

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.FM. /Т.34.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

ЭРГАШЕВ БОБУР АВАЗ ЎҒЛИ

**ТУРЛИ ТАРКИБЛИ CdTe ЮПҚА ҚАТЛАМИДА ХУСУСИЙ
НУҚТАВИЙ НУҚСОНЛАРНИНГ ҲОЛАТИ ВА ТАБИАТИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2019 йил

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

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

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

Эргашев Бобур Аваз ўғли

Турли таркибли CdTe юпка қатламида хусусий нуқтавий
нуқсонларнинг ҳолати ва табиати 3

Эргашев Бобур Аваз угли

Природа и поведение собственных точечных дефектов в пленках
CdTe различного состава 23

Ergashev Bobur Avaz ogli

The nature and behavior of intrinsic point defects in CdTe films of
different composition..... 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 47

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.FM. /Т.34.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

ЭРГАШЕВ БОБУР АВАЗ ЎҒЛИ

**ТУРЛИ ТАРКИБЛИ CdTe ЮПҚА ҚАТЛАМИДА ХУСУСИЙ
НУҚТАВИЙ НУҚСОНЛАРНИНГ ҲОЛАТИ ВА ТАБИАТИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2019 йил

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.2.PhD/FM88 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.fti.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Разиков Тахирджон Муталович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Гулямов Абдурасул Гафурович
физика-математика фанлари доктори

Турсункулов Ойбек Муйидинович
физика-математика фанлари номзоди

Етакчи ташкилот:

Тошкент давлат техника университети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти ҳузуридаги DSc.30.05.2018.FM./T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «___» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Чингиз Айтматов кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91; e-mail: ftikans@uzsci.net, Физика-техника институти мажлислар зали).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Чингиз Айтматов кўчаси, 26-уй. Физика-техника институти. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2019 йил «___» _____ да тарқатилди.

(2019 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

Н.Р. Авезова

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
раиси т.ф.д., етакчи илмий ходим

А.Г. Комилов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
илмий котиби, т.ф.н.

А.В. Каримов

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда дунёда энг самарадор юпқа қатламли қуёш элементлари CdTe , Cu(In,Ga)Se_2 асосидаги яримўтказгич материалларидан олинган, уларнинг фойдали иш коэффициентлари мос равишда 22,1% ва 22,9% ташкил қилади¹. Етакчи олим ва мутахассисларнинг саъй-ҳаракатларига қарамасдан, зарур ўтказувчанликка эга бўлган CdTe юпқа қатламларини олишдаги технологик муаммолар уларнинг кенг қамровли фойдаланишига тўсқинлик қилмоқда. Бу жиҳатдан юқори ўтказувчанликка эга бўлган кадмий теллур юпқа қатламларини олиш ва унинг асосидаги юқори самарадорликка эга бўлган юпқа қатламли қуёш элементларини яратишдаги муҳим вазифалардан бири бўлиб келмоқда. Бу борада хусусий нуқтавий нуқсонларнинг концентрациясини бошқариш, кристаллнинг ўсиш жараёнида киришмалар билан легирлаш, манба таркибий концентрациясини технологик бошқариш ёки юпқа қатламни ўстиргандан сўнг унга турли муҳитларда термик ишлов бериш долзарб вазифалардан ҳисобланади.

Ҳозирги кунда жаҳонда кремний (Si) асосидаги анъанавий қуёш элементлари билан бир қаторда, CdTe , Cu(In,Ga)Se_2 асосидаги юпқа қатламли қуёш элементларини ишлаб чиқаришга катта эътибор қаратилмоқда. Бу соҳада мақсадли илмий тадқиқотларни амалга ошириш, жумладан, қуйидаги йўналишларда илмий тадқиқотларни олиб бориш энг муҳим вазифалардан бири ҳисобланади: юқори ўтказувчанликка эга бўлган юпқа қатламларни олишда хусусий нуқтавий нуқсонларнинг концентрациясини бошқариш, юпқа қатламларда ўсиш жараёнида киришмалар билан легирлаш, ёки уларга турли муҳитларда термик ишлов бериш. Бундан ташқари юпқа қатламли қуёш элементларининг остки юза қатламига ток олувчи контактларини олиш қуёш элементларининг барқарорлигини таъминлашда зарур вазифалардан саналиб, қулай ва соддалаштирилган технологияларни ишлаб чиқишда муҳим роль ўйнайди.

Сўнгги йилларида республикамызда устувор инновацион технологиялар ривожланишига ва қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш соҳасидаги ишланмаларга, шу билан бирга арзон ва юқори самарадор яримўтказгичли қуёш элементларини ишлаб чиқаришга катта эътибор қаратилмоқда. Иссиқ иқлим шароитларида самарали ишловчи фотоэлементларни ишлаб чиқариш, фото қабул қилиш юзасини текстурлаш орқали оптик йўқотишни камайитириш, кристалл панжарага киришма атомларининг нанокластерларини киритиш ёки изовалент киришмаларини легирлаш орқали спектрал сезгирлик соҳасини кенгайтириш, ҳамда қуёш элементлари учун юпқа қатламли халькогенид структураларни олишнинг технологик жараёнларини ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш йўналишларида салмоқли натижалар олинган. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига мувофиқ «иктисодиётнинг

¹ Green et. al. Progress in Photovoltaics Volume27, Issue1 January 2019 Pages 3-12.

энергия сарфини ва ресурс сарфини камайтириш, ишлаб чиқаришга энергия тежовчи технологияларни кенг жорий этиш ва иқтисодиёт тармоқларида меҳнат унумдорлигини ошириш» муҳим аҳамиятга эга. Шу нуқтаи назардан, CdTe юпқа қатламларининг электрофизик хоссаларини бошқаришнинг янги усулларини яратиш, улар асосида қайта тикланадиган энергия манбаларидан кенг фойдаланишни таъминлайдиган арзон ва юқори самарадор юпқа қатламли қуёш элементларини ишлаб чиқариш имконини беради.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 26 майдаги ПҚ-3012-сонли «2017-2021 йилларда қайта тикланувчи энергетикани янада ривожлантириш, иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳада энергия самарадорлигини ошириш чора-тадбирлари дастури тўғрисида», 2018 йил 14 июлдаги ПҚ-3855-сонли «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида», 2019 йил 30 майдаги ПҚ-4348-сонли «Электротехника саноатини янада ривожлантириш учун қулай шарт-шароитлар яратиш ва тармоқнинг инвестициявий ҳамда экспорт салоҳиятини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига боғлиқлиги. Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг IV. «Қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланиш усулларини ишлаб чиқиш, нанотехнология, фотоника ва бошқа замонавий технологиялар асосида янги технологиялар ва қурилмалар ишлаб чиқиш» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Юпқа қатламли қуёш энергетикасида кенг тадқиқот қилинадиган асосий материаллардан бири сифатида кадмий теллур поликристалли ҳисобланади. Дунёда 15 дан ортиқ илмий тадқиқот марказларида, жумладан, First Solar (АҚШ), Calyxo (Германия), Advanced Solar Power (Хитой), Microsys International (Сингапур) ва бошқаларда, фойдали иш коэффициенти 10-15% бўлган CdTe фотоэлектрик модулларини ишлаб чиқариш технологиялар фаолияти билан шуғулланади². Ушбу илмий тадқиқот марказларидаги ишлаб чиқариш технологиялари турлича эканлигига қарамасдан, олинадиган қуёш элементларининг салт юриш кучланиши ($U_{ск} \leq 860$ мВ) ва тўлдириш коэффициенти ($FF \leq 0.79$) билан чекланган. Тадқиқотларнинг назарий маълумотларига асосан CdTe асосидаги қуёш элементлари таъқиқланган зона кенлиги 1,41 эВ бўлган яримўтказгич материалларида салт юриш кучланиши $U_{ск}$ ва тўлдириш коэффициенти FF мос равишда 1000 мВ ва 0.85 намоён қилиши керак. Бу кўрсаткичларни инобатга

² <https://www.enfsolar.com/directory/panel/cdTe>

олган ҳолда, қисқа туташув токининг ($J_{\text{КТ}} = 27 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$) қийматга эришилганлиги, кадмий теллур асосидаги қуёш элементининг кутилаётган фойдали иш коэффициенти 23% бўлади.

Таъкидлаш жоизки, CdTe юпқа қатламларида салт юриш кучланишини ошириш учун, акцептор киришмалар (N_A-N_D) концентрациясининг ички диффузиявий потенциалининг оширилишини талаб қилади. Бироқ, тадқиқотлар шуни кўрсатдики, легирлаш даражасини кескин ошириш, тўлдириш коэффициенти камайишига олиб келади, бунинг натижасида қуёш элементларининг самарадорлиги камаяди. Бу ҳолатда легирлаш даражасини ошириш, ноасосий заряд ташувчиларининг ҳаракатчанлиги ва яшаш вақти билан аниқланадиган диффузия узунлигини сезиларли камайишига олиб келиши билан тушунтирилади. Ноасосий заряд ташувчиларининг диффузия узунлигининг ошиши, заряд ташувчиларининг ҳаракатчанлиги ёки яшаш вақти, ёки бир вақтда иккала кўрсаткичнинг оширилишини талаб қилади. Бироқ, CdTe юпқа қатламларида нуқтавий ва структуравий нуқсонларнинг, заряд ташувчилар ҳаракатчанлиги ва яшаш вақтига таъсири етарлича ўрганилмаган.

Бу соҳанинг ривожига Ўзбекистон олимлари Т.М. Разиков ва К.М. Кучкаровлар салмоқли ҳиссаларини қўшган³. Хусусан, Т.М.Разиков биринчилардан бўлиб халкогенидлар асосидаги поликристалл юпқа қатламларни олишнинг янги технологияси, кимёвий молекулалар дасталаридан олиш (КМДО) усулини ишлаб чиқди. Бу усулнинг афзалликлари айнан манба компонентларининг алоҳида-алоҳида жойлаштирилиши, уларнинг мустақил қиздирилиши ва газ ташувчисини ҳар бир манба орқали етказиб берилиши туфайли аниқ таркибдаги юпқа қатламларни олиш мумкинлиги, бу эса ўстириладиган юпқа қатламларнинг хоссаларини, айнан ўтказувчанлик тури ва хусусий нуқтавий нуқсонларининг (ХНН) концентрациясини бошқариш имконини беради.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Физика-техника институти илмий тадқиқот ишлари режасига биноан Ф2-Ф032-сон «Фотосезгир поликристалл кадмий теллур юпқа қатламларида тортилувчи нуқсонларнинг электрон ҳолатларининг кинетик ва деградацион хоссаларига таъсирини ва CdS-CdTe юпқа қатламли қуёш элементларидаги физик жараёнларини тадқиқот қилиш» (2007-2011 йй.); Ф3-ФА-0-56434-сон «Қуёш элементлари ва яримўтказгич асбоблари учун нано уланишли тузилмалар ҳамда юпқа қатламли тузилмалар ҳосил бўлишининг физик қонуниятлари» (2012-2015 йй.), ҳамда халқаро М/CRDF-43/2013-сонли «Самарадор юпқа қатламли қуёш элементларини ишлаб чиқариш учун турли таркибли CdTe юпқа қатламларининг физик хоссаларини тадқиқот қилиш» (2014-2015 йй.) илмий лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади турли таркибли CdTe юпқа қатламларида, ҳамда CdCl₂ ишқорида термик ишлов берилганда ва Sb билан легирланганда хусусий нуқтавий нуқсонларнинг ҳолати ва табиатини аниқлашдан иборат.

³ http://fti.uz/sotrudniki-laboratorii/?SECTION_ID=32

Тадқиқотнинг вазифалари:

CdTe юпка қатламларининг энг яхши электрофизик ва оптик хоссаларини олиш мақсадида КМДО усулида поликристалл ўстиришни оптимал технологик шароитини аниқлаш;

ўсиш жараёнидаги CdTe юпка қатламининг буғ фазавий таркибига морфологик, структуравий ва электрофизик хоссаларининг боғлиқлигини тадқиқот қилиш;

турли таркибли CdTe юпка қатламларига CdCl₂ ишқорида термик ишлов беришнинг таъсирини аниқлаш;

турли таркибли CdTe юпка қатламларида нуқтавий нуқсонларнинг ҳолати ва табиатини ўрганиш;

турли таркибли CdTe юпка қатламларини Sb киришма атомлари билан легирлаганда уларнинг электрофизик хоссаларига таъсирини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти КМДО усулида олинган турли таркибли CdTe асосидаги юпка қатламлардан иборат.

Тадқиқотнинг предмети турли таркибли CdTe юпка қатламларида хусусий нуқтавий нуқсонларнинг табиати ва уларнинг электрофизик хоссаларига таъсиридан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Юпка қатламларни тадқиқот қилишда экспериментал физиканинг комплекс усуллари: вольт-ампер характеристика, ҳароратнинг ўтказувчанликка боғлиқлиги, сканерловчи электрон микроскопия, рентген нурларининг дифракцияси, фотолюминесценция усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

юпка қатлам элементларининг таркибини КМДО усулида синтез қилишда, ўсиш тезлиги $10^{-1} \div 10$ Å/сек бўлганда, тагликка тушаётган молекулалар оқимини $10^{13} - 10^{14}$ см²/сек⁻¹ гача пасайиши, CdTe юзасида юпка наноқатламлар олишга имконият яратиши, бунда юқори сифатли омик контактлар олиш мумкинлиги аниқланган;

буғ фазаларда Cd/Te молекулалар дасталарининг интенсивлик нисбатини ва тагликка ўстириладиган элементларнинг кетма-кетлик оқимини бошқариш билан поликристалл CdTe юпка қатламларини олиш ва уларнинг солиштира қаршилигини кенг $10^4 \div 10^8$ Ом·см интервалда ўзгартириш мумкинлиги аниқланган;

CdCl₂ ишқорида CdTe юпка қатламларига ишлов берилганда, доначалар ўлчами катталашиши, бунинг натижасида доначалар орасидаги бўшлиқлар йўқ бўлиши ва CdTe юпка қатламларида зич тахланган доначалар ҳосил бўлиши намоён қилинган;

турли таркибли CdTe юпка қатламларининг 20 К ҳароратдаги фотолюминесценция спектрларида иккита 1,41 эВ ва 1,12 эВ чўққиларини намоён қилганлиги ва биринчи сатҳ $E_V + 0.15$ эВ бирлик зарядланган вакансия кадмий V_{Cd}^- га, иккинчи чўққининг ҳосил бўлиши $E_C - 0.48$ эВ сатҳга ва иккилик зарядланган вакансия теллурга V_{Te}^{++} ёки тугунлараро кадмий атомига Cd_i^{++} тегишли эканлиги аниқланган;

CdTe юпка қатламларига ҳаво муҳитида термик ишлов берилганда, кислород атомлари донор сатҳ бўлган вакансия теллурни V_{Te} эгаллаши, натижада акцепторлар концентрациясининг ортиши ва мос равишда p-тур ўтказувчанликни намоён қилиши кўрсатилган;

КМДО усулида Sb билан легирланган турли таркибли CdTe юпка қатламларининг энг кичик солиштирма қаршилиги Cd га бойитилганда кузатилиб, бунда CdTe:Sb юпка қатламларида Sb атоми, Te атомининг жойини осон эгаллашлиги ва юпка қатламда акцептор хоссасини ифодалашлиги аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

КМДО усулида олинган турли таркибли CdTe юпка қатламларида нуқсон ҳосил бўлиш механизмининг боғлиқлик қонунияти аниқланган;

CdTe юпка қатламларининг фотосезгирлигини ошириш усуллари таклиф этилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги маълумотларни қайта ишлаш ва ўлчашда мустақил ва қўшимча комплекс усулларида фойдаланиш орқали, шу билан бирга олинган натижаларнинг юпка қатламлар учун мавжуд физик тасаввурларга мослиги билан таъминланган. Тажрибалар Жанубий Флорида Университетида (АҚШ), Парма Университетида (Италия) ва Малайзия Миллий Университетларида (Малайзия) ҳам амалга оширилган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқотнинг илмий аҳамияти CdTe юпка қатламларидаги хусусий нуқтавий нуқсонлар ҳақидаги физик тасаввурларни кенгайтиришдан иборат.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти, турли таркибли CdTe юпка қатламларининг электрофизик хоссалари аниқлаш, юпка қатламли қуёш элементларининг функционал хоссаларини яхшилаш имконини берганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Турли таркибли CdTe юпка қатламларида хусусий нуқтавий нуқсонларнинг ҳолати ва табиатини ҳамда уларнинг электрофизик хоссалари ўрганиш асосида:

$CdCl_2$ ишқори билан термик ишлов берилган CdTe юпка қатламларининг хоссаларини оптималлаштиришда олинган натижалар хорижий илмий журналларида (Thin Solid Films, 582, 134-138, 2015, IF: 1.939; Advances in Condensed Matter Physics, 2016, Article ID 8068396, IF: 0.959; Physica Status Solidi A, 213(12), 3231-3237, 2016, IF: 1.795 ва бошқа.) CdTe юпка қатламларининг электрофизик ва оптик хоссаларини яхшилаш ва улар асосидаги қуёш элементларини тадқиқот қилишда фойдаланилган. Илмий натижалардан фойдаланиш, CdTe юпка қатламларининг морфологик, структуравий хоссаларини яхшилаш ва солиштирма ўтказувчанликни ошириш ҳамда улар асосидаги қуёш элементларининг самарадорлигини ошириш имконини берган.

CdTe юпка қатламларининг ўсиш жараёнида буғ фазадаги таркибини бошқариш орқали юпка қатламнинг морфологик ва структуравий ҳамда электрофизик хоссаларини яхшилашда олинган натижалар хорижий илмий журналларда (Materials Science and Engineering B, 171, 73–78, 2010, IF: 3.316;

Physica B, 407, 4214–4220, 2012, IF:1.453; Optik, 124, 2165–2170, 2013, IF:1.191 ва бошқа.) CdTe юпка қатламларининг электрофизик ва оптик хоссалари ўзгаришини бошқаришда фойдаланилган. Илмий натижалардан фойдаланиш CdTe юпка қатламларини танланган таркибда олиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишида олинган асосий натижалари 9 та халқаро ва 6 та республика илмий амалий анжуманларида маъруза ва муҳокамалар қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича асосий илмий натижалар жами 20 та илмий ишда chop этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг док-торлик диссертациялари асосий илмий натижаларини chop этиш тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан ва иловалардан иборат. Диссертация матни 104 бетда келтирилган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси очиб берилган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объекти, предмети ва усуллари тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги баён қилинган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиниши ва апробацияси ҳамда диссертация ҳажми ва тузилиши бўйича қисқа маълумотлар келтирилган.

«Кадмий теллур юпка қатламларининг электрофизик хоссалари ва уларни олиш усуллариининг таҳлили» номли биринчи бобда CdTe нинг асосий физик-кимёвий хоссалари ҳақида адабиётлар шарҳи келтирилган. CdTe да нуқсонларнинг ҳосил бўлиш жараёнлари ҳамда CdTe юпка қатламларнинг электрофизик ва оптик хоссаларига хусусий ва киришмали нуқтавий нуқсонларининг роли кўриб чиқилган. Кўрсатилган юпка қатлам бирикмаларни олиш ва фойдаланишга доир адабиётлардан маълумотлар таҳлили келтирилган. Бундан ташқари, CdTe юпка қатламларини олиш технологик усуллариининг афзаллик ва камчиликлари кўриб чиқилган. Мавжуд экспериментал ва назарий маълумотлар таҳлиliga асосан тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари шакллантирилган.

«CdTe юпка қатламларини олиш технологиясининг хусусиятлари ва тақиқот усуллари» деб номланган иккинчи боб турли таркибли CdTe юпка қатламларини КМДО усулида олиш ва юпка қатламларнинг физик хоссаларини комплекс тадқиқот қилиш усулларига бағишланган.

Таъкидлаш жоизки, юпка қатламли қуёш элементларини ишлаб чиқариш технологияларини кенг жорий қилишда, бу жараёнларнинг физикавий-технологик имкониятларини, айниқса иқтисодий самарадорлигини, олинадиган юпка қатламларнинг ишлаб чиқарилиш даражаси ва жараённинг тўлиқ автоматлаштирилиши ҳамда йирик ишлаб чиқаришда юпка қатламларнинг

катта юзада олиш имкониятларига аҳамият қаратиш лозим.

Турли таркибли CdTe юпқа қатламларини ўстиришда КМДО усули қўлланилган. Манба сифатида тозалиги 99.999% бўлган Cd ва Te элементларидан фойдаланилган. Юпқа қатламлар тагликнинг 500°C-600°C ҳароратларида шиша ва молибден тагликларга олинган. Намуналар атмосфера босимида водород газ оқимида ўстирилган. Юпқа қатламларнинг қалинликлари 1-5 мкм оралиқдаги қалинликни ташкил қилган.

Ишчи камера ҳажмининг квази ёпиқлиги, ҳамда Cd ва Te буғ босимларини бошқариш орқали, поликристалл CdTe қатламларини кенг соҳада Cd/Te = 0,5-1,5 олиш мумкин.

CdTe юпқа қатламларнинг физик хоссаларини тадқиқот қилишда комплекс усулларида фойдаланилди. Бу бизнинг илмий тадқиқотларимизгача КМДО усулида CdTe юпқа қатламларини олиш ҳақида адабиётларда кам маълумотлар мавжудлиги билан боғлиқ. Юпқа қатламларни комплекс тадқиқот қилиш уларнинг тур ўтказувчанлиги, ҳароратнинг ўтказувчанликка боғлиқлиги, ВАТ ва фотолюминесценцияларни ўз ичига олган. Бундан ташқари оптик металлография, рентген дифракцияси, сканерловчи электрон микроскопия ва атом кучили микроскопия усулларида фойдаланилган.

Янги олинган юпқа қатламларнинг электр хоссаларини ўлчаш учун уларга вакуум чанглантиш усулида омик контактлар олинди. Ковакли ўтказувчанликка эга бўлган юпқа қатламларга мис, кумуш, кумуш пастаси, электронли ўтказувчанликка эга бўлган юпқа қатламларга индий ва индий-галий қотишмасидан омик контакт сифатида фойдаланилди. Намуналарнинг тур ўтказувчанлиги термоЭЮКнинг кўрсаткичи орқали аниқланди. Чиқиш қаршилиги 10^{14} Ом бўлган В7-30 электрометрдан фойдаланиш, солиштира қаршилиги 10^8 Ом·см дан юқори бўлган намуналарнинг тур ўтказувчанлигини термоЭЮК кўрсаткичини аниқ индексациялаш имконини берди.

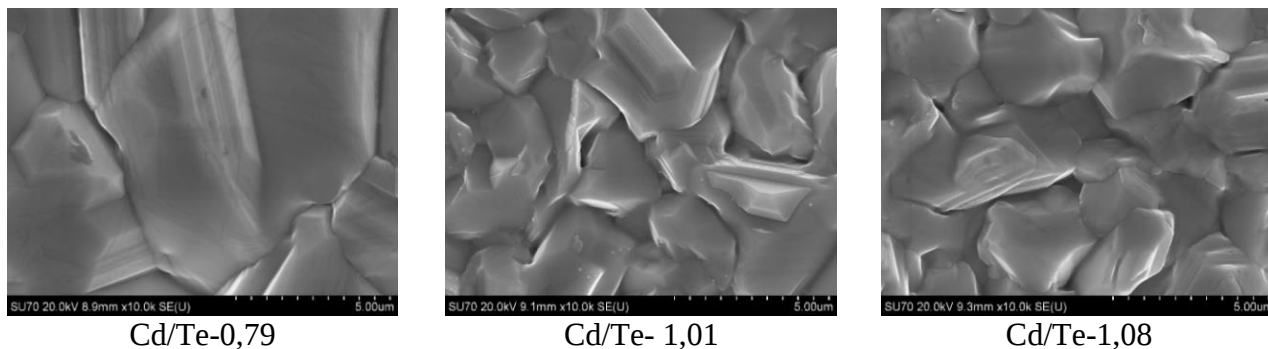
Намуналардаги контактнинг «омик» лийлигини намуналарда ВАТ ўлчаш орқали текширилди. Кейинги тадқиқотларни амалга ошириш учун ВАТ ўлчашда, кучланишнинг ўлчаш оралиғида тўғриланиш кузатилмаган намуналар олинди.

Юпқа қатламларнинг (ρ) солиштира қаршилиги ва (R_x) Холл доимийсини ўлчаш Ван-дер Пау усулида бажарилди. У5-9 турдаги электрометрлардан фойдаланиш, ρ солиштира қаршилиги 10^8 Ом·см дан катта бўлган намуналарни ўлчаш имконини берди. Намуналарнинг (ρ) солиштира қаршилиқни паст 80-300 К ҳароратларда ўлчаш махсус вакуум креостатда амалга оширилди.

Юпқа қатламларнинг микроструктураси HITACHI S800 сканерловчи электрон микроскопи (СЭМ) ва EasyScan 2 FlexAFM атом кучи микроскопи (АКМ) ёрдамида тадқиқот қилинган. Юпқа қатламларнинг таркибини аниқлаш учун энерго дисперсион спектроскопия асосидаги EDAX-Phoenix EDS Systemдан фойдаланилган. Рентген структура таҳлили PANALYTICAL X'PERT PRO MRD қурилмасида бажарилган. (Ўлчаш тадқиқотлари Жанубий Флорида Университети (АҚШ), Парма Университети (Италия) ва Малайзия Миллий Университетларида амалга оширилган).

«Турли таркибли CdTe юпқа қатламларининг морфологик, структуравий ва электрофизик хоссалари» номли учинчи бобда турли таркибли CdTe юпқа қатламларининг морфологик, структуравий ва электрофизик хоссаларининг тадқиқот натижалари электромикроскоп, рентгенспектрал таҳлил ва ўтказувчанликни ҳароратга боғлиқлик усулларидадан фойдаланилган ҳолда ҳамда намуналарнинг 20K ҳароратда фотолюминесценция ўлчаш натижалари келтирилган.

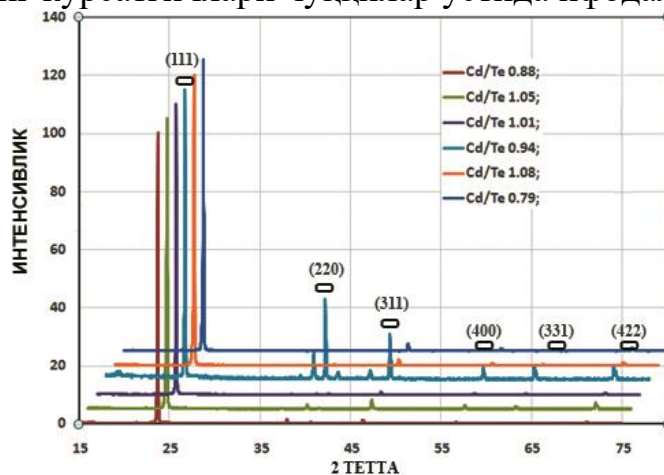
1-расмда тагликнинг 600°C ҳароратида ўстирилган турли таркибли намуналарнинг СЭМда олинган расмлари кўрсатилган. Расмдан кўринадики,



1-расм. Турли таркибли CdTe намуналарнинг сканерловчи электрон микроскопда олинган расмлари

Cd/Te - 0,79 таркибли намунадан ташқари, стехиометрик таркибга яқин намунанинг (доначаларнинг шакл ва ўлчамлари) ўхшаш микроструктураси кўринишига эга. (Cd/Te - 1,01;1,08) таркибли намуналар яхши ориентацияланган поликристалл структурага бўлиб, доначалар ўлчами 3-5 мкм ни ташкил қилади, бироқ юпқа қатламлар зичлашмаган. Те билан бойитилган юпқа қатламлар (таркибининг нисбати Cd/Te - 0,79) ҳам яхши ориентацияланган поликристалл структурага, доначалар ўлчами 5-10 мкм ни ташкил қилиб, зичлашган структурага эга.

2-расмда тагликнинг 600°C ҳароратида водород оқимида ўстирилган (Cd/Te ~ 0.79, 0.88, 0.94, 1.01, 1.05, 1.08) таркибли CdTe юпқа қатлам намуналарининг Рентген нурлари спектр дифракцияси келтирилган. Кристалл ориентацияларининг кўрсаткичлари чўққилар устида ифодаланган.

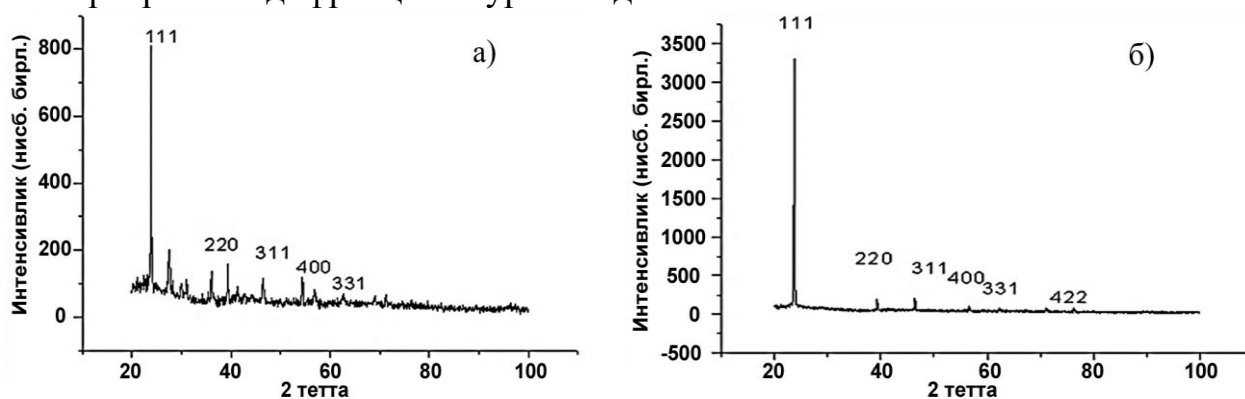


2-расм. Турли таркибли CdTe юпқа қатлам намуналарининг Рентген нурлари спектр дифракцияси.

Барча намуналарнинг Рентген нури спектрларининг дифракцияси $2\theta = 23.7^\circ$ да катта чўққига эга бўлиб, кристаллографик ўқнинг (111) йўналишига мос келади. Бу эса, CdTe юпқа қатламлари (111) йўналишига эга бўлган сфалерит структурада ўстирилганлигини кўрсатади. Cd/Te=0,94 таркибли юпқа қатламларда (200), (311) ва (422) ориентациядаги чўққилар ҳам кузатилди. Бу юпқа қатламнинг қалинлиги билан тушунтирилади. Қалинлиги 0,5 мкм дан кичик бўлган юпқа қатламлар жуда юпқа ҳисобланади ва (200), (311) ва (422) ориентациядаги мос чўққиларга эга бўлади.

Қалинликни 0,5 мкмдан ортиб боришида бу йўналишлардаги чўққиларнинг интенсивлиги камайиб кетади ва юпқа қатлам (111) ориентацияда ўсишни бошлайди. Стехиометрик таркибга яқин намуналарда (111) ориентациядаги чўққиларнинг устунлиги ортиб боради. Бу CdTe намуналарининг кристалл панжара доимийси $a = 6.487\text{\AA}$ бўлган афзал ориентациясига эгаллиги кўрсатади.

Тагликнинг 500°C ҳароратида олинган намуналарнинг Рентген нури спектрларининг дифракцияси ўрганилди.

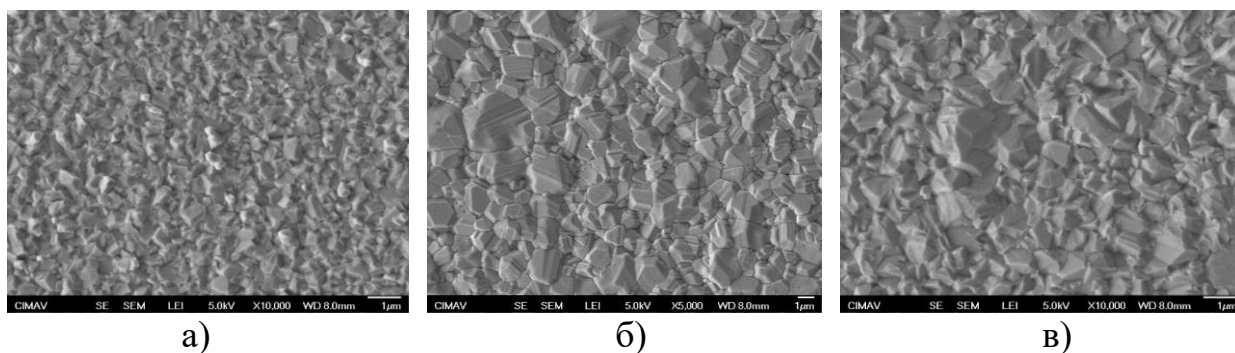


а) $d \sim 0,5\text{мкм}$; б) $d \sim 2\text{мкм}$.

3-расм. Ҳар хил қалинликдаги CdTe намуналарнинг Рентген нури спектрларининг дифракцияси.

3-расмда ҳар хил қалинликдаги CdTe намуналарнинг Рентген нури спектрларининг дифракцияси келтирилган бўлиб, $2\theta = 23.7^\circ$ да ёрқин намоён бўлган чўққи билан ифодаланади. Бу (111) кристаллографик йўналишига мос келиб, барча CdTe юпқа қатламлари сфалерит структурага эга эканлигини билдиради. Шу билан бирга (220), (311) ва (440) йўналишлардаги чўққилар ҳам кузатилди. Бу чўққиларнинг интенсивлиги, намуналарнинг қалинлигига боғлиқ. 2 мкм қалинликдаги намунада (220), (311) ва (440) йўналишлардаги чўққиларнинг мавжудлиги, бу намуналар учун координация рақами 12 бўлган кубик панжараси тавсифланади. Бу натижаларга кўра, панжара доимийси $a = 6.481\text{\AA}$ (аниқлик 0.093%).

4-расмда тагликнинг 500°C ҳароратида КМДО усулида олинган турли таркибли CdTe юпқа қатламларининг СЭМда олинган расмлари кўрсатилган. Расмдан кўринадики, намуналар яхши ориентацияланган поликристалл структурага эга бўлиб, доначалар ўлчами 2-3 мкм ташкил қилади ҳамда юпқа қатламлар янада зичлашган.



а)

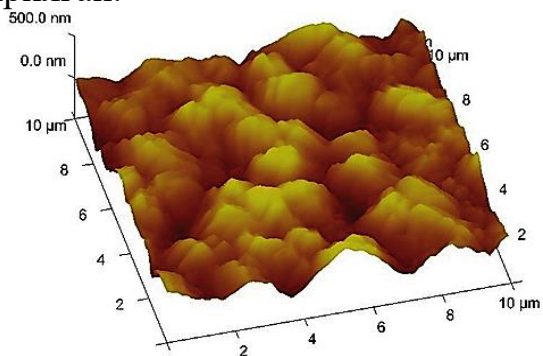
б)

в)

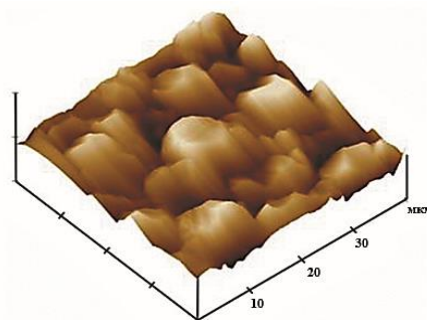
а) Cd/Te ~ 0,5 б) Cd/Te ~ 0,85 в) Cd/Te ~ 1,05

4-расм. Тагликнинг 500°C ҳароратида ўстирилган турли таркибли CdTe юпқа қатламларининг СЭМда олинган расмлари.

5-расмда тагликнинг 500°C ва 600°C ҳароратларида олинган турли таркибли CdTe юпқа қатламларининг атом кучи микроскопида олинган 3D расмлари кўрсатилган. Атомик куч микроскопида CdTe юпқа қатламларининг морфологик хоссалари тадқиқот қилиш атом кучи микроскопида Малайзия Миллий Университетида ва Жанубий Флорида Университетларида амалга оширилган.



а)



б)

Тагликнинг ҳароратлари: а) 500°C, б) 600°C

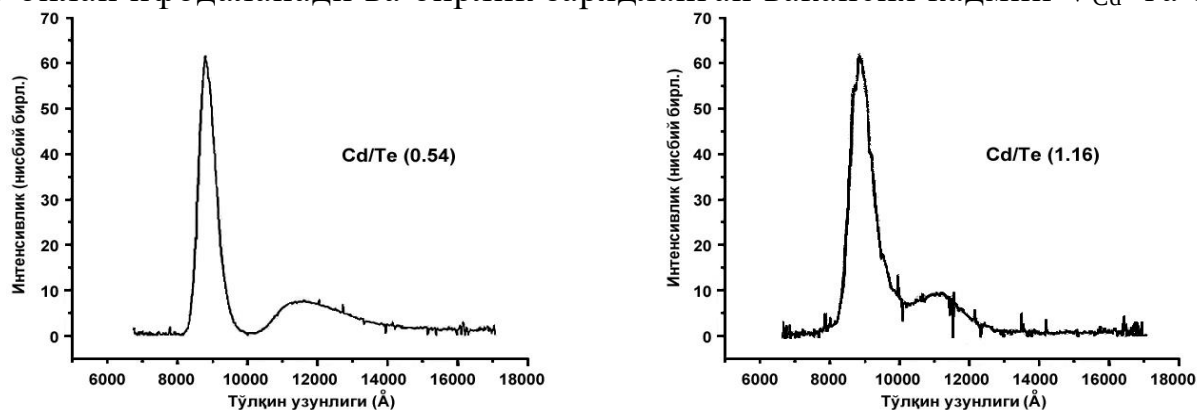
5-расм. CdTe юпқа қатламларининг атом кучи микроскопида олинган 3D расмлари.

Рентгеноструктуравий, сканерловчи электрон микроскоп ва атомик куч микроскоплар натижалари таҳлиliga асосан, таглик ҳароратининг 600°C да олинган стехиометрик таркибга яқин CdTe юпқа қатламлари (111) йўналишга эга бўлган поликристалл сфалерит структурага, доначалари ўлчами 5-8 мкм га ва бир жинсли 4 мкм қалинликка эга эканлиги аниқланди. Шу билан бирга тагликнинг 500°C ҳароратида олинган стехиометрик таркибли CdTe юпқа қатламлар ҳам яхши ориентацияланган поликристалл структурага эга бўлиб, доначалар ўлчами 2-3 мкм ташкил қилади, бироқ 600°C ҳароратида олинган намуналарга нисбатан янада зичлашган. Бу тагликнинг ушбу ҳароратида ҳам CdTe юпқа қатламларининг оптимал таркибида фотоволтаик қурилмалар яшашга яроқлилигини ифодалайди.

6-расмда турли таркибдаги тагликнинг 600°C ҳароратида олинган CdTe юпқа қатламларининг фотолюминесценция спектрлари кўрсатилган. Намуналарнинг таркиби Cd/Te мос равишда 0.54 ва 1.16 га тенг.

Барча намуналар учун биринчи 1.41 эВ ёки 900 нм, иккинчи 1.12 эВ оралиғида ётувчи, 1100 нм мос келадиган чўққилар мавжудлиги аниқланди. CdTe юпқа қатламларининг фотолюминесценциядаги 1.41 эВ га мос келувчи

чўққи электронларнинг ўтказувчанлик зонасидан акцептр сатҳга ўтиши $E_v+0.15$ эВ билан ифодаланади ва бирлик зарядланган вакансия кадмий V_{Cd}^- га ёки



6-расм. Турли таркибдаги олинган CdTe юпка қатламларининг фотолюминесценция спектрлари.

тугунлараро теллур атомига Te_i^- тегишли. 1.12 эВ даги чўққи электронларнинг донор сатҳдан $E_c - 0.48$ эВ валент зонага ўтиши билан тавсифланади. Бу донор сатҳ иккилик зарядланган вакансия теллурга V_{Te}^{++} ёки тугунлараро кадмий атомига Cd_i^{++} тегишли.

Намуналарнинг солиштирма қаршили-гини паст 80-300 К ҳароратларда ўлчаш, махсус вакуум креостатда амалга оширилган. Нуқсонларнинг фаоллашиш энергиялари аниқланган.

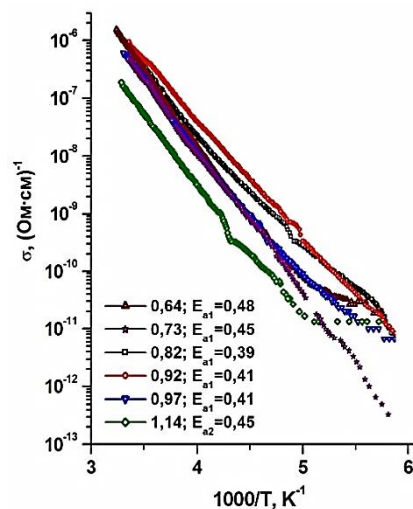
7-расмда Cd/Te=0,64; 0,73; 0,82; 0,92; 0,97 ва Cd/Te=1,14 таркибли юпка қатламларда ўтказувчанликнинг ҳароратга боғлиқлик эгри чизиқлари келтирилган.

Расмдан кўринадики, намуналарда ўтказувчанликнинг ҳароратга боғлиқлик эгри чизиқлари фаоллашиш энергиясига $E_{a1}=E_v+0,42\pm0,03$ эВ бўлган оддий экспоненциал кўринишга эга. Cd/Te=1,14 таркибдаги юпка қатлам учун фаоллашиш энергияси $E_{a2}=E_c-0,45$ эВ бўлган сатҳ аниқланган. Адабиётлардаги маълумотларга асосан бу фаоллашиш энергияларнинг кўрсаткичлари E_{a1} бирлик зарядланган вакансия кадмий V_{Cd}^- га ва E_{a2} иккилик зарядланган тугунлараро кадмий атомига Cd_i^{++} тегишлиги билан тавсифланади.

«CdTe юпка қатламларига $CdCl_2$ ишқорида термик ишлов беришнинг таъсири»

деб номланган 4-боб турли таркибли CdTe юпка қатламларига $CdCl_2$ ишқорида термик ишлов берилганда, юпка қатламларнинг морфологик, структуравий ва электрофизик хоссаларига ҳамда хусусий нуқтавий нуқсонларга таъсири тадқиқот қилинган.

$CdCl_2$ ишқорини CdTe юпка қатламининг юзасига олиш юқори вакуум муҳитида амалга оширилган. Бу жараён қуйидагича бажарилди: $CdCl_2$ ишқори

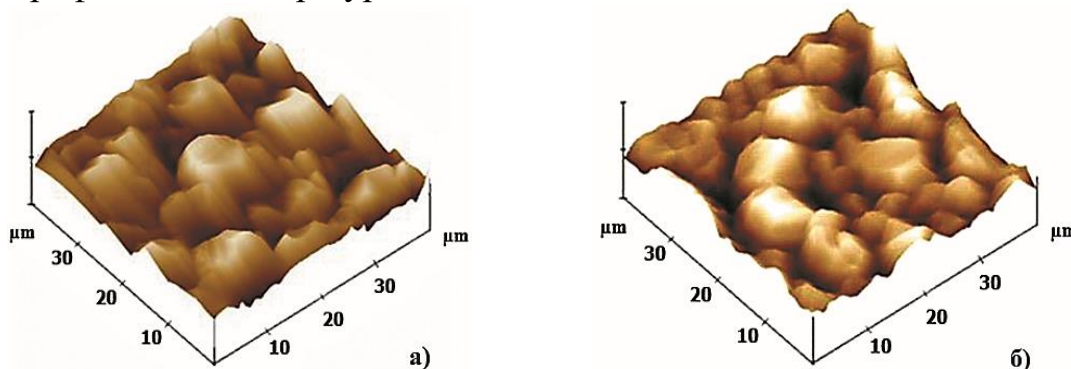


7-расм. Турли таркибли CdTe юпка қатламларда ўтказувчанликнинг ҳароратга боғлиқлик эгри чизиқлари.

CdTe юпқа қатламининг юзасига турли қалинликларда олинди, жараён юқори босим ичида жойлашган махсус конструкцияли цилиндрик кварцдан тайёрланган квази ёпиқ ҳажмда амалга оширилди.

Пуркилаш жараёнидан олдин намуналар тозаланган этил спиртида ювилган. Намуналарнинг пуркилашга яроқлилиги юза қисмини микроскопда визуал кўриб чиқилгандан кейин махсус тайёрланган алюмин ниқобларга жойлаштирилди. Пуркилаш жараёнида CdCl_2 ишқори CdTe юпқа қатламининг юзасига турли қалинликларда олинди. CdTe юпқа қатлами юзасидаги CdCl_2 қатламининг қалинлиги ишқорнинг учуш вақти орқали бошқарилди ва қалинлик 200-300 нм ташкил қилди. Намуналарнинг юза қисмида оксидланишни чеклаш учун намуналар юқори вакуумда совитилди, сўнг намуналар юзасидаги CdCl_2 ишқорининг қолдиқлари тозаланган метил спиртида ювилди.

Намуналарга CdCl_2 ишқори олингандан кейин махсус ясалган қурилмада 30 дақиқа давомида, 390°C - 400°C ҳароратларда ҳаво муҳитида намуналарга термик ишлов берилди. Сўнг намуналарнинг турига қараб кумуш пастасидан ёки индий-галий қотишмасидан ток олиш контактлари олинди. Олинган контактларни намуналарнинг юза қисмига яхшироқ кириши учун 30 дақиқа давомида, 250°C - 270°C ҳароратларда термик ишлов берилди. Юқоридаги технологик жараёнлардан сўнг юпқа қатламларнинг морфологик, структуравий ва электрофизик хоссалари ўрганилди.



CdCl_2 ишқорида, а) ишлов берилмаган; б) ишлов берилган

8-расм. CdTe юпқа қатламларининг 3D кўринишдаги атом кучи микроскоп расмлари.

CdTe юпқа қатламларига CdCl_2 ишқорида ишлов берилгандан сўнг уларнинг морфологик хоссалари атом кучи микроскопда ўрганилди. CdCl_2 ишқорида ишлов берилган ва ишлов берилмаган намуналарнинг 3D расмларини (8-расм) солиштириб, ишлов берилган намуналарнинг морфологик структураси, доначалар ўлчами ўзгармасдан қолди, фақат юза қисмининг текиланганлиги аниқланди.

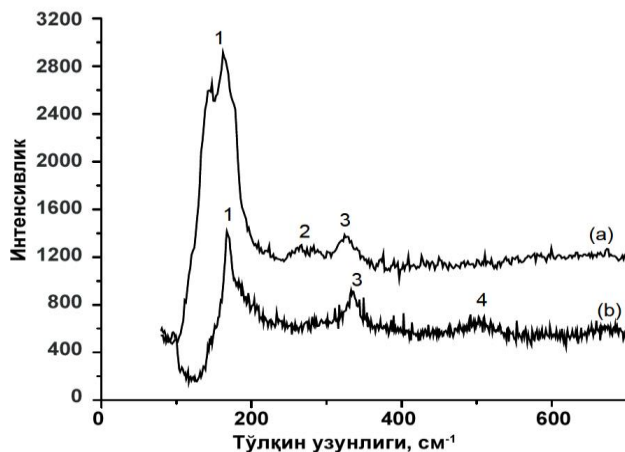
Юпқа қатламларнинг 3D суратда олинган атом кучи микроскоп расмларининг таҳлиliga асосан, яхши ориентацияланган поликристалл структурали, зарур доначалар ўлчами 6-8 мкм бўлган юпқа қатламларни олиш учун, уларга CdCl_2 ишқорида ишлов бериш шарт эмас, сабаби бундай ишлов бериш КМДО усулида олинган юпқа қатламларнинг морфологиясини кескин ўзгартрмайди.

Олинган натижалар таҳлили қуйидагиларни кўрсатмоқда:

а) юпка қатламларнинг морфологияси атом кучи микроскопи ёрдамида ўрганилганда, яхши ориентацияланган, доначалар ўлчами 6-8 мкм бўлган поликристалл структура эгаллиги намоён бўлди;

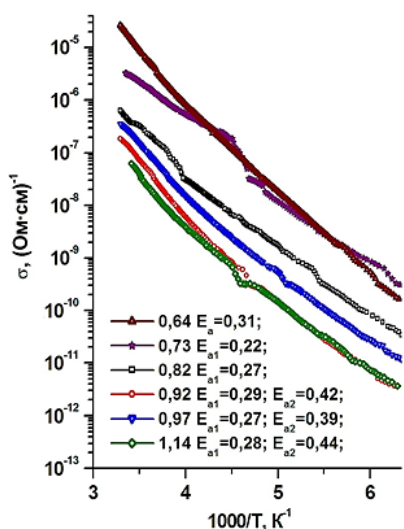
б) CdCl_2 ишқорида ишлов берилган намуналарнинг морфологик хоссаларида кескин ўзгариш кузатилмади. Фақат CdCl_2 ишқорида ишлов берилганда юпка қатламларнинг кристалл доначалари қайта тақсимланиши ва структурасининг бироз зичлашиши кузатилди.

9-расмда стехиометрик таркибли CdTe юпка қатламининг комбинациялашган сочилиш спектри кўрсатилган. (Спектр, а) 165 см^{-1} даги кенгчирик 1- чўкки (LO) бўйлама оптик мода, CdTe га ва 145 см^{-1} даги E_{TO} кучли фазадаги Te га ҳиссасига эга. 2-чўкки Te нинг умумийлашган кучли фаза модаси A_1 (120 см^{-1}) + E_{TO} (145 см^{-1}) билан боғлиқ, 3-чўкки LO бўйлама фононининг иккинчи гармоник-касига мос келади. CdCl_2 ишқорида ишлов берилган юпка қатламларнинг Раман спектри (Спектр, б) муҳим ўзгаришни кўрсатади. Тоза Te билан боғлиқ фаза йўқолиб кетди ва янги 4-фаза пайдо бўлди. Спектрдаги бу модификациялар, намуналарга ишлов берилганда аввал ажралган Te атомларини қайта тақсимланишини ва умумий ҳолатда кристаллитларнинг яхшиланганини кўрсатади, сабаби энди спектр 4-обертонгача етиб боради. Фонон обертонларнинг ташқи кўриниши кристалл сифатининг ўлчами ҳисобланади.



CdCl_2 ишқорида
а) ишлов берилган; б) ишлов берилмаган.

9-расм. Стехиометрик таркибли CdTe юпка қатламларининг комбинациялашган сочилиш спектрлари.



10-расм. CdCl_2 ишқорида ишлов берилган турли таркибли CdTe юпка қатламларида ҳароратнинг электр ўтказувчанликка боғлиқлик графиги.

10-расмда $\text{Cd}/\text{Te}=0,64; 0,73; 0,82; 0,92; 0,97$ и $\text{Cd}/\text{Te}=1,14$ таркибли CdCl_2 ишқорида ишлов берилган CdTe юпка қатламларининг ҳароратнинг электр ўтказувчанликка боғлиқлик эгри чизиқлари келтирилган.

$\text{Cd}/\text{Te}=0,64$ таркибли намунанинг эгри чизиғидан фаоллашиш энергияси $E_a=E_v+0,31$ эВ бўлган сатҳ ҳисоблаб топилган. Бу стаҳга эга бўлган Te_{Cd} нуқсони кристаллнинг ўсиш жараёнида ҳосил бўлган.

$\text{Cd}/\text{Te}=0,73$ юпка қатлам эгри чизиғидан ҳисоблаб топилган $E_{a1}=E_v+0,22$ эВ сатҳи акцептор сатҳ бўлиб, V_{Cd} ёки $\text{Cl}_{\text{Te}}+V_{\text{Cd}}$ га тегишли.

$\text{Cd}/\text{Te}=0,82$ намуна учун фаоллашиш энергияси $E_{a3}=E_v+0,27$ эВ бўлган сатҳ ҳисоблаб чиқилди. Адабиётларда фаоллашиш

энергияси (0,27-0,35 эВ) ораликда бўлган бу нуқсон сатҳини Cu, Ag, Au, Pb каби металл киришмаларга тегишли эканлигини ёзиб ўтган бўлиб, кўп ҳолларда буни сатҳлари 0,33 эВ бўлган Cu ифлосланиши концентрацияси билан боғлаган. Мураккаб комплекс сатҳларнинг ёки термик ишлов берилганда киришмаларнинг тарқалиши (0,3-0,4 эВ) нуқсонлар йўлагини келтириб чиқариши мумкин. Олинган натижаларни, яъни донор бўлган Te_{Cd} антиструктуравий нуқсонининг термодинамик мувозанатдаги иштироки деб ҳам изоҳлаш мумкин, Антиструктуравий нуқсонларнинг ҳосил бўлишини, тугунлардаги ёки Te_i тугунлараро Te атомларини, V_{Cd} кадмий вакансия жойига ўтиши билан тушунтириш мумкин.

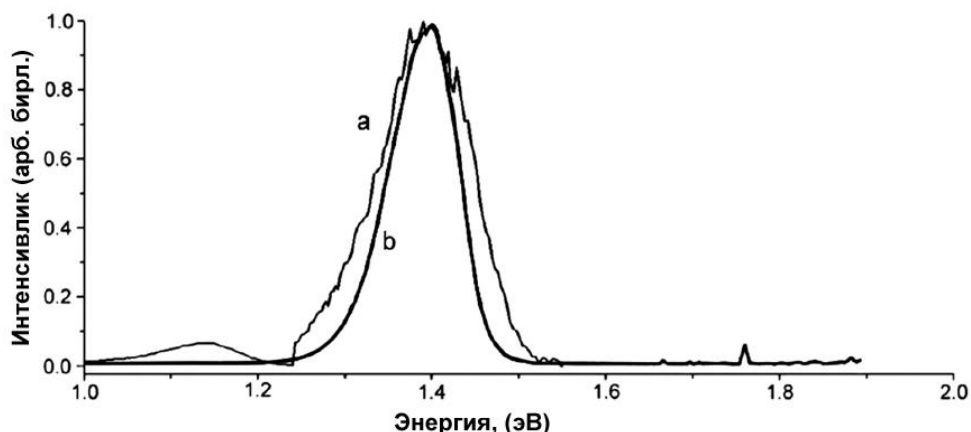
Кейинги эгри чизиклар $\text{Cd/Te}=0,92;0,97$ таркибли юпқа қатламларда ҳароратнинг электр ўтказувчанликка боғлиқлигини ўлчаш орқали олинган. Уларнинг эгри чизиклари мураккаброқ кўринишга эга бўлиб, фаоллашиш энергияси $E_{a4}=E_v+0,40\pm0,01$ эВ бўлган юқори ҳароратли ва фаоллашиш энергияси $E_{a5}=E_v+0,28\pm0,01$ эВ бўлган паст ҳароратли иккита экспоненциал қисмлардан иборат. $E_v+0,40\pm0,01$ эВ сатҳ акцептор сатҳ бўлиб, бирламчи V_{Cd}^{-1} вакансия кадмийга мос келади. $E_v+0,28\pm0,01$ эВ металл киришмаларга ёки антиструктуравий нуқсонларга тегишли.

$\text{Cd/Te}=1,14$ таркибли юпқа қатламнинг эгри чизигида ҳам мураккаб кўриниш мавжуд. Фаоллашиш энергияси $E_{a6}=E_c-0,45$ эВ бўлган юқори ҳароратли ва фаоллашиш энергияси $E_{a7}=E_c-0,28$ эВ бўлган паст ҳароратли иккита экспоненциал қисмлардан иборат. $E_c-0,45$ эВ сатҳ донор сатҳ бўлиб, иккилик ионлашган тугунлараро кадмий Cd_i^{++} га тегишли. $E_c-0,28$ эВ сатҳ $4\text{Cu}_{\text{Cd}}+\text{Cl}_{\text{Te}}$ комплекс нуқсонга тегишли.

$\text{Cd/Te}=0,64;0,73$ таркибли юпқа қатламларга CdCl_2 ишқорида ишлов берилганда уларнинг солиштира қаршилиги 10^7 Ом·см дан 10^5 Ом·см гача камайди. Бу вақтда Cd бойитилган ва стехиометрик таркибли юпқа қатламларда эса солиштира қаршилик деярли ўзгармади ва $\sim 10^7$ Ом·см атрофида қолди. Бу натижалар CdCl_2 ишқорида термик ишлов берилганда ҳар доим ҳам доначалар ўлчами катталашшига олиб келмайди, айниқса КМДО усулида олинган йирик доначали юпқа қатламларда, бироқ кадмий теллурнинг хусусий нуқтавий нуқсонларига таъсир қилади.

CdTe юпқа қатламларини фаоллашиш энергияси $E_v+0,42\pm0,03$ эВ бўлган акцептр сатҳли ва фаоллашиш энергияси $E_c-0,45$ эВ бўлган донор сатҳли компенсирлашган материал сифатида қараш мумкин. CdTe юпқа қатламларининг физик хоссалари, айнан солиштира қаршилиги, бу сатҳларнинг фаоллиги билан бошқарилади. $E_c-0,45$ эВ сатҳ донор сатҳ бўлиб, иккилик ионлашган тугунлараро кадмий Cd_i^{++} га тегишли ва Cd билан бойитилган, n-тур ўтказувчанликка эга бўлган юпқа қатламларда намоён бўлади. $E_v+0,42\pm0,03$ сатҳи акцептор сатҳ бўлиб, V_{Cd} га тегишли ва Te билан бойитилган p-тур намуналарда намоён бўлади. Te билан бойитилган намуналарга CdCl_2 ишқорида ишлов берилганда уларнинг солиштира қаршилигини сезиларли камайиб кетиши кузатилди. Бу янги вакансия теллур V_{Te}^{++} билан боғлиқ $E_v+0,24\pm0,01$ эВ сатҳнинг ҳосил бўлиши тавсифланади.

CdTe юпқа қатламларига CdCl_2 да ишлов беришнинг таъсирини аниқлаш мақсадида $\text{Cd/Te}=1,0$ таркибли юпқа қатламлар фотолюминесценция қилинди. (11-расм).



CdCl_2 ишқорида, а) ишлов берилмаган, б) ишлов берилган.

11-расм. $\text{Cd/Te}=1,0$ таркибли юпқа қатламлар фотолюминесценция спектрлари.

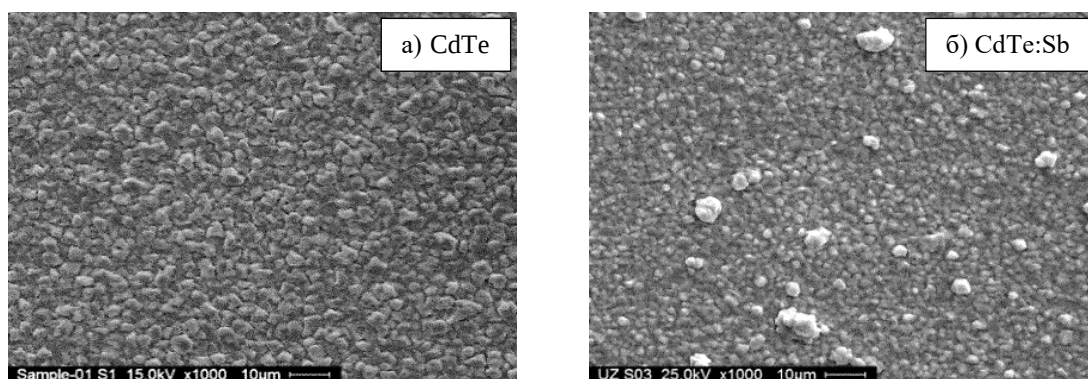
Намуналарда биринчи 1.41 эВ ёки 900 нм, иккинчи 1.12 эВ оралиғида ётувчи, 1100 нм мос келадиган чўққилар мавжудлиги аниқланди. CdTe юпқа қатламларининг фотолюминесценциядаги 1.41 эВ га мос келувчи чўққи электронларнинг ўтказувчанлик зонасидан акцептр сатҳга ўтиши $E_V + 0.15$ эВ билан ифодаланади ва бирлик зарядланган вакансия кадмий V_{Cd}^- га ёки тугунлараро теллур атомига Te_i^- тегишли. 1.12 эВ даги чўққи электронларнинг донор сатҳдан $E_C - 0.48$ эВ валент зонага ўтиши билан тавсифланади. Бу донор сатҳ иккилик зарядланган вакансия теллурга V_{Te}^{++} ёки тугунлараро кадмий атомига Cd_i^{++} тегишли.

Намуналарга CdCl_2 да термик ишлов беригандан кейин ҳам 1,41 эВ да жойлашган фотолюминесценция спектр чўққи чизиги мавжуд эди. Бироқ, 1.12 эВ да жойлашган чўққи йўқолиб кетди. Дастлабки хулоса шундан иборатки, 1.12 эВ да жойлашган чўққи вакансия теллур V_{Te} билан боғлиқ бўлиб, CdCl_2 да термик ишлов берилгандан кейин, кислород атоми билан алмашган. Кислород термик ишлов бериш жараёнида, намунага кириб, теллурнинг жойини олади (хлор билан таққосланганда), сабаби теллур билан кислород битта гуруҳнинг элементлари ҳисобланади.

«Sb билан легирланган CdTe юпқа қатламларнинг физик хоссаларини тадқиқот қилиш» деб номланган бешинчи бобда турли таркибли CdTe юпқа қатламларини Sb билан легирланганда ушбу юпқа қатламларининг морфологик ва электрофизик хоссаларига легирлашнинг таъсири ўрганилган ҳамда тадқиқотлар натижалари келтирилган.

Таъкидлаш жоизки, Sb бизнинг КМДО қурилмасида биринчи марта кадмий теллур юпқа қатламига киришма сифатида ишлатилган. Шунинг учун Sb ни оптимал қалинлиги ва учуш ҳароратини топиш учун олдин алоҳида манбадан Sb элементи шиша юзасига олинди. Қалинлик ва ҳароратнинг оптимал режими топилгандан сўнг, CdTe юпқа қатламларига Sb элементи легирланди. Бу жараёнда алоҳида легирловчи киришманинг ҳарорати 600°C - 850°C ни ташкил қилди.

CdTe:Sb юпқа қатламларнинг электрофизик хоссаларини ўрганиш учун, солиштирма қаршиликнинг ҳароратга боғлиқлиги Ван дер-Пау усулида ўлчанди. КМДО ва вакуум пуркалаш усуллари билан олинган CdTe:Sb юпқа қатламларнинг тадқиқот натижалари мос равишда 1- ва 2-жадвалларда келтирилган. Sb билан легирланган CdTe юпқа қатламларининг энг кичик (ρ) солиштирма қаршилиги 1-жадвалда кўрсатилганидек, $Cd/Te=1,35$ таркибли юпқа қатламларда кузатилган. Бу, ушбу таркибда хусусий нуқтавий нуқсонларнинг концентрациясини камайиши натижасида, V_{Te} вакансия теллурнинг концентрациясини ҳам камайиши билан тушунтирилади. Бу ҳолатда CdTe:Sb юпқа қатламларида Sb атоми, Te атомининг жойини осон эгаллайди ва юпқа қатламга акцетор хоссасини беради. Бошқа таркиблардаги юпқа қатламларнинг ρ солиштирма қаршилиги легирланмаган юпқа қатламлардек, деярли ўзгармади. Кейинги ҳолатларда CdTe юпқа қатламлари стехиометрик таркибда ва стехиометрик таркибдан Te бойитилган таркиб томонга оғанда хусусий нуқтавий нуқсонларнинг концентрацияси ортиб боради. Бунда Sb атомлари CdTe:Sb юпқа қатламларининг юзасида хусусий нуқтавий нуқсонларнинг комплекс тўпланиши ҳосил бўлиши, юпқа қатламларнинг солиштирма қаршилиги ортишига сабаб бўлади. Бу Sb нинг манба ҳароратини бошқариш орқали, CdTe:Sb юпқа қатламларининг электрофизик хоссаларини ҳам бошқариш мумкинлигини билдиради.



12-расм. КМДО усулида олинган юпқа қатламларнинг сканерловчи электрон микроскопда олинган расмлари.

Sb нинг CdTe юпқа қатламига тушиш оқими оширилганда, намунада нуқтавий тўпланишлар кузатилиб, бу Sb оқимининг юқори ўсиш тезлиги билан боғлиқ. Sb нинг тушиш оқими оширилганда бу тўпланишларнинг концентрацияси ортиб, намунада Sb доғларини пайдо қилади. Бу ўз навбатида олинадиган юпқа қатламларнинг морфологик хоссаларини ёмонлашишига олиб келади. (12-расм).

Олинган натижалар таҳлили, 60 дақиқа давомида 300°C - 400°C ҳароратда бажарилган термик ишлов бериш вакуум муҳитида Sb легирланган $Cd/Te=0,6 - 1,0$ таркибли юпқа қатламлар учун солиштирма қаршиликларининг ўсишини кўрсатди. Бу ҳолатни Sb атомларининг CdTe юпқа қатламларидаги хусусий нуқсонлар билан ўзаро таъсири ва электр ўтказувчанликни ҳолатини кузатадиган турли хил комплекс нуқсонларининг ҳосил бўлиши билан тушунтириш мумкин. 2-жадвалда кўрсатилганидек CdTe юпқа қатламларида

ЭНГ кичик (ρ) солиштирма қаршиликка 60 дақиқа давомида $T=400^{\circ}\text{C}$ ҳароратда эришилган.

1-жадвал.

CdTe:Sb юпқа қатламларининг электрофизик хоссалари

№	$T_{\text{Cd}}^{\circ}\text{C}$	Cd (мг)	$T_{\text{Te}}^{\circ}\text{C}$	Te (мг)	$T_{\text{Sb}}^{\circ}\text{C}$	Sb (мг)	Cd/Te	қалин. d (мкм)	ўтказ. тури	Sb легирилмаган ρ (Ом·см)	Sb легирилган ρ (Ом·см)
42	560	28,9	570	21,4	850	11,4	1,35	1,65	n	$6,7 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^4$
43	560	19,4	570	17,4	860	9,65	1,1	1,81	n	$3,7 \cdot 10^6$	$9,4 \cdot 10^5$
20	530	20,6	600	20,9	650	0,5	1,01	0,66	p	$3,7 \cdot 10^6$	$4,8 \cdot 10^6$
23	530	28,8	600	28,3	760	3,5	1,0	0,12	p	$2,4 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^6$

2-жадвал.

Sb билан легирилган турли таркибли CdTe юпқа қатламларининг (ρ) солиштирма қаршилиги

	ўтказ. тури	Cd/Te	CdTe:Sb	T – 300 ⁰ C				T – 400 ⁰ C		
				20 дақ	40 дақ	60 дақ	80 дақ	20 дақ	40 дақ	60 дақ
ρ , (Ом·см)	p	0,6	$1,3 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	$9,4 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$
	p	0,7	$3,1 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^7$	$5,2 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^7$	$9,6 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^5$
	p	0,8	$3,7 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^5$	$3,7 \cdot 10^5$
	p	1,0	$9,1 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^5$	$5,5 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	$6,2 \cdot 10^5$
	n	1,2	$2,1 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^5$	$6,7 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^5$	$7,3 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^2$

Бу ҳарорат ва вақтда, p-тур ўтказувчанликни ҳосил қиладиган ва Sb атомини V_{Te} вакансия теллур ўрнига кириши учун энг қулай термодинамик ҳолат деб қараш мумкин. Ҳароратнинг яна оширилиши намуналарнинг ρ солиштирма қаршилигини ошишига сабаб бўлди. Бу намуналарда ўз-ўзини компенсациялаш содир бўлиш эҳтимоли билан тушунтирилади.

ХУЛОСА

CdTe юпқа қатламларининг морфологик, структуравий ва электрофизик, хоссаларига боғлиқ амалга оширилган тадқиқотларга асосан куйидаги хулосалар килинди:

1. Рентгеноструктуравий, сканерловчи электрон микроскоп ва атомик куч микроскопларининг натижалари таҳлиliga асосан, таглик ҳароратининг 600°C да олинган CdTe юпқа қатламлари (111) йўналишга эга бўлган поликристалл сфалерит структурага, доначалари ўлчами 5-8 мкм га ва бир жинсли 4 мкм қалинликка эга эканлиги аниқланиб, бу CdTe юпқа қатламларининг оптимал таркибида фотоволтаик қурилмалар яшашга яроқлилигини исботлайди.

2. Поликристалл CdTe юпқа қатламларида таглик ҳароратининг доначалар ўлчами ва зичлигига боғлиқлиги кўрсатилиб, тагликнинг 500°C ҳароратида олинган CdTe юпқа қатламлар яхши ориентацияланган поликристалл

структурага эгаллиги, доначалар ўлчами 2-3 мкм ташкил қилиши ва таглик ҳароратини 600°C оширганда доначалар ўлчамини 5-8 мкмгача катталашиши, бироқ структуранинг зичлашиши паст ҳароратга нисбатан камайиши аниқланди.

3. Структуравий ва морфологик таҳлил натижаларига кўра, CdCl_2 ишқорида ишлов берилган намуналарда ҳам максимал чўққи $2\theta=23.7^\circ$ да кристаллографик ўқининг (111) га мослиги ва сфалерит структурага эга эканлиги намоён бўлиб, барча CdCl_2 ишқорида ишлов берилган намуналарнинг доначалар ўлчами ўзгармай қолганлиги ва бир текис юзага эга эканлиги кузатилди.

4. CdCl_2 ишқорида ишлов берилган CdTe юпқа қатламларнинг Раман спектри намуналарда муҳим ўзгаришни намоён қилиб, (тоза Te билан боғлиқ фаза йўқолиб кетиши ва янги фаза пайдо бўлиши), спектрдаги бу модификациялар, намуналарга ишлов берилганда аввал ажралган Te атомларини қайта тақсимланишини ва умумий ҳолатда кристаллитларнинг яхшиланганини кўрсатди.

5. Te га бойитилган CdTe юпқа қатламларига CdCl_2 ишқорида ишлов берилганда намуналарнинг электрўтказувчанлиги икки марта ортиши кузатилиб, бу янги $\text{Cl}_{\text{Te}}+\text{V}_{\text{Cd}}$ ва Te_{Cd} нуқсонларга тегишли бўлган $E_v+0.24\pm0.01\text{эВ}$ ва $E_v+0.31\text{эВ}$ сатҳларнинг ҳосил бўлиши билан боғлиқлиги аниқланди;

6. Фотолюминесценция спектрларига асосан, намуналарга CdCl_2 да термик ишлов берилгандан кейин ҳам 1,41 эВ да жойлашган фотолюминесценция спектр чўққи чизиғи мавжудлиги, бироқ, 1.12 эВ да жойлашган чўққи йўқолиб кетганлиги, бунда 1.12 эВ да жойлашган чўққи вакансия теллур V_{Te} билан боғлиқ эканлиги, CdCl_2 да термик ишлов берилгандан кейин кислород атоми билан алмашиши мумкинлиги, теллур билан кислород битта гуруҳнинг элементлари бўлганлиги туфайли, кислород термик ишлов бериш жараёнида (хлор билан таққосланганда) намунага кириб V_{Te} жойини олиши аниқланди;

7. КМДО усулида Sb билан легирланган турли таркибли CdTe юпқа қатламларининг энг кичик (ρ) солиштирма қаршилиги стехиометрик таркибдан ўзгарганда $\text{Cd/Te}=1.35$ га тенг бўлганда намоён бўлиб, бу ушбу таркибда хусусий нуқтавий нуқсонларнинг озайиши билан боғлиқ эканлиги, ва ўз навбатида V_{Te} вакансия теллурнинг концентрацияси кўпайтириши, бунда CdTe:Sb юпқа қатламларида Sb атоми, Te атомининг жойини осон эгаллаб, юпқа қатламда акцептор хоссасини бериши аниқланди.

8. Вакуум муҳотида CdTe юпқа қатламлари Sb билан легирлаб, термик ишлов берилганда, Sb легирланган CdTe юпқа қатламларида энг кичик (ρ) солиштирма қаршиликка 60 дақиқа давомида $T=400^\circ\text{C}$ ҳароратда эришиш мумкинлиги аниқланиб, бу ҳарорат ва вақт, p -тур ўтказувчанликни ҳосил қилиши, ҳамда Sb атомини V_{Te} вакансия теллур ўрнига кириши учун энг қулай термодинамик ҳолат эканлиги топилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.05.2018.FM./T.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЭРГАШЕВ БОБУР АВАЗ УГЛИ

**ПРИРОДА И ПОВЕДЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ТОЧЕЧНЫХ
ДЕФЕКТОВ В ПЛЕНКАХ CdTe РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.2.PhD/FM88.

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте АН РУз.

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

Научный руководитель:	Разыков Тахирджон Муталович доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Гулямов Абдурасул Гафурович доктор физико-математических наук Турсункулов Ойбек Муйидинович кандидат физико-математических наук
Ведущая организация:	Ташкентский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM./T.34.01 при Физико-техническом институте. (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, дом 26). Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за №__). Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, дом 26. Физико-технический институт. Тел./Факс: (99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2019 г.

(реестр протокола рассылки №__ от «__» _____ 2019 г.).

Н.Р. Авезова
председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.т.н.,
ведущий научный сотрудник

А.Г. Комилов
ученый секретар Научного совета по
присуждению ученых степеней, к.т.н.

А.В. Каримов
председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых
степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире на сегодня наиболее эффективные тонкопленочные солнечные элементы созданы на основе полупроводниковых материалов CdTe, Cu(In,Ga)Se₂, в которых рекордное значение эффективности составляет соответственно 22,1% и 22,9%¹. Несмотря на усилия ученых и специалистов существует ряд технологических проблем, связанных с обеспечением требуемой проводимости получаемых тонких пленок CdTe, что сдерживает их широкомасштабное применение. В этом аспекте одной из важнейших задач, требующих решения при создании высокоэффективных тонкопленочных солнечных элементов на основе теллурида кадмия, является получение пленок с высокой проводимостью, что может быть обеспечено управлением концентрацией собственных точечных дефектов, легированием примесями во время процесса роста, технологическим контролем концентраций исходных компонент или термической обработкой пленок в различных средах после их выращивания.

На сегодняшний день в мире наряду с традиционными солнечными элементами на основе Si большое внимание уделяется разработке тонкопленочных солнечных элементов на основе CdTe, Cu(In,Ga)Se₂. В этой области реализация целевых научных исследований, в том числе научных изысканий по следующим направлениям, является одной из важнейших задач: получение пленок с высокой проводимостью посредством управления концентрацией собственных точечных дефектов, легирования примесями во время процесса роста или термической обработки пленок в различных средах. Кроме того, значимой задачей при получении тонкопленочных солнечных элементов является изготовление токосъемных контактов к тыльной поверхности солнечного элемента, которые играют важную роль в обеспечении стабильности солнечных элементов, а также разработка доступной и упрощенной технологии их изготовления.

В последние годы в нашей республике большое внимание уделяется приоритетному развитию инновационных технологий и разработок в области использования возобновляемых источников энергии, в том числе разработке доступных и высокоэффективных полупроводниковых солнечных элементов. В этом направлении по разработке фотоэлектрических элементов для эффективной работы в условиях жаркого климата, уменьшению оптических потерь путем текстурирования фотоприемной поверхности, расширению спектральной области чувствительности введением в решетку кристалла нанокластеров примесных атомов или легированием изовалентными примесями, а также по разработке и усовершенствованию технологических процессов получения тонкопленочных халькогенидных структур для солнечных элементов получены ощутимые результаты. В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан является важным «сокращение энергоемкости и ресурсоемкости экономики,

¹ Green et. al. Progress in Photovoltaics Volume27, Issue1 January 2019 Pages 3-12.

широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии, повышение производительности труда в отраслях экономики». В этом аспекте создание новых способов управления электрофизическими свойствами пленок CdTe обеспечит возможность создания на их основе доступных и высокоэффективных тонкопленочных солнечных элементов, что способствует расширению использования возобновляемых источников энергии.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит решению задач, предусмотренных в Постановлениях Президента № ПП-4348 от 30 мая 2019 года «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала отрасли», № ПП-3855 от 14 июля 2018 года «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности», № ПП-3012 от 26 мая 2017 года «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017–2021 годы», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертация выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан – IV. «Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий».

Степень изученности проблемы. Поликристаллический теллурид кадмия является одним из широко исследуемых материалов в качестве базового материала для тонкопленочной солнечной энергетики. В мире осуществляют деятельность более 15 исследовательских центров, такие как First Solar (США), Calyxo (Германия), Advanced Solar Power (Китай), Microsys International (Сингапур) и другие, в которых налажена технология изготовления фотоэлектрических модулей на основе CdTe с эффективностью преобразования 10–15%². Несмотря на то что исследовательскими центрами и компаниями используются различные технологии, следует отметить, что в получаемых солнечных элементах эффективность преобразования ограничена вследствие невысокого напряжения холостого хода ($U_{oc} \leq 860$ мВ) и коэффициента заполнения ($FF \leq 0.79$). Согласно расчетным данным по солнечным элементам на основе CdTe, солнечные элементы на основе полупроводникового материала с шириной запрещенной зоны порядка 1,41 эВ должны продемонстрировать U_{oc} и FF соответственно не менее 1000 мВ и 0.85. При достижении этих значений, учитывая уже достигнутые значения плотности тока короткого замыкания ($J_{кз} = 27$ мА·см⁻²), ожидаемая эффективность преобразования для

² <https://www.enfsolar.com/directory/panel/cdTe>

оптимизированных лабораторных солнечных элементов на основе пленок CdTe будет порядка 23%.

Заметим, что повышение напряжения холостого хода требует увеличения внутреннего диффузионного потенциала увеличением концентрации акцепторных примесей ($N_A - N_D$) в пленках CdTe. Однако проведенные исследования показали, что чрезмерное повышение степени легирования приводит к большему снижению коэффициента заполнения, чем увеличение напряжения холостого хода, вследствие чего производительность СЭ падает. Данное обстоятельство объясняется тем, что увеличение степени легирования приводит к значительному снижению длины диффузии неосновных носителей, которая определяется подвижностью носителей и их временем жизни. Увеличение длины диффузии неосновных носителей требует увеличения или подвижности носителей, или их времени жизни, или обоих параметров. Однако влияние точечных и структурных дефектов пленок CdTe на подвижность носителей и их времена жизни недостаточно изучено.

В развитие данного направления существенный вклад внесли ученые из Узбекистана Т.М. Разыков и К.М. Кучкаров³. В частности, Т.М. Разыковым впервые разработана новая технология получения поликристаллических пленок на основе халкогенидов методом химического молекулярно-пучкового осаждения (ХМПО). Благодаря достоинствам этого метода, а именно дискретному размещению источников компонент при их независимом нагреве и подаче газа-носителя через каждый из них, можно легко получать пленки заданного состава, а значит и управлять их свойствами, в частности типом проводимости и концентрацией собственных точечных дефектов (СТД) выращиваемых пленок.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» АН РУз в рамках научных проектов Ф2-Ф032 «Исследование влияния электронных состояний протяженных дефектов на кинетические и деградационные параметры в фоточувствительных поликристаллических пленках теллурида кадмия и физических процессов в тонкопленочных солнечных элементах CdS-CdTe» (2007–2011 гг.); Ф3-ФА-0-56434 «Физические закономерности формирования тонкопленочных структур и структур с нановключениями для солнечных элементов и полупроводниковых приборов» (2012–2015 гг.), а также в рамках международного проекта совместно с США, M/CRDF-43/2013 «Исследование физических свойств пленок CdTe различного состава для изготовления эффективных тонкопленочных солнечных элементов» (2014–2015 гг.).

Целью исследования является выявление природы и поведения собственных точечных дефектов в пленках CdTe различного состава, а также термообработанных в растворе CdCl₂ и легированных Sb.

³ http://fti.uz/sotrudniki-laboratorii/?SECTION_ID=32

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи исследования**:

выявление оптимальных технологических условий выращивания пленок CdTe методом ХМПО для изучения электрофизических и оптических характеристик пленок;

исследование морфологических, структурных и электрофизических свойств пленок CdTe в зависимости от состава паровой фазы во время процесса роста;

определение влияния термической обработки раствором CdCl_2 на свойства пленок, выращенных CdTe различного состава;

изучение природы и поведения точечных дефектов в пленках CdTe различного состава;

установление степени влияния легирования примесными атомами Sb на электрофизические свойства пленок CdTe различного состава.

Объектами исследования являются тонкие пленки на основе CdTe различного состава, выращенные методом ХМПО.

Предметом исследования являются природа собственных точечных дефектов в пленках CdTe различного состава и их влияние на электрофизические свойства пленок.

Методы исследования. В работе применены комплексные методы исследования тонких пленок: вольтамперные, температурные, морфологические, рентгеноструктурные и люминесцентные методы изучения характеристик и свойств материала.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлено, что уменьшение потока молекул, поступающих на подложку до 10^{13} – 10^{14} см²/сек⁻¹, где скорость роста пленок составляет 10^{-1} ÷ 10 Å/сек, при синтезе пленок из элементарных компонент методом ХМПО позволяет получить пленочные наноструктуры на поверхности CdTe, способствующие получению высококачественных омических контактов;

выявлено, что управляя соотношением интенсивности молекулярных пучков Cd/Te в паровой фазе и контролем последовательного потока осаждаемых элементов на подложку, можно получать поликристаллические пленки CdTe и контролировать удельное сопротивление этих пленок в широком интервале 10^4 ÷ 10^8 Ом·см;

выявлено, что обработка пленок в растворе CdCl_2 приводит к увеличению размеров исходных зерен и вследствие этого исчезновению пространственных межзерновых пустот, способствуя образованию плотноупакованной структуры зерен на поверхности пленок CdTe;

обнаружено на основе спектров фотолюминесценции пленок CdTe различного состава при температуре 20 К наличие двух пиков 1,41 эВ и 1,12 эВ, первый из которых соответствует уровню $E_V+0.15$ эВ и относится к однозарядным вакансиям кадмия V_{Cd}^- , а возникновение второго пика обусловлено уровнем $E_C-0.48$ эВ и относится к двухзарядным вакансиям теллура V_{Te}^{++} или междоузельным атомам кадмия Cd_i^{++} .

показано, что при термической обработке пленок CdTe на воздухе атомы кислорода замещают вакансии теллура V_{Te} , являющегося донорным уровнем, в результате повышается концентрация акцепторов и соответственно р-тип проводимости, который объясняет резкое повышение КПД тонкопленочного солнечного элемента на основе CdTe при отжиге в среде, содержащей кислород;

показано, что для пленок CdTe, полученных методом ХМПО, легирование Sb приводит к значительному уменьшению удельного сопротивления только пленок, осажденных из парогазовой смеси, обогащенной Cd, и обусловлено тем, что при легировании атомы Sb замещают вакансии теллура V_{Te} , а также придают пленкам акцепторные свойства.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

установлены закономерности зависимости механизма дефектообразования в пленках CdTe различного состава полученных методом ХМПО;

предложен способ повышения фоточувствительности пленки CdTe.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием комплекса независимых и взаимодополняющих методов измерения и обработки данных, а также соответствием полученных результатов существующим физическим представлениям о тонких пленках. Эксперименты были проведены также в Университете Южной Флориды (США), Университете Парма (Италия) и Национальном Университете Малайзии (Малайзия).

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований заключается в расширении физических представлений о собственных точечных дефектах в пленках CdTe.

Практическая ценность работы заключается в том, что выявленные электрофизические свойства пленок CdTe с различным составом позволяют улучшить функциональные характеристики тонкопленочных солнечных элементов на их основе.

Внедрение результатов исследования. На основе изучения природы и поведения собственных точечных дефектов в пленках CdTe различного состава и их электрофизических свойств:

полученные результаты по оптимизации параметров пленок теллурида кадмия термической обработкой в растворе $CdCl_2$ были применены при исследованиях для улучшения электрофизических и оптических свойств пленок теллурида кадмия и солнечных элементов на их основе в зарубежных журналах (Thin Solid Films, 582, 134-138, 2015, IF: 1.939; Advances in Condensed Matter Physics, 2016, Article ID 8068396, IF: 0.959; Physica Status Solidi A, 213(12), 3231-3237, 2016, IF: 1.795 и т.д.). Использование научных результатов позволило улучшить морфологию и структуру пленок теллурида кадмия, увеличить их удельную проводимость, а также улучшить эффективность преобразования солнечных элементов на их основе;

полученные результаты по улучшению морфологии и структуры пленок CdTe, а также их электрофизических свойств управлением состава паровой фазы во время процесса роста пленок были применены для осуществления управляемого изменения электрофизических и оптических свойств пленок

теллурида кадмия (см. в зарубежных журналах Materials Science and Engineering B, 171, 73–78, 2010, IF: 3.316; Physica B, 407, 4214–4220, 2012, IF:1.453; Optik, 124, 2165–2170, 2013, IF:1.191 и т.д.). Использование научных результатов позволило получить пленки теллурида кадмия с заданными параметрами.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на 9 международных и 6 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 20 научных трудах, в том числе в 5 статьях в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Текст диссертации изложен на 104 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе «Анализ электрофизических свойств пленок теллурида кадмия и методов их получения» представлен литературный обзор, в который включены основные физико-химические свойства CdTe. Рассматриваются процессы дефектообразования в CdTe, а также роль собственных и примесных точечных дефектов на электрофизические и оптические свойства пленок CdTe. Приводится анализ литературных данных по методам получения и использования пленок указанных соединений. Кроме того, рассматриваются преимущества и недостатки технологических методов получения пленок на основе CdTe. На основе анализа имеющихся экспериментальных и теоретических данных сформулирована цель и постановлены задачи исследований.

Вторая глава «Особенности технологии получения пленок CdTe и методы их исследования» посвящена выращиванию пленок CdTe различного состава методом ХМПО и методике комплексных исследований физических свойства пленок.

Следует отметить, что при выборе технологии изготовления тонкопленочных солнечных элементов наземного применения, помимо физических возможностей метода следует учесть его экономичность, простоту, вероятность выращивания пленок на больших площадях, автоматизацию и приспособляемость к массовому производству.

Для получения пленок теллурида кадмия с различным составом используется метод ХМПО. Применены отдельные источники Cd и Te с особой чистотой 99.999% и 99.999% соответственно. Образцы CdTe получены на стеклянную (боросиликат) и металлическую (молибден) подложку. Пленки были выращены в потоке водорода при атмосферном давлении. Толщина выращенных образцов варьировались от 1 до 5 мкм.

Варьируя давлениями паров Cd и Te, можно получать поликристаллические слои CdTe в широком диапазоне соотношения $Cd/Te = 0,5-1,5$ в реакционной газовой смеси благодаря квазизамкнутому объему реакционной камеры.

Для изучения физических свойства пленок CdTe нами применен комплексный метод исследования. Это обуславливалось тем, что до начала наших исследований в литературе существовало мало информации о получении пленок CdTe химическим молекулярно-пучковым осаждением. Комплексное исследование пленок заключалось в изучении типа проводимости, электропроводности и ее температурной зависимости, измерением ВАХ и фотолюминесценции. Использованы также методы оптической металлографии, рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии.

Для выполнения электрических измерений к осажденным пленкам были нанесены омические контакты с использованием вакуумного напыления. В данном случае омический контакт был использован к пленкам n-типа (электронной проводимости)- сплав индий-галлий или индий, а к пленкам p-типа (дырочной проводимости) серебро, медь или серебряную пасту. По знаку термоЭДС определяли тип проводимости образцов. Для высокоомных образцов измерение типа проводимости использовался электрометр В7-30 с сопротивлением больше 10^{14} Ом для показания знака термо ЭДС, которая позволяла измерить образцы с удельным сопротивлением больше 10^8 Ом · см.

Омичность контактов проверяли измерением ВАХ и изучением потенциала вдоль образца. Качественными для проведения дальнейших исследований считались те образцы, у которых характеристики ВАХ не имели свойства выпрямления в широком диапазоне измеряемых напряжений.

Измерение удельного сопротивления (ρ) и постоянной Холла (R_x) в пленках производили по методу Ван-дер Пау. Использование электрометров типа У5-9 позволило вести измерения в высокоомных образцах с $\rho > 10^8$ Ом·см. Измерение ρ при низких температурах 80–300 К проводили в специально разработанном вакуумном криостате.

Микроструктуру пленок исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) HITACHI S800 и атомно-силовым микроскопе (АСМ) EasyScan 2 FlexAFM. Для изучения состава пленки была использована энергетически дисперсионная спектроскопия на основе EDAX-Phoenix EDS System. Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием устройства PANALYTICAL X'PERT PRO MRD (измерения были проведены в Университете Южной Флориды (США), Университете Парма (Италия) и Национальном Университете Малайзии (Малайзия)).

В третьей главе «Морфология, структура и электрофизические свойства пленок CdTe с различным составом» приведены результаты исследования морфологии, структуры и электрофизических свойств пленок CdTe различного состава с применением методов электромикроскопического, рентгеноспектрального анализа и температурной зависимости электропроводности, а также приведены результаты измерения фотолюминесценции при 20 К.

На рис. 1 показаны снимки СЭМ для образцов, полученных при 600 °С. Как видно из рисунка, микроструктура (форма и размер зерен) образцов с близкой к стехиометрическому составу, имеет схожий вид, кроме пленок, имеющих соотношение состава Cd/Te-0,79. Данные образцы (Cd/Te - 1,01;1,08) обладают ориентированную поликристаллическую структуру, размер зерен составляет 3–5 мкм, но структура (зерен) пленок не упакована. В то же время пленки обогащенных теллуром (соотношение состава Cd/Te - 0,79) также имели

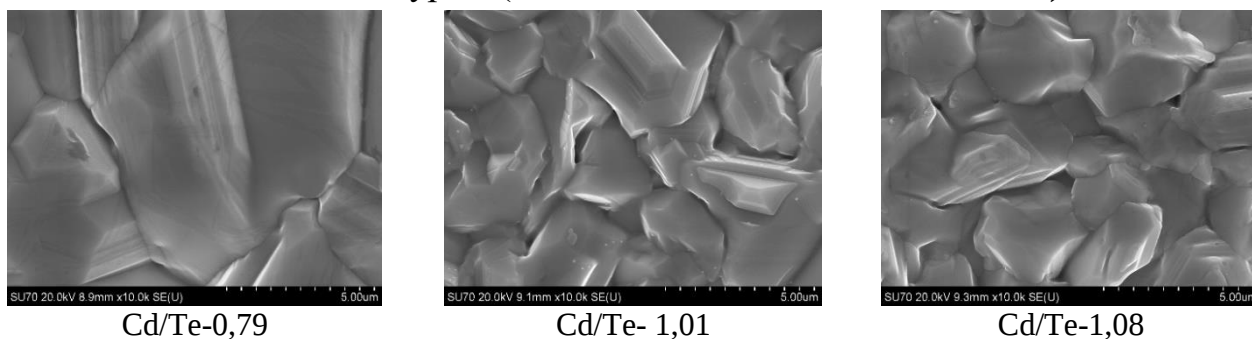


Рис. 1. Снимки сканирующего электронного микроскопа для пленок CdTe различного состава.

ориентированную поликристаллическую структуру, размер зерен составляет 5–10 мкм, но структура (зерен) пленок более плотноупакована.

Спектры дифракции рентгеновских лучей для пленок CdTe, выращенных при температуре подложки 600°С в потоке водорода с соотношением различного состава (Cd/Te ~ 0.79, 0.88, 0.94, 1.01, 1.05, 1.08), представлены на рис. 2. Значения, передающие кристаллическую ориентацию, также обозначены над пиками.

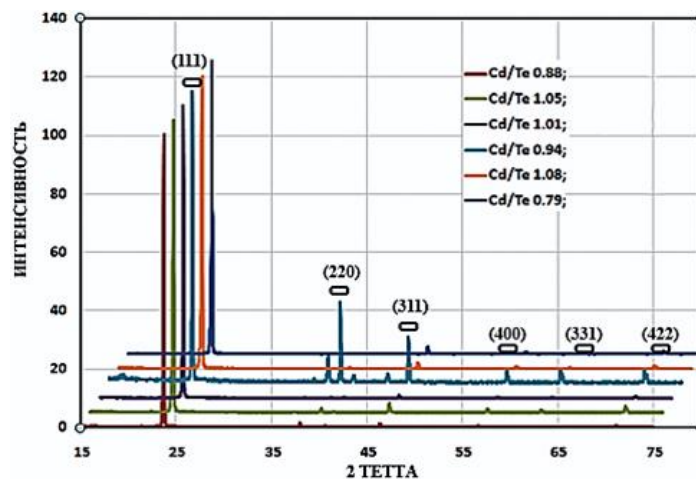


Рис. 2. Рентгеновские спектры для пленок CdTe различного состава.

Спектры дифракции рентгеновских лучей для всех образцов имеют огромный пик при $2\theta = 23.7^\circ$, который совпадает кристаллографической оси (111). Это доказывает, что пленки CdTe были выращены с ориентацией (111) и со структурой сфалерита. Для пленок соотношением состава Cd/Te=0,94 также выявлялись пики соответствующие ориентации (200), (311) и (400). Это объясняется различной толщиной пленки. Пленки толщиной до 0,5 мкм очень тонкие и имеют соответствующие пики с ориентацией (200), (311) и (422).

С увеличением толщины от 0,5 мкм исчезает интенсивность пиков по этому направлению, и пленки начинают выращиваться с ориентацией (111). Для образцов с составом, близким к стехиометрическому, доминируют пики с преимущественной ориентацией (111). Пленки CdTe ориентированы с постоянной решетки, $a = 6.487 \text{ \AA}$.

Далее была изучена рентгеновская дифракция для образцов, выращенных при температуре подложки 500°C .

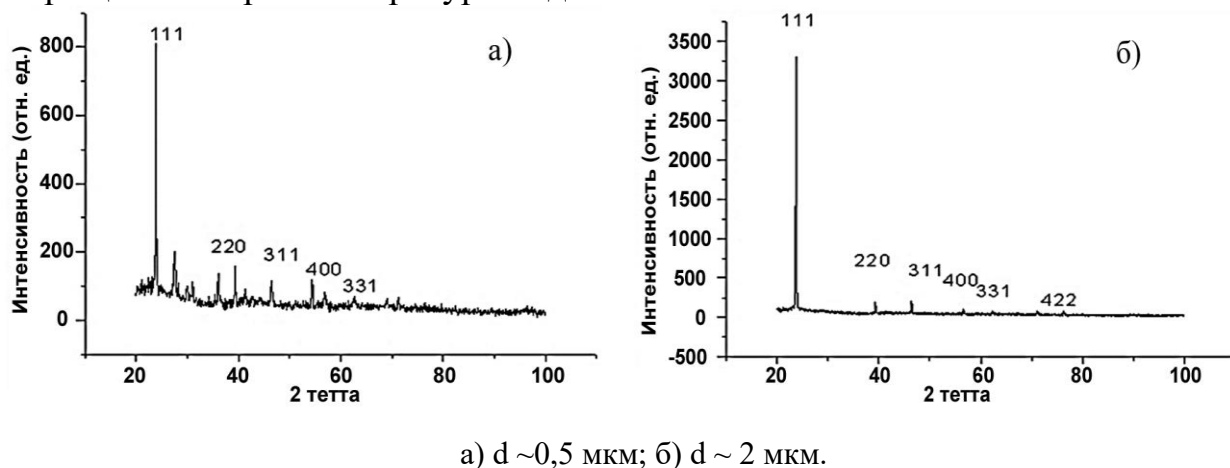
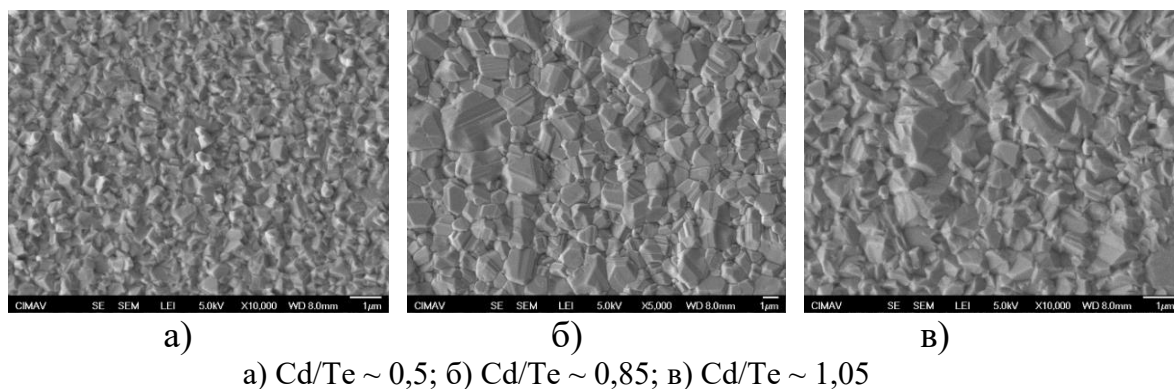


Рис. 3. Дифракционные спектры рентгеновских лучей для пленок CdTe различной толщины.

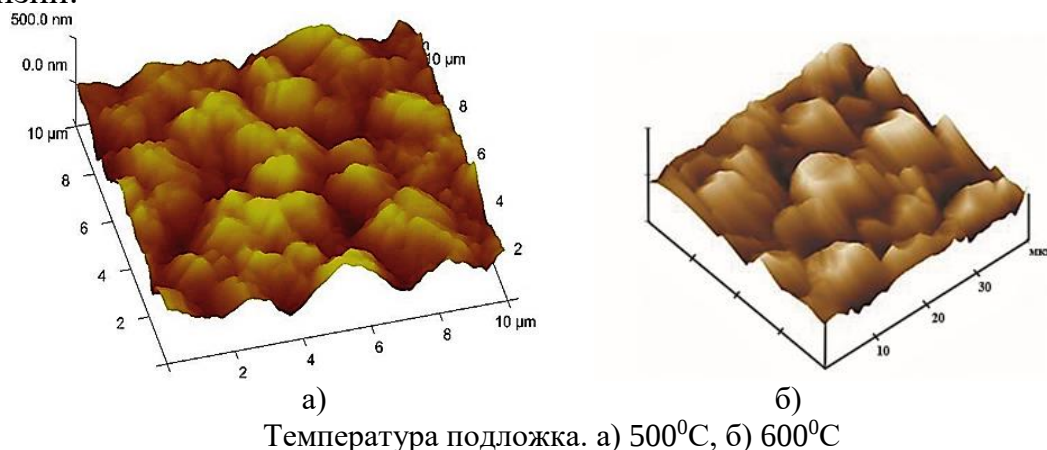
На рис. 3 представленная рентгеновская дифракция для образцов CdTe, полученных с различной толщиной, характеризуется присутствием ярко выраженного пика при $2\theta = 23.7^\circ$. Он соответствует кристаллографическому направлению (111) и очевидно, что все пленки CdTe имеют сфалеритную структуру. Наблюдались также пики при (220), (311) и (440). Интенсивность этих пиков зависела от толщины образцов. Присутствие в образцах толщиной 2 мкм пиков (220), (311) и (440) показывает, что для этого образца характерна кубическая решетка с координационным числом 12. Согласно этим результатам, параметр решетки, $a = 6.481 \text{ \AA}$ (точность 0.093%).

На рис. 4 приведены снимки СЭМ для следующей партии образцов, полученных при температуре 500°C различного состава методом ХМПО. Данные образцы, как видно из рис.4, также обладали ориентированную поликристаллическую структуру, в то же время размер зерен составляет 2–3 мкм, но структура пленок более упакована.



а) $\text{Cd/Te} \sim 0,5$; б) $\text{Cd/Te} \sim 0,85$; в) $\text{Cd/Te} \sim 1,05$
Рис. 4. Растровые снимки сканирующего электронного микроскопа для пленки CdTe различного состава, полученные при температуре подложки 500°C

Рис. 5 является 3D изображением АСМ для образцов CdTe, выращенных при температуре подложки 500°C и 600°C . Исследование морфологических свойств пленок теллурида кадмия различного состава с помощью атомносилового микроскопа было выполнено в Национальном Университете Малайзии.



Температура подложки. а) 500°C , б) 600°C
Рис. 5. 3D изображения АСМ для пленок CdTe, полученных методом ХМПО

На основе анализа рентгеноструктурного, сканирующего электронного микроскопа и атомно-силового микроскопа было выявлено, что пленки CdTe стехиометрического состава, полученные при температуре подложки 600°C , имеют поликристаллическую сфалеритную структуру с ориентацией (111), размерами зерен 5–8 мкм и с однородной толщиной пленок ~ 4 мкм. Образцы CdTe со стехиометрическим составом, полученные при 500°C , кроме того обладали направленной поликристаллической структурой, размер зерен составлял 2–3 мкм, но структура пленок более плотноупакована. Это обуславливает вероятность выращивания пленок CdTe оптимального состава, которые применимы для изготовления фоточувствительных устройств.

Спектры фотолюминесценции для пленок теллурида кадмия различного состава выращенные при температуре подложки 600°C представлены на рис.6. Для двух образцов соотношение состава Cd/Te составляло 0.54 и 1.16.

На спектрах фотолюминесценции наблюдалось наличие два пика, первый который совпадает 1.41 эВ или 900 нм для обоих составов, пик второго обнаружено в интервале 1-1.12 эВ, который совпадает 1100 нм. Вероятно этот

пик обусловлен из-за перехода электронов на акцепторный уровень $E_V+0.15$ эВ из зоны проводимости и, по-видимому, относится к междоузельным атомам

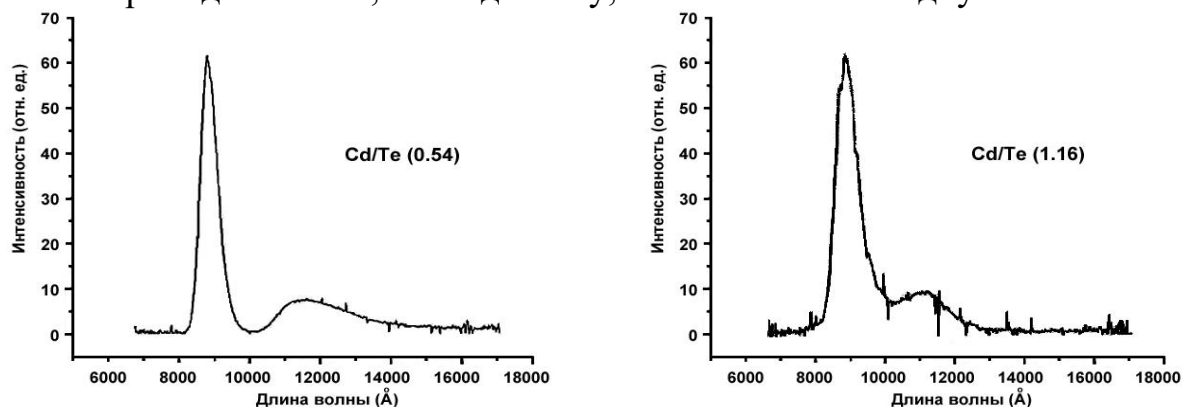


Рис. 6. Спектры фотолюминесценции для пленок CdTe различного состава.

теллура Te^- или в однозарядным вакансиям кадмия V_{Cd}^- пленках CdTe. При этом пик 1.12 эВ обусловлен из-за перехода электронов в валентную зону с донорного уровня $E_C - 0.48$ эВ. Данный донорный уровень относится к междоузельным Cd_i^{++} атомам кадмия или двухзарядным вакансиям V_{Te}^{++} теллура.

Измерение электропроводности (σ) при низких температурах 80–300 К проводили в специально разработанном вакуумном криостате. Определены энергии активации дефектов.

На рис. 7 приведены кривые температурных зависимостей электропроводности для пленок с соотношением Cd/Te=0,64; 0,73; 0,82; 0,92; 0,97 и Cd/Te=1,14.

Из рис. 7 видно, что температурные зависимости электропроводности для измеренных образцов имеют вид простой экспоненты с энергией активации $E_{a1}=E_V+0,42\pm0,03$ эВ. Для пленок с соотношением состава Cd/Te=1,14 определен уровень с энергией активации $E_{a2}=E_C-0,45$ эВ. По данным литературны, значения этих энергий активации E_{a1} соответствуют однократной вакансии кадмия V_{Cd}^- и E_{a2} двукратно-ионизованного междоузельного кадмия Cd_i^{++} .

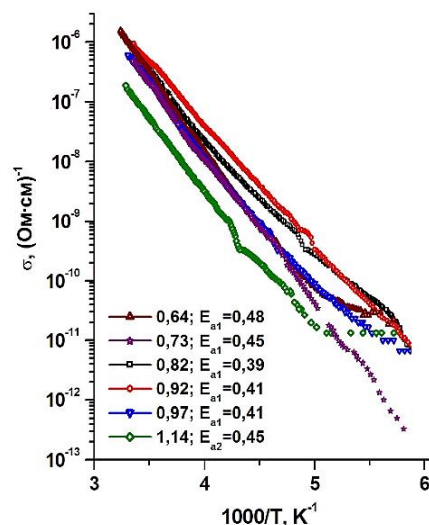


Рис.7. Температурные зависимости электропроводности в пленках CdTe различного состава.

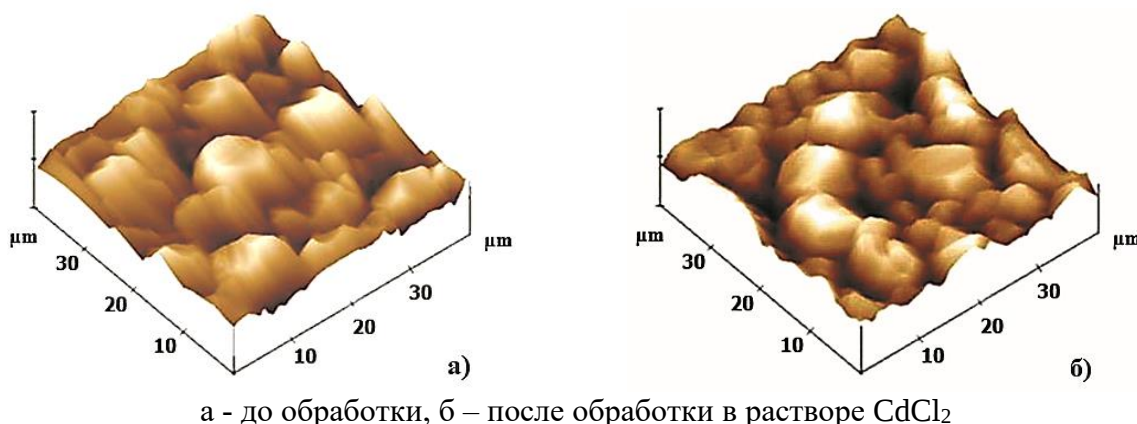
Четвертая глава «Влияние термической обработки в растворе $CdCl_2$ на свойства пленок CdTe» посвящена исследованию влияние термической обработки в растворе хлорида кадмия на морфологические, структурные и электрофизические свойства, а также на собственные точечные дефекты в пленках CdTe различного состава.

Процесс нанесения раствора $CdCl_2$ на поверхность пленок CdTe был выполнен в высоком вакууме. Данный процесс проводился следующим

образом: на поверхность пленки CdTe наносился слой CdCl₂ с различной толщиной. При этом сам процесс нанесения CdCl₂ проводился в разработанном нами специальном квазизамкнутом объеме, находящегося в высоком вакууме. Для проведения процесса нами была изготовлена специальная конструкция цилиндрической головки из кварца.

Перед процедурой напыления пленок промывались очищенным этиловым спиртом. Далее после визуального исследования поверхности образцов на микроскопе на пригодность их к напылению образцы помещали в специальную маску алюминиевой фольги. Затем на поверхность пленок CdTe различной толщиной наносились тонкие слои CdCl₂. Толщина CdCl₂ составляла 200-300 нм и она контролировалось временем осаждения CdCl₂. В тоже время, чтобы предотвратить поверхностное окисления образцов проводилось постепенное остывание при высоком вакууме. Остаточный осадок хлорида кадмия с поверхности образцов промывали очищенным метиловым спиртом.

После проведения нанесения CdCl₂ образцы подвергались термообработке в специальной установке для термоотжига при температуре 390–400⁰С в течение 30 минут на воздухе. Затем наносились токосъемные контакты из серебряной пасты или сплава индия-галлия. Для вплавления контактов на поверхности пленок проводился дополнительный термоотжиг при температуре 250–270⁰С в течение 30 минут. После этих технологических этапов были проведены исследование морфологических, структурных и электрофизических свойств исходных пленок.



а - до обработки, б – после обработки в растворе CdCl₂
Рис. 8. 3D изображение атомно-силового микроскопа для пленок CdTe

После проведения обработки в среде CdCl₂ были исследованы морфология пленок CdTe методом атомно силового микроскопа. Согласно 3D изображению (см. рис. 8), после обработки пленок CdTe в растворе CdCl₂ микроструктура, размеры зерен не изменялись и наблюдалась наличие равномерной поверхности.

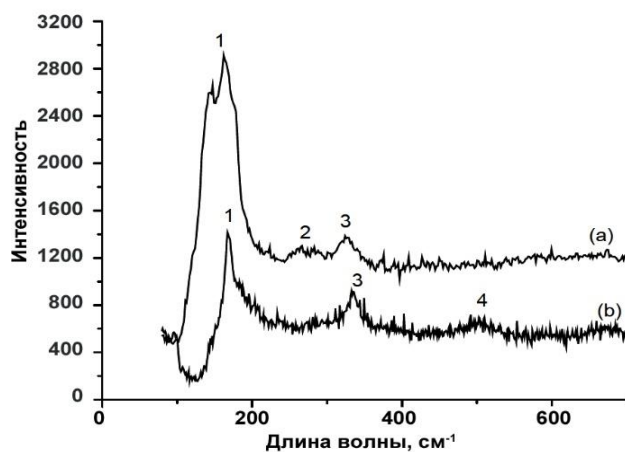
На основе анализа пленок атомно-силовым микроскопом, полученных 3D изображений было определено, что для выращивания ориентированной поликристаллической структуры, имеющая предпочтительный размер зерен 6-8 мкм, необязательно проводить обработку в растворе хлорида кадмия, т.к. данная обработка значительно не изменяет морфологию образцов полученных методом ХМПО.

Анализ полученных результатов показывает следующее:

а) при измерении морфологии пленок атомно-силовым микроскопом наблюдалась хорошо ориентированная поликристаллическая структура с размером зерен 6–8 мкм;

б) после термической обработки в растворе CdCl_2 не наблюдалось существенного изменения морфологических свойств. Только отмечалось, что обработка в растворе CdCl_2 приводит к перераспределению кристаллических зерен, при этом структура пленки становится более плотноупакованной.

На рис. 9 показан спектр комбинационного рассеяния стехиометрического образца CdTe . (спектр а) Широкополосный пик 1 имеет вклад продольной оптической моды (LO) CdTe при 165 см^{-1} и сильном режиме E_{TO} Te при 145 см^{-1} . Пик 2 может быть связан с суммарной фазой самого сильного Te моды A_1 (120 см^{-1}) + E_{TO} (145 см^{-1}), а пик 3 соответствует второй гармонике LO-фонона. Рамановский спектр пленки, обработанной CdCl_2 (рис. 9, спектр б), показывает важные изменения. Фазы, связанные с чистыми Te , исчезли, и появилась новая фаза 4. Эти модификации в спектре показывают, что обработка благоприятствует перераспределению ранее разделенных атомов Te и что общее качество кристаллов улучшилось, так как теперь спектр доходит до обертона LO (пик 4). Внешний вид фононных обертонов является мерой кристаллического качества.



а - до обработки, б – после обработки в растворе CdCl_2 .

Рис.9. Спектр комбинационного рассеяния стехиометрического образца CdTe .

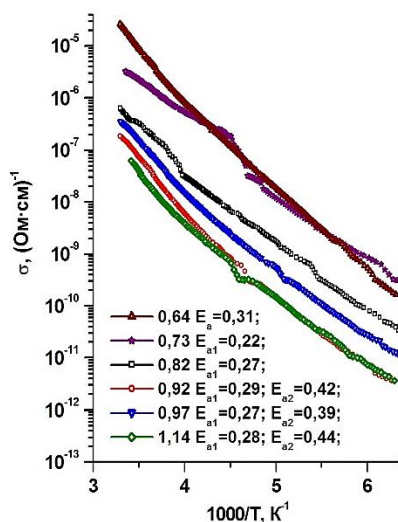


Рис. 10. Температурные зависимости

электропроводности в пленках CdTe различного состава после термической обработки в растворе CdCl_2

На рис. 10 приведены кривые температурных зависимостей электропроводности для пленок с соотношением $\text{Cd}/\text{Te}=0,64; 0,73; 0,82; 0,92; 0,97$ и $\text{Cd}/\text{Te}=1,14$ после термической обработки в растворе CdCl_2 .

Из кривой для образца с составом $\text{Cd}/\text{Te}=0,64$ вычислен уровень энергии активации $E_a=E_v+0,31$ эВ. Этот уровень относится к дефекту Te_{Cd} , возможно, введенного во время процесса роста.

Уровень $E_{a1}=E_v+0,22$ эВ, вычисленный из графика для пленок с составом $\text{Cd}/\text{Te}=0,73$, является акцепторным и относится V_{Cd} или $\text{Cl}_{\text{Te}}+V_{\text{Cd}}$.

Для образца $\text{Cd}/\text{Te}=0,82$ вычислен уровень с энергией активации $E_{a3}=E_v+0,27$ эВ.

Некоторые авторы связывают дефектную полосу с энергией активации, изменяющейся между (0,27–0,35 эВ), с металлическими примесями, такими как Cu , Ag , Au , Pb , в частности

приписывали эту энергетическую зону загрязнению Cu путем сравнения электрического поведения с концентрациями уровня Cu и 0,33 эВ. Диссоциация комплексных уровней или диффундирующих примесей во время термической обработки может вызвать появление дефектной полосы (0,3–0,4 эВ). Также полученные результаты можно объяснить, рассматривая участие в термодинамическом равновесии антиструктурного дефекта, являющегося акцептором – Te_{Cd} . Образование антиструктурных дефектов можно представить, как переход атомов Te из узлов или междоузельных Te_i на место V_{Cd} .

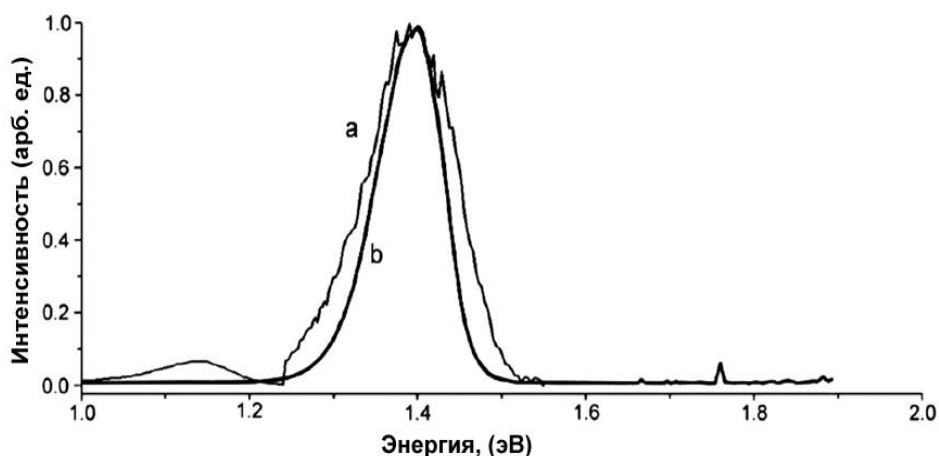
Следующие кривые соответствуют температурной зависимости пленки с составом $\text{Cd/Te}=0,92;0,97$. Для них характерен более сложный вид: наличие двух экспоненциальных участков – высокотемпературного с энергией активации $E_{a4}=E_v+0,40\pm0,01$ эВ и низкотемпературного с энергией активации $E_{a5}=E_v+0,28\pm0,01$ эВ. Уровень $E_v+0,40\pm0,01$ эВ является акцептором и соответствует однократной вакансии кадмия $\text{V}_{\text{Cd}}^{-1}$. $E_v+0,28\pm0,01$ эВ относится к металлическим примесям или антиструктурным дефектам.

Для пленок с составом $\text{Cd/Te}=1,14$ тоже характерен сложный вид: наличие двух экспоненциальных участков – высокотемпературного с энергией активации $E_{a6}=E_c-0,45$ эВ и низкотемпературного с энергией активации $E_{a7}=E_c-0,28$ эВ. Уровни $E_c-0,45$ эВ и $E_c-0,28$ эВ являются донорными и относятся к двукратно ионизованному кадмию междоузельному Cd_i^{++} . Уровень $E_c-0,28$ эВ относится к дефектным комплексам $4\text{Cu}_{\text{Cd}}+\text{Cl}_{\text{Te}}$.

После термообработки в растворе CdCl_2 уменьшается удельное сопротивление пленок с соотношением $\text{Cd/Te}=0,64;0,73$ от 10^7 Ом·см до 10^5 Ом·см, к тому же удельное сопротивление пленок, обогащенных кадмием, и стехиометрического состава изменились незначительно и остались в пределах $\sim 10^7$ Ом·см. Эти результаты показывают, что термическая обработка в растворе хлорида кадмия иногда не приводит к увеличению размера зерен, в частности для крупнозернистых образцов, которые выращены методом ХМПО, но она фактически влияет на собственные точечные дефекты CdTe .

Пленки теллурида кадмия можно рассмотреть, как компенсированный материал, включающий $E_v+0,42\pm0,03$ эВ акцепторный уровень и $E_c-0,45$ эВ уровень донора. Физические свойства, в частности удельное сопротивление пленок CdTe , управляются в зависимости от активности этих уровней. Уровень $E_c-0,45$ эВ соответствует междоузельному кадмию Cd_i^{++} , который преобладает в пленках, обогащенных Cd , и соответственно в пленках n -типа проводимости. Уровень $E_v+0,42\pm0,03$ эВ соответствует V_{Cd} вакансии кадмия, который преобладает в пленках, обогащенных Te , т. е. в образцах p -типа проводимости. Мы заметили значительное понижение удельного сопротивления в образцах, обогащенных Te при обработке в растворе хлорида кадмия. Это возникает из-за образования $E_v+0,24\pm0,01$ эВ нового уровня, который связан с $\text{V}_{\text{Te}}^{++}$ вакансией теллура.

Из рис. 11 видно, что характерным для пленок CdTe является наличие двух пиков, первый из которых совпадает 1,41 эВ или 900 нм для обоих составов, пик второго обнаружено в интервале 1,12 эВ, которая совпадает 1100 нм. Возможно этот пик обусловлен из-за перехода электронов на акцепторный



а) до CdCl_2 обработки; б) после CdCl_2 обработки

Рис. 11. Фотолюминесценция для пленок с соотношением $\text{Cd}/\text{Te}=1$

уровень $E_V + 0.15$ эВ из зоны проводимости и, по-видимому, относится к междоузельным атомам теллура Te_i^- или в однозарядным вакансиям кадмия V_{Cd}^- пленках CdTe . При этом пик 1.12 эВ обусловлен из-за перехода электронов в валентную зону с донорного уровня $E_D - 0.48$ эВ. Данный донорный уровень относится к междоузельным Cd_i^{++} атомам кадмия или двухзарядным V_{Te}^{++} вакансиям теллура.

После термообработки CdCl_2 все еще присутствовала полоса PL, расположенная на уровне 1,41 эВ; однако полоса 1.12 эВ не была обнаружена. Предварительное заключение состоит в том, что пик 1.12 эВ был связан с вакансией теллура (V_{Te}), который, возможно, был заменен кислородом после термообработки CdCl_2 . Кислород присутствует во время термообработки и, скорее всего, занимает вакансию теллура (по сравнению с хлором), поскольку кислород и теллур являются одними и теми же элементами группы.

В пятой главе «Исследование физических свойств пленок CdTe легированных Sb » рассмотрены и приведены результаты исследований влияния легирования Sb на морфологические и электрофизические свойства пленок CdTe различного состава.

Следует отметить, что примесь Sb впервые применялась в нашей установке ХМПО в качестве легируемой примеси для пленок теллурида кадмия. Поэтому для нахождения оптимальной толщины и температуры осаждения Sb нами предварительно проведено нанесение слоев Sb на поверхность стекла из бинарного источника. После подборов оптимальных режимов осаждения (температуры и толщины слоев) проводился рост пленок теллурида кадмия, легированного Sb . В данном случае для бинарной компоненты легируемой примеси температура составляла 600–850 $^{\circ}\text{C}$.

Для исследования электрофизических свойств пленок $\text{CdTe}:\text{Sb}$ проводилось измерение температурной зависимости удельного сопротивления методом Ван дер-Пау. Экспериментальные результаты для пленок $\text{CdTe}:\text{Sb}$, полученных методом ХМПО и вакуумным напылением, приведены в табл. 1, 2. Как показано в таблице 1, наименьшее удельное сопротивление (ρ) пленок CdTe различного состава, легированных Sb

полученных методом ХМПО, наблюдается при составе $\text{Cd/Te}=1,35$. Это обусловлено тем, что при данном составе происходит уменьшение собственных точечных дефектов, которые в свою очередь снижают концентрацию V_{Te} вакансия теллура, то время как в пленках CdTe:Sb атомы Sb легко занимают место атома теллура, которые придают пленкам акцепторные свойства. Для других составов удельное сопротивление пленок CdTe:Sb фактически остаётся неизменным подобно нелегированным пленкам. В другом случае при стехиометрическом составе и отклонении от стехиометрического состава обогащенных Te пленок CdTe увеличивается концентрация собственных точечных дефектов. Здесь в пленках CdTe:Sb атомы Sb образуют с СТД комплексные скопления дефектов, которые увеличивают удельное сопротивление данных пленок. Это позволяет, управляя температурой источника Sb, управлять электрофизическими свойствами пленок CdTe (удельное сопротивление).

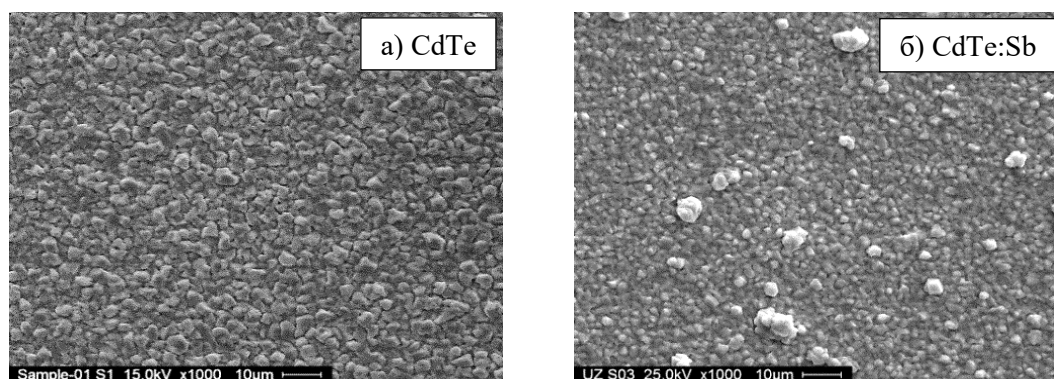


Рис. 12. Снимки сканирующего электронного микроскопа для пленок, полученных методом ХМПО.

Несмотря на это при увеличении падающего потока Sb в пленках CdTe образуются точечные вкрапления, обусловленные высокой скоростью осаждения потоков Sb. С увеличением падающего потока Sb происходит увеличение концентрации данных вкраплений, образуя пятна Sb. Это в свою очередь приводит к ухудшению морфологических свойств исходных пленок, как показано на рис. 12.

Анализ полученных результатов показывает следующее: термоотжиг при температуре $300\text{--}400^\circ\text{C}$ в течение 60 минут в вакууме вызывает направленное увеличение электропроводности образцов нанесением слоя Sb для интервала состава пленок CdTe 0,6 до 1,0. Подобные явления можно объяснить взаимодействием Sb с СТД, присущим пленкам CdTe различного состава, и образованием различного рода дефектных комплексов, определяющих наблюдаемое поведение в электропроводности. Как показано в табл. 2, наименьшее удельное сопротивления (ρ) пленок CdTe , легированных Sb, было достигнуто при температуре отжига $T=400^\circ\text{C}$ в течение 60 минут.

Таблица 1

Параметры пленок CdTe различного состава

№ _{обр}	T _{Cd} °C	Вес Cd (мг)	T _{Te} °C	Вес Te (мг)	T _{Sb} °C	Вес Sb (мг)	Cd/Te	Толь. d (мкм)	Тип пров	ρ без лег. Sb (Ом·см)	ρ лег. Sb (Ом·см)
42	560	28,9	570	21,4	850	11,4	1,35	1,65	n	6,7·10 ⁶	1,9·10 ⁴
43	560	19,4	570	17,4	860	9,65	1,1	1,81	n	3,7·10 ⁶	9,4·10 ⁵
20	530	20,6	600	20,9	650	0,5	1,01	0,66	p	3,7·10 ⁶	4,8·10 ⁶
23	530	28,8	600	28,3	760	3,5	1,0	0,12	p	2,4·10 ⁸	1,6·10 ⁶

Таблица 2

Удельное сопротивление (ρ) пленок CdTe различного состава легированных Sb

	Тип пров.	А/В CdTe	Предв. Отжиг	T _{отж} – 300°C				T _{отж} – 400°C		
				20 мин	40 мин	60 мин	80 мин	20 мин	40 мин	60 мин
ρ, (Ом·см)	p	0,6	1,3·10 ⁶	1,6·10 ⁶	2,2·10 ⁶	3,4·10 ⁶	1,5·10 ⁶	1,6·10 ⁶	9,4·10 ⁵	2,1·10 ⁵
	p	0,7	3,1·10 ⁷	2,8·10 ⁷	4,1·10 ⁷	5,2·10 ⁷	2,3·10 ⁷	9,6·10 ⁵	1,4·10 ⁵	3,3·10 ⁵
	p	0,8	3,7·10 ⁶	2,3·10 ⁶	4,3·10 ⁶	2,3·10 ⁶	1,2·10 ⁶	3,4·10 ⁵	1,9·10 ⁵	3,7·10 ⁵
	p	1,0	9,1·10 ⁸	2,5·10 ⁵	6,5·10 ⁵	1,6·10 ⁵	2,8·10 ⁵	5,5·10 ⁵	1,3·10 ⁵	6,2·10 ⁵
	p	1,2	2,1·10 ⁷	2,3·10 ⁵	6,7·10 ⁶	2,8·10 ⁵	7,3·10 ⁵	1,2·10 ⁵	1,1·10 ⁵	1,1·10 ²

Предполагается, что данная температура и время наиболее благоприятны для замещения теллура сурьмой, тем самым обеспечивая p-тип проводимости. Дальнейший рост температуры приводил к увеличению ρ, что можно объяснить увеличением вероятности самокомпенсации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований взаимосвязи морфологических, структурных и электрофизических свойства пленок Cd/Te различного состава полученных методом ХМПО сделаны следующие выводы:

1. На основе анализа данных рентгеноструктурного, сканирующего электронного микроскопа и атомно силового микроскопа выявлено, что пленки CdTe, выращенные при температуре подложки T_п=600°C, имеют поликристаллическую сфалеритную структуру с преимущественной ориентацией (111) и с размерами зерен 5-8 мкм и однородной толщиной пленок ~ 4 мкм, что доказывает возможность выращивания пленок CdTe оптимального состава, которые могут быть применены при изготовлении фоточувствительных приборов.

2. Выявлено зависимость размеров и плотности распределения зерен поликристаллических пленок CdTe от температуры подложки, в частности, пленки CdTe полученные при температуре подложки 500°C формируют плотноупакованную поверхностную структуру с размером зерен 2-3 мкм,

а с повышением температуры подложки до 600⁰С происходит увеличение зерен до 5-8 мкм, однако при этом плотноупакованная структура уменьшается по сравнению со случаем использования низкотемпературной подложки.

3. Из структурного и морфологического анализа выявлено, что все образцы после термической обработки в растворе CdCl₂ имеют максимальный пик при 2θ=23.7⁰, который соответствует кристаллографической оси (111) и имеют структуру сфалерита, а также размеры зерен остаются неизменными и наблюдается наличие равномерной поверхности.

4. В Рамановском спектре пленки CdTe, обработанной в растворе CdCl₂, идентифицируются важные изменения (фазы, связанные с чистыми Te, исчезли и появился новый режим), которые показывают, что обработка благоприятствует перераспределению ранее разделенных атомов Te и общее качество кристаллов улучшилось.

5. Обнаружено повышение электропроводности на два порядка в пленках CdTe, обогащенных Te при термической обработке в растворе в CdCl₂, что можно объяснить образованием новых уровней E_v+0.24±0,01эВ и E_v+0,31 эВ, которые связаны с Cl_{Te}+V_{Cd} или Te_{Cd}.

6. На основе спектров фотолуминесценции пленок CdTe выявлено, что после термической обработки CdCl₂ обнаруживается полоса PL, расположенная на уровне 1,41 эВ, в тоже время ранее присутствующая полоса в интервале 1-1.12 эВ исчезает после проведения термоотжига, что обусловлено тем, что пик 1.12 эВ связан с вакансией теллура V_{Te}, который, возможно, после термообработки CdCl₂ заменяется кислородом, присутствующим во время термообработки и, скорее всего, кислород занимает вакансию теллура (по сравнению с хлором), поскольку кислород и теллур являются одними и теми же элементами группы.

7. Показано, что для пленок CdTe:Sb, полученных методом ХМПО наименьшее удельное сопротивления (ρ) наблюдается при составе равной Cd/Te=1,35, что обусловлено тем, что при данном составе происходит уменьшение собственных точечных дефектов, которые в свою очередь увеличивают концентрацию V_{Te} вакансий теллура, в то время как, в пленках CdTe:Sb атомы Sb легко занимают место атома теллура, которые придают пленкам акцепторные свойства.

8. При проведении легирования Sb поликристаллических пленок CdTe методом вакуумного осаждения с последующим отжигом обнаружено, что наименьшее удельное сопротивления (ρ) пленок CdTe легированных Sb было достигнуто при температуре отжига пленок T_{Sb}=400⁰С в течение 60 минут, что предположительно обусловлено тем, что данная температура и время отжига термодинамически наиболее благоприятны для замещения теллура сурьмой, тем самым обеспечивая p-тип проводимости.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.30.05.2018.FM./T.34.01 ON AWARDING
OF SCIENTIFIC DEGREES AT PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE**

PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE

ERGASHEV BOBUR AVAZ OGLI

**NATURE AND BEHAVIOR OF INTRINSIC POINT DEFECTS IN CdTe
FILMS OF DIFFERENT COMPOSITION**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2019

Theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № B2017.2.PhD/FM88.

Dissertation has been prepared at Physical-technical institute.

Abstract of the dissertation is posted in three (uzbek, russian, english (resume)) languages on the website (www.fti.uz) and on Information and educational portal «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Razykov Takhirdjon Mutalovich**
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents: **Gulyamov Abdurasul Gafurovich**
doctor of physical and mathematical sciences
Tursunkulov Oybek Muyidinovich
candidate of physical and mathematical sciences

Leading organization: **Tashkent state technical university**

Dissertation defense will be held on «___» _____2019 at ____ at the meeting of Scientific Council number DSc.30.05.2018.FM./T.34.01 at the Physical-Technical Institute, (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, Chingiz Aytmatov street 2B. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net).

Dissertation is possible to review in Information Resource Centre at Physical-Technical Institute (registered under No.____). Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, Chingiz Aytmatov street 2B. Phone/fax: (+99871) 235-30-41.

Abstract of dissertation sent out on «___» _____2019

(Registry record No. ____ on «___» _____2019)

N.R. Avezova

Chairman of scientific council on award of scientific degrees, DSc in techniques

A.G. Komilov

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, PhD in techniques

A.V. Karimov

Chairman of scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

Today, in the world the most efficient thin-film solar cells are based on CdTe, Cu (In, Ga) Se₂ semiconductor materials, in which the record value of efficiency is 22.1% and 22.9%, respectively¹. Despite the efforts of scientists and specialists, there are a number of technological problems associated with ensuring the required conductivity of the obtained CdTe thin films, which hinders their widespread use. In this aspect, one of the most important problems that need to be solved when creating high-performance thin-film solar cells based on cadmium telluride is to obtain films with high conductivity, which can be ensured by controlling the concentration of intrinsic point defects, doping with impurities during the growth process, and technological control of the concentrations of the initial components or heat treatment of films in various environments after their growth.

The aim of research work is to identify the nature and behavior of intrinsic point defects in CdTe films of different compositions, as well as heat-treated in a CdCl₂ solution and doped with Sb.

The objects of the research work are thin films based on CdTe with different composition fabricated by CMBD method.

Scientific novelty of the research work:

it was found that a decrease in the flux of molecules entering the substrate to 10^{13} - 10^{14} cm² / s⁻¹, where the film growth rate is 10^{-1} ÷ 10 Å / s, during the synthesis of films from elementary components by the CMBD method, allows one to obtain film nanostructures on the CdTe surface, contributing to high-quality ohmic contacts;

it was revealed that the processing of films in a CdCl₂ solution leads to an increase in the size of the initial grains and, as a result, the disappearance of spatial intergrain voids, contributing to the formation of a close-packed grain structure on the surface of CdTe films;

it was found that by controlling the ratio of the intensity of Cd / Te molecular beams in the vapor phase and controlling the sequential flow of the deposited elements on the substrate, it is possible to control the resistivity of CdTe films in a wide range of 10^4 ÷ 10^8 Ω·cm;

it was observed that in photoluminescence spectra of CdTe films with different composition, the presence of two peaks at 1.41 eV and 1.12 eV, the first of which corresponds to an E_V+0.15 eV and relates to single-charged cadmium vacancies V_{Cd}⁻, and the second peak is due to E_C-0.48 eV and refers to V_{Te}⁺⁺ doubly charged tellurium vacancies or Cd_i⁺⁺ interstitial cadmium atoms;

it is shown that during the thermal treatment of CdTe films in air, oxygen atoms replace the tellurium vacancies V_{Te}, which is the donor level, as a result, the concentration of acceptors and, accordingly, the p-type conductivity increase, which explains the sharp increase in the efficiency of the CdTe thin film element during annealing in the medium, containing oxygen;

it has been shown that for CdTe films obtained by the CMBD method, doping with Sb leads to a significant decrease in the resistivity of only films deposited from a

¹ Green et. al. Progress in Photovoltaics Volume27, Issue1 January 2019 Pages 3-12.

Cd-rich vapor-gas mixture and is due to the fact that, upon doping, Sb atoms replace V_{Te} tellurium vacancies and also give the films acceptor properties.

Implementation of the research results. Based on the study of the nature and behavior of intrinsic point defects in CdTe films with different composition and their electro physical properties:

The obtained results on the optimization of the parameters of cadmium telluride films by thermal treatment in $CdCl_2$ solution were used in studies to improve the electro physical and optical properties of cadmium telluride films and solar cells based on them in foreign journals (Thin Solid Films, 582, 134-138, 2015, IF: 1.939; Advances in Condensed Matter Physics, 2016, Article ID 8068396, IF: 0.959; Physica Status Solidi A, 213(12), 3231-3237, 2016, IF: 1.795 etc.). The use of scientific results made it possible to improve the morphology and structure of cadmium telluride films, to increase their conductivity, and also to improve the conversion efficiency of solar cells based on them;

The obtained results on improving the morphology and structure of CdTe films as well as their electro physical properties by controlling the vapor phase composition during the film growth process were used to effect a controlled change in the electro physical and optical properties of cadmium telluride films in foreign journals (Materials Science and Engineering B, 171, 73–78, 2010, IF: 3.316; Physica B, 407, 4214–4220, 2012, IF:1.453; Optik, 124, 2165–2170, 2013, IF:1.191 etc.). The use of scientific results allowed us to obtain films of cadmium telluride with specified parameters.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of references and an appendix. The text of the thesis is outlined on 104 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. B.A. Ergashev, T.M. Razykov. Influence of Composition and Heat Treatment in CdCl_2 Solution on Intrinsic Point Defects in CdTe Films // Applied Solar Energy. – New York, – 2017, Volume. 53, No. 4, P. 299–302. (№3, Scopus CiteScore:0.90)

2. Т.М. Разыков, К.М. Кучкаров, Б.А. Эргашев, Р.Т. Йулдошов. Влияние собственных точечных дефектов на электропроводимость поглотителя слоя CdTe, полученных методом ХМПО, для пленочных солнечных элементов // Узбекский физический журнал. – Ташкент. – 2015, Volume 17, №6, С.382-385. (01.00.00, №5)

3. T.M. Razykov, N. Amin, B.A. Ergashev, C.S. Ferekides, D. Y. Goswami, M.K. Hakkulov, K.M. Kouchkarov, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, M. Alghoul, H.S. Ullal. Effect of the composition on physical properties of CdTe absorber layer fabricated by CMBD for use in thin film solar cells // Journal of Applied Physics. – New York, – 2012, 112; P. 023517-1-5, (№3, Scopus, IF:2.32).

4. Разыков Т.М., Кучкаров К.М., Эргашев Б.А., Хуббимов А.Н., Хаккулов М.К. Особенности изменения удельного сопротивления пленок CdTe полученных методом ХМПО и легированных Sb вакуумным осаждением // Узбекский физический журнал. – Ташкент. – 2011, Volume.13 №, С. 42-46. (01.00.00, №5).

5. T.M.Razykov, G.Contreras-Puente, G.C.Chornokur, M.Dybjec, Yu.Emirov, B.Ergashev, C.S.Ferekides, A.Hubbimov, B.Ikramov, K.M.Kouchkarov, X. Mathew, D.Morel, S.Ostapenko, E.Sanchez-Meza, E.Stefanakos, H.M.Upadhyaya, O.Vigil-Galan and Yu.V.Vorobiev. Structural, photoluminescent and electrical properties of CdTe films with different compositions fabricated by CMBD // Solar Energy. – Oxford, UK. – 2009, V.83, P. 90-93. (№3, Scopus, IF:4.67).

II бўлим (II часть; part II)

6. Б.А. Эргашев, Т.М. Разыков, К.М. Кучкаров. Влияние собственных точечных дефектов на состав пленок CdTe полученных методом ХМПО / Материалы Республиканской научно-технической конференции «Научно-методические проблемы инженерной физики» 8-9 сентябрь 2017. Ташкент. С. 144-146.

7. Эргашев Б.А. Температурные зависимости электропроводности на пленках CdTe различного состава / Материалы Республиканской научной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах». Ташкент-2017. С. 123-124.

8. T.M. Razykov, K.M. Kouchkarov, B. Ergashev, C.S. Ferekides, N. Amin, K. Bangi, H.S. H.M. Upadhyaya. Effect of Cd and Te_2 vapor phase mixture in CMBD on growth rate and morphology of CdTe films for use in thin-film solar cells / 32st

European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU PVSEC 2016, 20-24 June 2016, Munich, Germany. P. 1144-1146.

9. К.М. Кучкаров, Т.М. Разыков, Крис Ферекидес, Б.А. Эргашев, Р.Т. Йулдошов, М.А. Зуфаров. Исследование электрофизических свойств пленок теллурида кадмия различного состава, легированных примесью сурьмы, методом вакуумного осаждения / «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Сборник тезисов докладов Международной конференции Физико-технический институт НПО "Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан 5-6 ноября 2015. Ташкент, Узбекистан, С.128-131.

10. Т.М. Разыков, К.М. Кучкаров, Крис Ферекидес, Б.А. Эргашев, Р.Т. Йулдошов. Исследование морфологических свойств пленок CdTe различного состава до и после термической обработки для тонкопленочных солнечных элементов. Сборник тезисов докладов Международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан 5-6 ноября 2015. Ташкент, Узбекистан, стр. 224-227.

11. К.М. Кучкаров, Т.М. Разыков, Б.А. Эргашев, Р.Т. Йулдошов. Влияние толщины пленок теллурида кадмия на их морфологические и структурные свойства полученных методом ХМПО. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Сборник тезисов докладов Республиканской конференции, посвященной 100-летию академика С.А.Азимова, 5-ноября, 2014, г. Ташкент. стр.152-154.

12. Разыков Т.М., Кучкаров К.М., Эргашев Б.А., Йулдошов Р. Получение пленок CdTe на гибких металлических подложках методом ХМПО. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Труды международной конференции, посвященной 70-летию Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» АН РУз 14-15 ноября 2013 г. - Ташкент. стр.135-136.

13. Т.М. Razykov, N. Amin, B. Ergashev, C.S. Ferekides, D. Y. Goswami, M.K. Hakkulov, K.M. Kouchkarov, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, M. Alghoul, H.S. Ullal. Effect of CdCl₂ treatment on Raman spectra and electrical properties of CdTe films with different compositions fabricated by CMBD / 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Messe Frankfurt, Germany, Conference 24-28 September 2012 Exhibition 25 - 28 September 2012 P. 480-482.

14. Разыков Т.М., Кучкаров. К.М., Эргашев Б.А. «Фотолюминесценция пленок теллурида кадмия различного состава полученных методом химически молекулярно-пучкового осаждения». Сборник тезисов докладов II международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- наноструктурах, 8-9 сентября Фергана. 2011, стр. 129-131.

15. Разыков Т.М., Кучкаров К.М., Эргашев Б.А., Хақкулов М. К. Хуббимов А.Н. Панцырев А.Ю. Влияние слоя Sb на структуру и контактное сопротивление пленок CdTe осаждённых на подложке из молибдена. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Труды международной конференции, посвященной 80-летию академика М. С. Саидова, 23-25 ноября 2010г., г.Ташкент. стр.252-253.

16. Разыков Т.М., Кучкаров К.М., Эргашев Б.А., Хаккулов М. К. Хуббимов А.Н. Исследование морфологических свойств пленок CdTe различного состава полученных методом ХМПО / «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Труды международной конференции, посвященной 80-летию академика М. С. Саидова., 23-25 ноября, 2010г. Ташкент. стр. 249-251.

17. Разыков Т.М., Кучкаров. К.М., Эргашев Б.А. Хаккулов М.К. Влияние термообработки на электрофизические свойства пленок CdTe полученных методом ХМПО / Труды II международной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах». 12-14 ноября 2009г. г.Ташкент. стр. 52-53.

18. Кучкаров К.М., Эргашев Б., Икрамов Б., Хаккулов М. Особенности изменения удельного сопротивления пленок CdTe легированных Sb полученных методом химического молекулярно-пучкового осаждения / Материалы V-ой республиканской конференции. РСПК-2008 Андижан 11-12 апреля 2008 г. С.144.

19. T.M. Razykov, G. Contreras-Puente, G.C. Chornokur, M. Dybjec, Yu. Emirov, B. Ergashev, C.S. Ferekides, D. Y. Goswami, A. Hubbimov, B. Ikramov, K.M. Kouchkarov, X. Mathew, D. Morel, S. Ostapenko, E. Sanchez-Meza, E. Stefanakos, O. Vigil-Galan and Yu.V. Vorobiev. Structural, photoluminescent and electrical properties of CdTe films with different compositions fabricated by CMBD / XVI Intern.Mater. Res.Congress, 2007, Cancun, Quintana Roo, Mexico, October 28-31, P.9-10.

20. T.M. Razykov, G. Contreras-Puente, G.C. Chornokur, M. Dybjec, Yu. Emirov, B. Ergashev, C.S. Ferekides, D.Y. Goswami, A. Hubbimov, B. Ikramov, K.M. Kouchkarov, X. Mathew, D. Morel, S. Ostapenko, E. Sanchez-Meza, E. Stefanakos, O. Vigil-Galan, Yu.V. Vorobiev and H. Zhao. Effect of CdCl₂ treatment on structure and photoluminescence of CdTe films with different compositions fabricated by CMBD / Technical Digest of the International PVSEC-17, Fukuoka, Japan, 2007, P.855-856.

Автореферат «Til va adabiyot ta'limi» журнали таҳририятида таҳрирдан
ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро
мувофиқлаштирилди (19.08.2019 йил).

Босишга рухсат этилди: 06.09.2019 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 3,125. Адади: 100. Буюртма: № ____.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68.

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.