

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

---

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ**

**ЙЎЛДОШОВ РУҲИДДИН ТОЛИБОВИЧ**

**$Zn_xSn_{1-x}Se$  ЮПҚА ҚАТЛАМЛАРИНИНГ СТРУКТУРАВИЙ,  
МОРФОЛОГИК, ОПТИК ВА ЭЛЕКТРОФИЗИК ХОССАЛАРИ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**Тошкент – 2023**

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

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

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

**Йўлдошов Рухиддин Толибович**

$Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламларининг структуравий, морфологик, оптик ва  
электрофизик хоссалари

3

**Йўлдошов Рухиддин Толибович**

Структурные, морфологические, оптические и электрофизические свойства  
пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$

23

**Yuldoshov Ruhiddin Tolibovich**

Structural, morphological, optical and electrophysical properties of  $Zn_xSn_{1-x}Se$  films

43

**Эълон қилинган илмий ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ

List of published works

47

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

**ЙЎЛДОШОВ РУҲИДДИН ТОЛИБОВИЧ**

**$Zn_xSn_{1-x}Se$  ЮПҚА ҚАТЛАМЛАРИНИНГ СТРУКТУРАВИЙ,  
МОРФОЛОГИК, ОПТИК ВА ЭЛЕКТРОФИЗИК ХОССАЛАРИ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**Тошкент – 2023**

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2022.1.PhD/FM283 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация ЎЗР ФА “Физика-Қуёш” ИИЧБ Физика-техника институтида бажарилган.

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

**Илмий раҳбар:**

**Разыков Тахирджон Муталович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Эгамбердиев Баҳром Эгамбердиевич**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Юлдашев Носиржон Хайдарович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**Тошкент давлат техника университети**

Диссертация химояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12-рақамли Илмий кенгашнинг 2023 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел. (99871)248-79-94, факс:(99871)248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz), (ЎзМУ қошидаги ЯФМ ИТИ мажлислар зали).

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

Диссертация автореферати 2023 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ да тарқатилди.

(2023 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**Ш.Б. Утамурадова,**

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

**Ж.Ж. Хамдамов,**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, (PhD), к.и.х.

**Н.А. Тургунов,**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., доцент

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

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурлиги.** Дунёда қайта тикланувчи энергия манбаларидан кенг фойдаланиш, углеводород ёқилғи-энергетика ресурсларини тежаш ва улардан оқилона фойдаланиш масалалари долзарб аҳамият касб этмоқда. Ҳозирги вақтда дунёнинг ривожланган мамлакатларида қайта тикланувчи энергия манбаларидан электр энергияси ишлаб чиқариш йилига 7 фоизга ошиб, шундан қуёш модулларидагина олинган энергия улуши 5 фоизни ташкил этади. 2030 йилга бориб ишлаб чиқаришнинг 60 фоиздан ортиғи қайта тикланадиган энергия манбаларига тўғри келиши прогноз қилинмоқда. Шу муносабат билан, ҳозирги вақтда Si, a-Si, CdTe, Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> материалларига асосланган қуёш модуллари кенг қўламда тижоратлаштирилди ва шу билан бирга, қуёш элементларидан фойдаланишнинг ривожланиши туфайли янги материалларга асосланиб, келажакда қуёш энергиясида ишловчи моделларининг нархини пасайтириш ва самарадорлигини оширишга эътибор қаратилмоқда<sup>1</sup>.

Жаҳонда олиб борилаётган тадқиқотлар юпқа қатламли қуёш элементларининг ютувчи база қатламини арзон ва зарарсиз янги материаллар билан алмаштиришга қаратилган<sup>2</sup>. Ушбу юпқа қатламлар тақиқланган соҳа кенглиги 0,87÷1,7 эВ оралиғида бўлиб, илмий марказлар томонидан турли усулларда олинган бу турдаги юпқа қатламли қуёш элементларининг самарадорлиги йилдан-йилга ортиб бормоқда.

Республикамызда қуёш энергияси самарадорлигини ошириш ва ундан кенг фойдаланишга қўмаклашувчи янги технологиялар ва усулларни ўзлаштириш соҳасида илмий-тадқиқот ишлари бўйича кенг қўламда чоратадбирлар амалга оширилмоқда. Бу борада 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, жумладан «Иқтисодиётни электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш ҳамда “Яшил иқтисодиёт” технологияларини барча соҳаларга фаол жорий этиш, иқтисодиётнинг энергия самарадорлигини 20 фоизга ошириш»<sup>3</sup> бўйича вазифалар белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, хусусан, қуёш энергиясига асосланган янги ишлаб чиқариш қувватларини қуриш, шу жумладан, янги турдаги қуёш элементларини яратиш учун зарур бўлган электрофизик хусусиятларга эга янги яримўтказгичли материаллар - қаттиқ қоришмаларни яратиш катта илмий аҳамиятга эга. Шу нуқтаи назардан, Zn<sub>x</sub>Sn<sub>1-x</sub>Se асосидаги яримўтказгич юпқа қатламлар зарарли даражаси кам бўлган компонентлардан ташкил топган бўлиб, оптимал оптик ва фотоэлектрик хусусиятлари туфайли арзон ва экологик тоза қуёш

<sup>1</sup>Martin A. Green, Ewan D. Dunlop, Jochen Hohl-Ebinger, Masahiro Yoshita, Nikos Kopidakis, Xiaojing Hao. Solar cell efficiency tables//Prog Photovolt Res Appl. 2020.pp. 629–638

<sup>2</sup>T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D.Morel, E.Stefanakos, H.S.Ullal, H.M. Upadhyaya. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects//Solar Energy. 2011. V. 85. pp.1580–1608

<sup>3</sup>Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги «2022 – 2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида» 60-сон Фармони. [lex.uz](http://lex.uz)

элементларини катта ҳажмда ишлаб чиқариш учун истиқболли материалдан бири ҳисобланади.

Ушбу диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги «2022 – 2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги ПФ-60-сон Фармони, 2021 йил 19 мартдаги «Таълим сифатини ошириш ва физика соҳасида илмий тадқиқотларни такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ПКҚ-5032-сон қарори ва Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2020 йил 23 июлдаги 452-сон «Қайта тикланувчи энергия манбалари қурилмаларининг ва улардан ишлаб чиқариладиган энергиянинг давлат ҳисобини юритиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.**  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришмаларини ўрганиш бўйича дунё миқёсида бир қанча илмий изланишлар ўтказилган. Шунингдек, Хитой Халқ Республикаси қаттиқ жисмлар физикаси институти олимлари J.C.Li, D. Li, X.Y.Qin, ва J. Zhang<sup>4</sup> томонидан  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришмасининг термоэлектрик хоссаларини ўрганиш юзасида илмий изланишлар олиб боришган. Ушбу илмий тадқиқот марказида SnSe бирикмасига Zn элементини киритиб, электрофизик параметрлари яхшиланган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришмаси олинган. Нигерия университетининг Нанотадқиқотлар лабораторияси олимлари Ikhioya I. Lucky, D.Okoli<sup>5</sup> ва бошқалар томонидан ҳам ZnSnSe юпқа қатламлари соҳасида илмий тадқиқотлар олиб борилган. ZnSe юпқа қатламга Sn элементини киритиб, тақиқланган соҳа кенглиги 2 эВ бўлган юпқа қатлам олишга муваффақ бўлинган.

Шунингдек, қаттиқ қоришмали юпқа қатлам қуёш элементларини ишлаб чиқиш ва уларни такомиллаштириш борасида Ўзбекистонда ҳам кўпгина таниқли олимларининг илмий ишлари бағишланган. Т.М.Разиков, А.Мирсағатов, А.С.Саидов, М.С.Саидов, А.Юсуповлар томонидан олиб борган тадқиқотлар натижасида икки ва кўпкомпонентли халкогенидли яримўтказгичлардан поликристалл юпқа қатламлар олишнинг янги технологиялари ишлаб чиқилган.

Шу билан бирга, шу кунга қадар  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларини SnSe ва ZnSe бинар бирикмаларидан олишнинг технологик режимлари аниқланмаган.

<sup>4</sup>J.C. Li, D. Li, X.Y. Qin, and J. Zhang. Enhanced thermoelectric performance of p-type SnSe doped with Zn // Scripta Materialia. 2017.V.126. pp.6–10.

<sup>5</sup>I. Ikhioya Lucky, D. N Okoli and A. J Ekpunobi Influence of pH on Tin Doped Zinc Selenide (SnZnSe) via Electrochemical Deposition Technique // International Journal of Chem Tech Research. 2019. V.12 pp.200-211.

$Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришмаларидан тақиқланган соҳа кенглигини ўзгартириш орқали қуёш элементлари учун оптимал тақиқланган соҳали юпқа қатламларни олиш ва уларнинг электрофизик хоссаларини, хусусан, асосий заряд ташувчилар концентрациясини ва ҳаракатчанлигини тадқиқ этиш масалалари етарли даражада ҳал этилмаган.

**Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий тадқиқот муассасаси илмий тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Физика-техника институти илмий тадқиқот ишлари режасига биноан ФА-ФЗ-003 « $Zn_xSn_{1-x}Se$  асосидаги янги, арзон ва самарадор юпқа қатламли қуёш элементини тадқиқот қилиш» (2017-2020 йй.); ФТҚФ «Янги ва арзон юпқа қатламли қуёш элементини олиш учун  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламнинг физикавий хоссаларини ўрганиш» (2016-2017 йй.) илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** самарали қуёш элементларининг талабларига мос келувчи физикавий ва оптик хоссаларига эга бўлган юқори сифатли  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма юпқа қатламларини олиш имконини берувчи кимёвий молекулалар дасталаридан ўтказиш усулининг оптимал технологик режимларини аниқлаш ҳамда уларнинг структуравий, морфологик, оптик ва электрофизик хусусиятларининг термодинамик параметрлар билан ўзаро боғлиқлик қонуниятларини ўрганишдан иборат.

**Тадқиқот вазифалари:**

кимёвий молекулалар дасталаридан ўтказиш усули билан юқори сифатли  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларини олишнинг оптимал технологик режимларини аниқлаш;

синтез жараёнида технологик параметрларнинг (буғланиш тезлиги, буғланиш ва таглик ҳарорати, ўсиш тезлиги)  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг таркиби ва физик хоссаларига таъсирини ўрганиш;

тагликнинг турли ҳароратида ( $500\div 600^\circ C$ ) ва турли таркибда ўстирилган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг рентгеноструктуравий ва электрон-микроскопик тадқиқотларини ўтказиш;

$Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг оптик хоссалари (оптик ўтказувчанлик ва ютиш коэффицентлари)ни аниқлаш;

$Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг электрофизик хоссаларини (ўтказувчанлик тури, солиштирма қаршилиги, асосий заряд ташувчиларни концентрацияси ва ҳаракатчанлиги) аниқлаш.

**Тадқиқот объекти** кимёвий молекулалар дасталаридан ўтказиш усули билан оҳак-натрийли шиша сиртида ўстирилган  $ZnSe$ ,  $SnSe$  ва  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламлари олинган.

**Тадқиқот предмети**  $ZnSe$ ,  $SnSe$ ,  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларини олишнинг технологик жараёнлари ҳамда уларда кечадиган структуравий, морфологик, оптик ва электрофизикавий ҳодисалардан иборат.

**Тадқиқот усуллари** кимёвий молекулалар дасталаридан ўтказиш технологияси, рентген нурлари дифракцияси усули, атом куч микроскопияси ва сканерловчи электрон микроскопияси, Холл методи, вольт-ампер

характеристикалар таҳлили, оптик эллипсометрия услубларидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** куйидагилардан иборат:

илк бор кимёвий молекулалар дасталаридан ўтказиш усули билан  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришмасининг юқори сифатли поликристалл юпка қатламларини ўстиришнинг оптимал технологик режимлари аниқланган ҳамда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма таркибининг  $ZnSe$  ва  $SnSe$  бирикмаларининг буғ босимлари нисбатига боғлиқлик қонуниятлари асосида ушбу қаттиқ қоришманинг таркибини бошқариш усуллари ишлаб чиқилган;

таглик ҳарорати  $550\text{ }^\circ\text{C}$  бўлганда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламларининг микрокристалчалари зич жойлашган бўлиб, уларнинг ўлчамлари  $5\div 10$  мкм эканлиги ва асосан  $(h00)$  йўналишларида ўсиши ҳамда панжара доимийларининг ўзгариши ва рентгенограммаларда  $2\theta=21,4$  градус қайтиш бурчагидаги чўкки интенсивлигининг кўтарилиши  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма ҳосил бўлганлигини тасдиқлаши кўрсатилган;

олинган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма юпка қатламларининг ёруғлик ютиш коэффиценти  $\alpha = 10^4\div 10^5\text{ см}^{-1}$  бўлиб, тўғри оптик ўтишларга мос келиши ва  $Zn/(Zn+Sn)$  компонентларининг моляр нисбати 0 дан 0,3 гача ўзгарганда тақиқланган соҳа кенлиги 1,01 дан 2 эВ гача ўзгариши аниқланган, ҳамда илк бор  $Zn_{0.12}Sn_{0.88}Se$  таркибли қаттиқ қоришма тақиқланган соҳасининг кенлиги куёш элементлари учун оптимал бўлган 1,4 эВ га тенг бўлиши кўрсатиб берилган;

$Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма таркибида  $Zn$  нинг моляр миқдори  $0\leq x\leq 0,3$  оралиқда ортганда юпка қатлам электр ўтказувчанлиги  $\sigma=15\text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ дан  $4\cdot 10^{-3}\text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$  гача ва асосий заряд ташувчиларининг концентрацияси  $n=10^{17}\text{ см}^{-3}$  дан  $10^{14}\text{ см}^{-3}$  гача камайиши тугунлараро жойлашган акцептор сатҳ берувчи  $Se$  атоми нуқсонларининг камайиши билан боғлиқ эканлиги кўрсатиб берилган;

$Zn/(Zn+Sn)$ нинг компонентлар моляр нисбати қиймати 0 дан 0,3 гача ўзгарганда микрокристаллчалар чегаралараро сочилиш марказларининг ортиши натижасида намуналарда асосий заряд ташувчилари ҳаракатчанлигининг  $\mu=24\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{сек})$ дан  $10\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{сек})$  гача камайиши аниқланган.

**Тадқиқот амалий натижалари** куйидагидан иборат:

кимёвий молекулалар дасталаридан ўтказиш усули билан турли таркибли юқори сифатли поликристалл яримўтказгич юпка қатламларни олиш технологик режимлари ишлаб чиқилган;

арзон ва самарали куёш элементларини талабларига мос келадиган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламларнинг электрофизик ва оптик катталиклари ўзгариши аниқланган;

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** яримўтказгичлар физикасининг замонавий ўлчаш усулларида фойдаланилганлиги ва олинган илмий натижаларни нуфузли нашрларда чоп этилган ишларнинг натижаларига мос келиши, юқори сезгир технологиялар асосида олинган илмий натижаларнинг назарий маълумотларга мос келиши, олинган

натижаларнинг синалган физик моделлар доирасида изоҳлаб берилиши билан таъминланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламларининг ўрганилган структуравий, оптик ва электрофизик хусусиятларининг термодинамик параметрларга ўзаро боғлиқлик қонуниятлари,  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламлари характеристикалари ҳақида физик тушунчаларни кенгайтиришга ёрдам бериши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, диссертация ишининг натижалари  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатлами асосида арзон, экологик тоза ва самарали қуёш элементлари ва модулларини ишлаб чиқариш технологиясини ишлаб чиқишда қўлланилиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши**  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламларини структуравий, оптик ва электрофизик хоссаларини тадқиқ этиш асосида:

$Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламларини таркибидаги SnSe юққа қатламини олиш ва унинг структуравий, морфологик, оптик хоссаларини ўрганишдан олинган натижаларни хорижий илмий журналларда (Royal society of chemistry advances 2020, 10, 16749, IF: 3.12, Solar Energy Materials and Solar Cells, 221, 110919, 2021, IF: 6.98; Vacuum, 177, 2020, 109343, IF: 2.9; Solar Energy, 186, 2019, 29–36, IF: 5.7) SnSe юққа қатламларининг электрофизик, оптик хоссаларини яхшилаш ва улар асосида қуёш элементларини тадқиқ қилишда фойдаланилган. Илмий натижалардан фойдаланиш ҳавола келтирилган илмий ишларда SnSe юққа қатламларини электрофизик хоссаларини, хусусан, ҳаракатчанликни ошириш ва улар асосидаги қуёш элементларининг самарадорлигини ошириш имконини берган;

диссертация доирасида ишлаб чиқилган технологик режимлар асосида MRB-AN-2019-17 рақамли «Қуёш элементлари учун кенг полосали композит тескари қайтарувчи копланмаларини тадқиқ этиш» номли лойиҳанинг илмий-техникавий вазифаларини бажаришда  $Zn_xSn_{1-x}Se/ZnO:Al$ -гетероструктуралар илк марта олиниб, уларнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссалари тадқиқ этилган. (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 8-ноябрдаги 2/1255-3066-сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш лойиҳа доирасида тадқиқ этилган материаллар асосида *p-n*-ўтиш чегарасида нуқсонлар зичлиги кичик бўлган  $Zn_xSn_{1-x}Se/ZnO:Al$ -гетероструктура ва юқори самарадор юққа қатламли қуёш элементларини олиш имконини берган.

**Тадқиқот натижалари апробацияси.** Диссертация ишининг натижалари 4 та халқаро ва 2 та республика илмий-амалий анжуманларида маърузалар қилинган ва муҳокамалардан ўтган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 13 та илмий иш, шу жумладан 5 та илмий мақола Ўзбекистон Республикаси олий аттестация комиссияси томонидан

диссертация ишларининг илмий натижаларини эълон қилиш учун тавсия этилган журналларда чоп этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, 110 та фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва 6 та иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 117 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**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 ва 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.

**« $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{IV}B^{VI}$  бирикмаларнинг физик хоссалари ва улар асосидаги юпқа қатламларини олиш усуллари»** номли биринчи бобда яримўтказгич  $A^{II}B^{VI}$  ва  $A^{IV}B^{VI}$  бинар бирикмалар ва уларнинг хоссалари, хусусан ZnSe ва SnSe юпқа қатламларининг асосий физик-кимёвий хоссалари ҳақида адабиётлар шарҳи келтирилган. Кўрсатилган бирикмалар юпқа қатламларини олиш ва фойдаланишга доир адабиётлардан олинган маълумотлар таҳлили келтирилган.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  ва шу каби юпқа қатламларни олиш технологик усуллариининг афзаллик ва камчиликлари кўриб ўтилган. Экспрементал ва назарий маълумотлар таҳлили асосида диссертация ишининг мақсад ва вазифалари қўйилган.

**« $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларини олиш технологияси ва уларнинг физик хоссаларини мукамал тадқиқот қилиш усуллари»** деб номланган иккинчи бобда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларини кимёвий молекулалар дасталаридан ўтказиш усули билан ўстириш ва юпқа қатламларнинг физик хоссаларини комплекс тадқиқ қилиш усуллурига бағишланган. Кимёвий молекулалар дасталаридан ўтказиш (КМДЎ) усули билан оҳак-натрийли шиша (SLG-soda-lime glass) сиртига юқори сифатли ZnSe, SnSe ва  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларини ўстиришнинг оптимал технологик режимлари аниқланди. Бунда таглик ҳарорати  $500^{\circ}C \div 600^{\circ}C$ , элемент манбаларининг ҳароратлари ZnSe учун  $980^{\circ}C \div 1025^{\circ}C$ , SnSe учун  $780^{\circ}C \div 840^{\circ}C$  оралиқларида ўзгартирилди, ўсиш тезлиги 0,1-20А/сек, водород оқими  $W_{H_2}=10\text{см}^3/\text{мин}$  га тенг бўлиши аниқланди. Синтез жараёнида турли таркибли  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларнинг физик хоссалари билан термодинамик катталиклари (буғланиш тезлиги, буғланиш ва таглик ҳароратлари, ўсиш тезлиги) орасидаги ўзаро боғлиқлик қонуниятлари ўрганилган.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламининг ҳосил бўлиш ва ўсиш механизми кўрсатиб ўтилган.

$Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларини олишнинг КМДЎ усули бўйича синтези куйидагича амалга оширилди. Ҳар бир алоҳида контейнер (тигел)га стехио-метрик таркибли SnSe қотишмаси ва ZnSe кукуни жойлаштирилди. Шундан

кейин тизим ишчи холатга келтирилди ва ундан атмосферавий ифлословчи газларни йўқотиш учун водород газни киритилди. Шундан кейин реакцион камеранинг ташқи печи уланди. Тагликнинг ҳарорати қиздирилиши талаб этилаётган даражага етганида  $\text{SnSe}$ ,  $\text{ZnSe}$  бирикмаларнинг индивидуал киздириш печлари уланади ва улар талаб этилаётган буғланиш ҳароратларига етказилади. Ўстириш жараёнининг давом этиши юпқа қатламларнинг талаб этиладиган қалинлигига боғлиқ ва 30 дан 60 минутгача интервалда бўлади.

$\text{Zn}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$  юпқа қатламларининг водород оқимидаги синтезида юз берувчи физик-кимёвий жараёнлар қуйидагича ифодаланади. Буғланиш ҳароратида  $\text{ZnSe}$  ва  $\text{SnSe}$  лар газ фазага ўтади:



Шундан кейин газсимон фазада  $\text{ZnSe}$  ва  $\text{SnSe}$  рух, қалай ва селенга ажралади:



Ажраган газсимон селен бир онда селенводород ҳосил қилиб, водород билан реакцияга киришади:



Рух, қалай ва селенводород буғлари газ-ташувчи (водород) оқими билан кристалланиш соҳасига ўтади. Кристалланиш соҳасининг ҳарорати буғланиш соҳасининг ҳароратидан паст бўлганлиги туфайли у ерда селенводороднинг парчаланиши юз беради ва (3) реакция тескари йўналишда боради. Рух, қалай ва селенларнинг ўзаро таъсирлашуви натижасида тагликда  $\text{Zn}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$  қаттиқ қоришманинг юпқа қатлами юзага келади:



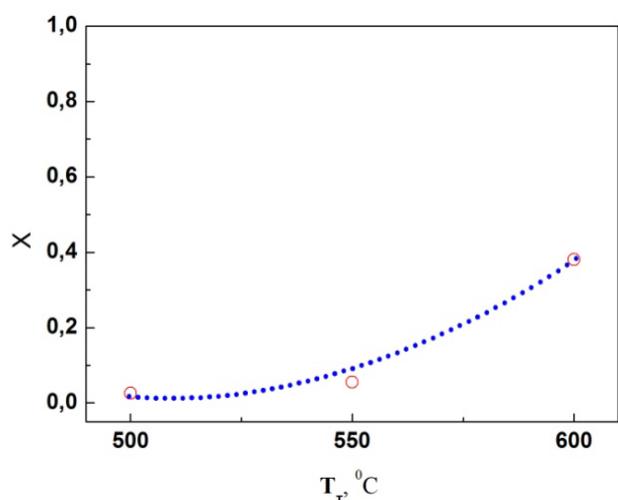
$\text{Zn}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$  қаттиқ қоришма таркиби рух, қалай ва селенлар буғи босимини бошқариш йўли билан ўзгартирилди ва бунга  $\text{ZnSe}$  ва  $\text{SnSe}$  манбаларининг буғланиш ҳароратларини ошириш ёки камайтириш йўли билан эришилди.  $\text{Zn}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$  юпқа қатламлар таркиби  $0 \leq x \leq 0,55$  ораликда олинди.

Олинган  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{SnSe}$ ,  $\text{Zn}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$  юпқа қатламларнинг физик хоссаларини тадқиқ қилиш учун рентгенструктуравий ва электрон-микроскоп тадқиқот усуллари қўлланилди, ҳамда, оптик-спектроскопия, Холл эффекти ва аниқ микроўлчаш усуллари тадбиқ қилинди, вольт-ампер, ўтказувчанликнинг ҳароратга боғлиқлик характеристикаси ўрганилди.

**“SnSe,  $\text{Zn}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$  юпқа қатламларининг морфологик ва структуравий хусусиятларини тадқиқ этиш”** деб номланган 3-боб  $\text{Zn}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$  юпқа қатламларининг морфологик ва структуравий хоссаларини ўрганишга бағишланган бўлиб, булар юпқа қатламларнинг асосий ўрганилиши керак бўлган хоссаларидир. Шунингдек бу бобда  $\text{Zn}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$  юпқа қатламларининг

структуравий хусусиятлари, панжара доимийсининг тагликнинг ҳароратига ва юққа қатламларининг таркибларига боғлиқлиги кўрсатиб ўтилган.

$Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламларининг таркиби EDX (Oxford Instrument) – Aztec Energy Advanced X-act SDD маркали энергодисперсияли рентген таҳлиллагичи ёрдамида аниқланди. 1-расмда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламлари таркибининг таглик ҳароратига боғлиқлиги кўрсатилган. Расмдан кўринадики, таглик ҳароратининг ошиши билан, юққа қатламлар таркибида Zn миқдорининг ортиши кузатилади. Буни қуйидагича тушунтириш мумкин. Таглик ҳароратининг ортиши билан, қаттиқ қоришма таркибида кенг тақиқланган соҳалик ZnSe компоненти миқдорининг ортиш томонига ўзгариши, қалай буғларининг парциал босими рух буғларининг парциал босимига нисбатан юқори бўлишига қарамай, рух атомлари сублимацияси ҳарорат кўтарилиши билан устунликка эга бўлади. Шу билан бир вақтда, қалай буғ-



**1- расм.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришмали юққа қатламлари таркибининг таглик ҳароратига боғлиқлиги**

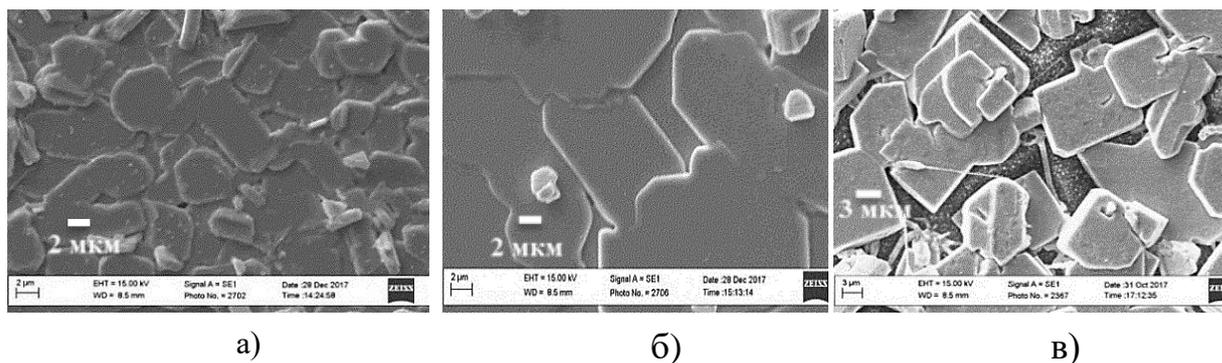
лари конденсацияланишга улгурмасидан, улар водород оқими томонидан ўстириш соҳасидан олиб кетилади. Ва аксинча, таглик ҳароратининг пасайиши билан, қалай буғларини конденсацияланиши устунлик қилабош лайди. Шунингдек рух буғлари, тагликка етиб бормасиданоқ реакторнинг янада юқори ҳароратли соҳасида сублимацияланади. Шунинг учун ҳам юққа қатламлар таркиби тор тақиқланган соҳали SnSe компоненти миқдорининг

ортиши томонига силжийди.

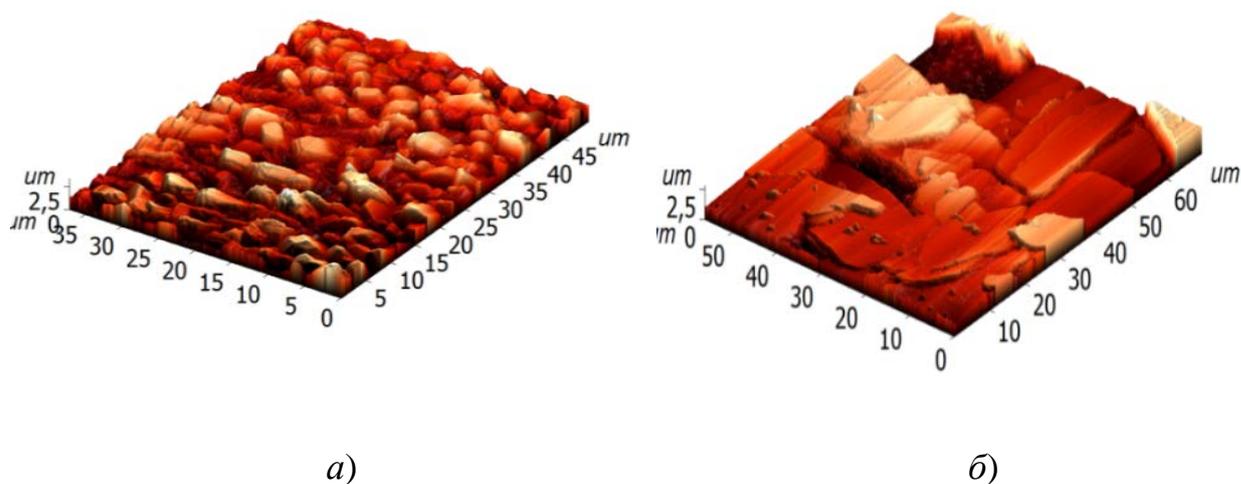
$Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламларининг морфологик тадқиқодлари сканерловчи электрон микроскоп SEM-EVO MA 10 ёрдамида ўтказилди. 2-расмда турли таглик ҳароратларида ўстирилган намуналарнинг сканерловчи электрон микроскопда олинган суратлари келтирилган. Барча  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламлар микрокристаллари таглик юзаси бўйлаб бир текис тақсимланган. Намуналарнинг микроструктураси (микрокристаллчалар шакли ва ўлчами) тагликнинг ҳароратига боғлиқдир. Таглик ҳароратининг ортиши билан юққа қатлам микрокристаллчаларининг шакли ўзгармайди, микрокристаллчалар ўлчамлари эса катталашади. Бунда, ҳарорати 500°C, 550°C бўлган тагликларда ўстирилган барча намуналарнинг микрокристаллчалар шакли зичлашган кўринишда эканлиги кузатилади. 550°C таглик ҳароратида ўстирилган юққа қатламлар микрокристаллчаларининг ўлчами 8-20 мкм гача катталашади, структураси эса янада зичлашган ўрамга эга бўлади. 600°C таглик ҳароратида ўстирилган микрокристаллчалар ўлчамлари кичраяди ва улар орасида тешиклар пайдо бўлди. Бунга сабаб  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатлам поликристалл таркибида ZnSe компонентининг ошиши билан боғлиқ бўлиб,

ZnSe алоҳида атом тугунлари ҳосил бўлиши  $Zn_xSn_{1-x}Se$  кенг сохали каттик қоришманинг шаклланишига таъсир қилган.

3-расмда 550°C ва 600°C таглик ҳароратларида олинган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламлар намуналарининг атом кучли микроскопда олинган таҳлили келтирилган. Расмдан кўринадики таглик 550 °C ҳароратида олинган юпқа қатламларда микрокристаллчалари зич ва юзаси текис тақсимланган. Таглик ҳарорати 600°C да эса доналар ўлчамлари катта ва юза қисмида катта тешиқлар кузатилади. Булардан хулоса қилиш мумкинки, сканерловчи микроскоп кузатувларини атом кучли микроскоп ҳам тасдиқлайди.



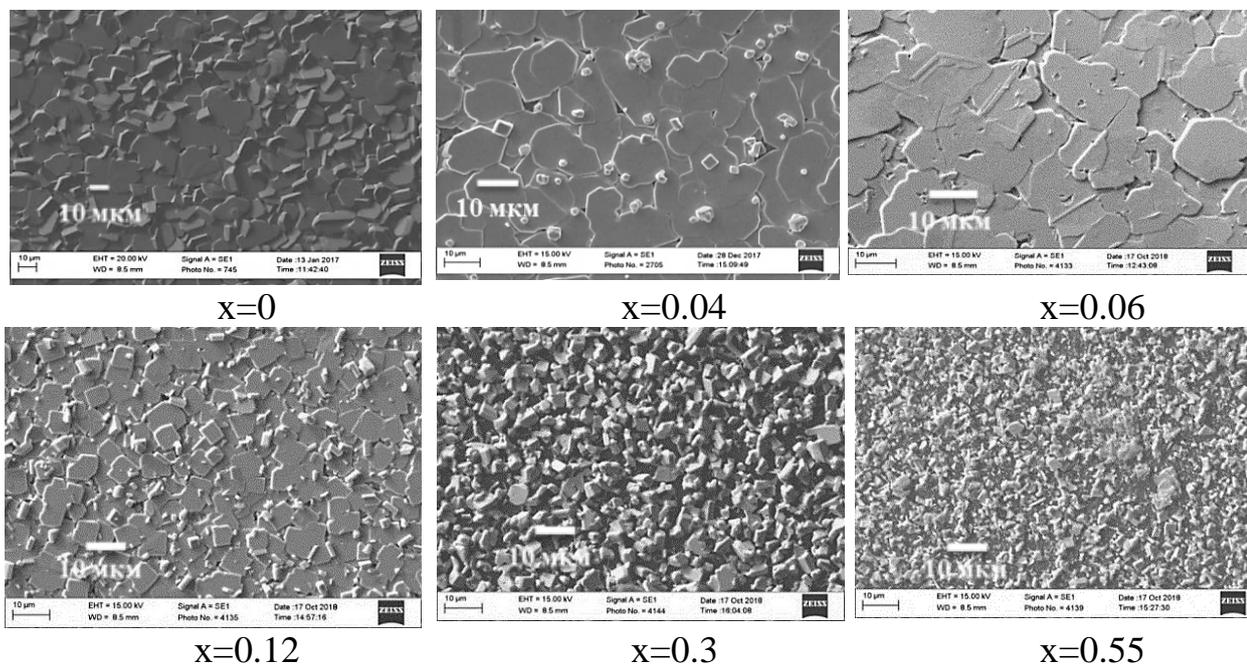
2-расм. Сканерловчи электрон микроскопда олинган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларини морфологияси: таглик ҳароратлари: а)  $T_T = 500^\circ C$ ; б)  $T_T = 550^\circ C$ ; ва в)  $T_T = 600^\circ C$



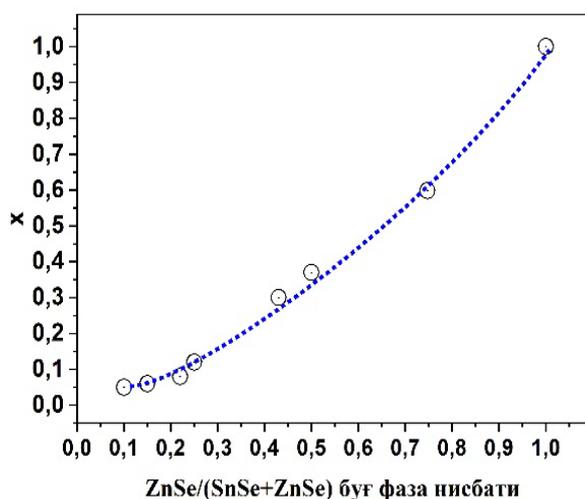
3- расм. Атом кучи микроскопияси усулида олинган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламлари морфологияси: Юпқа қатламлар таглик ҳароратлари: а)  $T_T = 550^\circ C$ ; б)  $T_T = 600^\circ C$ .

Тагликнинг ҳарорати 550°C бўлганда олинган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг доналар ўзаро зич жойлашган ва уларда тешиқлар кузатилмади. 4-расмдан намуналар микроструктураси (кристаллчалар шакли ва ўлчами) буғ фазасидаги ZnSe ва SnSe бирикмаларнинг ўзаро нисбатига боғлиқ эканлиги кўринади. Яъни, буғ фаза таркибида  $ZnSe/(SnSe+ZnSe)$  нисбат ўзгарганида, ўстирилган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  каттик қоришма таркиби, кристаллчаларнинг шакли ва ўлчамлари ўзгаради. Шиша тагликларда  $0 \leq x \leq 0,12$  ораликда ўстирилган намуналар кристаллчаларининг шакли

зичлашган кўринишга эга бўлиб, уларнинг ўлчамлари 2-10 мкм ни ташкил этади. Шиша тагликларда  $0,3 \leq x \leq 0,5$  ораликда олинган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  таркибида Zn миқдорининг бундан кейинги ортиши кристаллчалар ўлчамларининг кичрайишига олиб келади. Ушбу факт, кенг тақиқланган соҳалик ZnSe компонента панжарасининг ҳосил бўлиш энергияси SnSe га нисбатан юқорилигини кўрсатади.



4-расм.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма юпқа қатламларнинг мофологияси



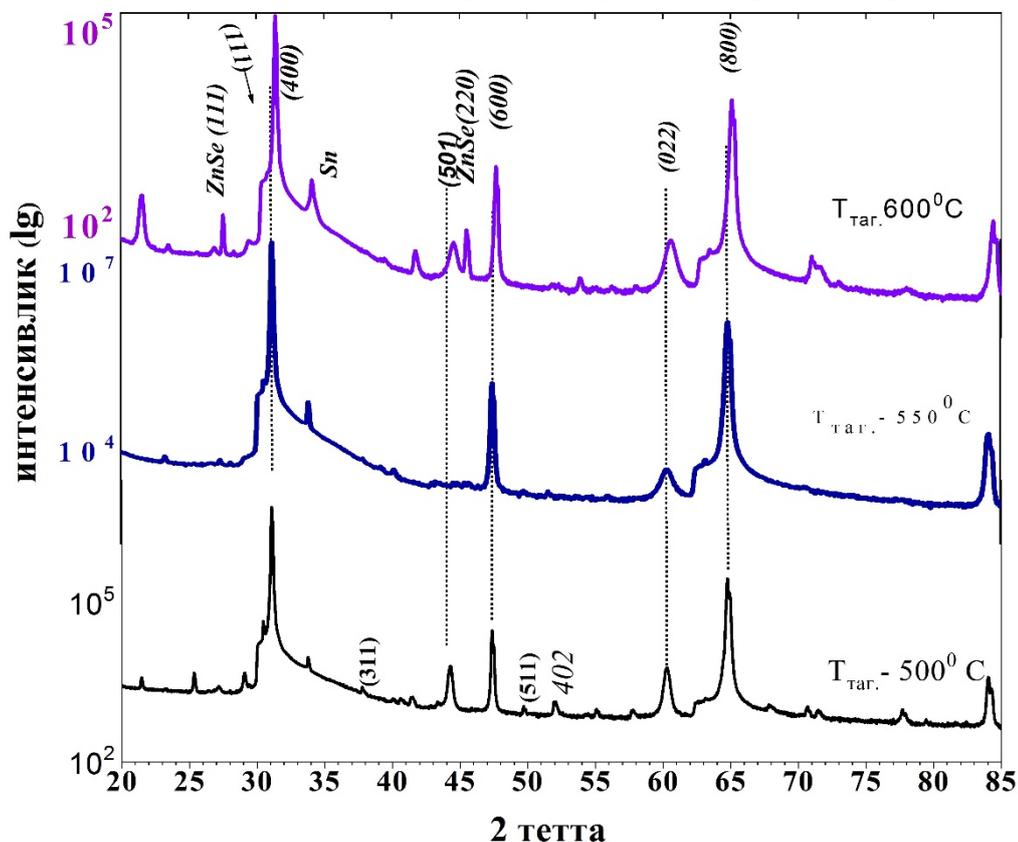
5-расм.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма юпқа қатламлари таркибини буг фазасининг  $ZnSe/(SnSe+ZnSe)$  нисбатига боғлиқлиги

5-расмда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламлари таркибининг буг фазаси таркибидаги  $ZnSe/(SnSe+ZnSe)$  нисбатга боғлиқлиги кўрсатилган. Бундан SnSe ва ZnSe лари бугининг парциал босимини бошқариб қаттиқ қоришма таркибини бошқариш мумкинлиги кўринади. Бу  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма юпқа қатламларининг таркиби ўзгарганда уларнинг морфологияси, оптик ва электрофизик хусусиятлари ўзгаришини кўрсатади. Демак, қаттиқ қоришма таркибни ўзгартириш йўли билан самарали куёш элементи учун зарур бўлган электрофизик ва оптик параметр-

ларга эга бўлган ёруғлик ютувчи қатламни олиш мумкин. Яна 5-расмдан кўринадик, “ $x$ ”нинг ортиши билан қаттиқ қоришма таркибида Zn миқдорининг ортиши кузатилади. Бу қуйидагича тушунтирилиши мумкин. Рух селениди жойлашган тигел ҳароратининг ортиши, кенг тақиқланган

соҳали компонента микдорининг чизиқли ўсишига ва юққа қатламлар таркибининг ўзгаришига сабаб бўлади.

Бу бобда шунингдек,  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламларнинг рентгенограмма тадқиқот натижалари ҳам келтирилган. 6-расмда тагликнинг ҳароратларида олинган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламлари учун рентгенограммалари келтирилган.



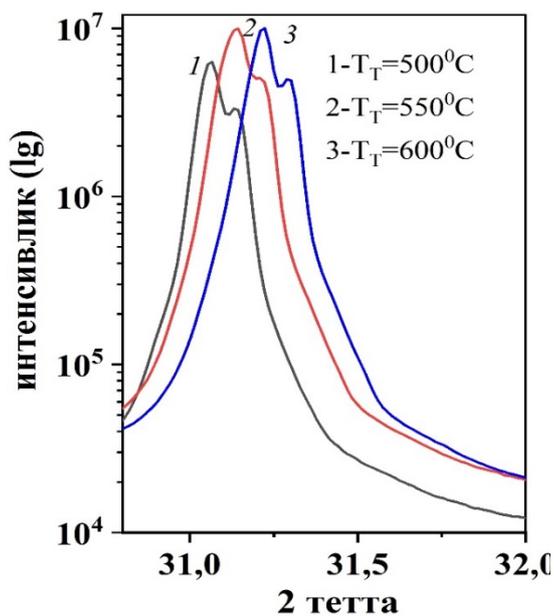
6- расм. Тагликнинг турли ҳароратларида  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламлари рентгенограммалари

$Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма орторомбик структурага эга бўлиб ва асосий чўққилар (400), (600) ва (800) текисликларга мос келиши кузатилган. Рентгенограммадан (6-расм) кўринадик,  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юққа қатламларида кузатилувчи чўққилар, ҳамда SnSe ва ZnSe фазаларига мос келувчи чўққилар ҳам мавжуд. Шунингдек  $34.75^\circ$  да, Sn фазасининг шаклланганлигини тасдиқловчи, кам интенсивликка эга бўлган чўққи кузатилган.

Таглик ҳарорати  $500^\circ C$  бўлганда олинган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма панжара параметрлари қуйидаги қийматларга эга:  $a=11.487 \text{ \AA}$ ,  $b=4.215 \text{ \AA}$ ,  $c=4.471 \text{ \AA}$ ,  $550^\circ C$  ҳароратда эса  $a=11.475 \text{ \AA}$ ,  $b=4.214 \text{ \AA}$ ,  $c=4.473 \text{ \AA}$ ,  $600^\circ C$  ҳароратига мос ҳолда  $a=11.40 \text{ \AA}$ ,  $b=4.205 \text{ \AA}$ ,  $c=4.485 \text{ \AA}$ . Бундан шундай хулоса қилиш мумкин,  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма юққа қатламлари учун “a” ва “b” кристалл панжара параметрларининг қийматлари таглик ҳарорати кўтаришганда камайди, “c” қиймати эса ортади. Бунда таглик ҳароратининг ортиши билан қаттиқ қоришма таркибида Zn нинг ортиши панжара параметрларининг ўзгаришига таъсир этади. Шу билан бирга рентгенограммада чўққиларнинг силжиши кузатилади. 7-расмда (400) чўққи кўрсатилган. Текисликлараро масофанининг камайиши ва шунга мувофиқ равишда

панжара параметрларининг ҳам ўзгариши сабабли рентгенограммада  $2\theta$  нинг ортиш томонга силжиши кузатилди.

8-расмда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг рентгенограммалари келтирилган. Рентгенограммадаги (400), (600) ва (800) текисликларга мос келувчи чўққилар асосий ҳисобланади. Кўрсатилган текисликлар асосий чўққилар билан бир қаторда, интенсивлиги нисбатан кам бўлган (100), (111), (311), (220), текисликларга мувофиқ келувчи чўққилар мавжудлиги кузатилди.

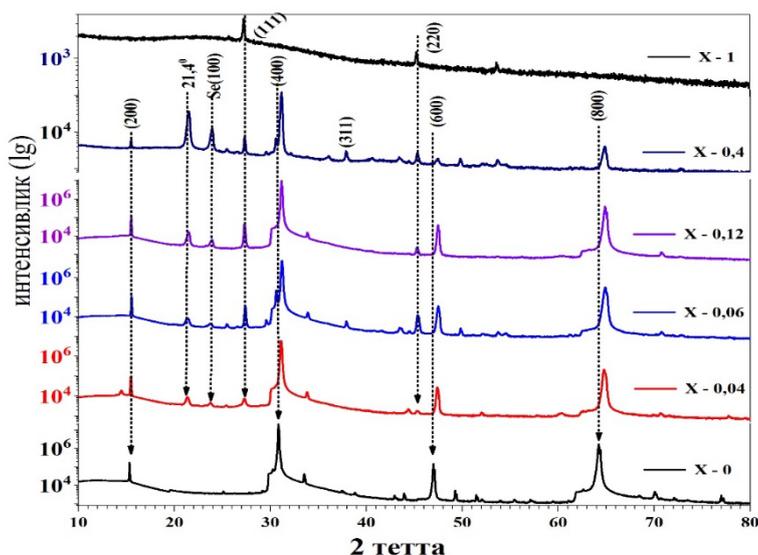


7-расм.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламлари рентгенограммасидаги (400) чўққининг силжиши

$Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма юпқа қатламларида кристал панжарада Sn атоми ўрнини Zn атоми олади бу қаттиқ қоришманинг ҳисобланган кристалл панжара доимийсининг қийматлари ўзгаришига сабаб бўлади. Бунга  $Sn^{2+}$  атоми ковалент радиусидан (1.41 Å),  $Zn^{++}$  атоми ковалент радиуси (1.31 Å) нисбатан кичик бўлиши имкон беради.

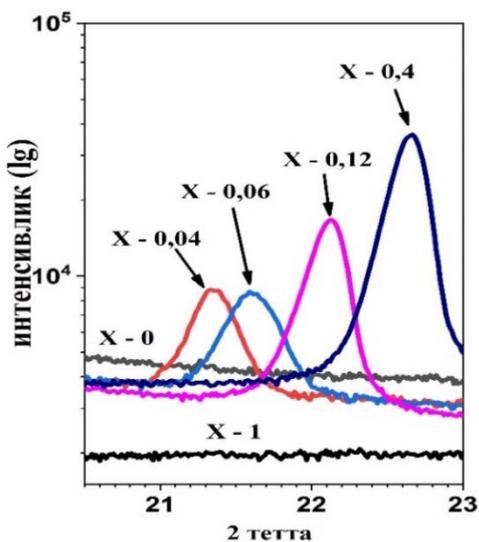
Қаттиқ қоришма таркибида Zn миқдорининг ортиб бориши томон рентнограммада  $2\theta=21.4^\circ$  қайтиш бурчагидаги чўққи интенсивлигининг ортиши, чўққиларнинг Вегард қонуни бўйича  $2\theta$  ортиши томонга бирмунча силжиши (9-расм) ҳамда намуналар кристалл панжара доимийси

қийматларининг ўзгариши  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма юпқа қатламларнинг шаклланганлигидан далолат беради.

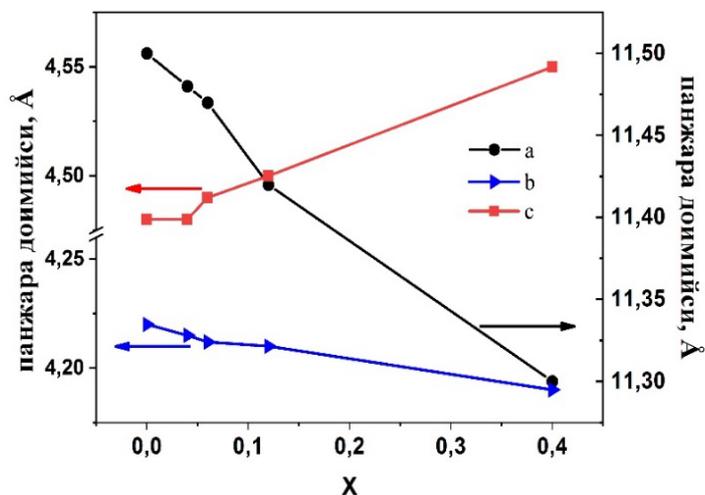


8-расм.  $x$  нинг турли қийматларидаги  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламлари рентгенограммалари

$Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламлар кристалл панжараси параметрлари “ $a$ ” ва “ $b$ ” қийматлари каттиқ қоришма таркибида “ $x$ ” нинг қиймати ортиши билан камайди, “ $c$ ” эса катталашади (10-расм). Барча чўққилар рентгенограммалар маълумотлар базасидаги JCPDS 01-089-0233, 00-037-1463, 86-2246 диаграммаларига мувофиқ келувчи дифракцион чўққилар билан таққосланди.

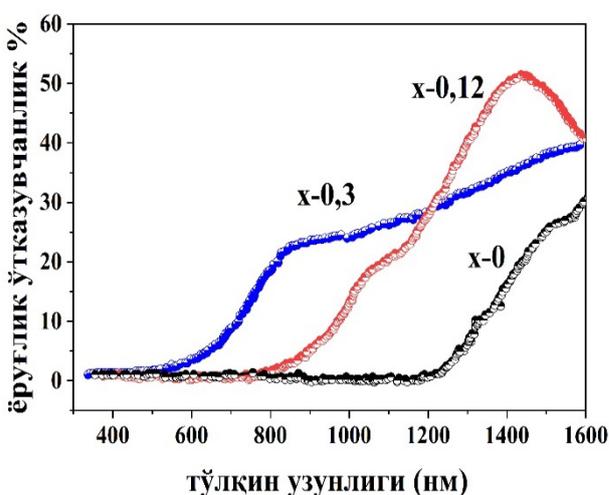


9-расм.  $2\theta=21.4^\circ$  қайтиш бурчагидаги чўққининг силжиши

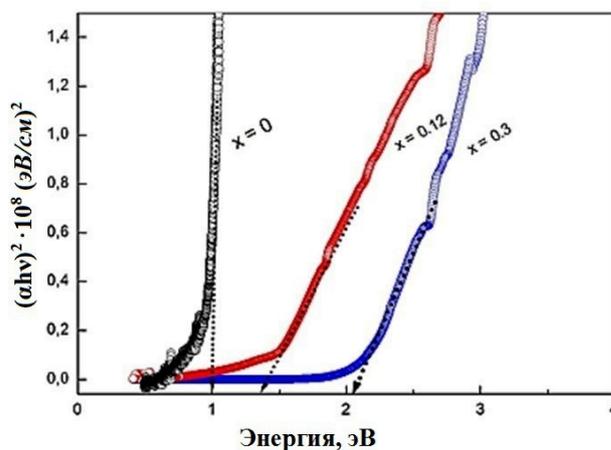


10- расм. Кристал панжара параметрининг  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламлари таркибга боғлиқлиги

« $SnSe$ ,  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламларининг оптик ва электрофизик хоссалари» деб номланган тўртинчи бобда турли таркибли  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламларининг оптик ва электрофизик хоссалари ўрганилган. Ёруғлик ютилиш коэффициенти ва оптик ютилиш соҳа кенглигини аниқлаш мақсадида, олинган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламларининг оптик хусусиятлари тадқиқ этилди.



11-расм.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламлар ёруғлик ўтказувчанлик спектрининг тўлқин узунлигига боғлиқлиги



12-расм. Турли таркибли  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламларининг ёруғлик ютилиш спектри

11-расмдан кўринадикки,  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламларнинг ёруғлик ўтказувчанлик коэффициенти ёруғликнинг тўлқин узунлигига боғлиқлигидан ёруғликнинг ютилиш чегараси яқинида  $10^5 \text{ см}^{-1}$  тенг эканлиги аниқланди. Бу эса юпка қатламли қуёш элеменларининг ютувчи қатлами учун энг юқори кўрсаткичдир.  $(\alpha h\nu) n=f(h\nu)$  функциялар таҳлилининг кўрсатишича, олинган материаллар учун энг хос бўлгани тақиқланган соҳанинг қуйидаги оптик кенглигига эга бўлган оптик тўғри ўтишлар ҳисобланади: мос равишда SnSe учун  $E_g=1,0$  эВ,  $Zn_xSn_{1-x}Se$   $x=0,12$  бўлган таркиб учун  $E_g= 1,4$  эВ,  $x=0,3$  бўлган таркиб учун эса  $E_g = 2,0$  эВ (12-расм). Шунингдек,  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламларининг оптимал тақиқланган соҳа кенглиги ( $E_g = 1,4$  эВ)  $x = 0,12$  бўлган таркибига тўғри келиши аниқланди. Бу эса, Шокли-Кейссер модели бўйича самарали қуёш элементлари олиш имконини беради.

### **SnSe ва $Zn_xSn_{1-x}Se$ юпка қатламларининг электрофизик хоссалари.**

Аксарият қуёш элементларининг солиштирма қаршилиги уларнинг фотоэлектрик хоссаларига катта таъсир кўрсатади. Солиштирма қаршилиги юқори бўлган юпка қатламли қуёш элементининг фойдали иш коэффициенти паст қийматга эга бўлади. Бунга сабаб юпка қатламлардан ташкил топган сендвич қуёш элементларида ток ўтиш механизми йўналиши тагликка перпендикулярдир. SnSe ва  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламлари кичик солиштирма электр қаршиликка эга бўлганлиги учун бу талабларга мос келади.

$Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма таркиби кенг тақиқланган соҳали компоненти томонига силжиганда ўтказувчанлик турида инверсия кузатилади. Бунда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма солиштирма электр ўтказувчанлигининг ўзгариши  $p$ -тип учун  $\sigma = 15$  (Ом·см)<sup>-1</sup> дан  $\sigma = 2 \cdot 10^{-2}$  (Ом·см)<sup>-1</sup> гача;  $n$ -тип учун эса  $\sigma = 1 \cdot 10^{-3}$  (Ом·см)<sup>-1</sup> дан  $\sigma = 1 \cdot 10^{-6}$ (Ом·см)<sup>-1</sup> гача бўлган ораликларда кузатилади. Солиштирма электр қаршиликнинг ортиши заряд ташувчи эркин электронлар концентрацияси камайиши билан изоҳланади (1-жадвал).

### **1-жадвал.**

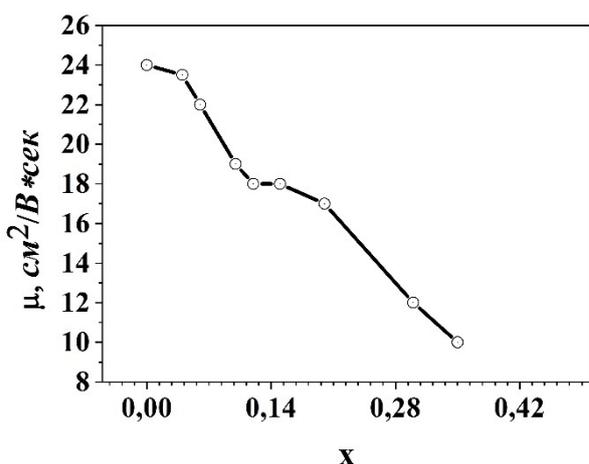
#### **$Zn_xSn_{1-x}Se$ қаттиқ қоришма юпка қатламларининг электрофизик параметрлари**

$Zn_xSn_{1-x}Se$	$x=0$	$x=0,04$	$x=0,06$	$x=0,08$	$x=0,2$	$x=0,3$	$x=0,55$
Ўтказувчанлик тури	$p$	$p$	$p$	$p$	$p$	$n$	$n$
Электрўтказувчанлик (Ом·см) <sup>-1</sup> , 300К	15	1,6	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Солиштирма қаршилик (Ом·см), 300К	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$	10	10	50	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^7$
Таглик ҳарорати $T_r$ , (°C)	550	550	550	550	550	550	550

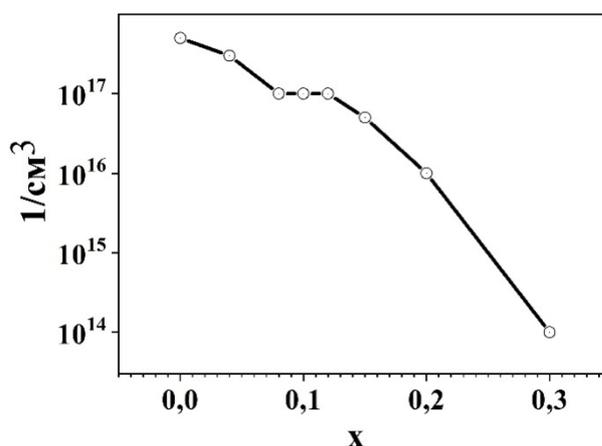
13-расмда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпка қатламлари асосий заряд ташувчилари ҳаракатчанлигининг қаттиқ қоришма таркибига боғлиқлиги келтирилган. Расмдан кўринадикки, заряд ташувчилар ҳаракатчанлиги  $\mu$  нинг қиймати  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма таркибида кенг тақиқланган соҳали компонент миқдорининг ўсиши билан камаяди, яъни  $x=0$  бўлганда  $24 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{сек})$ , ва  $x=0,3$  бўлганда эса  $10 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{сек})$  бўлади.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма таркибида “ $x$ ” нинг

қиймати ошиб бориши билан кристаллчалар ҳажмининг камайиши натижасида улар орасидаги чегараларо зичлик ошади, натижада кристаллчалар чегараларо зарядлар сочилиш марказларининг миқдори ортади, бу эса ўз навбатида асосий заряд ташувчилар ҳаракатчанлигини камайтиради. Заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги сочилиш механизми билан белгиланади. Мукаммал кристалларда макродефектлар концентрацияси паст бўлганлиги туфайли заряд ташувчиларнинг сочилиши эътиборга олинмайди. Аммо поликристалларда кристалчаларнинг чегараларо зичлиги зарядлар сочилиш механизмларига катта таъсир кўрсатади.

$Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларидаги асосий заряд ташувчиларнинг коваклар концентрацияси  $x=0$  бўлганда  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  дан,  $x=0,3$  бўлганда  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  гача камаяши кузатилади (14-расм). Бунга сабаб Zn атомининг бир қисми Sn атоми ўрнини олади, кейинги Zn нинг моляр улуши ортишида акцептор сатҳ берувчи тугунларо  $Se_i$  атомлари нуқсони билан реакцияга киришиб ZnSe тугунлари (фазалари) ҳосил қилади, рентгенфаза анализ натижаларидан ZnSe миқдорининг ўсишини кўриш мумкин.



13-расм. Асосий заряд ташувчилар ҳаракатчанлигини  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма таркибига боғлиқлиги



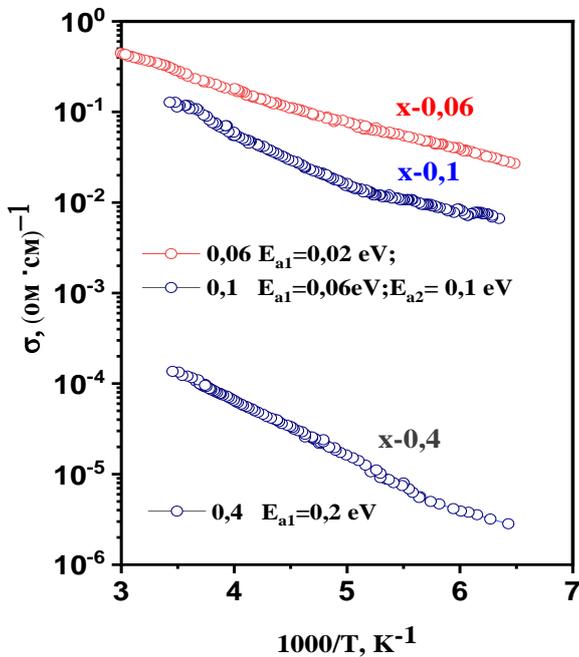
14-расм. Асосий заряд ташувчилари концентрациясини  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма таркибига боғлиқлиги

Бу тугунларо жойлашган селен атомлари ( $Se_i$ ) нуқсонининг концентрацияси камайиши, акцепторлар концентрациясининг камайишига олиб келади. Шу билан биргаликда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма таркиби кенг тақиқланган соҳали компонент томонга силжишида коваклар ва донорлар компенсацияси юзага келади.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  p-типдаги юпқа қатламларининг электрофизик катталиклари самарали қуёш элементларининг талабларига мос келиши, улар асосида арзон ва самарали қуёш элементларини олишга имкон беради.

15-расмда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларнинг электрўтказувчанлигининг ҳароратга боғлиқлиги  $\sigma(T)$  келтирилган. Ушбу боғлиқлик қуйидаги экспоненциал қонунга бўйсунди:

$$\delta = \delta_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (5)$$

Ковакли ўтказувчанликли  $p$ -типтаги қаттиқ қоришма таркиби  $x=0,06$  ва  $x=0,1$  бўлган қийматларда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламлар учун  $\Delta E$  активлашиш энергияларининг мос равишда  $\Delta E_1=E_v+0,02$  эВ ва  $\Delta E_1=E_v+0,06$  эВ,  $\Delta E_2=E_v+0,1$  эВ қийматлари аниқланди.



15-расм.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг логарифмик масштабдаги электр ўтказувчанлиги  $\sigma(T)$  ни ҳароратга боғлиқлиги

Донорли ўтказувчанликка эга бўлган  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламлар учун  $x=0,4$  қийматида  $E_a=E_c-0,2\pm 0,02$  эВ қийматга эга бўлган сатҳ мавжудлиги аниқланди. Ушбу активлашиш энергиялари акцептор сатҳ берувчи қалай вакансияси ( $V_{Sn}$ ) ҳамда тугунлараро селен ( $Se_i$ ) нуқсонларига тегишли эканлиги аниқланди. Бундан ташқари кристалл панжарада Sn атоми ўрнини Zn атоми эгаллаши ҳисобига  $Zn_{Sn}$  антитузилма нуқсони ҳосил бўлиши аниқланди. Қаттиқ қоришма таркиби  $x=0,4$  қийматида Zn нинг улуши ошиши натижасида Se дефектлари билан боғланиб  $ZnSe$  фазаларини ҳосил қилиши аниқланди. Бу эса донор сатҳ берувчи селен вакансияси ( $V_{Se}$ ) нуқсонлари концентрациясининг ортишига сабаб бўлади.

## ХУЛОСА

$Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг структуравий, морфологик, оптик ва электрофизик хоссаларига боғлиқ амалга оширилган тадқиқотларга асосан куйидаги хулосалар қилинди:

1. Кимёвий молекулалар дасталаридан ўтказиш усули орқали оҳак-натрийли шиша (SLG) сиртига юқори сифатли  $ZnSe$ ,  $SnSe$  ва  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма юпқа қатламларини ўстиришнинг технологик оптимал режимлари: таглик ҳарорати  $500^\circ C \div 600^\circ C$ , элемент манбалари ҳарорати  $ZnSe$  учун  $980^\circ C \div 1025^\circ C$ ,  $SnSe$  учун  $780^\circ C \div 840^\circ C$  ораликларида ўзгариши, ўсиш тезлиги  $0,1 \div 20$  Å/сек ва водород оқими  $W_{H_2}=10$  см<sup>3</sup>/мин тенг эканлиги аниқланди, шунингдек, синтез жараёни  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма таркиби  $ZnSe$  ва  $SnSe$  бирикмаларининг буғ босимлари нисбатига боғлиқлик қонунияти аниқланди.

2.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг ҳамма намуналарида микрокристаллчалар таглик сиртида юза бўйлаб тенг тақсимланиши, зич

жойлашганлиги, барча намуналар поликристалл структурага эга эканлиги,  $0 \leq x \leq 0,12$  ораликда кристаллчалар ўлчами  $5 \div 10$  мкм эканлиги,  $0,3 \leq x \leq 0,55$  ораликда эса 3 мкм гача камайиши, кристаллчалар шаклининг ўзгаргариши намуналарнинг таркибида  $ZnSe$  моляр миқдорининг ортиши билан изоҳланаши аниқланди.

3. Рентгенограмма таҳлили асосида  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма кристаллчалари асосан  $\langle h00 \rangle$  кристаллографик йўналишда ўсганлиги, рентгенограммада (111) ва (220) чўққилар интенсивлигининг ортиши поликристалл юпқа қатлам таркибида  $ZnSe$  моляр миқдорининг ортиши билан изоҳланган, қаттиқ қоришма таркиби ўзгаришига мос равишда орторомбик структура панжара доимийсининг ўзгариши, ҳамда  $2\theta = 21,4$  градус қайтиш бурчагидаги чўққи интенсивлигининг ортиши  $Zn_xSn_{1-x}Se$  қаттиқ қоришма ҳосил бўлганлигини тасдиқлаган.

4.  $0 \leq x \leq 0,3$  оралиғидаги қийматларда  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламлар ютилиш коэффиценти  $\alpha = 10^4 \div 10^5 \text{ см}^{-1}$  бўлган тўғри оптик ўтишларга эга эканлиги, юпқа қатламлар тақиқланган соҳа кенлиги уларни таркибига боғлиқ равишда  $E_g = 1,0 \div 2$  эВ ораликда ўзгариши, шунингдек, қуёш элементлари учун оптимал бўлган  $E_g = 1,4$  эВ тақиқланган соҳа кенлиги  $Zn_{0,12}Sn_{0,88}Se$  таркибли қаттиқ қоришма тегишли бўлиши аниқланди.

5.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг таркибида  $Zn/(Zn+Sn)$  компонентлар моляр нисбатининг қиймати ортиб бориши билан акцептор сатҳ берувчи тугунлараро жойлашган селен атоми нуқсонларининг концентрацияси камайиши ҳисобига солиштирма электр ўтказувчанлиги  $0 \leq x \leq 0,55$  интелдаги қийматларида (р-тип  $Zn_xSn_{1-x}Se$  учун,  $\sigma = 15$  ( $\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  дан  $2 \cdot 10^{-2}$  ( $\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  гача; n-тип  $Zn_xSn_{1-x}Se$  учун  $\sigma = 4 \cdot 10^{-3}$  ( $\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  дан  $10^{-6}$  ( $\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  гача), ва асосий заряд ташувчиларнинг концентрацияси ( $n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$  дан  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  гача) ўзгаришлари аниқланди.

6.  $Zn/(Zn+Sn)$ нинг компонентлар моляр нисбати ортиб бориши билан кристаллчаларнинг чегаралараро сочилиш марказлари миқдори ортиши натижасида асосий заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги  $0 \leq x \leq 0,3$  ораликдаги қийматларида  $\mu = 24 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$  дан  $10 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$  гача камайиши аниқланди.

7. Диссертация ишининг натижалари  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламлар асосида арзон, экологик тоза ва самарали қуёш элементлари олиш ва юпқа қатламли қуёш элементларини яратиш учун янги имкониятлар беради.



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

---

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**ЙУЛДОШОВ РУХИДДИН ТОЛИБОВИЧ**

**СТРУКТУРНЫЕ, МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК  $Zn_xSn_{1-x}Se$**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

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

**Ташкент – 2023**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2022.1.PhD/FM283**

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте АН РУз НПО «Физика-Солнце»

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

**Научный руководитель:**

**Разыков Такхиржан Муталович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич**  
доктор физико-математических, профессор

**Юлдашев Носиржон Хайдарович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:**

**Ташкентский государственный технический университет**

Защита диссертации состоится «\_\_\_» «\_\_\_\_\_» 2023 г. в \_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте Физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г.Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871)248-79-94, факс: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz (зал заседаний НИИ ФПМ при НУУз).

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

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

(реестер протокола рассылки № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2023 г.).

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

**Ж.Ж. Хамдамов,**  
Ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
доктор философии по ф.-м.н. (PhD), с.н.с.

**Н.А. Тургунов,**  
Председатель Научного семинара  
при Научном совете по присуждению  
ученых степеней, д.ф-м.н., доцент

## ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии)

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире особое значение придается вопросам широкого использования возобновляемых источников энергии, сохранению углеводородных топливно-энергетических ресурсов и их рационального использования. В настоящее время в развитых странах мира производство электроэнергии из возобновляемых источников растет на 7% в год, из них доля энергии, получаемая от солнечных модулей, составляет 5%. К 2030 году более 60% производства будет приходиться на возобновляемые источники энергии. В связи с этим, в настоящее время солнечные батареи, на основе материалов Si,  $\alpha$ -Si, CdTe, Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub>, получили широкую коммерциализацию, и, в то же время, благодаря развитию солнечных элементов на основе новых материалов, уделяется большое внимание удешевлению и повышению эффективности солнечных модулей в будущем<sup>1</sup>.

Во всем мире, с целью повышения качества солнечных моделей проводимые исследования направлены на использование, в качестве поглощающего базового слоя тонкопленочных солнечных элементов, более дешевых и нетоксичных новых материалов, взамен существующих<sup>2</sup>. Эффективность солнечных элементов на основе тонких пленок, имеющих ширину запрещенной зоны в диапазоне 0,87÷1,7 эВ, полученных различными методами в научных центрах, с каждым годом увеличивается.

В Республике реализуются масштабные мероприятия в области исследований по разработке новых технологий и методов, способствующих повышению эффективности и широкому внедрению и использованию солнечной энергии. В этом отношении, в стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы, поставлены задачи, в том числе «..бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией, активное внедрение технологий «Зелёной экономики» во все сферы жизни, увеличение энергоэффективности экономики на 20 процентов»<sup>3</sup>. Для выполнения поставленных задач, в частности, большое научное значение имеет строительство новых производств на основе солнечной энергии, в том числе создание новых полупроводниковых материалов твердых растворов с электрофизическими свойствами, необходимыми для разработки новых типов солнечных элементов. С этой точки зрения, полупроводниковые тонкие пленки на основе Zn<sub>x</sub>Sn<sub>1-x</sub>Se, состоящие из компонент, имеющих малую степень вредности, а также ввиду их оптимальных оптических и фотоэлектрических свойств, считаются одним из перспективных и важных

---

<sup>1</sup>Martin A. Green, Ewan D. Dunlop, Jochen Hohl-Ebinger, Masahiro Yoshita, Nikos Kopidakis, Xiaojing Hao. Solar cell efficiency tables//Prog Photovolt Res Appl. 2020.pp. 629–638

<sup>2</sup>T.M. Razykov, C.S. Ferekides,D.Morel,E.Stefanakos,H.S.Ullal, H.M. Upadhyaya. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects//Solar Energy. 2011. V. 85. pp.1580–1608

<sup>3</sup>Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 « О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 — 2026 годы».

материалов для использования в производствей дешевых и экологически чистых солнечных элементов в большом объеме.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, изложенных в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 года», постановлении Президента Республики Узбекистан «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года № ПП-5032, и Постановлении Кабинета министров Республики Узбекистан за № 452 «О мерах по ведению государственного учета установок возобновляемых источников энергии и вырабатываемой ими энергии» от 23 июля 2020 года, а также в других нормативно-правовых документах в отношении данных отраслей.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан ППИ-3 «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машина- и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

**Степень изученности проблемы.** По изучению свойств твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  в мире проводилось множество научных исследований. К примеру, учеными института Физики твердых тел Китайской Народной Республики J.C.Li, D.Li, X.Y.Qin и J.Zhang<sup>4</sup> проводились научные исследования по изучению термоэлектрических свойств твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$ . В этом научно исследовательском центре получены твердые растворы  $Zn_xSn_{1-x}Se$  с улучшенными электрофизическими параметрами путем добавления элемента Zn в соединение SnSe. Учеными лаборатории Наноисследований университета Нигерии I. Ikhioya, D. Lucky Okoli<sup>5</sup> и другими проводились научные исследования пленок ZnSnSe. В частности, введением примесей элемента Sn в тонкий слой ZnSe, добились получения тонких пленок с шириной запрещенной зоны в 2 эВ.

Также, разработке и усовершенствованию технологий получения пленок твердых растворов для солнечных элементов посвящены работы известных ученых Узбекистана. В результате, научно-исследовательских работ проведённых Т.М. Разыковым, А. Мирсагатовым, А.С. Саидовым, М.С. Саидовым, А. Юсуповым разработана новая технология получения поликристаллических тонких пленок на основе двоичных и многокомпонентных халкогенидных полупроводников.

Однако, до сих пор в достаточной степени не решены задачи определения технологических режимов получения пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  из бинарных соединений SnSe и ZnSe, получения пленок твердых растворов для

---

<sup>4</sup>J.C. Li, D. Li, X.Y. Qin, and J. Zhang. Enhanced thermoelectric performance of p-type SnSe doped with Zn // Scripta Materialia. 2017.V.126. pp.6–10.

<sup>5</sup>I. Ikhioya Lucky, D. N Okoli and A. J Ekpunobi Influence of pH on Tin Doped Zinc Selenide (SnZnSe) via Electrochemical Deposition Technique // International Journal of Chem Tech Research. 2019. V.12 pp.200-211.

солнечных элементов с оптимальными значениями ширины запрещенной зоны, путем изменения ширины запрещенной зоны пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , изучения их электрофизических свойств, концентрации и подвижности основных носителей заряда.

**Связь темы диссертации с тематическими планами научно-исследовательских работ.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ фундаментальных проектов Физико-технического института по теме под номером ФА-А3-Ф003 «Исследование основ и создание новых, дешевых и эффективных тонкопленочных солнечных элементов на основе  $Zn_xSn_{1-x}Se$ » (2017-2020 гг.); ФПФИ «Исследование физических свойств пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  для получения новых и дешевых тонкопленочных солнечных элементов» (2016-2017 гг.).

**Целью исследования** является определение оптимальных технологических режимов химического молекулярного пучкового осаждения, позволяющих получать высококачественные пленки твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  с физическими и оптическими свойствами, отвечающими требованиям эффективным солнечным элементам, изучение закономерностей взаимосвязи их структурных, морфологических, оптических и электрофизических свойств с термодинамическими величинами.

**Задачи исследования:**

определение оптимальных технологических режимов получения высококачественных пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  методом химического молекулярного пучкового осаждения;

изучение влияния технологических параметров (скорости испарения, температур испарения и подложки, скорости роста) на состав и физические свойства пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  в процессе синтеза;

проведение рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследований пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , выращенных при различных температурах подложки (500÷600°C) и с разным составом;

определение оптических свойств (коэффициентов оптического пропускания и поглощения) пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ ;

определение электрофизических свойств (типа проводимости, удельного сопротивления, концентрации и подвижности основных носителей заряда) пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ .

**Объектом исследования** выбраны пленки ZnSe, SnSe и  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , полученные на поверхности известково-натриевого стекла методом химического молекулярного пучкового осаждения.

**Предметом исследования** являются технологические процессы получения пленок ZnSe, SnSe,  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , а также происходящие в них структурные, морфологические, оптические и электрофизические явления.

**Методы исследований** метод химического молекулярного пучкового осаждения, метод дифракции рентгеновского излучения, атомно-силовой и

сканирующей электронной микроскопии, подвижности носителей заряда измерены методом Холла, анализа вольт-амперных характеристик.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

впервые определены оптимальные технологические режимы метода химического молекулярного пучкового осаждения выращивания высококачественных поликристаллических пленок твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , а также разработаны методы управления составом данного твердого раствора на основе закономерностей связи состава твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$  относительно давления паров соединений  $ZnSe$  и  $SnSe$ ;

определен рост микрокристаллитов пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , плотноупакованных, в основном в направлениях (h00) и имеющих величины  $5 \div 10$  мкм. при температуре подложки  $550$  °С, а также показано, что повышение пика интенсивности, при угле отражения  $2\theta = 21,4$  и изменение постоянных решеток структуры, подтверждает образование твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$ ;

выявлено, что коэффициент поглощения света полученных пленок твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$  равен  $\alpha = 10^4 \div 10^5$  см<sup>-1</sup>, что соответствует прямозонным оптическим переходам и установлено, что изменение молярного соотношения компонентов  $Zn/(Zn+Sn)$  от 0 до 0,3 приводит к изменению ширины запрещенной зоны от 1,0 до 2 эВ, а также впервые показано, что твердый раствор с составом  $Zn_{0,12}Sn_{0,88}Se$  имеет оптимальную для солнечных элементов ширину запрещенной зоны 1,4 эВ;

показано, что уменьшение удельной электропроводности пленок от  $\sigma = 15$  (Ом·см)<sup>-1</sup> до  $4 \cdot 10^{-3}$  (Ом·см)<sup>-1</sup> и концентрации основных носителей заряда от  $n = 10^{17}$  см<sup>-3</sup> до  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>, при увеличении количества Zn в интервале  $0 \leq x \leq 0,3$  состава твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , связано с уменьшением дефектов атомов Se, расположенных в междоузлиях, дающих акцепторные уровни;

выявлено, что уменьшение подвижности основных носителей заряда от  $\mu = 24$  см<sup>2</sup>/(В·сек) до  $10$  см<sup>2</sup>/В·сек с повышением значения молярного соотношения компонентов  $Zn/(Zn+Sn)$  в пределах от 0 до 0,3 связано с увеличением количества центров микрокристаллического межграницного рассеяния.

**Практические результаты исследования:**

разработаны технологические режимы получения высококачественных тонких поликристаллических полупроводниковых пленок разного состава методом химического молекулярного пучкового осаждения;

определено изменение электрофизических и оптических величин тонких пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , отвечающих требованиям к параметрам дешевых и эффективных солнечных элементов.

**Достоверность результатов исследований** обеспечивается использованием современных методов измерения физики полупроводников и соответствием полученных научных результатов с результатами работ, опубликованных в ведущих журналах, соответствием результатов, полученных на основе высокочувствительных технологий с теоретическими

данными, интерпретацией полученных результатов в рамках апробированных физических моделей.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования объясняется тем, что знание закономерностей взаимосвязи структурных, оптических и электрофизических свойств пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  с термодинамическими параметрами способствуют расширению физических представлений о характеристиках тонких пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ .

Практическая значимость результатов исследования объясняется тем, что результаты диссертации использованы при разработке технологий изготовления дешевых, экологически чистых и эффективных солнечных элементов, и модулей на основе пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ .

**Внедрение результатов исследования.** На основе исследования структурных, оптических и электрофизических свойств пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ :

Получены результаты, исследований режимов испарения тонкого слоя  $SnSe$ , входящего в состав пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , а также изучены их структурные, морфологические и оптические свойства, на использование которых ссылаются в зарубежных научных журналах (Royal society of chemistry advances 2020, 10, 16749, IF: 3.12, Solar Energy Materials and Solar Cells, 221, 110919, 2021, IF: 6.98; Vacuum, 177, 2020, 109343, IF: 2.9; Solar Energy, 186, 2019, 29–36, IF: 5.7) для улучшения электрофизических и оптических свойств тонких пленок. Использование научных результатов, на которые ссылаются в приведенных научных работах, способствует увеличению электрофизических параметров, в частности, подвижности пленок  $SnSe$  и дает возможность повышения эффективности солнечных элементов на их основе;

на основе использования при выполнении научно-технических заданий проекта под номером MRB-AN-2019-17, на тему: «Исследование широкополосных композитных обратно отражающих покрытий для солнечных элементов», разработанных в рамках диссертационной работы технологических режимов, впервые были получены  $Zn_xSn_{1-x}Se/ZnO:Al$  гетероструктуры и исследованы их электрофизические и фотоэлектрические свойства (Справка за № 2/1255-3066 от 8 ноября 2021 года Академии Наук Республики Узбекистан). Использование научных результатов, на основе исследованных в рамках проекта материалов, дало возможность получения гетероструктуры  $Zn_xSn_{1-x}Se/ZnO:Al$  с малой плотностью дефектов на границе *p-n*-перехода и высококачественных тонкопленочных солнечных элементов.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 4 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов.** По теме диссертации опубликовано всего 13 научных трудов, из них 5 научных статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 110 наименований и 6 приложений. Текст диссертации содержит 117 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и необходимость проведенных исследований, показано их соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий нашей республики, раскрыта степень изученности проблемы, описаны цели и задачи, объект, предмет и методы исследования, представлена краткая информация по научной новизне исследований, внедрению результатов исследований в практику и апробации, объёму и структуре диссертации.

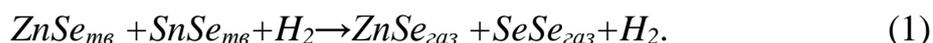
**В первой главе**, под названием «**Физические свойства соединений  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{IV}B^{VI}$  и способы получения пленок на их основе**», приводится обзор литературы о бинарных полупроводниковых соединениях  $A^{II}B^{VI}$  и  $A^{IV}B^{VI}$  и их свойствах, в частности, об основных физико-химических свойствах пленок ZnSe и SnSe. Приведен анализ литературных данных по получению и использованию пленок указанных соединений. Рассмотрены преимущества и недостатки технологических методов получения тонких пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  и подобных им слоев. На основе анализа экспериментальных и теоретических данных были поставлены цели и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава «Технология получения пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  и методы комплексного исследования их физических свойств»**, посвящена получению пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , методом химического молекулярно пучкового осаждения, а также комплексному исследованию их физических свойств. Установлены оптимальные технологические режимы получения качественных пленок ZnSe, SnSe и  $Zn_xSn_{1-x}Se$  на поверхности известково-натриевого стекла (SLG-soda-lime glass) методом химического молекулярно пучкового осаждения (ХМПО). Причем, температура подложки находилась в интервале  $500^{\circ}C \div 600^{\circ}C$ , а температура источников элементов варьировалась в диапазонах: для ZnSe –  $980^{\circ}C \div 1025^{\circ}C$ , а для SnSe –  $780^{\circ}C \div 840^{\circ}C$ ; скорость роста составляла  $0,1 \div 20 \text{ \AA/сек}$ , поток водорода  $W_{H_2}=10 \text{ см}^3/\text{мин}$ . В ходе синтеза изучались закономерности связи между физическими свойствами термодинамических величин (скорость испарения, температура испарения и основания, скорость роста) тонких пленок различного состава  $Zn_xSn_{1-x}Se$ . Показан механизм образования и роста тонких пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ .

Процесс получения пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  методом ХМПО осуществлялся следующим образом: в каждый из отдельных контейнеров были помещены соединения SnSe стехиометрического состава и порошок ZnSe. Затем система была запущена в рабочий режим, и введен газообразный водород для удаления из нее атмосферных загрязнителей. Далее была подключена внешняя печь реакционной камеры. При достижении температуры подложки

требуемого значения, подключались индивидуальные печи нагрева контейнеров соединений SnSe, ZnSe и доводились до необходимой температуры испарения. Продолжительность процесса выращивания зависела от требуемой толщины пленок и варьировалась в интервале от 30 до 60 минут.

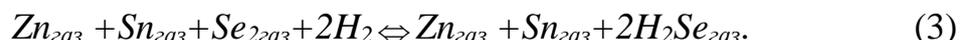
Физико-химические процессы, протекающие при синтезе пленок твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  в потоке водорода, могут быть описаны в следующем виде: при температуре испарения ZnSe и SnSe переходят в газовую фазу:



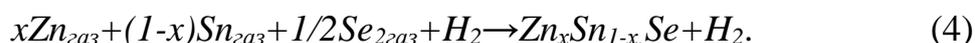
Затем, в газообразной фазе, ZnSe и SnSe разлагаются на цинк, олово и селен:



Освободившийся газообразный селен мгновенно вступает в реакцию с водородом, образуя селено-водород:



Пары цинка, олова и селено-водорода в потоке газа-носителя (водорода) транспортируются в зону осаждения, где температура ниже температуры зоны испарения. При этом в зоне осаждения происходит разложение селено-водорода и реакция (3) протекает в обратном направлении. В результате взаимодействия цинка, олова и селена, на подложке образуется тонкая пленка твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$ :

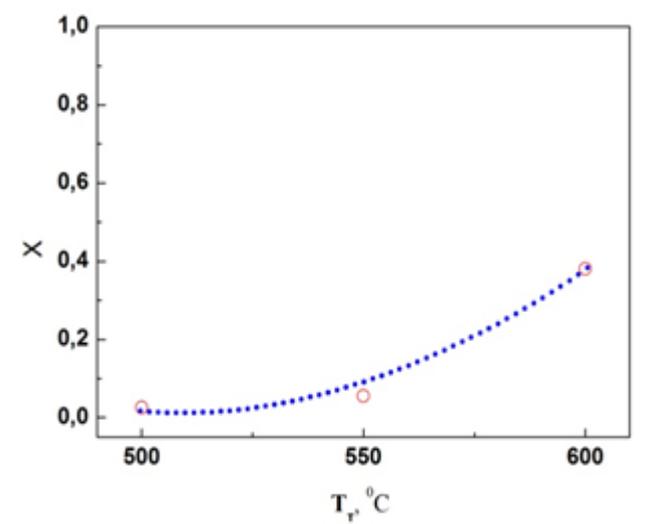


Состав твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  модифицировали, регулируя давление паров цинка, олова и селена, что достигалось увеличением или уменьшением температуры испарения источников ZnSe и SnSe. Получены тонкие пленки  $Zn_xSn_{1-x}Se$  в диапазоне составов  $0 \leq x \leq 0,55$  с составом  $x$  в диапазоне.

Для исследования физических свойств полученных пленок ZnSe, SnSe,  $Zn_xSn_{1-x}Se$  были использованы рентгеноструктурные и электронно-микроскопические методы, проанализированы полученные вольтамперные и температурные зависимости проводимости, а также методы оптической спектроскопии, метод Холла и прецизионные микроскопические методы.

**Глава 3**, под заголовком «**Исследование морфологических и структурных свойств пленок SnSe и  $Zn_xSn_{1-x}Se$** », посвящена изучению морфологических и структурных свойств пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , являющихся основными свойствами этих пленок, подлежащих изучению. Также в этой главе показана зависимость структурных свойств постоянных решеток пленок твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  от температуры подложки и состава пленок.

Состав пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  определялся с помощью энергодисперсионного рентгеновского анализатора марки EDX (Oxford Instrument) - Aztec Energy Advanced X-act SDD. На рис. 1 показана зависимость состава пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  от температуры подложки. Как видно из рисунка, с увеличением температуры подложки наблюдается увеличение количества атомов Zn в составе твердого раствора. Это можно объяснить следующим образом: с повышением температуры подложки, состав пленок изменяется в сторону увеличения количества широкозонной компоненты ZnSe. Несмотря на то, что парциальное давление паров олова выше, чем парциальное давление паров цинка, сублимация атомов цинка преобладает при повышении температуры. В то же время, пары олова, не успевая сконденсироваться, удаляются из зоны выращивания потоком водорода. И, наоборот, при понижении температуры подложки, конденсация паров олова становится преобладающей.



**Рис.1. Зависимость состава пленок твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  от температуры подложки**

А также, пары цинка сублимируются в более высокотемпературной области реактора, не достигая подложки, и поэтому состав пленок смещается в сторону увеличения количества узкозонной компоненты SnSe.

Морфологические исследования пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  проводились для различных составов и температур подложки с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM-EVO MA 10. На рис.2 показаны изображения морфологии образцов, выращенных при различных температурах подложки, снятые

на сканирующем электронном микроскопе. Во всех пленках  $Zn_xSn_{1-x}Se$  микрокристаллы распределены равномерно по всей поверхности подложки. Как видно, микроструктура образцов (форма и размер зерен) зависит от температуры подложки. Форма зерен с повышением температуры подложки оставались без изменений, а их размеры увеличились. Было замечено, что форма зерен всех образцов, выращенных при температурах подложки 500°C, 550°C, имела плотноупакованную морфологию. Выращенных при температуре подложки 550 °C, увеличились до 8–20 мкм с более плотноупакованной структурой. При температуре подложки 600 °C, размеры зерен уменьшились и между зернами появлялись пустоты. Это связано с увеличением содержания ZnSe в составе тонкопленочного поликристаллического  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , что приводит к образованию широкозонных отдельных атомных узлов ZnSe, влияющих на формирование твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$ .

На рис.3 приведены результаты исследований на атомно-силовом микроскопе поверхности пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , полученных на подложках с температурами 550 °С и 600 °С. Из рисунка видно, что при температуре подложки 550 °С, зерна равномерно распределяются по поверхности пленки. У пленок, полученных при температуре подложки 600 °С, размеры зерен большие и между ними имеются большие отверстия. Следовательно, можно заключить, что результаты исследований, полученные на сканирующем микроскопе, подтвердились аналогичными результатами, полученными на атомно-силовом микроскопе.

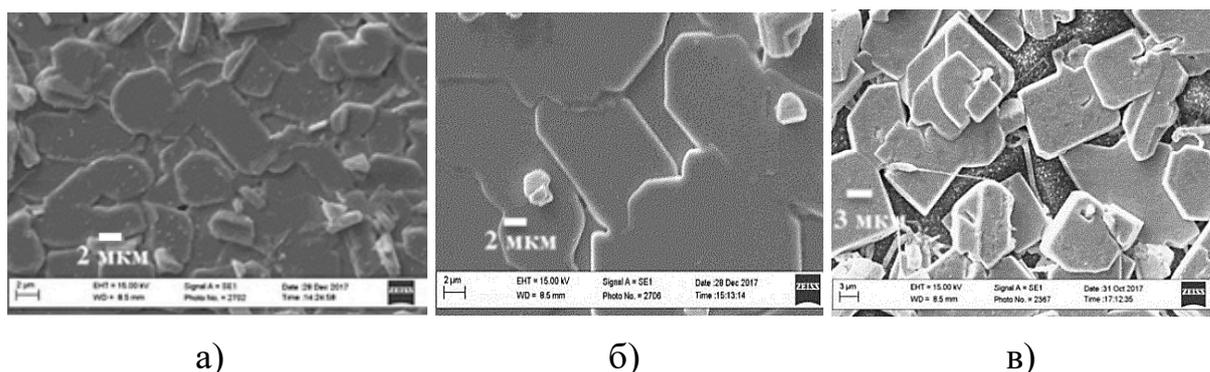


Рис.2. Морфология пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , полученных на сканирующем электронном микроскопе при различных температуры подложки: а)  $T_p = 500\text{ °C}$  б)  $T_p = 550\text{ °C}$  в)  $T_p = 600\text{ °C}$

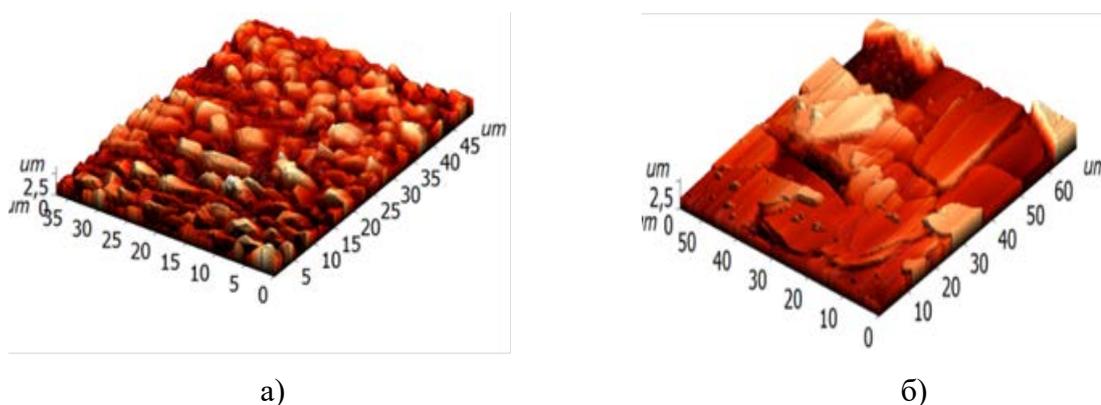
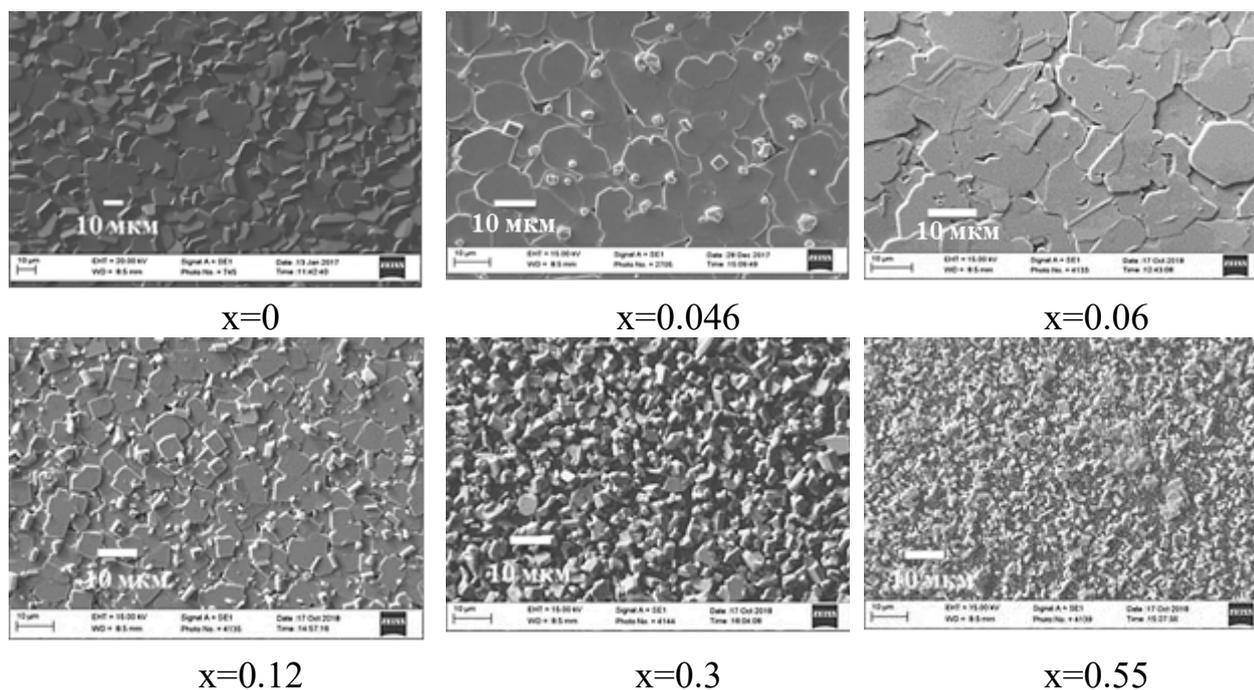


Рис.3. Морфология пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , полученных методом атомно-силовой микроскопии при различных значениях температуры подложки: а)  $T_p = 550\text{ °C}$  б)  $T_p = 600\text{ °C}$

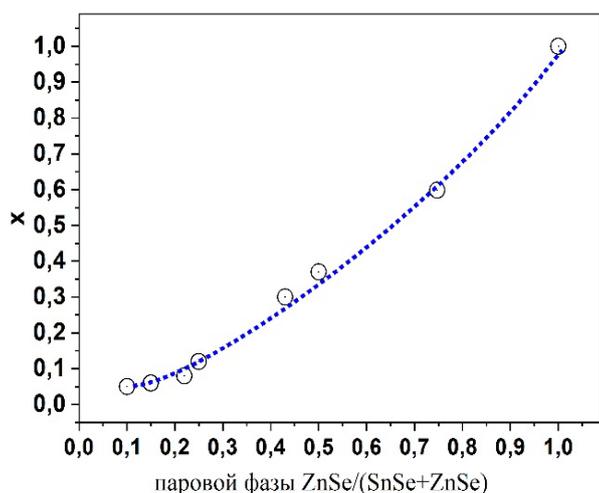
На образцах пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , полученных при температурах подложки 550°С, зерна плотно упакованы и отверстий не обнаружено.

Как видно из рис. 4, микроструктура образцов (форма и размер зерен) зависит от соотношения соединений  $ZnSe$  и  $SnSe$  в паровой фазе. То есть, при изменении соотношения  $ZnSe/(SnSe+ZnSe)$  в паровой фазе, изменяются состав выращенных пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , а также форма и размеры зерен. Форма зерен образцов, выращенных в интервале составов  $0 \leq x \leq 0,12$ , имеет уплотненный вид и их размеры составляют 2÷10 мкм. Дальнейшее увеличение количества  $Zn$  в составе пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , полученных с

составом  $0,3 \leq x \leq 0,5$ , привело к уменьшению размера зерен. Этот факт указывает на то, что энергия образования решетки компоненты ZnSe выше, чем у SnSe.



**Рис.4. Морфология пленок твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$**



**Рис.5. Зависимость состава пленок твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  от отношения паровой фазы  $ZnSe/(SnSe+ZnSe)$**

На рис. 5 показана зависимость состава пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  от отношения  $ZnSe/(SnSe+ZnSe)$  в паровой фазе. Из этого видно, что управляя парциальным давлением паров SnSe и ZnSe, можно регулировать состав твердого раствора. Это указывает на то, что При изменении состава пленок твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$  изменяются их морфология, оптика и электрофизические свойства. Следовательно, При изменении состава пленок твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$  можно получить света поглощающий слой обладающий

электрофизическими и оптическими параметрами, необходимыми для создания эффективного солнечного элемента, изменяя состав твёрдого раствора. Также из рис. 5 видно, что с увеличением «x» наблюдается увеличение содержания Zn в составе твердого раствора. Это объясняется следующим образом. По мере увеличения температуры тигля, на котором размещен содержащего селенид цинка, приводит к линейному увеличению количество широкозонных компонент, что вызывает изменение состава пленок.

Также, в этой главе представлены результаты рентгеновских исследований пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  различного состава. На рис. 6 приведены рентгенограммы пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , полученных при различных значениях температуры подложки.

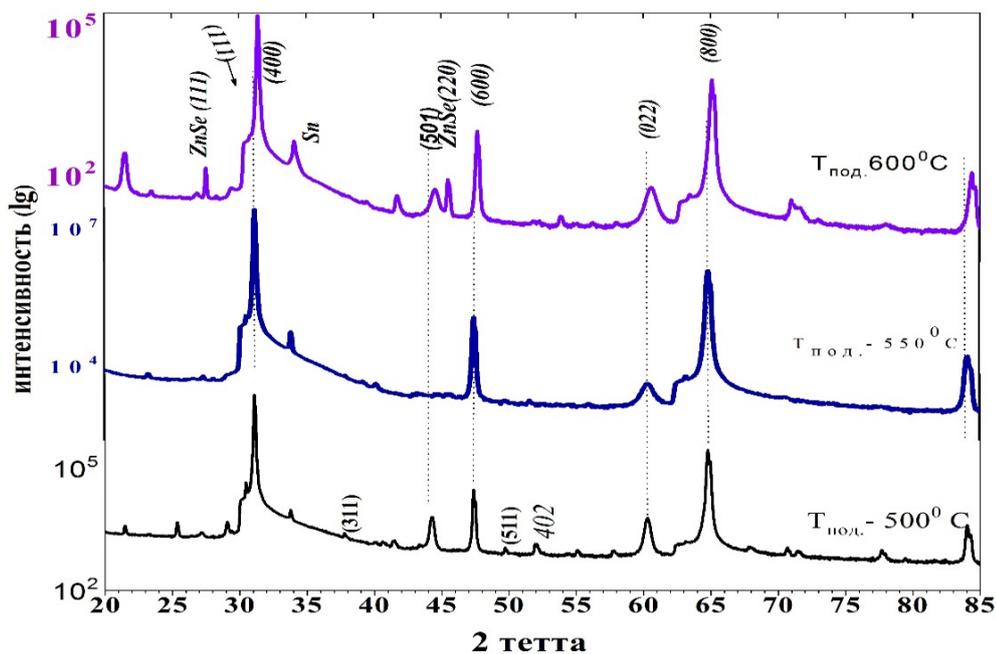


Рис.6. Рентгенограммы пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  при различных температуры подложки

Плѐнки твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  имеют орторомбическую структуру и основные пики соответствуют плоскостям (400), (600) и (800). Из рентгенограмм видно (рис.6.), что существуют пики, наблюдаемые в пленках  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , также имеются пики, соответствующие фазам SnSe и ZnSe. Также, при  $34,75^\circ$ , обнаружен пик с низкой интенсивностью, свидетельствующий о формировании фазы Sn.

Параметры решетки пленок твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , полученных при температуре подложки  $500^\circ C$ , имели следующие значения:  $a = 11,487 \text{ \AA}$ ,  $b = 4,215 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,471 \text{ \AA}$ ; а при  $550^\circ C$   $a = 11,475 \text{ \AA}$ ,  $b = 4,214 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,473 \text{ \AA}$  и при  $600^\circ C$ , соответственно,  $a = 11,40 \text{ \AA}$ ,  $b = 4,205 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,485 \text{ \AA}$ . Из этого можно сделать вывод, что для твердых растворов пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  значения параметров кристаллической решетки « $a$ » и « $b$ » уменьшаются с увеличением температуры подложки, а значения « $c$ » увеличиваются. Это означает, что с повышением температуры подложки, увеличение в составе мольного соотношения Zn влияет на изменение параметров решетки. Увеличение мольного соотношения Zn в составе происходит за счет повышения температуры подложки, что влияет на изменение параметров решетки. Вместе с тем, на рентгенограмме наблюдается сдвиг пиков. На рис. 7 показан пик (400). На рентгенограмме обнаружен сдвиг пика в сторону увеличения максимума  $2 \text{ тета}$ , что обусловлено уменьшением расстояния между плоскостями и соответственно, изменением параметров решетки.

На рис. 8 представлены рентгенограммы пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ . Пики, соответствующие кристаллографическим плоскостям (400), (600) и (800) на рентгенограмме, являются основными. Наряду с основными пиками указанных плоскостей, на рентгенограммах образцов также присутствовали пики, соответствующие плоскостям (100), (111), (311) и (220), интенсивность которых была меньше по сравнению с интенсивностью пиков (400), (600) и (800).

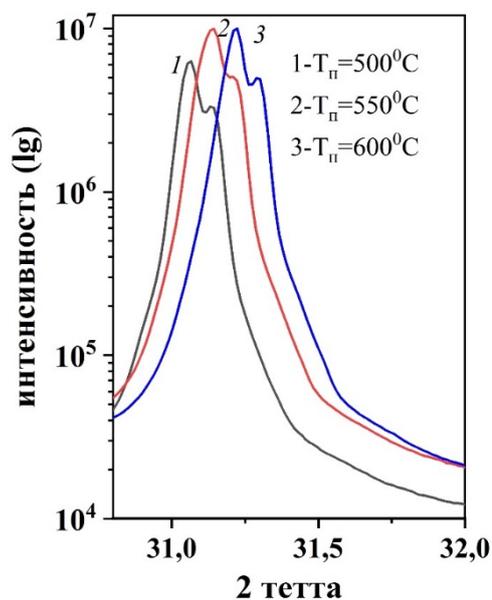


Рис.7. Сдвиг пика (400) пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  на рентгенограмме.

значений постоянной кристаллической решетки образцов являются доказательством того, что образуются тонкие пленки твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$ .

Заменение атома Sn атомом Zn в кристаллической решетке твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  приводит к изменению расчетных значений постоянной кристаллической решетки. Это происходит вследствие того, что ковалентный радиус атома  $Zn^{2+}$  (1,31 Å) относительно меньше ковалентного радиуса  $Sn^{2+}$  (1,41 Å).

Увеличение молярного содержания Zn в твердом растворе, на рентгенограмме, а также увеличение интенсивности пика при  $2\theta = 21,4^\circ$ , небольшое отклонение пиков интенсивности в сторону увеличения  $2\theta$  по закону Вегарда (рис.9) и изменение

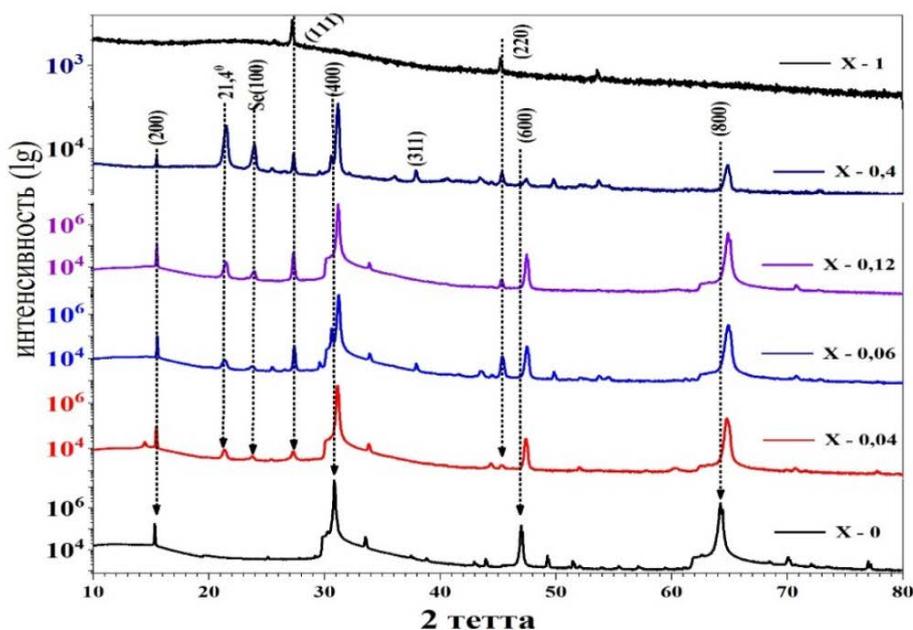


Рис.8. Рентгенограммы пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  при различных значениях  $x$

Значения «*a*» и «*b*» параметров кристаллической решетки пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  уменьшаются с увеличением содержания Zn атомов, а «*c*» увеличивается (рис.10). Все пики сравнивались с дифракционными пиками, соответствующими базовым диаграммам JCPDS 01-089-0233, 00-037-1463, 86-2246.

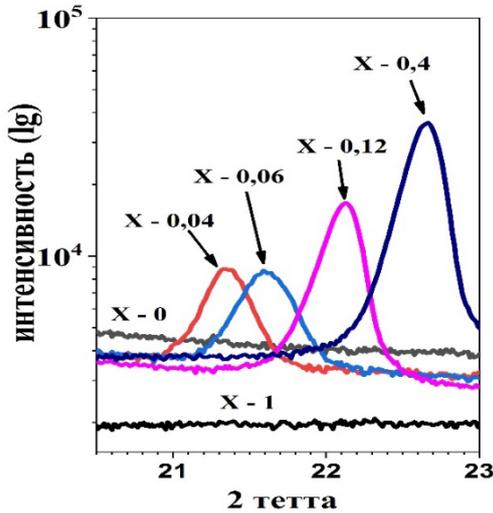


Рис. 9. Сдвиги пика, находящегося на  $2\theta = 21,4^\circ$

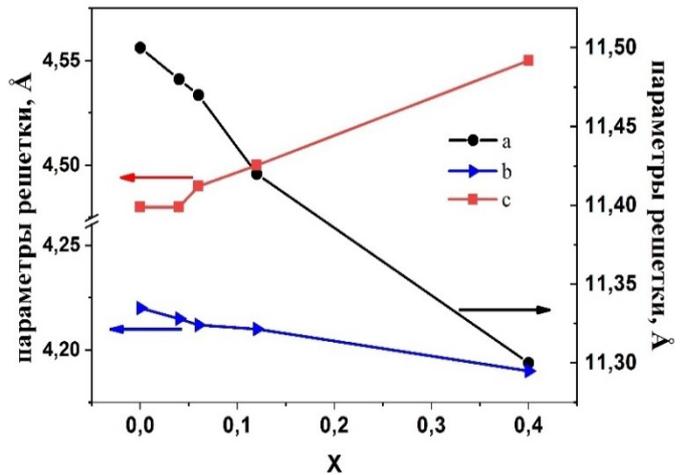


Рис.10. Зависимость параметров решетки пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  от их состава

В четвертой главе, озаглавленной «**Оптические и электрофизические свойства пленок SnSe и  $Zn_xSn_{1-x}Se$** » изучались оптические и электрофизические свойства пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  различного состава. С целью определения коэффициента поглощения света и соответствии с шириной запрещенной зоны были исследованы оптические свойства полученных пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  различного состава.

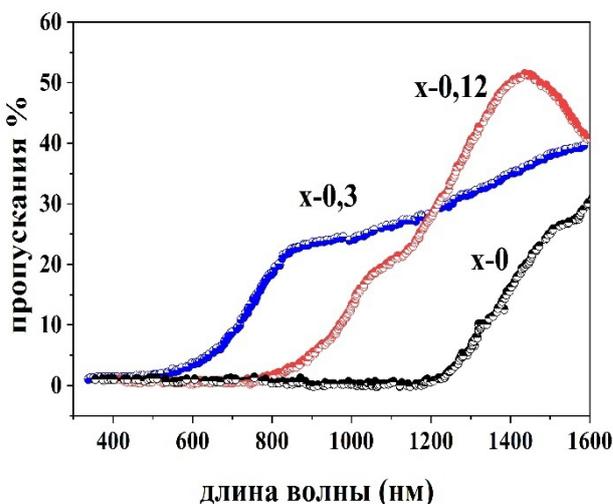


Рис.11. Зависимость спектра пропускания света пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  от длины волны

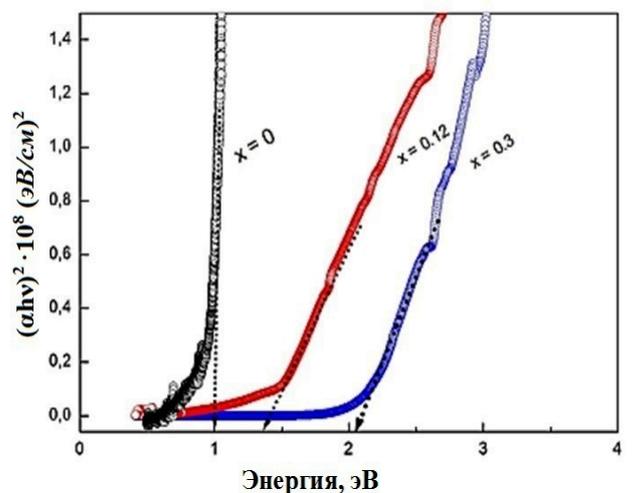


Рис. 12. Спектры поглощения пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  различного состава

Как видно из рис. 11, коэффициент поглощения тонких слоев  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , рассчитанный из зависимости коэффициента пропускания от длины волны света, вблизи границы поглощения, оказался равным  $10^5 \text{ см}^{-1}$ . Это самый высокий показатель для поглощающего слоя тонкопленочных солнечных элементов. Анализ функций  $(ahv) n = f(hv)$  показывает, что наиболее типичными для полученных материалов являются прямозонные переходы со следующей оптической шириной запрещенной зоны:  $E_g = 1.0$  эВ для SnSe,  $E_g = 1,4$  эВ для пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  с составом  $x = 0,12$  и  $E_g = 2,0$  эВ для состава  $x = 0,3$ , соответственно (рис.12). Также установлено, что оптимальная ширина запрещенной зоны ( $E_g = 1,4$  эВ) тонких пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  соответствует составу  $x = 0,12$ . Это позволяет получить эффективные солнечные элементы по модели Шокли-Кейссера.

**Электрофизические свойства пленок SnSe и  $Zn_xSn_{1-x}Se$ .** Для изготовления солнечных элементов подходят пленки с малым удельным сопротивлением. Последовательное сопротивление большинства солнечных элементов оказывает большое влияние на их фотоэлектрические свойства. КПД тонкопленочного солнечного элемента с большим последовательным сопротивлением будет низким. Это связано с тем, что в солнечных элементах типа «сэндвич», состоящих из пленок, направление механизма передачи тока перпендикулярно подложке. Пленки SnSe и  $Zn_xSn_{1-x}Se$  удовлетворяют эти требованиям, поскольку имеют низкое электрическое сопротивление.

Так, при сдвиге состава твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$  в сторону широкозонной компоненты, наблюдается проводимость инверсионного типа. Удельная электропроводность твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$  колеблется в пределах от  $\sigma=15 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$  до  $\sigma=2\cdot 10^{-2} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$  для  $p$ -типа; Для  $n$ -типа наблюдалось изменение в пределах от  $\sigma=1\cdot 10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$  до  $\sigma=1\cdot 10^{-6} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ . Увеличение удельного сопротивления объясняется уменьшением концентрации свободных носителей заряда (табл. 1).

Таблица 1.

Электрофизические параметры пленок твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$

$Zn_xSn_{1-x}Se$	$x=0$	$x=0,04$	$x=0,06$	$x=0,08$	$x=0,2$	$x=0,3$	$x=0,55$
Тип проводимости	$p$	$p$	$p$	$p$	$p$	$n$	$n$
Электропроводность $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ , при 300К	15	1,6	$10^{-1}$	$10^{-1}$	$2\cdot 10^{-2}$	$1\cdot 10^{-3}$	$1\cdot 10^{-6}$
Удельное сопротивление $(\text{Ом}\cdot\text{см})$ , при 300К	$6\cdot 10^{-2}$	$5\cdot 10^{-1}$	10	10	50	$2\cdot 10^4$	$5\cdot 10^7$
Температура подложки $T_{\text{п}} (\text{°C})$	550	550	550	550	550	550	550

На рисунке 13 представлена зависимость подвижности основных носителей заряда пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  от состава твердого раствора. Как видно из рисунка, величина подвижности  $\mu$  носителей заряда уменьшается с увеличением молярного содержания широкозонной компоненты в твердом растворе  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , т.е. она составляет  $24 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{сек})$  при  $x = 0$ , и  $10 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{сек})$  при  $x = 0,3$  сек. По мере увеличения значения  $x$  в твердом

растворе  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , граничная плотность между кристаллами увеличивается с уменьшением плотности кристаллов, и увеличивается количество центров захвата для рассеяния заряда, что снижает подвижность заряда. Подвижность носителей заряда определяется механизмом рассеяния. В идеальных кристаллах пренебрегают рассеянием носителей заряда из-за малой концентрации макродефектов. Однако, в поликристаллах граничная плотность кристаллов оказывает большое влияние на механизмы рассеяния заряда.

Концентрация дырок основных носителей заряда в пленках  $Zn_xSn_{1-x}Se$  снизилась с  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при  $x = 0$  до  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  при  $x = 0,3$  (рис. 14). Это связано с тем, что часть атомов Zn замещает атомы Sn и, по мере увеличения молярной доли, Zn реагирует с дефектом межузельных атомов  $Se_i$  с образованием узлов ZnSe, увеличение количества ZnSe видно по результатам рентгенофазового анализа.

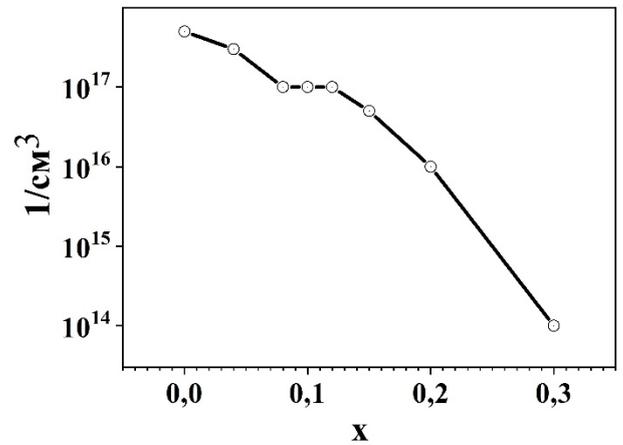
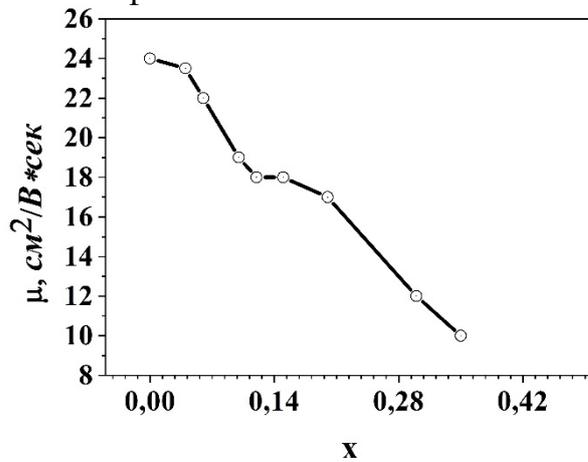


Рис.13. Зависимость подвижности основных носителей заряда от состава пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$

Рис. 14. Зависимость концентрации основных носителей заряда от состава пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$

Это приводит к снижению концентрации межузловых дефектов  $Se_i$  и уменьшению концентрации дырок. В то же время компенсация дырок и доноров происходит при сдвиге состава твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$  в сторону широкозонной компоненты. Электрофизические величины пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$   $p$ -типа удовлетворяют требованиям эффективных солнечных элементов, следовательно, на их основе можно получить дешевые и эффективные солнечные элементы.

На рисунке 15 приведены результаты исследований температурной зависимости электропроводности  $\sigma(T)$  пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$ . Эта зависимость подчиняется экспоненциальному закону:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (5)$$

При значениях состава  $x = 0,06$  и  $x = 0,1$  для пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  дырочной проводимости  $p$ -типа, энергия активации  $\Delta E$  составила  $\Delta E_{a1} = E_v + 0,02$  эВ,  $\Delta E_{a1} = E_v + 0,06$  эВ и  $\Delta E_{a2} = E_v + 0,1$  эВ, соответственно. Для пленок

$Zn_xSn_{1-x}Se$  с донорной проводимостью при  $x = 0,4$  установлено наличие уровня с энергией  $\Delta E_{a1} = E_c - 0,2 \pm 0,02$  эВ.

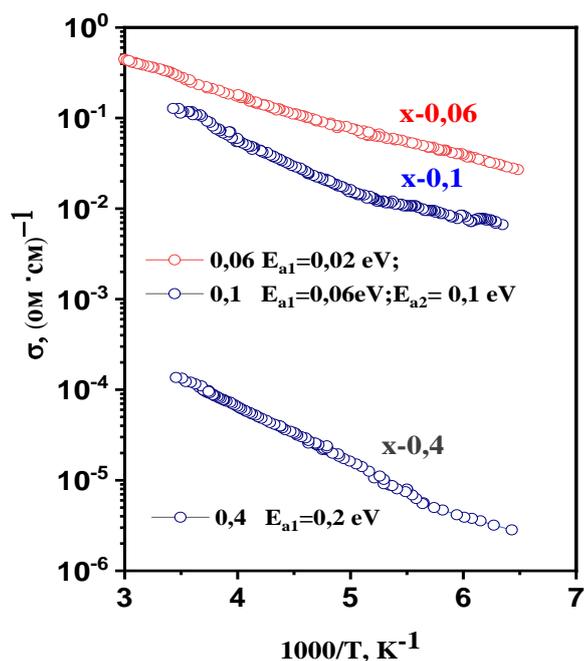


Рис. 15. Зависимость электропроводности ( $\sigma(T)$ ) пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  в логарифмическом масштабе от температуры

Обнаружено, что эти энергии активации принадлежат вакансиям олова, создающим акцепторные уровни ( $V_{Sn}$ ) и межузельные дефекты селена ( $Se_i$ ). Кроме того установлено, что в следствии замены атома Zn на атом Sn, в кристаллической решетке формируется антиструктурный дефект  $Zn_{Sn}$ . Установлено образование фаз ZnSe в составе твердого раствора при  $x = 0,4$  за счет увеличения молярной доли Zn, связанных с дефектами Se. Это приводит к увеличению концентрации дефектов вакансий селена ( $V_{Se}$ ), создающих донорные уровни.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследований структурных, морфологических, оптических и электрофизических свойств пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  были сделаны следующие выводы:

1. Определены оптимальные технологические режимы выращивания высококачественных пленок ZnSe, SnSe и  $Zn_xSn_{1-x}Se$  твердых растворов на поверхности известково-натриевого стекла (SLG) методом химического молекулярно пучкового осаждения: такие как температура подложек  $500^\circ C \div 600^\circ C$ , температура источников элементов, которая варьируется для ZnSe в интервале  $980^\circ C \div 1025^\circ C$ , а для SnSe в интервале  $780^\circ C \div 840^\circ C$ , в то же время, скорость роста находится в пределах  $0,1 \div 20 \text{ \AA/сек}$  при потоке водорода  $W_{H_2} = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$ , а также определена закономерность зависимости процесса синтеза пленок твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  от отношения давлений паров элементов ZnSe и SnSe.

2. Установлено, что микрокристаллы всех образцов пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  равномерно распределены по поверхности подложки, плотно упакованы и имеют поликристаллическую структуру, при этом в диапазоне  $0 \leq x \leq 0,12$  размеры кристаллитов составляют  $5 \div 10 \text{ мкм}$ , в диапазоне  $0,3 \leq x \leq 0,55$  уменьшаются до  $3 \text{ мкм}$ , а изменение формы кристаллитов объяснялось увеличением молярного состава ZnSe в образцах.

3. На основе анализа рентгенограмм твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  в объяснены, что: кристаллы имеют кристаллографическое направление роста (h00), увеличение интенсивности пиков (111) и (220) связано с увеличением молярной доли ZnSe, изменение постоянной решетки орторомбической структуры в соответствии с изменением состава твердого раствора, а также подъем пика при углах отражения  $2\theta=21,4$  градуса подтверждает образование твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$ .

4. Выявлено, что пленки твердых растворов  $Zn_xSn_{1-x}Se$  при значениях  $x$  в диапазоне  $0 \leq x \leq 0,3$  обладают прямозонным оптическим переходом с коэффициентом оптического поглощения  $\alpha=10^4 \div 10^5 \text{ см}^{-1}$ , ширина запрещенной зоны пленок в зависимости от состава варьируется в пределах  $E_g=1.0 \div 2$  эВ, а ширине запрещенной зоны  $E_g = 1,4$  эВ являющейся оптимальной для солнечных элементов соответствует пленки с составом  $Zn_{0.12}Sn_{0.88}Se$ .

5. Установлено, что с увеличением молярного соотношения компонентов  $Zn/(Zn+Sn)$  в составе пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  в результате уменьшения концентрации дефектов ( $Se_i$ ) атомов селена в междоузлии, дающие акцепторные уровни, удельные сопротивления пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  в интервале значения  $0 \leq x \leq 0,55$  варьируются в пределах от  $\sigma = 15$  (Ом·см)<sup>-1</sup> до  $\sigma = 2 \cdot 10^{-2}$  (Ом·см)<sup>-1</sup> для  $p$ -типа от  $\sigma = 2 \cdot 10^{-3}$  (Ом·см)<sup>-1</sup> до  $\sigma = 10^{-6}$  (Ом·см)<sup>-1</sup> для  $n$ -типа, а концентрация основных носителей заряда от  $n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

6. Установлено, что с увеличением значения молярного соотношения компонентов  $Zn/(Zn+Sn)$ , увеличивается количество центров рассеяния на границах кристаллитов, вследствие чего подвижность основных носителей заряда уменьшается от  $\mu = 24 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{сек})$  до  $\mu = 10 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{сек})$  (в области  $0 \leq x \leq 0,3$ ).

7. Результаты диссертационной работы позволяют получить дешевые, экологически чистые и эффективные солнечные элементы на основе пленок  $Zn_xSn_{1-x}Se$  и откроют новые возможности для создания тонкопленочных солнечных элементов.



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

---

**PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE**

**YULDOSHOV RUHIDDIN TOLIBOVICH**

**STRUCTURAL, MORPHOLOGICAL, OPTICAL AND  
ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF  $Zn_xSn_{1-x}Se$  FILMS**

**01.04.10-Physics of semiconductors**

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

**Tashkent-2023**

**The subject of doctoral dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number B2022.1.PhD/FM283.**

The Dissertation was implemented at the Physical-Technical Institute.

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

**Scientific supervisor:**

**Razikov Takhirjan Mutalovich**

doctor of Physical and Mathematical, professor

**Official opponents:**

**Egamberdiyev Bakhrom Egamberdiyevich**

doctor of Physical and Mathematical, professor

**Yuldashev Nosirjon Khaydarovich**

doctor of Physical and Mathematical, professor

**Leading organization**

**Tashkent state technical university**

The defense of the doctoral dissertation will be held on “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2023, at \_\_\_\_\_ at the meeting of the Scientific Council No.DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz), Conference Hall of the SRIPSM under the NUU).

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

The abstract of the dissertation was distributed on “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2023.  
(Registry record No. \_\_\_\_\_ dated “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2023)

**Sh.B. Utamuradova**

Chairman of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**J.J. Khamdamov,**

Scientific Secretary of the Scientific Council on Award  
of Scientific Degrees, Doctor of Philosophy in Phys.-  
Math., PhD. s. researcher

**N.A. Turgunov**

Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific  
Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of  
Physical and Mathematical Sciences

## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The aim of the research work** is to determine the optimal technological modes of chemical molecular beam deposition, which make it possible to obtain high-quality films of  $Zn_xSn_{1-x}Se$  solid solutions with physical and optical properties that meet the requirements of efficient solar cells, to study the relationships between their structural, morphological, optical and electrophysical properties with thermodynamic quantities.

**The objects of the research work** are ZnSe, SnSe and  $Zn_xSn_{1-x}Se$  films obtained on the surface of soda-lime glass (SLG) by the chemical molecular beam deposition (CMBD) method.

**The scientific novelty of the research work:** The scientific novelty of the research is as follows:

for the first time, the optimal technological regimes of the method of chemical molecular beam deposition for growing high-quality polycrystalline films of the  $Zn_xSn_{1-x}Se$  solid solution were determined, and methods for controlling the composition of this solid solution were developed based on the laws governing the relationship between the composition of the  $Zn_xSn_{1-x}Se$  solid solution relative to the vapor pressure of the  $Zn_xSn_{1-x}Se$  compounds;

the growth of microcrystallites of  $Zn_xSn_{1-x}Se$  films, densely packed, mainly in the directions (h00) and having values of  $5\div 10\ \mu m$  at a substrate temperature of  $550\ ^\circ C$ , was determined, and it was also shown that an increase in the intensity peak at a reflection angle structure lattices confirms the formation of a  $Zn_xSn_{1-x}Se$  solid solution.

it was found that the light absorption coefficient of the obtained films of the  $Zn_xSn_{1-x}Se$  solid solution is equal to  $\alpha = 10^4 \div 10^5\ cm$  to a change in the band gap from 1,0 to 2 eV, and it was also shown for the first time that a solid solution with the composition  $Zn_{0.12}Sn_{0.88}Se$  has a band gap of 1,4 eV, which is optimal for solar cells;

it is shown that a decrease in the specific electrical conductivity of the films from  $\sigma = 15\ (\Omega \cdot cm)^{-1}$  to  $4 \cdot 10^{-3}\ (\Omega \cdot cm)^{-1}$  and the concentration of the main charge carriers from  $n = 1 \cdot 10^{17}\ cm^{-3}$  to  $1 \cdot 10^{14}\ cm^{-3}$ , at an increase in the amount of Zn in the range  $0 \leq x \leq 0,3$  of the composition of the  $Zn_xSn_{1-x}Se$  solid solution is associated with a decrease in defects of Se atoms located in interstices, giving acceptor levels;

it was found that a decrease in the mobility of the majority charge carriers from  $\mu = 24\ cm^2/(V \cdot sec)$  to  $10\ cm^2/V \cdot sec$  with an increase in the molar ratio of the Zn/(Zn+Sn) components in the range from 0 to 0,3 is associated with an increase in the number of centers microcrystalline interboundary scattering;

**Implementation of research results.** Based on the study of the structural, optical and electrical properties of  $Zn_xSn_{1-x}Se$  films:

The results of studies of the evaporation modes of a thin layer of SnSe, which is part of the  $Zn_xSn_{1-x}Se$  films, have been obtained, as well as their structural, morphological and optical properties have been studied, the use of which is referred to in foreign scientific journals (Royal society of chemistry advances 2020, 10, 16749, IF: 3.12, Solar Energy Materials and Solar Cells, 221, 110919,

2021, IF: 6.98; Vacuum, 177, 2020, 109343, IF: 2.9; Solar Energy, 186, 2019, 29–36, IF: 5.7) to improve electrophysical and optical properties of thin films. The use of scientific results referred to in the cited scientific papers contributes to an increase in electrophysical parameters, in particular, the mobility of SnSe films and makes it possible to increase the efficiency of solar cells based on them;

based on the use in the performance of scientific and technical tasks of the project under the number MRB-AN-2019-17, on the topic: “Research of broadband composite back-reflective coatings for solar cells”, developed as part of the dissertation work of technological regimes, the first time were obtained  $Zn_xSn_{1-x}Se/ZnO:Al$  heterostructures and studied their electrophysical and photoelectric properties (Reference No. 2/1255-3066 dated November 8, 2021 of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan). The use of scientific results based on the materials studied within the framework of the project made it possible to obtain a  $Zn_xSn_{1-x}Se/ZnO:Al$  heterostructure with a low density of defects at the p-n junction boundary and high-quality thin-film solar cells.

**Approbation of results of a research.** On the topic of the dissertation, 13 scientific papers were published, of which 5 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of the dissertation.

**The structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references from 110 titles and 6 applications. The text of the dissertation consists of 117 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИЛМИЙ ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим ( I часть, part I)**

1. T.M. Razykov, A. Bosio, B. Ergashev, K.M. Kouchkarov, A. Romeo, N. Romeo, R. Yuldoshov. M. Baiev, M. Makhmudov, J. Bekmirzoyev, R. Khurramov, E. Fazylov. Growth and characterization of  $Zn_xSn_{1-x}Se$  films for use in thin film solar cells // Solar Energy 2019. V. 193. pp. 519-522. (№ 1 Web of science, IF: 7.18)

2. T.M. Razykov, K. M. Kuchkarov B.A. Ergashev, M. Baiev, M. Mahmudov, R. T. Yuldoshov A. Nasirov. Effect of Substrate Temperature on the Physical Properties of  $Zn_xSn_{1-x}Se$  Films for Thin-Film Solar Cells // Applied Solar Energy. 2019. V. 55. pp. 315-320 (№ 3 Scopus, IF: 1.2)

3. Т.М. Разыков, Б.А.Эргашев, Р.Т.Йулдошов, М.Баиев, М.Махмудов, К.М. Кучкаров. Исследование морфологии и электрических свойств пленок твердого раствора  $Zn_xSn_{1-x}Se$ , полученных методом ХМПО // Физика полупроводников и микроэлектроника, 2019, № 1. Стр.18-22 ( 01.00.00; № 16)

4. T.M. Razykov, B.A. Ergashev, R. T. Yuldoshov, A.A. Mavlonov, K. M. Kuchkarov. Production and Characteristics of  $(ZnSe)_{0.1}(SnSe)_{0.9}$  Films for Use in Thin Film Solar Cells // Applied Solar Energy. 2018. V. 54 pp. 255-260 (№ 3 Scopus, IF: 1.2)

5. T.M. Razykov, G.S. Boltaev, A. Bosio, B. Ergashev, K.M. Kouchkarov, N.K. Mamarasulov, A.A. Mavlonov, A. Romeo, N. Romeo, O.M. Tursunkulov. R. Yuldoshov. Characterisation of SnSe thin films fabricated by chemical molecular beam deposition for use in thin film solar cells // Solar Energy 2018. V. 159. pp. 834-840. (№ 1 Web of science, IF: 7.18)

**II бўлим (II часть; part II)**

6. T.M. Razykov, A. Bosio, B. Ergashev, A.A. Mavlonov, A. Romeo, E. Artegiani, N. Romeo, R. Yuldoshov. Growth and characterization of  $(ZnSe)_{0.1}(SnSe)_{0.9}$  films for use in thin film solar cells // Proc. of the 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Brussels, Belgium. 2018. pp.169-171.

7. T.M. Razykov, E. Artegiani, G.S. Boltaev, A. Bosio, B. Ergashev, K.M. Kouchkarov, N.K. Mamarasulov, A.A. Mavlonov, A. Romeo, N. Romeo. R. Yuldoshov. Novel  $Zn_xSn_{1-x}Se$  Absorber for Use in Thin-Film Solar Cells // Proc. Of the 33d European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, Netherlands, 2017, pp.141-145.25-29 September

8. Т.М.Разыков, К.М.Кучкаров, Б.А.Эргашев, М.Махмудов Р.Т.Йулдошов.  $Zn_xSn_{1-x}Se$  юпқа қатламларининг электрофизик хоссалари //

Фан ва таълимни ривочлантиришда ёшларни ўрни. Республика илмий конференцияси. 30-сентябрь. 2021. 31-33 б.

9. Т.М.Разыков, К.М.Кучкаров, Б.А.Эргашев, М.Махмудов Р.Т.Йулдошов. Фотоэлектрические характеристики тонкопленочных солнечных элементов на основе нового материала  $Zn_xSn_{1-x}Se$ // Восьмая международная конференция по физической электронике ИРЕС-8. сентябрь 2021. Ташкент. стр.119-120

10. Т.М. Разыков, Б.А. Эргашев, А.А. Мавлонов Р.Т.Йулдошов, К.М. Кучкаров. Физические свойства пленок  $(ZnSe)_x(SnSe)_{1-x}$  для использования в тонкопленочный солнечный элемент // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы возобновляемой энергетики».18 мая 2018. Карши. стр.154-157

11. Т.М.Разыков, Б.А. Эргашев, М.Баиев, Р.Т.Йулдошов, М. Махмудов, К.М. Кучкаров. Исследование новых материалов для тонкопленочных солнечных элементов // IV-Международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах». 25-26 мая 2018. Фергана. стр. 180-183

12. Т.М. Razykov, К.М. Kuchkarov, R.T. Yuldoshov, A.A. Mavlonov. Influence of substrate temperature on structural properties of  $(ZnSe)_{0.1}(SnSe)_{0.9}$  thin films // IV- Международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах». 25-26 мая. 2018. Фергана. стр. 183-185.

13. R.T. Yuldoshov. Structural properties of SnSe thin films prepared by Chemical Molecular Beam deposition // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы возобновляемой энергетики».18 мая 2018. Карши. стр. 271- 273.





реферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида тахрирдан  
казилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги  
текширилди (02.03.2023 йил).

Бичим 60x841/16. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.

Шартли босма табағи: 3,25. Адади 60. Буюртма №39

Гувоҳнома reester № 10-4434

Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти  
босмаҳонасида чоп этилган.

Босмаҳона манзили: 100057, Тошкент ш., Янгиолмазор кўчаси 20-уй

