⁻⁷ -0.3·10 ⁻⁸
Реакторнинг γ-нурлари	3.3·10 ¹⁷ см ⁻²	+3.2·10 ³ -3.8·10 ³	0.84	+2·10 ³ -3.7·10 ³	0.54	0.2·10 ⁻⁴ 0.1·10 ⁻⁵
ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn 52 нм ва 0.86		+5.6·10 ⁶ -9·10 ⁶	0.62	+1.3·10 ⁶ -8.3·10 ⁶	0.15	+0.6·10 ⁻⁷ -0.8·10 ⁻⁸
Реакторнинг γ-нурлари	3.3·10 ¹⁷ см ⁻²	+5·10 ⁴ -9.9·10 ⁴	0.88	+3·10 ³ -3·10 ³	1	0.2·10 ⁻⁴ 0.2·10 ⁻⁴

Барча намуналарни Zn буғида термо-ишлов бериш, ($O_{se}^0 + V_{Zn}^-$), ($O_{se}^0 Te_{se}^0 V_{Zn}$) ассоциатлари билан Zn_i маркази ва p - n -ўтишнинг ҳосил бўлишига олиб келди, натижада ρ_T ва ρ_C 2÷4 тартибгача камайиши, қутбланиш қиймати тушиши, $\sigma_{\Phi\check{y}}$ 10⁴ мартагача ўсиши кузатилди. Нурланишнинг барча турлари, айниқса реакторнинг γ-нурлари таъсирида натижасида Френкел жуфтларининг ҳосил бўлиши $\sigma_{\Phi\check{y}} \sim 20 \div 10^4$ бараваргача ошишига олиб келди.

6-расмда реакторнинг γ-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 γ-нурлари 3.3·10¹⁷ см⁻² оқимидан олдин ва сўнг Фото-ВАХ қоронғуликда (қора) ва ёруғликда (ёруғ).

ZnSe/ZnO:O наногетероструктура омик Фото-вольт-ампер-характеристикага эга бўлиб, реакторнинг γ -нурланиши таъсири натижасида унда фото яримўтказгичли структура шаклланиши кузатилди. ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O наногетероўтишни 0.2% Te аралашмалари билан бойитиш, $U \approx 70$ В беркитувчи кучланишли яримўтказгичли структуранинг шаклланишига олиб келди. Реакторнинг γ -нурланиши таъсири натижасида намуналарда Френкел жуфтлари билан Zn_i^{2+} ва $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$ комплекслар ҳосил бўлиши, $U \approx 1$ В гача камайишига ва $\sigma_{ф\ddot{y}}$ 10^4 мартагача ошишига олиб келди (6-расм, В).

7-расмда ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn (А) ва ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn (В) наногетероўтишларнинг $90 \div 390$ К ораликдаги сиртий электрўтказувчанлигининг ҳароратга боғлиқлиги $\sigma(T)$ келтирилган. Бу оралик одатда учта ҳароратли интервалга бўлинади, унда экспоненциал ва чўққили боғланиш кузатилади:

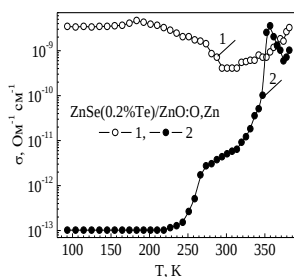
$$E_{\phi} = \frac{k \ln(\rho_1 / \rho_2)}{(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})} \quad \text{ва} \quad E_{\phi} = G \left[\frac{k T_m (T_m - \Delta T)}{\Delta T} \right] \quad (4)$$

Қалинлиги 40 нм ZnO нанокристалли ва 0.9 нм ZnO аморф фазази ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn (А) наногетероўтиш, паст ($90 \div 180$ К) ҳароратларда $\sigma(T) = (3.3 \div 4.2) \cdot 10^{-9}$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ энергия узатишнинг фаоллашув энергияси $E_{\phi} < 0.01$ эВ ли электрон ўтказувчанлик (Ферми сатҳи яқинида тепки ўтказувчанлик), $180 \div 390$ К ораликда эса $T_{\text{мин}} = 302$ К ли $\sigma_{\text{мин}} = 4.1 \cdot 10^{-10}$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ ва $E_{\phi} = 0.17$ эВ ли чўққили пасайишга эга. Бундай ҳолат балким ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn чегарасида ZnO қўшимчаларнинг ҳосил бўлиш ва $V_{Zn}Te_{Se}Zn_i$ нуқсонлар концентрациясининг ўсиши билан боғлиқ бўлиши мумкин. Гамма нурланиш таъсиридан сўнг $90 \div 210$ К ораликда ҳароратга боғлиқ бўлмаган ҳолда $\sigma(T)$ 4 тартибгача камайди, ҳароратнинг 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, $270 \div 370$ К ораликда $\sigma_{\text{мак}} = 3 \cdot 10^{-9}$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ ва $E_{\phi} = 0.57$ эВ ли $T_{\text{мак}} = 356$ К да чўққили ўсиш кузатилди (3-жадвал ва 7-расм). Ионли $\sigma(T) = (9.9 \div 13) \cdot 10^{-10}$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ ўтказувчанлик $370 \div 390$ К ораликда $E_{\phi} = 0.71$ эВ қийматга тенглиги ҳисобланди, эҳтимол бу қиймат, 1.2 нм ўлчамли аморф ZnO нанофазази ZnSe чегаралари буйлаб Zn_i^{+} ҳаракати, О микдорининг 70 мартагача ўсиши ва ZnO наноустунлар чўткасининг ҳосил бўлиши билан боғлиқдир. 52 нм ZnO нанокристалли ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (В) наногетероўтишнинг $\sigma(T)$ қиймати $90 \div 220$ К ораликда ҳароратга боғлиқ эмаслиги, аммо ҳароратнинг 313 К гача ошишида $\sigma(T)$ нинг $1.1 \cdot 10^{-12} \div 1.4 \cdot 10^{-10}$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ билан $E_{\phi} < 0.01$ эВ қийматигача ўсиши, ҳароратнинг 345 К гача кўтарилишида эса $\sigma_{\text{мак}} = 1.3 \cdot 10^{-9}$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ ва $E_{\phi} = 0.85$ эВ ли $T_{\text{мак}} = 335$ К да чўққили туннел электрўтказувчанлик ва $345 \div 390$ К да $E_{\phi} = 0.62$ эВ ли ион ўтказувчанлик ҳосил бўлиши кузатилди. Гамма квантлари билан нурлантириш электрўтказувчанликнинг $90 \div 170$ 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, $\sigma_{\text{мин}} = 9 \cdot 10^{-13}$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ да чўққили пасайишни, $345 \div 390$ К ораликда

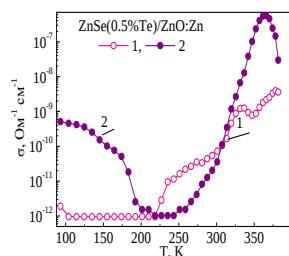
$T_{\text{мак}}=364$ К да, $E_a=0.62$ эВ, $\sigma_{\text{мак}}=6.2 \cdot 10^{-7}$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ қийматга эга бўлган чўққили ўсишни ҳосил бўлишига олиб келди (3 – жадвал).

3-жадвал

ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (A) ва ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (B) наногетероўтишда нурланишдан олдин (1) ва кейин (2) яқин сирт қатламдаги (90÷390 К) электрўтказувчанлик қийматлари



(A) 40 нм и 1.2 амр.фаза



7-Расм. (B) 52 нм

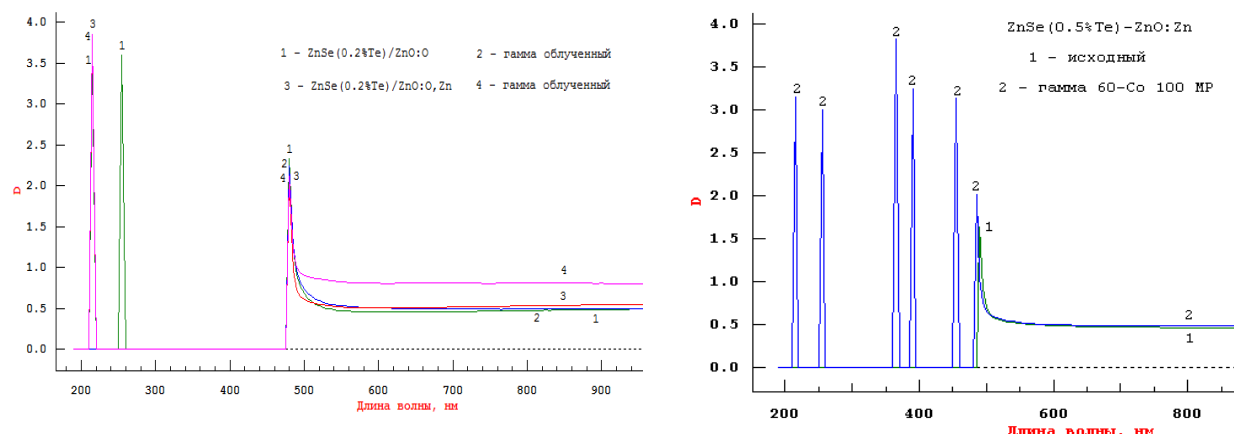
НГЎ	Пара-метрлари	Электрон ўтказувчан	Тепалик ўтказ	Ионли ўтказувчан.
A 40+ 1.2 нм	T (K) σ (Ом $^{-1}$ см $^{-1}$) E_f (эВ)	90÷180 (3.3÷4.2)·10 $^{-9}$ < 0.01	$T_{\text{мин}}=302$ 4.1·10 $^{-10}$ 0.17	-
γ-нур.	T (K) σ (Ом $^{-1}$ см $^{-1}$) E_f (эВ)	210÷270 10 $^{-13}$ ÷2.2·10 $^{-12}$ 0.33	$T_{\text{мак}}=356$ 3·10 $^{-9}$ 0.57	370÷390 (9.9÷13)·10 $^{-10}$ 0.71
B 52 нм	T (K) σ (Ом $^{-1}$ см $^{-1}$) E_f (эВ)	220÷313 1.1·10 $^{-12}$ ÷1.4·10 $^{-10}$ <0.01	$T_{\text{мак}}=335$ 1.3·10 $^{-9}$ 0.85	345÷390 8.6·10 $^{-10}$ 10÷4.2·10 $^{-9}$ 0.62
γ-нур.	T (K) σ (Ом $^{-1}$ см $^{-1}$) E_f (эВ)	90÷170 5.3·10 $^{-10}$ ÷6.6·10 $^{-11}$ 0.05 эВ	$T_{\text{мин}}=226$ 9·10 $^{-13}$ 0.1	$T_{\text{мак}}=364$ $\sigma_{\text{мак}}=6.2 \cdot 10^{-7}$ 0.62

Бу ҳолатлар заряд ташувчиларни ўтказувчанлик зонасида шаклланган резонанс сатҳларга термостимуляциявий уриб чиқарилиши ва $V_{\text{Zn}}\text{TeSeZn}_i$ ассоциатларнинг тақиқланган зонадаги сатҳлари билан боғлиқ ҳолда, О микдорининг ўсиши ва ZnO наноустунлар билан безатилган наноплёнканинг ҳосил бўлиши (5-расм, С) билан боғлиқдир.

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 ва кейин электро-оптик хусусиятлари**» деб номланган. Унда легирланишдан, термо-ишлов беришдан, шунингдек турли хил ионловчи нурланишлар таъсиридан олдин ва кейин ҳосил бўлган резонанс оптик ўтишлар ва Смакула формуласи ёрдамида ҳар бир шаклланган сатҳлардаги фотоқўзғатилган электронлар (N_e) концентрациясининг ҳисобланган қийматлари келтирилган. Т.В. Горковенконинг назарий ҳисоблари тўғри зонали ZnSe монокристалнинг $E_g=2.7$ эВ қийматидан юқори бир қанча Γ_{6v} -5.76 эВ, $L_{1,3v}$ -4.85 эВ ва M_{4v} -5.16 эВ мумкин бўлган резонанс сатҳларни ҳосил бўлишини кўрсатди. Қуйида 8-расм (чап) да, ZnSe(Te)/ZnO:O наногетероўтиш (1)-спектри Γ_{6v} -5.76 (215 нм) эВ ва $L_{1,3v}$ -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 сатҳлар ва

E_g даги (фотоўтказувчанликдаги электронлар концентрацияси) ҳисобланган қийматлар йиғиндиси 4-жадвалда кўрсатилгандек $N_e=4.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ни беради.

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



ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (чапда) ва ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (ўнгда) наногетероўтишларни γ -квантлар ^{60}Co билан нурлантиришдан олдин (1,3) ва кейин (2,4).

8-расм. Оптик зичлик спектрлари

4-жадвал

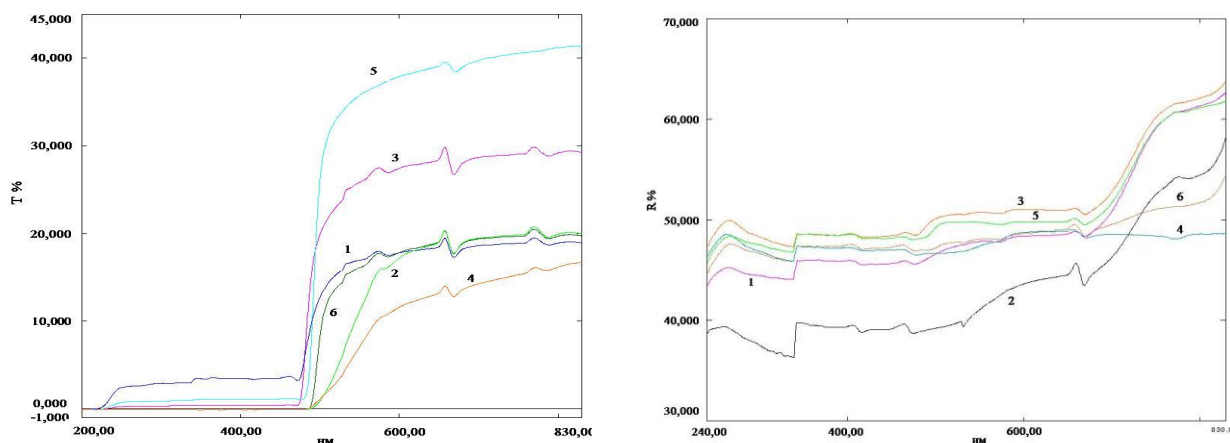
ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O (A), ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O,Zn (B) ва ZnSe(0.5% Te)-ZnO:Zn (C) наногетероўтишларда резонанс сатҳлар энергияси (эВ) ва N_e ҳисоблари

НГҲ ва НК ZnO	Γ_{6v} эВ $N_{\Gamma_{6v}}$ см^{-3}	$L_{1,3v}$ эВ $N_{L_{1,3v}}$ см^{-3}	Zn_i эВ N_{Zn_i} см^{-3}	O_{Se} эВ $N_{O_{Se}}$ см^{-3}	X эВ N_x см^{-3}	E_g эВ N_{E_g} см^{-3}	N_e см^{-3}
A-40 нм	5.76 $2.2 \cdot 10^{16}$	4.85 $1.6 \cdot 10^{16}$				2.58 $0.5 \cdot 10^{16}$	$4.4 \cdot 10^{16}$
$^{60}\text{Co } \gamma$ 40 нм		-				2.58 $0.5 \cdot 10^{16}$	$0.5 \cdot 10^{16}$
B-40 и 0.9 нм	5.76 $2.4 \cdot 10^{16}$					2.58 $0.3 \cdot 10^{16}$	$2.8 \cdot 10^{16}$
$^{60}\text{Co } \gamma$ 40 и 1.2 нм	5.76 $2.4 \cdot 10^{16}$					2.58 $0.5 \cdot 10^{16}$	$2.9 \cdot 10^{16}$
C-52 нм						2.52 $0.3 \cdot 10^{16}$	$0.3 \cdot 10^{16}$
$^{60}\text{Co } \gamma$ 52 нм	5.76 $2 \cdot 10^{16}$	4.85 $1.4 \cdot 10^{16}$	3.39 $0.9 \cdot 10^{16}$	3.17 $0.8 \cdot 10^{16}$	2.72 $0.4 \cdot 10^{16}$	2.55 $0.3 \cdot 10^{16}$	$5.8 \cdot 10^{16}$

Гамма квантлари билан нурлантириш резонанс сатҳларнинг бузилишига (2-спектр) олиб келди, натижада N_e нинг қиймати бир тартибга $4.6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ камайди. ZnSe(Te)/ZnO:O,Zn наногетероўтишни (3-спектр) Zn буғларида термо-ишлов бериш фақатгина $L_{1,3v}$ резонанс сатҳнинг бузилишига олиб

келди, натижада бу ҳолат ҳам N_e нинг $2.78 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ гача камайишига олиб келди. Нурлантириш (4-спектр) N_e бир оз $2.9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ 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) ҳосил бўлишига мос келади (5-расм (B)). ZnSe(0.5% Te)-ZnO:Zn наногетероўтишни 0.5% Te билан бойитиш, Zn буғида термо-ишлов бериш E_g ни 0.06 эВ гача ва N_e ни $0.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ гача камайишига олиб келди, балким бу ZnO нанозарра ўлчамининг 52 нм гача ўсиши билан боғлиқдир (8-расм, ўнг). Нурланиш (2-спектр) эҳтимол планарли интерфейсида, бешта резонанс сатҳларни шаклланишига, E_g ни 0.03 эВ га ва $N_e = 5.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ни 17.6 марта ошишига олиб келди (5-расм, C).

9-расмда 40 нм ўлчамли ZnO нанокристалли ZnSe(0.2% Te)/ZnO:O наногетероўтиш >3% дан юқори қолдиқли ва ўтказувчанлик зонаси чегарасидан <20% дан паст ўтиш спектрига, қайтиш спектрининг 240–670 нм оралиқда <20% дан юқори ва 750 нм дан 60% гача ўсувчи қайтиш спектрига эгаллиги тасвирланган. Нурланиш таъсирида кесими 200–400 нм асосли алоҳида 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, E_g да ўтказишни ва қайтишни оширди. Нурланиш таъсирида эса зич наноустунли чўтка ўсди (5-расм, B), натижада ўтказиш 2 каррага ва қайтиш (>670 нм) гача камайди, шу билан бир қаторда E_g да ютилиш ортди.

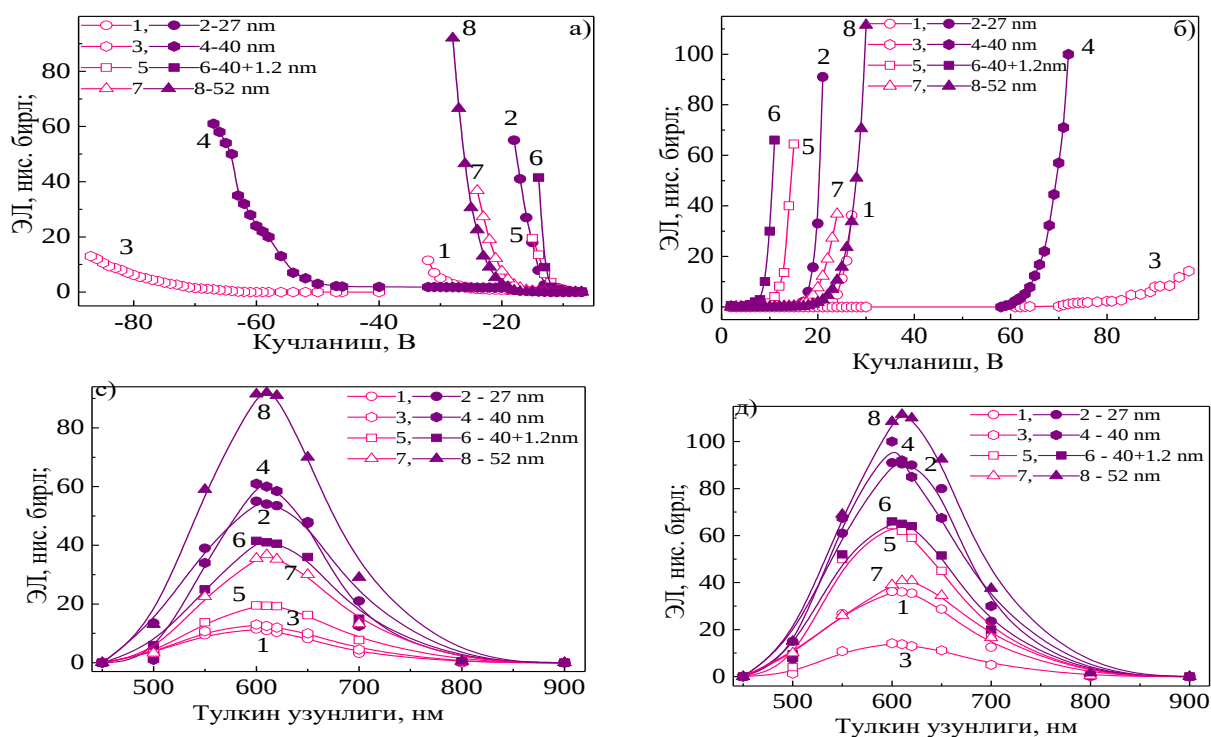


ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O соф (1); нурлантирилган (2); ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn соф (3); нурлантирилган (4); ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn соф (5); нурлантирилган (6).

9 – расм. 60-Со 500 МР нурланишдан олдин ва кейин наногетероўтишларнинг ўтиш ва қайтариш спектрлари

Ag ли муҳитда ўстирилган 52 нм ўлчамли ZnO нанокристалли ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn наногетероўтиш энг юқори ўтказиш ва қайтишга эгаллиги 9-расмда келтирилган. Нурланиш таъсирида ZnO наноустунлар билан безатилган наноплёнкани ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn наногетероўтишнинг яқин сирт қатламида шаклланиши (5-расм, C), ўтказиш ва қайтишни камайтирди.

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



10-расм. ^{60}Co гамма-нурланишдан олдин (1) ва кейин (2) $\text{ZnSeZnO}:\text{O}, \text{Zn}$, $\text{ZnSe}(0.2\% \text{ Te})/\text{ZnO}:\text{O}$, $\text{ZnSe}(0.2\% \text{ Te})/\text{ZnO}:\text{O}, \text{Zn}$, $\text{ZnSe}(0.5\% \text{ Te})/\text{ZnO}:\text{Zn}$ наногетероўтишларнинг (а, б) вольт-ёруғлик боғланиши ва (с, д) электролюминесценция спектрлари (а) тескари ва (б) тўғри кучланиш қутбларида

Юқори кучланишларда гистерезис пайдо бўлиши потенциал тўсиқларнинг асимметрик эканлигидан далолат беради. Бу 5. С-расмда келтирилган ZnO наноустунлар билан безатилган пленкали наногетероўтишларнинг геометрияси билан мос тушади. Электролюминесценция интенсивлигидан олинган чизиқли бўлмаган вольт-ёруғлик боғланиш қўйидаги кўринишга эга:

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

Кучланиш кутбининг тўлиқ циклидаги электролюминесценция спектрлари (с ва д) да $\lambda_{\text{мак}}=600\pm 10$ нм атрофидаги кенг полосадан иборатдир. Электролюминесценция интенсивлиги сарфланган кучланиш катталигига боғлиқ бўлиб, тўсиқли тешилиш олди механизми орқали тушунтирилади. Катталиклар фарқидан ва кучланишининг қўзғатиш 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 $U=-32$ В да $I_{\text{ЭЛ}}=11.5$ ни, $U=27$ В да эса $I_{\text{ЭЛ}}=36.3$ ни берди, гамма ^{60}Co нурланиш таъсиридан сўнг $U=-18$ В да $I_{\text{ЭЛ}}=60$ гача ва $U=21$ В да $I_{\text{ЭЛ}}=91$ гача ошди, бу ҳолат ZnO фаза рефлексининг ўсиши ва ZnO юпқа пленканинг шаклланиши билан боғлиқдир; ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O да $U=-87$ В остида $I_{\text{ЭЛ}}=13$ га ва $U=97$ В да $I_{\text{ЭЛ}}=14$ гача кўтарилди, нурланиш таъсири натижасида ZnSe нинг яқин сирт қатламида ZnO наноустунли пленканинг шаклланиши эса электролюминесценция интенсивлигининг $I_{\text{ЭЛ}}=61$ 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 $U=\pm 15$ В остида $I_{\text{ЭЛ}}=19.5$ гача ва 64.5 гача ўсди, нурланишдан сўнг яқин сирт қатламидаги ZnO наноустунли чўтканинг шаклланиши ва кислород миқдорининг ошиши электролюминесценция интенсивлигининг $U=-14$ В да $I_{\text{ЭЛ}}=42$ гача ва $U=11$ В да $I_{\text{ЭЛ}}=66$ гача кўтарилишига олиб келди; ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn да $U=-28$ В остида $I_{\text{ЭЛ}}=40$ гача ва $U=24$ В да $I_{\text{ЭЛ}}=36.8$ гача кўтарилди, нурланишдан сўнг ZnSe нинг яқин сирт қатламидаги ZnO нанокристал рефлексининг интенсивлигининг ошиши ва ZnO наноустунлар билан безатилган наноплёнканинг шаклланиши натижасида электролюминесценция интенсивлиги $U=-28$ В да $I_{\text{ЭЛ}}=92$ гача ва $U=30$ В да $I_{\text{ЭЛ}}=112$ гача ўсди. Юқоридаги олинган натижалардан кўриниб тургандек, гамма нурланишдан сўнг энг юқори 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. ^{60}Co гамма-нурланиш спектрга сезиларли таъсир қилмади, аммо γ -нурининг иккиламчи электронларининг зарбавий қўзғатилиши ва $V_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{O}_{\text{Se}}$ ёки $V_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{Te}_{\text{Se}}$ комплекслари билан Zn_i концентрациясининг ошиши натижасида қутбларга боғлиқ ҳолда $I_{\text{ЭЛ}}$ электролюминесценция интенсивлигини 2-8 каррагача ўсиши кузатилди. Иловада қўлланилган ўлчов усуллариининг схемаси ва тафсифлари келтирилган.

ХУЛОСА

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

1. Биринчи марта рентгено-структуравий таҳлил ва сканерлайдиган электрон микроскоп қурилмаларида ZnSe нинг яқин сирт қатламидаги (0.85-0.86) стехиометрияланмаганлик ва ҳосил бўлган ZnO нанокристаллитларининг критик ўлчамлар орасида тўғридан тўғри корреляцияси куйидаги ориентацияларда ўрнатилди (термо-ишлов ва гамма-нурланиш таъсирида): плёнка (013)ZnO~27 нм (311)ZnSe/ZnO:Zn ёнида, наноустунли (110)ZnO~40 нм (220)ZnSe(0.2% Te)/ZnO:Zn ёнида, наноустунлар билан безатилган плёнкали (002)ZnO~52 нм (111)ZnSe(0.5% Te)/ZnO:Zn ёнида. Бундай ўзаро ориентация, шакл ва ўлчамларда ZnSe/ZnO интерфейсларидаги кучланишнинг минималлиги кучланмаган гетероген нуклеация механизми орқали тушунтирилади ва наногетероўтишларнинг барқарорлигини таъминлайди. Вакуумдаги 18 МэВ протонлар ZnO нинг бузилишига, ^{17}O изотопининг ~7 МэВ ли гамма-нури эса яқин сиртдаги ZnO қатламнинг парчаланишига ва ZnSe панжара матричасининг иккига ажралишига олиб келади.
2. Юқори қаршиликли n -тур омик вольт-ампер-характеристикали ZnSe/ZnO:O намуналарни Te билан бойитиш ва оксидловчи муҳитда термо-ишлов бериш натижасида уларда p - n -наногетероўтишлар шаклланиши ва қаршиликлар сезиларли даражада (10^4 мартагача) камайиши кўрсатилган. Гамма (1-7 МэВ) ва протон 18 МэВ 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:O наногетероўтишда фото-вольт-ампер-характеристикасидаги беркитувчи кучланиш 10 В гача камайиши натижасида фотоўтказувчанлик 4 тартибга ошади.
3. ^{60}Co 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 чиқарилиши билан боғлиқ бўлган, планарли интерфейслар орқали ҳосил бўлган: $T_{\text{мак}}=356$ ва $T_{\text{мин}}=226$ - $T_{\text{мак}}=364$ К да $\sigma_{\text{мак}}=3\cdot 10^{-9}$ ва $\sigma_{\text{мин}}=9\cdot 10^{-13}$, $\sigma_{\text{мак}}=6.2\cdot 10^{-7}$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ ва $E_{\phi}=0.57$ ва $E_{\phi}=0.1$ -0.62 эВ чўққили 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 Γ_{6v} -5.76 эВ, $L_{1,3v}$ -4.85 эВ, Zn_i -3.39 эВ O_{Se} -3.17 эВ ва X -2.72 эВ резонанс сатҳларнинг аниқланиши умумий фотоэлектронлар концентрациясининг $N_e=5.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ гача, яъни 17 мартагача ошишига олиб келди.

5. ^{60}Co гамма нурланиш $\text{ZnSe}(0.2\%\text{Te})/\text{ZnO}:\text{O}$ наногетероўтишларда ZnO наноустунларни ҳосил қилиш билан бирга, нурланувчи марказ Zn_i ва $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$ ассоциатлар билан боғлиқ бўлган кенг полосали $\lambda_{\text{мак}}=600 \text{ нм}$ нурланишли электролюминесценция ёрқинлигини 8-каппа ошишига, ZnO наноустунлар билан безатилган плёнкали $\text{ZnSe}(0.5\% \text{ Te})/\text{ZnO}:\text{Zn}$ наногетероўтишларда эса 4 карра ошишига олиб келди. Электролюминесценция полосасининг максимум ҳолати электр майдон кучланишига эмас, тўсиқли тешилиш олди механизмига боғлиқдир. Тўсиқ 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 $\text{ZnSe}(\text{Te})/\text{ZnO}:\text{Zn}$ наногетероўтишларининг интерфейсида ўзаро ориентацияли ва тартибланган муайян (устун ёки плёнка) шаклли радиациявий-индуцирланган ZnO нанокристалларининг миқдорий ўсиши аниқланган. Бу ҳолат ишчи кучланишнинг 10 В гача камайишида тўсиқли тешилиш олди туридаги электролюминесценция интенсивлигининг ўсишини таъминлайди ва кенг зонали ёруғлик диодларини ишлаб чиқаришда амалий қизиқиш 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

ЭЛМУРОВА ДИЛНОЗА БАХТИЕРОВНА

**РАДИАЦИОННО-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:	Хидиров Ирсали 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

Защита диссертации состоится «___» _____ 2019 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики, Астрономическом институте, Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел.: (+99871) 289–31–18; факс: (+99871) 289–36–65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер ___), с диссертацией можно ознакомиться в ИРЦ (Адрес: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, НУУз. 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 время в мире исследование физических механизмов повышения эффективности преобразования электроэнергии в излучение видимого диапазона в полупроводниковых наноструктурах является одной из наиболее важных задач в области полупроводниковой оптоэлектроники. 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.

Полупроводниковые гетеропереходы 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 являются прямозонными полупроводниками. 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.

В республике большое внимание уделяется разработке фундаментальных основ изготовления различных типов полупроводниковых наногетероструктур и нанородов для создания приёмников оптического излучения – фотодиодов, фототранзисторов и фототиристор, преобразователей инфракрасной - излучении в видимое, оптоэлектронных приборов – гетеролазеров на мировом уровне. Направления этих 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 годы¹.

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 Узбекистан на 2017–2021 годы», Постановлении Президента Республики

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017 г.

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 получению сцинтилляционных кристаллов ZnSe с высоким световыходом для рентгеновской томографии, фотодиодов Шоттки для дозиметрии УФ-излучений и лазерной генерации, широкозонных гетеропереходов для фотовольтаических устройств проводились многими учеными мира, например, российскими (Ж.И. Алферов, С.В. Иванов), американскими (J. 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, Э.М. Ибрагимова, С. Курбонов, С.З. Зайнобиддинов) и другими 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 ($O_{se}V_{Zn}Me_{Zn}^{III}Zn_i$); обнаружены прямые разрешенные межзонные переходы в тонких пленках ZnSe; получены гетеро-наноспираль ZnO/ZnSe, гетероструктуры II типа n -ZnO/ p -ZnSe для применения в качестве фотодетекторов и светодиодов, наностержни гетероструктур ядро/оболочка ZnO/ZnTe для сенсibilизации 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 частности, в полупроводниковых соединениях SiZnSe и GaAsZnSe были найдены наноструктуры, состоящие из квантовых точек, изучены их электрические и электролюминесцентные свойства; выращены наностержни ZnO для определения пространственной ориентации объектов; изучено воздействие гамма- и реакторного излучений на сцинтилляторные характеристики нестехиометрических кристаллов ZnSe(Te,O,Zn) для определения их 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 $\text{ZnO}/\text{ZnSe}(\text{Te})\text{:O,Zn}$ 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 терморadiационных воздействиях» (2003–2007), ФА-Ф2-Ф068 «Радиационная инженерия наноструктурных материалов» (2007–2011), ОТ-Ф2-26 «Механизмы формирования функциональных наноструктур в пучке электронов» (2017–2021), грантов Фонда поддержки фундаментальных исследований Академии наук Республики Узбекистан 4-04 «Индукцированные гамма-излучением реактора изменения структуры и оптических свойств кристаллов LiF , ZnSe » (2004–2005) и 2-06 «Радиационно-индуцированное 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_i и размеров/формы НЧ ZnO на поверхностную электропроводность и электролюминесценцию;

изучить влияние размера/формы наночастиц ZnO на образование наногетероструктур ZnSe/ZnO или светоизлучающих наногетеропереходов $\text{ZnSe}(\text{Te})/\text{ZnO}$.

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 (013)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 В, $I_{\text{El}}=91$), ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (до 12 В, $I_{\text{El}}=70$) и ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (до 30 В, $I_{\text{El}}=112$) после ^{60}Co гамма-облучения с электролюминесценцией в 600 ± 10 нм независимо от полярности напряжения при участии дефектных Zn_i центров и стабильных ассоциатов $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{O}_{\text{Se}}$ или $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{Te}_{\text{Se}}$ в запрещенной зоне ZnSe;

обнаружено, что после ~ 1.25 МэВ гамма-облучения образуется электронная структура из пяти резонансных уровней $\Gamma_{6v} - 5.76$ эВ, $L_{1,3v} - 4.85$ эВ, $\text{Zn}_i - 3.39$ эВ, $\text{O}_{\text{Se}} - 3.17$ 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 ~ 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;

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

показано, что ^{60}Co гамма-облучение привело к появлению пиковой туннельной проводимости при $T_{\text{мак}}=356$ и $T_{\text{мин}}=226$, $T_{\text{мак}}=364$ К; $\sigma_{\text{мак}}=3\cdot 10^{-9}$ и $\sigma_{\text{мин}}=9\cdot 10^{-13}$, $\sigma_{\text{мак}}=6.2\cdot 10^{-7}$ Ом $^{-1}\text{см}^{-1}$ 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 В 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 аналитических методов, большой статистикой и хорошей 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 $\Gamma_{6v} - 5.76$ эВ, $L_{1,3v} - 4.85$ эВ, $Zn_i - 3.39$ эВ, $O_{Se} - 3.17$ 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 nano-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 кристалла-подложки, 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 nano-ZnO в приповерхностном слое ZnSe в результате ⁶⁰Co гамма-облучения

использованы для определения спектров пропускания тонких пленок ZnO в рамках прикладного проекта А4-ФА-Ф156 «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 проанализировать микрофотографии тонких пленок ZnO и определить их структурные характеристики;

полученные низковольтные светоизлучающие наногетеропереходы ZnSe/ZnO:O,Zn (до 21 В, $I_{\text{EL}}=91$), ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O (до 72 В, $I_{\text{EL}}=100$) и ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (до 12 В, $I_{\text{EL}}=70$) после ^{60}Co гамма-облучения с электролюминесценцией в 600 ± 10 нм независимо от полярности напряжения при участии дефектных Zn_i центров и стабильных ассоциатов $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{O}_{\text{Se}}$ или $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{Te}_{\text{Se}}$ 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 сенсори́в, 2011; Journal of Advances in Condensed Matter Physics, 2018; Journal of Applied Physics, 2018; Journal of Luminescence, 2018) для объяснения фотопроводимости, фотолюминесценции, микрофотография и рентгенограмма наночастиц ZnO; а также влияния гамма-облучения и рентгеновского излучения на электро-, фото- и рентгенолюминесцентные свойства светодиодов ZnSe. Использование результатов позволило объяснить гексагональную структуру вюрцита, зеленой эмиссии фотолюминесценции связанной V_{O} , фотопроводимость наночастиц ZnO, а также высокотемпературную проводимость, зависимости люкс - амперной характеристики рентгеностимулированной проводимости и УФ-фотопроводимости в чистых кристаллах ZnSe;

образование после ~ 1.25 МэВ гамма - облучения резонансных уровней $\text{Zn}_i - 3.39$ эВ, $\text{O}_{\text{Se}} - 3.17$ 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 нанородов ZnO в рамках прикладного проекта А4-ФА-Ф156 «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 наноструктур ZnO.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований были обсуждены на 20 международных и 8 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

Во введении обоснованы актуальность и 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.

В первой главе **«Обзор работ по синтезу и исследованию нанокристаллитов ZnO, гетероструктур и гетеропереходов ядро/оболочка ZnO/ZnSe, монокристалла ZnSe и их структурные фотоэлектрические и оптические свойства»** рассмотрены разные способы получения нанокристаллов ZnO, монокристаллов ZnSe, гетероструктур и 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 (~1.25 МэВ) или реактора (до 7 МэВ), смешанное облучение фильтрованными флюенсами тепловых нейтронов и гамма-компоненты $3.3 \cdot 10^{15} - 3.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ($10^8 - 5 \cdot 10^8 \text{ Р}$) в воздухе, а также флюенсом 18 МэВ протонов 10^{15} см^{-2} в вакууме.

Рентгено-флуоресцентным методом на многоканальном анализаторе с Ge-детектором определен средний по приповерхностному слою элементный состав (начиная от К). Для определения степени нестехиометрии кристалла, т.е. отношения Se/Zn в приповерхностном слое ~40 мкм, использовался изотоп ^{109}Cd с энергией X-квантов 22.1 кэВ, а для нахождения концентрации примеси Те в слое 70 мкм – изотоп ^{241}Am с энергией X-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 $\lambda_{\text{CuK}\alpha}=0,1542$ нм) в интервале углов $2\Theta=10\div70^\circ$, усовершенствованной дополнительной 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 $20\div200$ граммов. Микрофотографии поверхности с уколами алмазной пирамидки получены на модернизированном микроскопе МИК-1 с использованием 713XTV CARD и B/W CAMERA и компьютерной программы для обработки изображения. Двухконтактный метод использовали для измерений фото-ВАХ при 300 К и электропроводности от $90\div390$ К. 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 $10\times10\times1$ мм³ 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 (013) от низкосимметричной примесной фазы ZnO. Термообработка 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 ⁶⁰Co привело к уменьшению ширины рефлекса (311), что свидетельствует о частичном снятии напряжений матричной решетки, и увеличению интенсивности рефлекса (013) из-за роста содержания примесной фазы ZnO. Латеральные размеры включений кристаллической фазы ZnO, определенные по формуле Селякова–Шеррера,

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta_{hkl} \cos \theta_{hkl}} \quad (1)$$

где β_{hkl} – полуширина соответствующего отражения, в рад.

Легированные ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O 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.

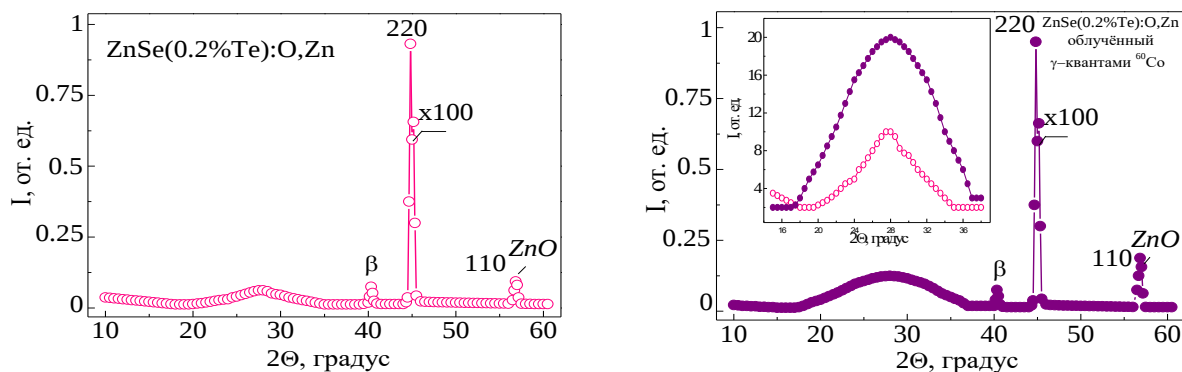


Рис. 1. Рентгенографический фазовый анализ ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn до и после гамма-облучения ^{60}Co

Этому направлению соответствует угол рассеяния $2\theta \approx 27.2^\circ$, именно около него наблюдается неселективный рефлекс, видимо, обусловленный очень мелкими не взаимодействующими между собой зародышами примесной фазы по направлению [111]. Однако при увеличении их размеров и уменьшении расстояния между ними преципитаты начинают взаимодействовать между собой и с имеющимися включениями кристаллической примесной фазы ZnO, ответственной за рефлекс (110) с $d/n=0.1626$ нм, в результате размеры включений растут. В ZnSe(0.2%Te):O,Zn, НЧ ZnO-(110) имели размер ≈ 40 нм, аморфные включения ZnO до облучения составляли 0.9 нм, а после гамма-облучения 1.2 нм за счет радиолитического разрушения поверхности кристалла с испарением Se и его замещением O и O_3 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.

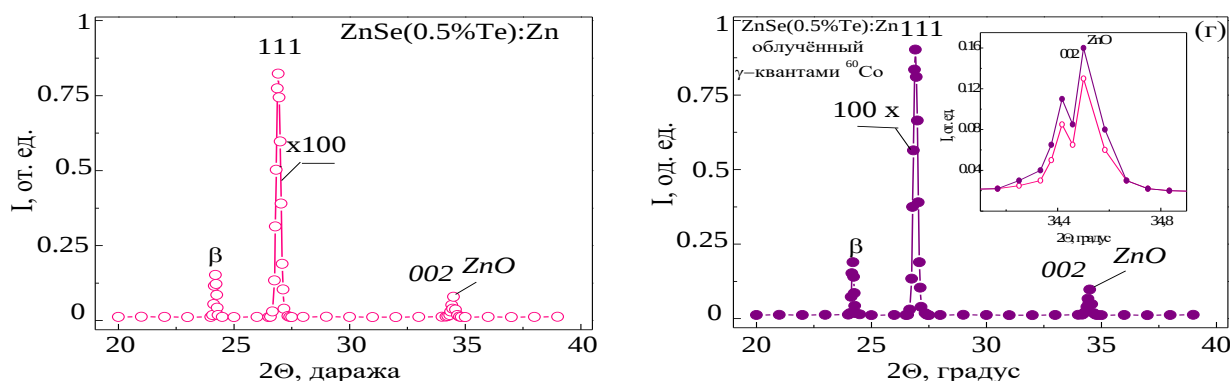


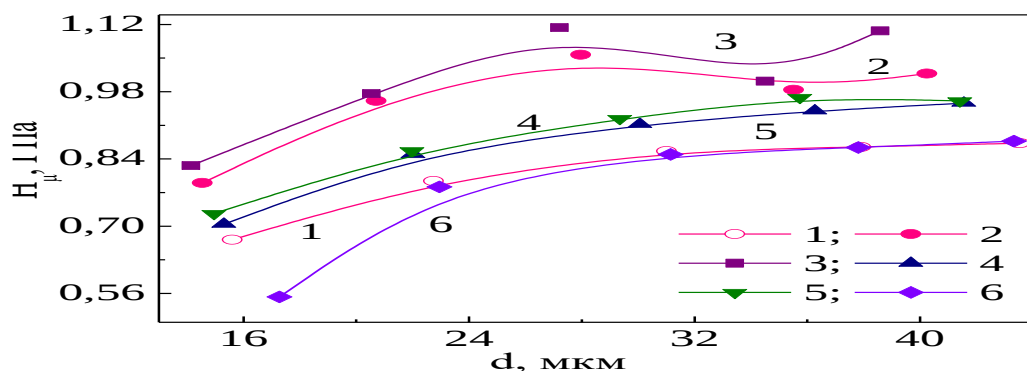
Рис. 2. Рентгенографический фазовый анализ ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn до и после гамма-облучения ^{60}Co

Это может быть связано с термообработкой образцов в окислительной среде или с более высокой концентрацией Те. Облучение ^{60}Co 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_i , введенные в приповерхностный слой и вступившие в химическую связь с О, образовали новые слои ZnO на сформированных примесных нанокристаллических 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 O^- из воздуха. Облучения ZnSe/ZnO:O,Zn гамма-компонентой реакторного излучения энергией до 7 МэВ от изотопа ^{17}O 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_μ и глубины l проникновения алмазной – квадратной пирамиды с двугранным углом $\alpha=136^\circ$ в ZnSe/ZnO:O и ZnSe/ZnO:O,Zn рассчитывали по формуле

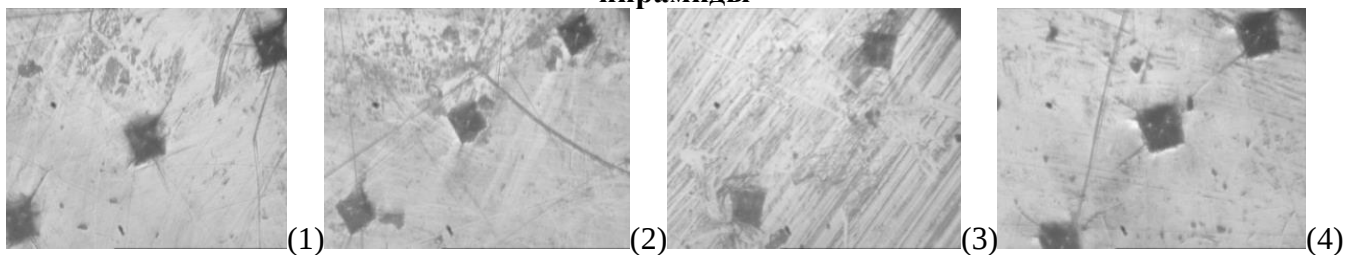
$$H_\mu = 1.854 \cdot \frac{P}{d^2} \quad \text{и} \quad \ell = \frac{d}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad (2)$$

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 ^{60}Co , 4 – передняя и 5 – тыльная сторона облученного протонами 10^{15} см^{-2} , 6 – гамма-облучение в реакторе $6.6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

Рис. 3. Зависимость микротвердости от глубины проникновения алмажной пирамиды



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

Рис. 4. Микрофотографии поверхности с уколами С-пирамиды

Сопоставление данных на рис. 3 и 4 показало, что ^{60}Co гамма-облучение (2) уменьшило размеры уколов (H_μ выросла), а гамма-лучами реактора (4) привело к углублению следа уколов (H_μ уменьшилась), а также к образованию мелких темных преципитатов. Таким образом, косвенно доказан рост НЧ ZnO после ^{60}Co гамма-облучения. Прямое доказательство видно на рис. 5, в табл. 1. На необлученных поверхностях видна только дислокационная сетка.

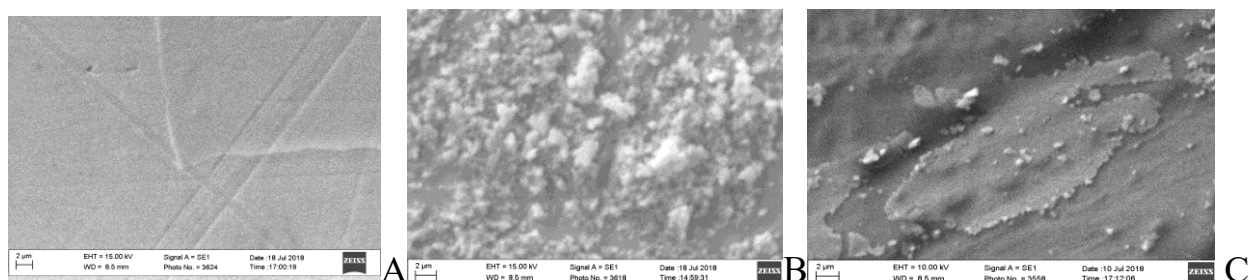


Рис. 5. Микрофотографии ZnSe/ZnO:O,Zn (A), ZnSe/ZnO (0.2%Te):O,Zn (B) и ZnSe/ZnO(0.5%Te):Zn (C) наногетеропереходов гамма-облученных ^{60}Co 500 МР

Сравнение снимков термообработанных в парах Zn и гамма-облученных наногетеропереходов показывает, что в образце, полученном в окислительной среде (A) с толщиной 27 нм ZnO нанокристаллов (определен по РСА), образовалась тонкая пленка, а последующее легирование до 0.2%Te (B) 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. Образцы, выращенные в восстановительной атмосфере аргона (C) с 0.5%Te и 52 нм ZnO нанокрситалов имели плоские ($>10 \times 10$ 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 радиоллизе слоев не позволил определить содержание O с помощью Si(Li)-детектора. Видно, что облучение гамма квантами ^{60}Co привело к росту содержания O в 70 раз за счет уменьшения содержание Se в наногетеропереходах ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn.

Таблица 1

Элементный состав удаленного при радиоллизе и оставшегося приповерхностного слоя и размеры нанокристаллов ZnO в наногетеропереходах до и после ^{60}Co 500 МР

Элемент, вес. %	ZnSe	ZnSe:O,Zn		ZnSe(0.2%Te):O,Zn		ZnSe(0.5%Te):Zn	
		Остаток	Удален	остаток	удален	Остаток	Удален
ZnO нм × интен.		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 названа «Фотоэлектрические свойства и электропроводность наногетероструктур ZnSe/ZnO:O, ZnSe(0.2 и 0.5%Te)/ZnO и 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 $\rho \sim (10^{10}-10^{12})$ Ом·см из-за наличия V_{Se} . Термообработка в парах Zn изменяет проводимость на p -тип и снижает ρ до $\sim (10^4-10^5)$ Ом·см за счет образования глубоких уровней, связанных с центрами V_{Zn} , но не было изучено влияние разных видов ионизирующих излучений.

Таблица 2

Значения удельного сопротивления, измеренные в темноте (ρ_T) и на свету (ρ_C), а также соответствующие расчеты поляризации (+R/-R), фотопроводности ($\sigma_{ФП}$), размеры нанокристаллов ZnO и Zn/Se (0.832) в ZnSe

Образец		ρ_T , Ом	+R/-R	ρ_C , Ом	+R/-R	$\sigma_{ФП}$, Ом ⁻¹
Наногетероструктура ZnSe/ZnO:O 27 и 0.84		+4.8·10 ⁹ -5.5·10 ⁹	0.87	+1.1·10 ⁹ -1.3·10 ⁹	0.81	+0.7·10 ⁻¹⁰ -0.6·10 ⁻¹⁰
γ -Лучи реактора	3.3·10 ¹⁷ см ⁻²	+1.1·10 ⁹ -4.8·10 ⁹	0.23	+3.7·10 ⁷ -4·10 ⁷	0.92	+0.3·10 ⁻⁸ -0.3·10 ⁻⁸
Наногетеропереход ZnSe (0.2%Te)/ZnO:O 40 и 0.85		+6.9·10 ⁸ -2.7·10 ⁹	0.25	+1.4·10 ⁸ -7.1·10 ⁸	0.2	+0.6·10 ⁻⁹ -0.1·10 ⁻⁹
γ -Лучи реактора	3.3·10 ¹⁷ см ⁻²	+2.6·10 ³ -5.8·10 ³	0.45	+2.5·10 ³ -5.2·10 ³	0.48	+0.1·10 ⁻⁵ -0.2·10 ⁻⁵
ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn 40 (0.9) и 0.85		+2.2·10 ⁵ -29·10 ⁵	0.07	+2.1·10 ⁵ -26·10 ⁵	0.08	+0.2·10 ⁻⁷ -0.3·10 ⁻⁸
γ -Лучи реактора	3.3·10 ¹⁷ см ⁻²	+3.2·10 ³ -3.8·10 ³	0.84	+2·10 ³ -3.7·10 ³	0.54	0.2·10 ⁻⁴ 0.1·10 ⁻⁵
ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn 52 и 0.86		+5.6·10 ⁶ -9·10 ⁶	0.62	+1.3·10 ⁶ -8.3·10 ⁶	0.15	+0.6·10 ⁻⁷ -0.8·10 ⁻⁸
γ -Лучи реактора	3.3·10 ¹⁷ см ⁻²	+5·10 ⁴ -9.9·10 ⁴	0.88	+3·10 ³ -3·10 ³	1	0.2·10 ⁻⁴ 0.2·10 ⁻⁴

В табл. 2 приведены (ρ_T) в темноте и (ρ_C) на свету, а также соответствующие расчеты поляризации (+R/-R) и фотопроводности ($\sigma_{ФП}$) до и после реакторного 7 МэВ гамма-облучения 3.3·10¹⁷ см⁻². Фотопроводимость определяли из соотношения

$$\sigma_{ФП} = \frac{(R_T - R_C)}{R_T \cdot R_C} \quad (3)$$

Видно, что наногетероструктура ZnSe/ZnO:O имела высокие значения ρ_T , ρ_C , $\sigma_{ФП}$ и (+R/-R), допирование до 0.2% Те привело к снижению ρ_T и ρ_C на порядок в зависимости от ($\pm V$) и поляризации, соответственно $\sigma_{ФП}$ выросла

на порядок, что связано с образованием Zn_i и V_{Se} . Наногетероструктуры $ZnSe(0.2\%Te)/ZnO$ и $ZnSe(0.5\%Te)/ZnO$ имели высокие ρ_T и ρ_C и низкую $\sigma_{ФП}$. Термообработка в парах Zn во всех образцах снизила ρ_T и ρ_C на $2 \div 4$ порядка, уменьшилась полярность с ростом $\sigma_{ФП}$ до 10^4 раз за счет образования Zn_i с ассоциатами $(O_{Se}^0 + V_{Zn}^-)$, $(O_{Se}^0 Te_{Se}^0 V_{Zn})$ и p - n -перехода, все виды облучения привели к росту $\sigma_{ФП}$, особенно γ -реакторная от ~ 20 раз до 10^4 раз с образованием пар Френкеля (табл. 2).

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

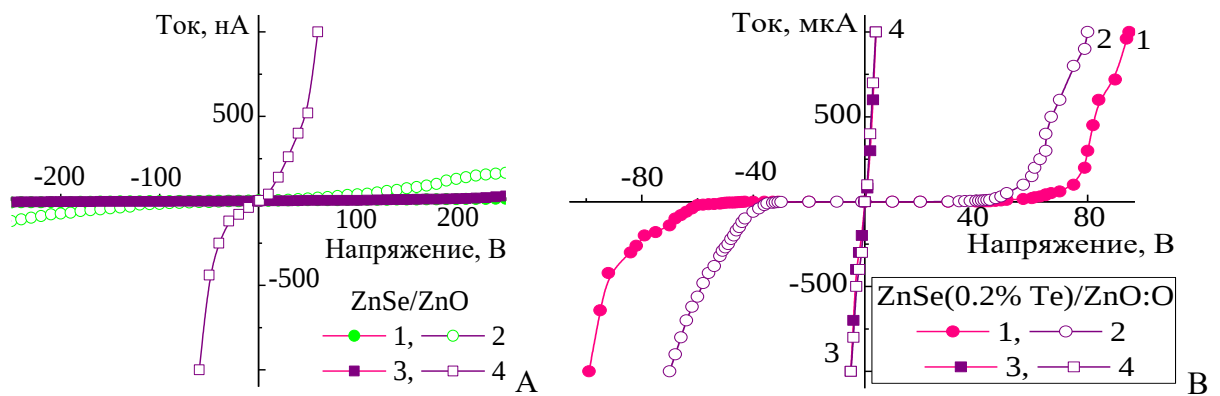


Рис. 6. Фото-ВАХ в темноте (темные) и на свету (светлые) до и после облучения потоком гамма-лучей реактора $3.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

Допирование $0.2\%Te$ в наногетеропереходах $ZnSe(0.2\%Te)/ZnO:O$ привело к формированию полупроводниковой структуры с запирающим $U \approx 70$ В, гамма-облучение в реакторе снизило $U \approx 1$ В, при этом значительно выросла $\sigma_{ФП}$ 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 $90 \div 390$ К наногетеропереходов $ZnSe(0.2\%Te)/ZnO:O, Zn$ (А) и $ZnSe(0.5\%Te)/ZnO:Zn$ (В), которые условно разделяются на три интервала температур, где наблюдаются как экспоненциальные, так и пиковые зависимости:

$$E_a = \frac{k \ln(\rho_1 / \rho_2)}{(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})} \quad \text{и} \quad E_a = G \left[\frac{k T_m (T_m - \Delta T)}{\Delta T} \right] \quad (4)$$

Наногетеропереход $ZnSe(0.2\%Te)/ZnO:O, Zn$ (А) с нанокристаллитами ZnO 40 нм и аморфной фазой толщиной до 0.9 нм в низко температурной ($90 \div 180$ К) части имеет $\sigma = (3.3 \div 4.2) \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ с энергией активации электропереноса $E_a < 0.01$ эВ, т.е. электронную проводимость (прыжковая проводимость около уровня Ферми) (кр.1-А), но при $180 \div 390$ К произошел

пиковый спад при $T_{\text{мин}}=302$ К, $\sigma_{\text{мин}}=4.1 \cdot 10^{-10}$ Ом⁻¹см⁻¹ с $E_a=0.17$ эВ, что может быть связано с повышением концентрации дефектов $V_{\text{Zn}}\text{Te}_{\text{Se}}\text{Zn}_i$ на границе с образованием включений, гамма-облучение привело к снижению $\sigma(T)$ на 4 порядка и ее независимости от температуры в интервале 90÷210 К, при росте до 270 К наблюдалось увеличение $\sigma=10^{-13} \div 2.2 \cdot 10^{-12}$ Ом⁻¹см⁻¹ с $E_a=0.33$ эВ, в интервале 270÷370 К наблюдался пиковый рост $\sigma_{\text{мак}}=3 \cdot 10^{-9}$ Ом⁻¹см⁻¹ 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

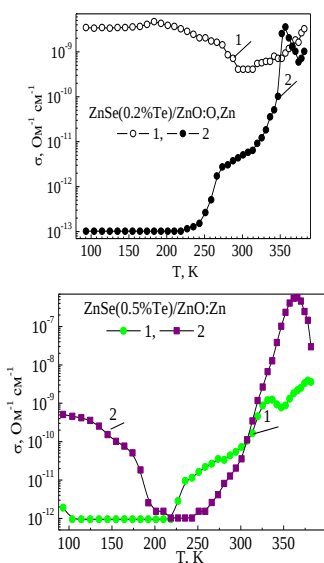


Рис. 7. (A) – 40 нм и 1.2 амр. фаза; (B) – 52 нм

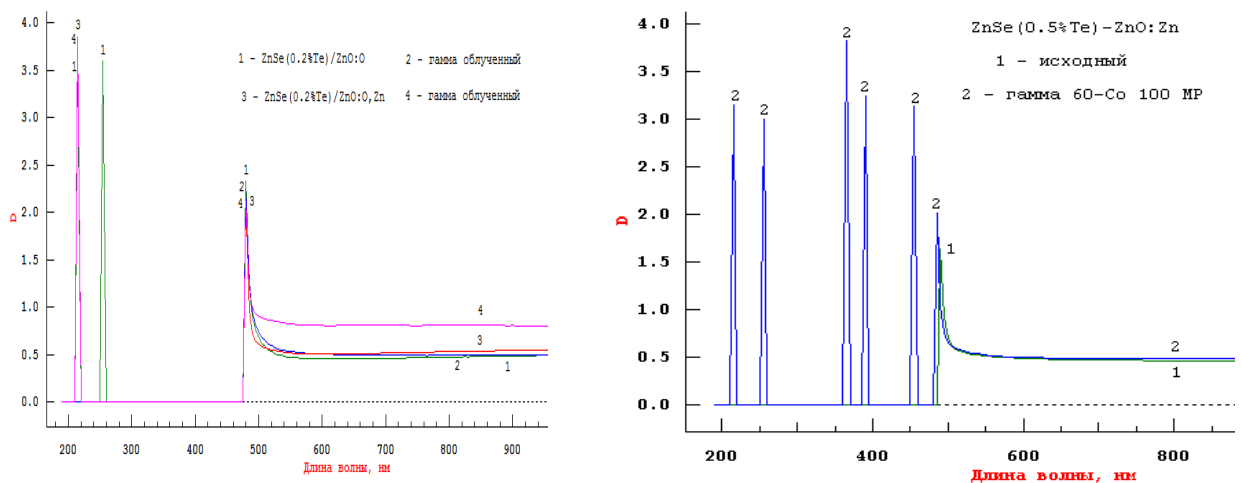
НГП	Параметр	Электронная проводимость	Пиковая провод.	Ионная провод.
A 40+ 1.2 нм	T (К) σ (Ом ⁻¹ см ⁻¹) E_a (эВ)	90÷180 (3.3÷4)·10 ⁻⁹ < 0.01	$T_{\text{мин}}=302$ 4.1·10 ⁻¹⁰ 0.17	-
γ -обл.	T (К) σ (Ом ⁻¹ см ⁻¹) E_a (эВ)	210÷270 10 ⁻¹³ ÷2·10 ⁻¹² 0.33	$T_{\text{мак}}=356$ 3·10 ⁻⁹ 0.57	370÷390 (10÷13)·10 ⁻¹⁰ 0.71
B 52 нм	T (К) σ (Ом ⁻¹ см ⁻¹) E_a (эВ)	220÷313 10 ⁻¹² ÷10 ⁻¹⁰ <0.01	$T_{\text{мак}}=335$ 1.3·10 ⁻⁹ 0.85	345÷390 8·10 ⁻¹⁰ ÷4·10 ⁻⁹ 0.62
γ -обл.	T (К) σ (Ом ⁻¹ см ⁻¹) E_a (эВ)	90÷170 5·10 ⁻¹⁰ ÷6·10 ⁻¹¹ 0.05 эВ	$T_{\text{мин}}=226$ 9·10 ⁻¹³ 0.1	$T_{\text{мак}}=364$ $\sigma_{\text{мак}}=6.2 \cdot 10^{-7}$ 0.62

Ионная проводимость с $\sigma = (9.9 \div 13) \cdot 10^{-10}$ Ом⁻¹см⁻¹ при 370÷390 К 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 наногетероперехода ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn (B) с нанокристаллитами ZnO 52 нм не зависит от температуры при 90÷220 К, с ростом температуры до 313 К наблюдается увеличение σ от $1.1 \cdot 10^{-12} \div 1.4 \cdot 10^{-10}$ Ом⁻¹см⁻¹ с $E_a < 0.01$ эВ, а до 345 К пиковая туннельная ЭП при $T_{\text{мак}}=335$ К с $E_a=0.85$ эВ, $\sigma_{\text{мак}}=1.3 \cdot 10^{-9}$ Ом⁻¹·см⁻¹ и ионная электропроводности при 345÷390 К с $E_a=0.62$ эВ, облучение гамма-квантами привело к росту электропроводности от $5.3 \cdot 10^{-10} \div 6.6 \cdot 10^{-11}$ Ом⁻¹см⁻¹ с $E_a < 0.05$ эВ при 90÷170 К, а нагрев до 345 К, наоборот, привел к пиковому спаду электропроводности при $T_{\text{мин}}=226$ К, $E_a=0.1$ эВ с $\sigma_{\text{мин}}=9 \cdot 10^{-13}$ Ом⁻¹см⁻¹, тогда как в интервале 345÷390 К наблюдался пиковый рост при $T_{\text{мак}}=364$ К, $E_a=0.62$ эВ с $\sigma_{\text{мак}}=6.2 \cdot 10^{-7}$ Ом⁻¹см⁻¹ (табл. 3) за счет увеличения содержания О и образования нанопленки, декорированной наностолбиками ZnO (рис. 5, С), 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.

В пятой главе «Электрооптические свойства наногетероструктур $ZnSe/ZnO:O$, $ZnSe(0.2-0.5\%Te)/ZnO$ и наногетеропереходов $ZnSe/ZnO:O,Zn$, $ZnSe(0.2\%Te)/ZnO:O,Zn$, $ZnSe(0.2-0.5\%Te)/ZnO:Zn$ 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 монокристалле $ZnSe$ 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. Ниже на рис. 8, слева, видно, что спектр наногетероперехода $ZnSe(Te)/ZnO:O$ (1) содержит резонансных уровней $\Gamma_{6v} - 5.76$ (215 нм) эВ и $L_{1,3v} - 4.85$ (255 нм) эВ, а также край поглощения $E_g=2.58$ эВ (480 нм). Расчетное значение суммарной заселенности на резонансных уровнях и E_g (концентрации электронов фотопроводимости) по формуле Смакулы дает значение $N_e = 4.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что приведено в табл. 4. Облучение привело к снижению N_e на порядок $4.6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ за счет разрушения резонансных уровней (2). Термообработка в парах Zn наногетероперехода $ZnSe(Te)/ZnO:O,Zn$ (3) привела только к разрушению резонансного уровня $L_{1,3v}$, в результате N_e уменьшилась до $2.78 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Облучение гамма-квантами (4) привело к незначительному росту $N_e=2.9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, 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 приповерхностном слое $ZnSe$ (рис. 5, В).

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



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 γ -квантами ^{60}Co

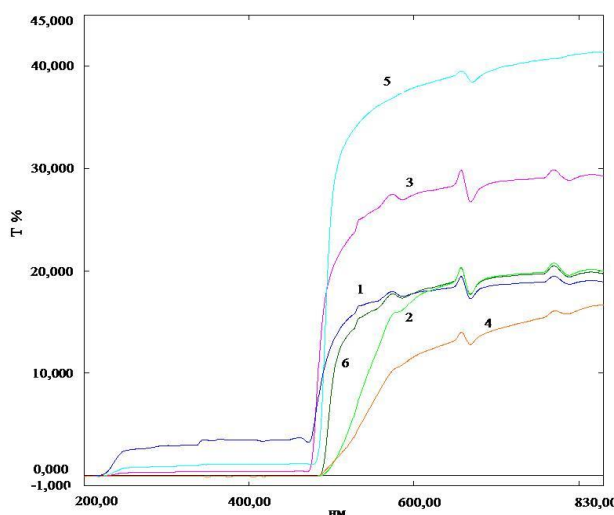
Рис. 8. Спектры оптической плотности

Таблица 4

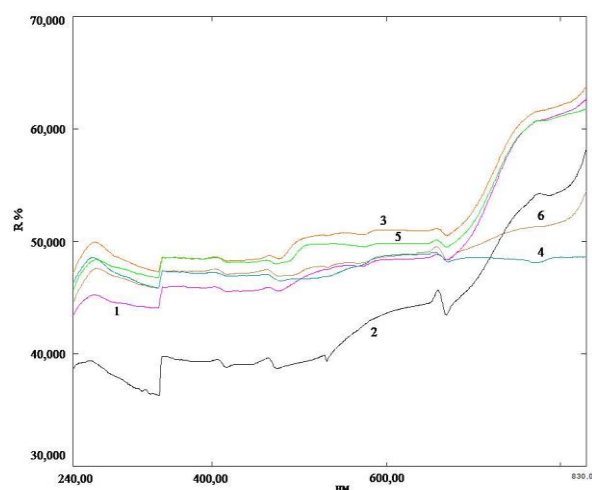
Энергии (эВ) уровней и расчеты N_e в наногетеропереходах ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O (А), ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn (В) и ZnSe(0.5%Te)-ZnO:Zn (С)

НГУ и НК ZnO	Γ_{6v} эВ $N_{\Gamma_{6v}}$ см ⁻³	$L_{1,3v}$ эВ $N_{L_{1,3v}}$ см ⁻³	Zn_i эВ N_{Zn_i} см ⁻³	O_{Se} эВ $N_{O_{Se}}$ см ⁻³	X эВ N_x см ⁻³	E_g эВ N_{E_g} см ⁻³	N_e см ⁻³
А-40 нм	5.76 $2.2 \cdot 10^{16}$	4.85 $1.6 \cdot 10^{16}$				2.58 $0.5 \cdot 10^{16}$	$4.4 \cdot 10^{16}$
⁶⁰ Co γ 40 нм		-				2.58 $0.5 \cdot 10^{16}$	$0.5 \cdot 10^{16}$
В-40 и 0.9 нм	5.76 $2.4 \cdot 10^{16}$					2.58 $0.3 \cdot 10^{16}$	$2.8 \cdot 10^{16}$
⁶⁰ Co γ 40 и 1.2 нм	5.76 $2.4 \cdot 10^{16}$					2.58 $0.5 \cdot 10^{16}$	$2.9 \cdot 10^{16}$
С-52 нм						2.52 $0.3 \cdot 10^{16}$	$0.3 \cdot 10^{16}$
⁶⁰ Co γ 52 нм	5.76 $2 \cdot 10^{16}$	4.85 $1.4 \cdot 10^{16}$	3.39 $0.9 \cdot 10^{16}$	3.17 $0.8 \cdot 10^{16}$	2.72 $0.4 \cdot 10^{16}$	2.55 $0.3 \cdot 10^{16}$	$5.8 \cdot 10^{16}$

Допирование 0.5%Te, термообработка в парах Zn наногетероперехода ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn привело к снижению E_g на 0.06 эВ и $N_e = 0.3 \cdot 10^{16}$ см⁻³, что может быть связано с увеличением размера наночастиц ZnO до 52 нм (рис. 8, справа). Облучение (спектр 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
исходный (3); **облученный** (4);
ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn **исходный** (5);
облученный (6)



Наногетеропереходы
ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O **исходный** (1);
облученный (2); ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn
исходный (3); **облученный** (4);
ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn **исходный** (5);
облученный (6)

Рис. 9. Спектры пропускания и отражения до и после 60-Со 500 МР

Из данных рис. 9 видно, что исходный наногетеропереход ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O с размерами ZnO нанокристаллитов 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 <E_g 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_g. Наибольшее пропускание и отражение имеет ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn, выращенный в Ar с размерами нанокристаллитов ZnO 52 нм. Облучение сформировало нанопленку, декорированную наностолбиками ZnO (рис. 5, С), что также уменьшило пропускание и отражение.

Далее на рис. 10 приведены результаты исследований вольт-яркостной зависимости и спектров электролюминесценции 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 и после ⁶⁰Co гамма-облучения. В нелегированных и необработанных высокоомных наногетероструктурах ZnSe/ZnO:O никакой электролюминесценции не наблюдалось. Однако допирование изовалентной примесью Te до 0.2% образовало наногетероперехода ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, а термообработка в парах Zn наногетеропереходов ZnSeZnO:O,Zn, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn ZnSe(0.2-0.5%Te)/ZnO:Zn, которая обладает электролюминесценцию около λ_{макс}=600 нм (±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 полярности. 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.

Получаемая нелинейная вольт-яркостная зависимость интенсивности электролюминесценции имеет вид

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

Спектр электролюминесценции (с и д) при полном цикле полярности напряжений содержит широкую полосу около λ_{макс}=600±10 нм, интенсивность которой 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.

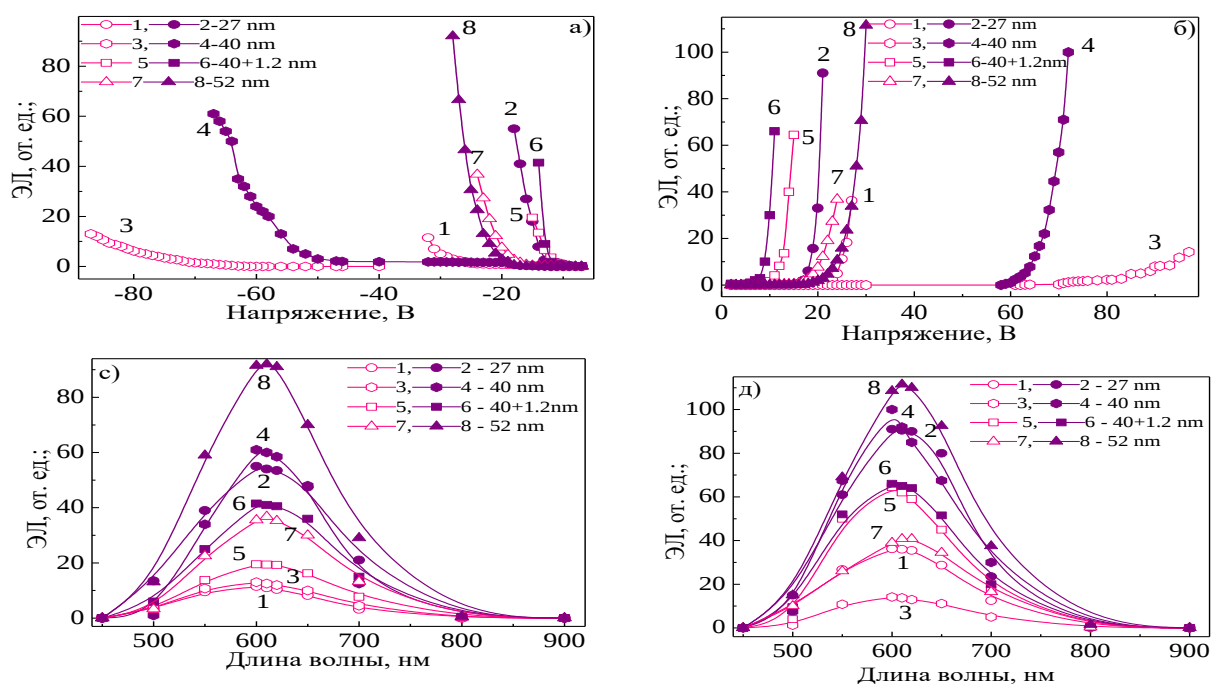


Рис. 10. ВЯЗ (а, б) и спектр электролюминесценции (с, д) наногетеропереходов ZnSe/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn, ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn до (1) и после (2) ^{60}Co гамма-облучения: при обратной(а) и прямой (б) полярности напряжений

Из рис 10. видно, что наногетеропереход ZnSe/ZnO:O,Zn с нанокристаллами ZnO до 40 нм, давал $I_{\text{ЭЛ}}=11.5$ при $U=-32$ В, и $I_{\text{ЭЛ}}=36.3$ при $U=27$ В, где облучения ^{60}Co γ -квантами привело к росту $I_{\text{ЭЛ}}=60$ при $U=-18$ В и $I_{\text{ЭЛ}}=91$ при $U=21$ В, что связано с увеличением интенсивности рефлекса ZnO фазы и формированием тонкой пленки ZnO; в ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O достигалась $I_{\text{ЭЛ}}=13$ при $U=-87$ В и $I_{\text{ЭЛ}}=14$ при $U=97$ В, а после облучения $I_{\text{ЭЛ}}=61$ при $U=-67$ В и $I_{\text{ЭЛ}}=100$ при $U=72$ В, за счет образования пленки с наностолбиками ZnO в приповерхностном слое ZnSe; в ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O,Zn $I_{\text{ЭЛ}}=19.5$ и 64.5 при $U=\pm 15$ В, а после $I_{\text{ЭЛ}}=42$ при $U=-14$ В и $I_{\text{ЭЛ}}=66$ при $U=11$ В, что связано с образованием пленки со щеткой из наностолбиков ZnO и высоким содержанием кислорода; в ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn $I_{\text{ЭЛ}}=40$ при $U=-28$ В и $I_{\text{ЭЛ}}=36.8$ при $U=24$ В, а после облучения $I_{\text{ЭЛ}}=92$ при $U=-28$ В и $I_{\text{ЭЛ}}=112$ при $U=30$ В, соответственно увеличилась интенсивность рефлекса нанокристаллов ZnO с формированием нанопленку декорированной наностолбиками ZnO. Видно, что самую интенсивную электролюминесценцию давал наногетеропереход ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn после гамма-облучения с толщиной нанокристаллитов ZnO до 52 нм и с нанопленкой, декорированной наностолбиками с поперечными размерами в основании от 200 до 400 нм. Гамма-облучение ^{60}Co существенным образом не повлияло на спектр, но привело к 2–8-кратному росту $I_{\text{ЭЛ}}$ в зависимости от полярности за счет роста концентрации Zn_i с комплексами $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{O}_{\text{Se}}$ или $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{Te}_{\text{Se}}$ и ударного возбуждения вторичными электронами от гамма-лучей.

В приложениях приведены описания и схемы методов измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов исследования, проведенного по теме диссертации доктора философии (PhD) «Радиационно-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 (013)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 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 ^{17}O распыляет приповерхностный слой ZnO и образует двойники в матричной решетке ZnSe.
2. Показано, что в высокоомных образцах ZnSe/ZnO:O *n*-типа с омической ВАХ после допирования Te и термообработки в окислительной среде образуются *p-n*-наногетеропереходы и значительно (до 10^4 раз) 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 электрон-дырочных пар и перезарядки центров. Фотопроводимость наногетеропереходов, особенно ZnSe(0.2%Te)/ZnO:O, усиливается на 4 порядка после реакторного гамма-облучения за счет снижения 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 $T_{\text{мин}}=226$ - $T_{\text{мак}}=364$ К; $\sigma_{\text{мак}}=3 \cdot 10^{-9}$ и $\sigma_{\text{мин}}=9 \cdot 10^{-13}$, $\sigma_{\text{мак}}=6.2 \cdot 10^{-7}$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ и $E_a=0.57$ и $E_a=0.1$ -0.62 эВ, 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 $\Gamma_{6v} - 5.76$ эВ, $L_{1,3v} - 4.85$ эВ, $Zn_i - 3.39$ эВ $O_{Se} - 3.17$ эВ, $X - 2.72$ эВ, образованных гамма-облучением, которые подтверждают расчеты, и рост общей концентрации фотоэлектронов до $N_e=5.8 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ в >17 раз.

5. Гамма-облучение ^{60}Co в наногетеропереходах $\text{ZnSe}(0.2\%\text{Te})/\text{ZnO}:\text{O}$ с образованием наностолбиков ZnO привело к 8-кратному увеличению яркости электролюминесценции с широкой полосой излучения $\lambda_{\text{мак}}=600$ нм, а в наногетеропереходах $\text{ZnSe}(0.5\%\text{Te})/\text{ZnO}:\text{Zn}$, где пленка декорирована наностолбиками, – к 4-кратному, что связано с излучательным центром Zn_i с асооциатами $\text{V}_{\text{Zn}}\text{Zn}_i\text{Te}_{\text{Se}}$. 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 $\text{ZnSe}(\text{Te})/\text{ZnO}:\text{Zn}$ 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 №.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 BAKHTIYOROVNA

**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**

Tashkent – 2019

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:	Ibragimova Elvira Memetovna Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher
Official opponents:	Khidirov Irsali Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor Tashmukhamedova Dilnoza Artikbaevna Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Leading organization:	Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A.Arifov

The defense of the dissertation will be held on “___” _____ 2019, at ___ at the meeting of the Scientific Council No.DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute, National University of Uzbekistan (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-18; fax (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No.____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “___” _____ 2019.
(Registry record No. ____ dated “___” _____ 2019.)

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 (NPs), depending on the Zn/Se ratio and dopants Te, O, and Zn_i;

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

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

investigating the dependence of the photoelectric characteristics on the concentration of dopant and Zn_i centers, as well as on the size/shape of the ZnO NPs;

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_i and the size/shape of ZnO NPs on the surface conductivity (SC) and EL;

studying the influence of the size/shape of ZnO NPs on the formation of ZnSe/ZnO NHS or light-emitting ZnSe (Te)/ZnO NGJ.

The object of the research: 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 NPs on ZnSe and the formation of NGS and light-emitting NGJ with different geometries, as well as factors influencing the efficiency of EL.

The scientific novelty of the research is as follows:

The dependence of the critical size, shape (film, hillock) 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 nanoheterojunctions interfaces: 27nm(013)ZnO/ZnSe:O,Zn with ZnO nanofilm; 40nm (110) ZnO/(220)ZnSe(0.2% Te):O,Zn with a brush made from ZnO nano-hillock, and 50nm (002)ZnO/(111)ZnSe(0.5%Te):Zn with decorated nano-hillock ZnO;

The conditions have been found for the growth of nano-ZnO content in the near-surface ZnSe layer treated in Zn vapor as a result of ⁶⁰Co gamma irradiation, and their destruction under 18 MeV protons in vacuum;

Twinning of the ZnSe matrix lattice has been detected due to its relaxation and ordering of nano-ZnO as a result of sputtering upon irradiation with 7 MeV gamma rays from the ¹⁷O isotope in the thermal column of the nuclear reactor;

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 ⁶⁰Co of gamma irradiation with EL 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 ~ 1.25 MeV gamma irradiation, five resonance levels are formed at Γ_{6v} -5.76 eV, $L_{1,3v}$ -4.85 eV, Zn_i -3.39 eV, O_{Se} -3.17 eV and X =2.72 eV, the E_g decreases by 0.06 eV and the photoconductivity increases to 10^{-6} Ohm $^{-1}$ in a planar nanoheterojunctions of ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn with 50 nm thickness of ZnO film decorated with ZnO nano- hillock;

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- hillock as well as the conditions for the growth of nano-ZnO in the near-surface ZnSe layer as a result of ^{60}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 structural characteristics;

discovered twinning of the ZnSe matrix lattice due to its relaxation and ordering of nano-ZnO; the resulting low-voltage light-emitting nanoheterojunctions ZnSe/ZnO:O,Zn (up to 21 V, I_{El} =91), ZnSe(0.2%Te)/ZnO: O (up to 72 V, I_{El} =100) and ZnSe (0.2%Te)/ZnO:O,Zn (up to 12 V, I_{El} =70) after ^{60}Co gamma irradiation with electroluminescence at 600 ± 10 nm, regardless of the voltage polarity, which involves Zn_i - defect centers and stable associates $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$ or $V_{Zn}Zn_iTe_{Se}$ 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, 2018; Journal of Luminescence, 2018) for explaining the effects of gamma irradiation and X-rays on the photo-electro- and x-ray luminescent properties of LEDs. Using the results made it possible to explain the high-temperature conductivity, the dependences of the lux-ampere characteristic of X-ray-stimulated conductivity and UV-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 $^{-1}$ in planar nanoheterojunction ZnSe(0.5%Te)/ZnO:Zn were used for X-ray analysis of ZnO nanorods 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 nanostructures.

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

I 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:O 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. 3th Int. Conf. Samarkand, August 12-15, 2003. - Tashkent, 2003. - P. 175.
9. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Вольт-амперные характеристики и микротвёрдость ZnSe:Te кристаллов после протонного-облучения // Фундаментальные и прикладные вопросы физики, посвящ. 60-летию ФТИ АНРУз. Рес. конф. 27-28 ноября 2003. – Ташкент, 2003. – С. 415–417.
10. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Влияние радиолиза на 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 ^{241}Am X–excitation and photo-resistivity of $\text{ZnSe}(\text{Te},\text{O})$ crystals // Applications of Nuclear Techniques: Abst. 8th Int. Conf. September 12-18, 2004. - Crete, 2004. - P. 9.
12. Elmurotova D.B., Ibragimova E.M. Effect of the reactor gamma-radiation on photosensitivity of $\text{ZnSe}(\text{Te},\text{O})$ semiconductors // Nuclear science and its application. Abst. 3th 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 $\text{ZnSe}(\text{Te},\text{O})$ crystals // Nuclear and Radiation Physics: Abst. of 5th Int. Conf. September 26-29, 2005. - Almaty, 2005. - P. 221-222.
14. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Изменение электролюминесцентных свойств кристаллов $\text{ZnSe}(\text{Te},\text{O})$ 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 $\text{ZnSe}(\text{Te},\text{O})$ crystals after gamma-irradiation // Modern problems of Nuclear physics, 7th 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 $\text{ZnSe}(\text{Te},\text{O})$ crystals after reactor irradiation // Nuclear science and its application: 4th 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 $\text{ZnSe}(\text{Te})$ crystals // Modern Problems of Nuclear Physics: 7th Int. Conf. September 22-25, 2009. - Tashkent, 2009. - P. 150-151.
20. Эльмуротова Д.Б., Ибрагимова Э.М. Изучение влияния примеси Te 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 $\text{ZnSe}(\text{Te})$ 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 $\text{ZnSe}(\text{Te})\text{:Zn}$, 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. 3th 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, 9th 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 // Заонавий физика ва астрономиянинг долзарб муаммолари. II Рес. Илмий конф. матер. 21 май, 2010. – Карши, 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:O после протонного облучения // Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и 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 Te и рост нанокристаллитов ZnO на электролюминесценцию в наногетеропереходах ZnSe-ZnO:O,Zn // Современные проблемы физики полупроводников СПФП-2011. Мат. Рес. конф., 23–28 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. – Карши, 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. научно-практической конф. молодых ученых, 18 декабря 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., 26-27 октября 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. ЎзРФА 75 йиллик юбилейига бағишланган Респ. Илмий ва амалий конф. 20.12.2018. – Ташкент–Навоий, 2018. – С. 72–74.

Талабгор

Д.Б.Элмуротова

Илмий раҳбар

Э.М.Ибрагимова

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида
тахрирдан ўтказилди (.....)