

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019. FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FIZIKA-TEXNIKA INSTITUTI

SHUKUROV AKBARJON XIDOYEVICH

**Sb₂Se₃ VA CdS_{1-x}Te_x YUPQA QATLAMLARINING STRUKTURAVIY,
MORFOLOGIK, OPTIK VA ELEKTROFIZIK XOSSALARI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2023

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

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

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

Shukurov Akbarjon Xidoyevich

Sb₂Se₃ va CdS_{1-x}Te_x yuqqa qatlamlarining strukturaviy, morfologik, optik va elektrofizik xossalari..... 3

Шукуров Акбаржон Хидоевич

Структурные, морфологические, оптические и электрофизические свойства пленок Sb₂Se₃ и CdS_{1-x}Te_x..... 23

Shukurov Akbarjon Xidoyevich

Structural, morphological, optical and electrical properties of Sb₂Se₃ and CdS_{1-x}Te_x films..... 43

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ

List of published works. 47

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019. FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FIZIKA-TEXNIKA INSTITUTI

SHUKUROV AKBARJON XIDOYEVICH

**Sb₂Se₃ VA CdS_{1-x}Te_x YUPQA QATLAMLARINING STRUKTURAVIY,
MORFOLOGIK, OPTIK VA ELEKTROFIZIK XOSSALARI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2023

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.1.PhD/FM587 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zRFA Fizika-texnika institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (ispm.uz) va «ZiyoNet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: **Razikov Taxirdjon Mutalovich**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: **Raxmatov Axmad Zayniddinovich**
texnika fanlari doktori, professor

Iliyev Xalmurat Midjitovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot: **Toshkent axborot texnologiyalari universiteti**

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti qoshidagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/30.12.2019. FM/T.01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2023 yil «05» 07 soat 10⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy, Tel.: (+99871)248-79-94, faks: (+99871)248-79-92, e-mail: info@ispm.uz)

Dissertatsiya bilan Raqamli ta'lim texnologiyalarini joriy etish bo'limida tanishish mumkin. (___ raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2023 yil «21» 06 kuni tarqatildi.
(2023 yil «21» 06 dagi 49 raqamli reestr bayonnomasi).


Sh.B. Utamuradova
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d., professor

O.X. Qo'ldashov
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash ilmiy kotibi, t.f.d., dotsent

N.A. Turgunov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi,
f.-m.f. d., dotsent

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi. Dunyoda qayta tiklanuvchi energiya manbalariga bo'lgan e'tibor jadal rivojlanishi munosabati bilan, tabiatda keng tarqalgan, zararsiz va samaradorligi yuqori bo'lgan arzon yarimo'tkazgichli materiallarga ehtiyoj paydo bo'lmoqda. Shu sababli, zamonaviy yarimo'tkazgichlar materialshunosligi sohasida arzon va samarali quyosh elementlarini ishlab chiqarish uchun mos keladigan noyob xususiyatlarga ega yangi yarimo'tkazgich birikmalar va qattiq qorishmalarni yaratishga qaratilgan tadqiqotlarga katta e'tibor qaratilmoqda. Bu sohadagi tadqiqotlarning istiqbolli yo'nalishlaridan biri yupqa qatlamlarga asoslangan quyosh elementlarini yaratishdir. Bugungi kunga kelib, eng samarali yupqa qatlamli quyosh elementlari CdTe, $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}(\text{S}, \text{Se})_2$, hamda yangi SnSe, Sb_2Se_3 materiallari va $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qattiq qotishmalarining qatlamlari asosida amalga oshirilgan deb hisoblash mumkin. Shu jihatdan bu materiallar orasida Sb_2Se_3 va $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ yutish koeffitsienti yuqori, past narxli va yer qobig'ida ko'pligi, hamda samarali quyosh elementlarini olish uchun mos taqiqlangan zona kengligiga egaligi uchun muhim ahamiyat kasb etmoqda.

Jahon miqyosida quyosh elementlarida foydalanish uchun Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarini o'rganish bo'yicha tadqiqotlar 2014-yildan boshlandi. Biroq, nisbatan qisqa vaqt davom etgan tadqiqotlarga qaramay, 2019-yilda Sb_2Se_3 qatlamlari asosida quyosh elementining samaradorligi 9,2% ga erishildi¹. So'nggi paytlarda Sb_2Se_3 va $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qattiq qotishmalarni olish energiya sarf-xarajati yuqori bo'lgan vakuum sharoitida va kichik yuzalarda olinmoqda, ammo bu borada ko'plab tadqiqotlar bo'lishiga qaramay, arzon va vakuumsiz texnologiyadan foydalangan holda katta yuzalarda Sb_2Se_3 va $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qattiq qotishmalarni olish bo'yicha ma'lumotlarning cheklanganligi, yupqa qatlamlarni vakuumsiz olish texnologiyasi va ular asosida quyosh elementlarini olish bilan bog'liq bir qator hal etilmagan muammolar mavjud. Shuning uchun, Sb_2Se_3 va $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ yupqa qatlamlarining fizik-kimyoviy va optik xususiyatlari qatlam olish metodlariga va tashqi ta'sirlarga qarab katta farq qiladi². Shu nuqtai nazardan, Sb_2Se_3 va $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ yupqa qatlamlarini vakuumsiz atmosfera bosimida olish, ularning kristall tuzilishlarining shakllanish qonuniyatlari shuningdek ular asosida yaratilgan birikmalarning xususiyatlarini o'rganish yo'nalishida olib borilgan tadqiqotlar katta ilmiy va amaliy ahamiyatga ega hamda yarimo'tkazgichlar va yarimo'tkazgichli materialshunoslik fizikasining dolzarb masalalaridan biri hisoblanadi.

Respublikamizda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan keng foydalanish va samaradorligini oshirishga yordam beradigan yangi texnologiyalarni yaratish bo'yicha tadqiqotlar o'tkazish va ularni amalda qo'llash bo'yicha keng ko'lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan «Iqtisodiyotni elektr energiyasi

¹ Li Z, Liang X, Li G, Liu H, Zhang H, Guo J, et al. 9.2%-efficient core-shell structured antimony selenide nanorod array solar cells. // Nature communications. 2019;10: 125-132.

² Zeng K, Xue D-J, Tang J. Antimony selenide thin-film solar cells. // Semi-conductor Science and Technology. 2016;31:063001.

bilan uzluksiz ta'minlash hamda "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish»³ bo'yicha vazifalari belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, qayta tiklanuvchi energiya manbalari asosida yangi ishlab chiqarish quvvatlarini qurish va mavjudlarini modernizasiya qilish, jumladan gorizontol yassi quyosh-havo isitgichiga quyoshli radiyasiyasi tushgan sharoit uchun absorberning devorini muvozanatli hamda haroratlarini majburiy konveksiya sharoitida isitgichdan chiqib ketadigan havoning haroratini aniqlash muhim hisoblanadi. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, quyosh energiyasiga asoslangan yangi ishlab chiqarish quvvatlarini qurish, shu jumladan, yangi turdagi quyosh elementlarini yaratish uchun zarur bo'lgan elektrofizik xususiyatlarga ega yangi yarimo'tkazgichli materiallar – qattiq qorishmalarni yaratish katta ilmiy ahamiyatga ega. Shu jihatdan, Sb_2Se_3 asosidagi yarimo'tkazgich yupqa qatlamlar zararli darajasi kam bo'lgan elementlardan tashkil topgan bo'lib, optimal optik va fotoelektrik xususiyatlari tufayli arzon va ekologik toza quyosh elementlarini katta hajmda ishlab chiqarish uchun istiqbolli materialdan biri hisoblanadi.

Ushbu dissertasiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son «2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida»gi Farmoni, 2019 yil 22 avgustdagi PQ-4422-son «Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishning tezkor chora-tadbirlari to'g'risida», 2020 yil 10 iyuldagi PQ-4779-son «Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg'i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida»gi Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur dissertatsiya tadqiqotlari O'zbekiston respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III. «Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligi rivojlanishi» ustuvor yo'nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Hozirgi vaqtda dunyoning yetakchi ilmiy markazlari va universitetlarida Sb_2Se_3 asosida yupqa qatlamlarni o'rganish va ular asosida quyosh elementlarini olish bo'yicha tadqiqotlar olib borilmoqda. Masalan Xitoy xalq respublikasining Huazhong Fan va Texnologiya Universiteti, Fizika va fizika muhandisligi maktabi, Qufu Normal universiteti Lazer qutblanish va axborot texnologiyalari laboratoriyasi olimlari Zeng K, Xue D-J, Tang J. Li Z, Liang X, Li G, Liu H, Zhang va boshqalar Sb_2Se_3 va CdS asosida tadqiqotlar olib borilmoqda. Tadqiqotlarning asosiy maqsadi Sb_2Se_3 yupqa qatlamining o'stirish

³ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон "2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тарққиёт стратегияси тўғрисида"ги Фармони.

davomida yuzaga keladigan nuqsonlarni kamaytirish va bir o'ldamli yo'nalishga ega bo'lgan donachalarni kerakli yo'nalish bo'yicha o'stirishga qaratilgan.

Shuningdek, MDH davlatlar orasida Belorussiya milliy universitetining «Energofizika» kafedrasida rahbari M.S. Tivanov boshchiligida quyosh elementlari uchun yupqa qatlamlar sohasida tadqiqotlar olib borilmoqda. O'zbekistonlik olimlardan T.M. Raziqov rahbarligida Fizika-texnika institutida kimyoviy molekular dastalaridan o'tqazish usuli bilan ikki va ko'p komponentli xalkogenidli yarimo'tkazgichlardan polikristall yupqa qatlamlar olishning yangi texnologiyasi ishlab chiqilgan.

Biroq, shu kunga qadar binar Sb_2Se_3 birikma va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmasini kimyoviy molekular dastalaridan o'tqazish usuli yordamida olish o'rganilmagan. Shu sababli, Sb_2Se_3 yupqa qatlam birikmalarining va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmasini olish shartlarini o'rganish, dissertatsiyada tavsiya etilgan usulda olingan plyonkalarining mikro tuzilma parametrlari, elektr va optik xususiyatlariga bog'liqlik qonuniyatlarini o'rnatish bo'yicha olib borilayotgan izlanishlar yarimo'tkazgichlar materialshunosligi va yarimo'tkazgichlar fizikasining dolzarb vazifasi bo'lib, fan uchun ham, amaliyot uchun ham katta qiziqish uyg'otadi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining tadqiqot ishlari rejalari bilan aloqasi. Dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi "Fizika-Quyosh" IICHB Fizika-texnika institutining ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining qo'yidagi fundamental loyihasi doirasida bajarilgan: FA-A3-F003 raqamli "Yangi turdagi xalkogenli materiallar asosida yupqa qatlamli quyosh elementlarini kompleks tadqiq qilish va ishlab chiqish" (2017-2020 yy.) ilmiy loyihasi doirasida amalga oshirilgan.

Tadqiqotning maqsadi kimyoviy molekular dastalaridan o'tqazish usuli bilan shisha tagliklarda Sb_2Se_3 birikmasi va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmasining yupqa qatlamlarini olishning fizik-texnologik xususiyatlarini aniqlash, texnologik rejim parametrlariga qarab mikro tuzilma, elektr va optik xususiyatlarning o'zgarish qonuniyatlarini o'rganishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

kimyoviy molekular dastalaridan o'tqazish usulida Sb_2Se_3 ning yupqa qatlamlarini olishda asosiy material sifatida ishlatiladigan Sb_2Se_3 ikkilik birikmasining qorishmasini olish;

kimyoviy molekular dastalaridan o'tqazish usulida shisha tagliklarda Sb_2Se_3 va $CdS_{1-x}Te_x$ birikmasining yupqa qatlamlarini vakuumsiz yarim yopiq hajmda vodorod oqimida turli xil texnologik sharoitlarda (manba va taglik harorati, vodorod oqimi tezligi va boshqalar) olish;

Sb_2Se_3 birikmasining yupqa qatlamlari va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmalarining morfologik, strukturaviy, optik va elektrofizik xossalarning har xil texnologik sharoitlariga bog'liqligini o'rganish;

Sb_2Se_3 va $CdS_{1-x}Te_x$ plyonkalarining morfologik, strukturaviy, optik va elektrofizik xossalarning tarkibiga qarab o'zgarishini o'rganish.

Tadqiqotning ob'yekti kimyoviy molekular dastalaridan o'tqazish usuli bilan shisha tagliklarda olingan Sb_2Se_3 birikmasi va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmasining

turli xil tarkibdagi ($0 \leq x \leq 1$) yupqa qatlamlari, shuningdek, ular asosida yaratilgan tuzilmalardir.

Tadqiqotning predmeti turli tarkibli Sb_2Se_3 birikmasi va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmasi ($0 \leq x \leq 1$) qatlamlarining fazaviy va kimyoviy tarkibi, strukturaviy xarakteristikalari, mikro tuzilishi, elektr va optik xususiyatlaridir.

Tadqiqot usullari. Qo'yilgan vazifalarni yechish uchun Sb_2Se_3 va $CdS_{1-x}Te_x$ yarimo'tkazgich yupqa qatlamlarini o'stirishda sodda usul bo'lgan kimyoviy molekulalar dastalaridan o'tqazish texnologiyasi, olingan qattiq qorishmalarining strukturaviy mukammaligini aniqlashda rentgen nurlari difraksiyasi usuli, qatlamlarning sirt relyefini aniqlashda atom kuch mikroskopiyasi va skanerlovchi elektron mikroskopiyasi, zaryad tashuvchilarning xarakatchanligini aniqlashda Xoll metodi, optik xossalarni o'lchashda zamonaviy fotoakustika va fotokuchlanish usullari, tok o'tish mexanizmlarini aniqlashda volt-amper xarakteristikalarni tahlil qilish, optik yorug'lik yutish chegarasini aniqlashda zamonaviy ellipsometriya uslublaridan foydalanilgan hamda elektr o'tkazuvchanlikning haroratga bog'liqligi jalb qilingan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagicha:

ilk marotaba Sb_2Se_3 va $CdS_{1-x}Te_x$ birikmalarining keng tarkibli diapazondagi ($0 \leq x \leq 1$) yupqa qatlamlari vodorod oqimida kvaziyopiq hajm sharoitida kimyoviy molekulyar dastalardan o'tqazish usuli bilan, arzon va samarali quyosh elementlarini olish uchun mos elektrofizik parametrlarga ega bo'lgan yupqa qatlamlar olingan;

vodorod oqimi tezligi $\leq 10 \text{ sm}^3/\text{min}$ bo'lganda olingan Sb_2Se_3 qatlamlar tarkibida (Se) miqdori 60 % dan yuqori bo'lishi, rentgenogrammada Se va Sb_2Se_3 fazalari mavjudligi va $15 \div 20 \text{ sm}^3/\text{min}$ oqim tezligida esa qatlam stexiometrik tarkibda bo'lishi energiya dispersli rentgen spektroskopiyasi usulida aniqlangan;

taglikning $T > 450^\circ\text{C}$ haroratida olingan Sb_2Se_3 qatlamlari Sb ga boy bo'lishi va donachalar (120) kristall yo'nalishida taglikka parallel o'sishi, $T < 450^\circ\text{C}$ da qatlamlar Se ga boy bo'lishi va (211) yo'nalishda taglik yuzasiga perpendikulyar o'sishi rentgen strukturaviy tahlil usulida aniqlangan;

$CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmasining taqiqlangan soha kengligi ($0 \leq x \leq 1$) oralig'ida nozichiqli qonuniyat bo'yicha 2,4 dan 1,4 eV gacha bo'lgan oraliqda o'zgarib turishi ko'rsatilgan;

bug' fazalarda Sb/Se molekulalar dastalarining intensivlik nisbatini va taglikka o'stiriladigan elementlar oqimini boshqarish bilan polikristall Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarini olish va ularning solishtirma qarshiligini keng $10^4 \div 10^8 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ intervalda o'zgartirishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

vodorod oqimida kvaziyopiq hajm sharoitida kimyoviy molekulyar dastalardan o'tqazish usulida Sb_2Se_3 birikmasining yupqa qatlamlari va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmalarini olishning fizik-texnologik asoslari ishlab chiqilgan;

tajriba ma'lumotlarini tahlil qilish asosida Sb_2Se_3 birikmasi va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmasining qatlamlari asosida foton energiyasining 2,4 eV dan 1,45 eV gacha bo'lgan diapazonida fotosezgirlikning spektral

diapazoniga ega bo'lgan samarali yupqa qatlamli quyosh elementlarini olish imkoniyati ko'rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi standart texnologik qurilmalardan foydalanish, yuqori aniqlikdagi asbob va uskunalar, qatlamlarning tuzilishi va tarkibini o'rganishning zamonaviy ilmiy va tasdiqlangan usullari, O'zbekiston Respublikasi Innovasion rivojlanish vazirligi huzuridagi Ilg'or texnologiyalar markazida -EDX -Energiya dispersiv rentgen analizatori (Oxford Instrument - Aztec Energy Advanced X-act SDD), rentgen tadqiqotlari «Panalytical Empyrean» rentgen difraktogrammada bajarilishi va plyonkalarining optik xususiyatlarini aniqlash uchun sirt kuchlanish (Surface voltage) va sirt fotokuchlanish (Surface photovoltage) usullaridan Kozalin Texnologiya Universitetida, (Polsha) foydalanilganligi bilan ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Olingan natijalarning ilmiy ahamiyati shundan iboratki, ular Sb_2Se_3 va $CdS_{1-x}Te_x$ birikmalarining yupqa qatlamlarining o'sish mexanizmlari va tarkibiy xususiyatlari, qattiq qotishmalarning elektrofizik va optik xossalarning texnologik parametrlarga bog'liqligini aniqlash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, ular Sb_2Se_3 va $CdS_{1-x}Te_x$ yupqa qatlamlarini olishning yangi usullarini ishlab chiqishga va ular asosida samarali quyosh elementlarini olish uchun mos bo'lgan qattiq qotishmalarini yaratishga, shuningdek, yupqa yarimo'tkazgich qatlamlarni olish texnologiyasini yanada rivojlantirishga imkon beradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.

Turli tarkibli Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarida morfologik, strukturaviy, optik va elektr xususiyatlarini o'rganish asosida:

Sb_2Se_3 qatlamlarining parametrlarini optimallashtirish bo'yicha olingan natijalar xorijiy jurnallarda surma selenid qatlamlari va ular asosidagi quyosh elementlari elektr va optik xususiyatlarini o'rganish bo'yicha quyidagi tadqiqotlarda qo'llanildi (Solar Energy Materials and Solar Cells. Impact Factor:7,267. Vol.200, 15 September 2019, 109945; Solar Energy, Impact Factor:5,95. Volume 187, 15 July 2019, Pages 404-410; Solar Energy, Volume 188, Impact Factor: 5.95, August 2019, Pages 586-592). Ilmiy natijalardan foydalanish surma selen yupqa qatlamlarining morfologiyasi va tuzilishini yaxshilash, ularning kristall yo'nalishini nazorat qilish va ular asosidagi quyosh elementlarining samaradorligini ~4,5% gacha oshirish imkonini bergan;

dissertatsiya ishida olib borilgan tadqiqot natijalari O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Materialshunoslik institutida №MRB-AN-2019-17-sonli "Quyosh elementlari uchun keng polosali kompozit reversiv muftalarni tadqiq qilish" loyihasini amalga oshirishda foydalanildi (2019 – 2020 yy.). Ushbu loyihada dissertatsiya ishida yaratilgan $CdS/CdTe-Ag$ yupqa qatlamli quyosh elementlari namunalari foydalanilgan (O'zR FA ning 01.06.2022 y. dagi №2/1255-1271-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish orqali $CdS/CdTe-Ag$ geterostrukturasi sirtiga aks ettirishga qarshi $MgF_2:CaF_2/ZnO(Al)$ qatlamni qo'llagan holda shisha/ $MgF_2:CaF_2/ZnO(Al)/CdS/CdTe-Ag$ quyosh elementlari

olinib, aks ettirishni kamayishi va qisqa tutashuv oqimining ortishi evaziga samaradorlikni ~1,6% gacha orttirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining natijalari 3 ta xalqaro va 3 ta respublika miqyosida o‘tkazilgan ilmiy- amaliy konferensiyalarda ma’ruza va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha asosiy natijalar 11 ta ilmiy ishda, ulardan 5 tasi dissertatsiya ishlarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestasiya komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, shu jumladan 4 ta maqola xorijiy xalqaro jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 36 ta rasm, 8 ta jadvalni o‘z ichiga olgan holda 123 betni va 131 ta foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatini tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning kirish qismida mavzuning dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, tadqiqotlarning respublikada fan va texnika taraqqiyotining ustuvor yo'nalishlari bilan aloqasi aniqlangan, muammoning o'rganilganlik darajasi ochib berilgan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, ob'yektlar aniqlangan, mavzular va tadqiqot usullari, tadqiqotning ilmiy yangiliklari bayon qilingan, ishni bajarish natijalari va aprobeiyasi, shuningdek, dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi haqida qisqacha ma'lumot berilgan.

Birinchi **“Surma selen va kadmiy sulfid telluridning qattiq qotishmalari va ularning xossalari olish sohasidagi tadqiqotlarning hozirgi holati”** nomli bobda Sb_2Se_3 ning asosiy fizik-kimyoviy xossalari va qattiq qotishma $CdS_{1-x}Te_x$ ni o'z ichiga olgan adabiyotlar sharhi keltirilgan. Sb_2Se_3 da nuqson hosil bo'lish jarayonlari, shuningdek nuqtaviy nuqsonlarining Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarining elektr va optik xossalari tutgan o'rni ko'rib chiqilgan. Ko'rsatilgan birikmalarning qatlamlarini olish va ulardan foydalanish usullari bo'yicha adabiyot ma'lumotlari tahlili taqdim etilgan. Bundan tashqari, Sb_2Se_3 asosida yupqa qatlam olishning texnologik usullarining afzalliklari va kamchiliklari ko'rib chiqilgan. Mavjud eksperimental va nazariy ma'lumotlarni tahlil qilish asosida maqsad tuzilgan va tadqiqot vazifalari belgilangan.

Ikkinchi **“ Sb_2Se_3 yupqa qatlamlari va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmalarini gaz oqimida kimyoviy molekular dastalaridan o'tqazish usulining (KMDO) o'ziga xos xususiyatlari”** nomli bobda Sb_2Se_3 qatlamlari va har xil tarkibli $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmalarining o'sishiga KMDO usuli bilan olishning, qatlamlarning fizik xossalari ta'sirini kompleks tadqiq qilishga bag'ishlangan.

Bu bo'limda Sb_2Se_3 qatlamlari va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmalarini Sb, Se, Cd, Te atmosferasida ikkilik birikmalar-CdS, CdTe, Sb_2Se_3 , $CdS_{1-x}Te_x$ yarim yopiq hajmda sintez qilish jarayonida sodir bo'ladigan fizik-kimyoviy jarayonlarning termodinamik tahlili va bug' fazasida mavjud bo'lgan asosiy gaz zarrachalarining N_2 va muvozanatli gaz zarrachalari bilan ta'siri natijalari keltirilgan. Sb_2Se_3 va $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmalarining diskret manbalardan vodorod oqimida kvaziyopiq hajmda molekulyar dastalardan o'tqazish usuli bilan sintez qilish uchun yangi, tejamkor, oson boshqariladigan texnologiya tavsiflangan va texnologik qurilmaning kvaziyopiq reaksiya kamerasida massa almashinish jarayonlarining molekulyar-kinetik tahlili keltirilgan.

Sb_2Se_3 qatlamlari vodorod oqimida atmosfera bosimida iqtisodiy tejamkor KMDO usuli bilan olingan. Sb_2Se_3 qotishmalari boshlang'ich material sifatida quyidagi foizlarda ishlatilgan: 1) Sb -50 % va Se -50 %, 2) Sb -50,7 % va Se-49,3 %. Sb_2Se_3 qotishmalarining ikkilik birikmalari quyidagicha tayyorlandi: Sb va Se yuqori tozalikdagi elementlari kvarsli ampulalarga joylashtirildi va ampulada yuqori vakuum hosil qilindi. Keyin, Sb_2Se_3 qotishmalarini tayyorlash uchun kvars ampulalari mufel pechkaga joylashtirildi va 72 soat davomida $900^\circ C$ gacha qizdirildi. Termal tavlanihdan so'ng, mufel pechining harorati asta-sekin xona haroratiga 50 gradus/soat tezlikda tushirildi. Kvars ampulalari mufel pechidan chiqarilib darhol muzli suvda sovutildi. Sb_2Se_3 qotishmalari kvars ampulalarini

kesish yo'li bilan chiqarildi. Sb_2Se_3 birikmasi olinganligini tekshirish uchun rentgen diffraksiyasi yordamida rentgen tahlili o'tkazildi. Rentgen strukturaviy tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, Sb_2Se_3 ikkilik birikmasi ortorombik kristall tuzilishga ega bo'lib chiqdi. So'ngra konteynerlarga stexiometrik Sb_2Se_3 qotishmalari joylashtirilib tizim ishga tushiriladi va kamera atmosferasidan ifloslantiruvchi gazlarni olib tashlash uchun vodorod bilan tozalanadi. Keyin reaksiya kamerasing tashqi pechi yoqiladi. Isitish darajasi o'rnatilgan manba harorati bilan belgilanadi. Taglikning temperaturasi kerakli isitish darajasiga yetganda, A^5V^6 komponentli individual isitish pechi yoqiladi va kerakli bug'lanish haroratiga keltiriladi. O'sayotgan qatlamlar uchun bug'lanishning harorat diapazoni $600^\circ C \div 900^\circ C$ oralig'ida, taglik harorati esa $450^\circ C \div 550^\circ C$ oralig'ida o'zgargan. Vodorod gazining oqimi esa $7 \div 20 \text{ sm}^3/\text{min}$ oralig'ida o'zgaradi. Sintez jarayonining davomiyligi kerakli qatlam qalinligiga bog'liq bo'lib 30 dan 60 minutgacha o'zgaradi. Sb_2Se_3 qatlamlarining qalinligi $1 \div 3$ mikron. Qatlamning o'sish tezligi $30 \div 40 \text{ nm} / \text{min}$ oralig'ida o'zgaradi.

$CdS_{1-x}Te_x$ plyonkalarini KMDO' usuli bilan vodorod oqimida kvazi-yopiq hajmda o'stirish bo'yicha tajribalar jarayonida biz plyonkalarining xossalari asosan o'sish jarayonining termodinamik parametrlariga ya'ni, yotqizilgan material tarkibiy qismlarining bug'lanish haroratlari T_m va taglik harorati T_t shuningdek, berilgan manba va plyonkadagi harorat gradienti bo'yicha bog'liqligini aniqladik, Ularning yordami bilan $CdS_{1-x}Te_x$ plyonkalarining tarkibi va boshqa xususiyatlarini keng diapazondagi qiymatlarda nazorat qilish imkoniyatiga ega bo'ldik.

P_{CdTe} dan x ning o'zgarishi tabiatining murakkabligi sababini tushuntirish uchun termodinamik tahlil ma'lumotlari asosida $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qotishmasi tarkibining muvozanat bug'ining tarkibiga bog'liqligi nazariy jihatdan o'rganildi. $T = 1000 \text{ K}$ va $P_{CdS} = 2 \cdot 10^2 \text{ Pa}$ uchun x (P_{CdTe}) bog'liqlik ko'rinishidagi hisoblar natijalari 1-rasmda ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, qattiq qorishma $CdS_{1-x}Te_x$ uchun x (P_{CdTe}) eksperimental bog'liqlik egri chiziqlari o'zgarish xarakteriga ko'ra mos keladi. Biroq, KMDO' tomonidan $T_t = 750^\circ C$ (1023 K) va $P_{CdS} = 2, 2 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ da olingan $CdS_{1-x}Te_x$ qatlamlari nazariya bo'yicha taxmin qilinganidan ko'proq CdTe ni o'z ichiga oladi, ya'ni $x_{(naz.)} > x_{(eksp.)}$. Shunga qaramay, eksperimental va nazariy egri chiziqlardagi o'zgarishlarning tabiati o'rtasidagi muvofiqlik shuni ko'rsatdiki, x (CdTe) ning nochiziqiligi $CdS_{1-x}Te_x$ qattiq qorishmasi tarkibining o'zgarishi bilan α_{CdS} va α_{CdTe} faolligining o'zgarishining o'ziga xos xususiyatlari bilan bog'liq.

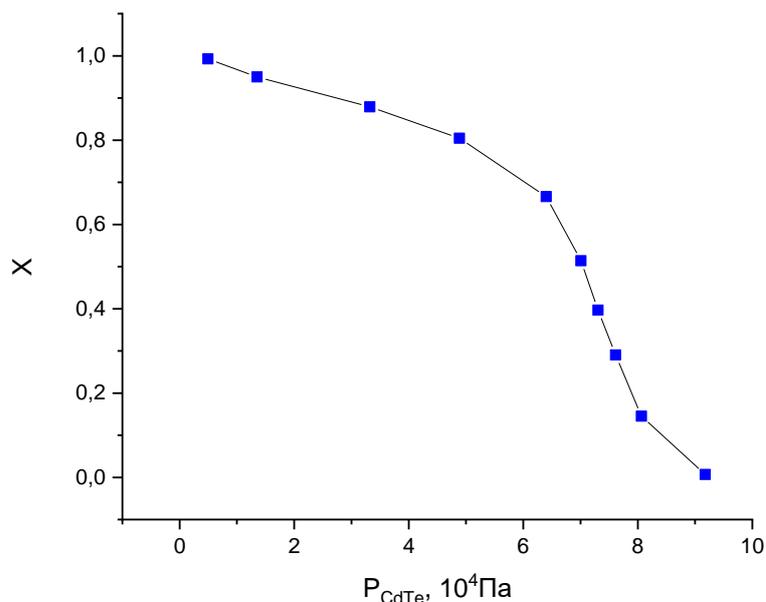
KMDO' da o'stirilgan birikmaning har bir komponenti alohida manbalardan bug'langanda, komponentning bug' oqim tezligi, ya'ni konteynerdan chiqadigan va reaktorga kiradigan molekulyar nurning intensivligi (MNI) (I_k) manbaning bug'lanish tezligiga teng:

$$I_k = \frac{\Delta m_k}{\Delta t}, \quad (1)$$

bu erda $\Delta m_k - \Delta t$ vaqt ichida bug'langan materialning massasi. Shuning uchun, Δm_k va Δt ni bilgan holda, biz o'zimizni qiziqtirgan I_k komponentlarini osongina aniqlashimiz mumkin.

KMDO' yordamida sintez paytida $CdS_{1-x}Te_x$ qatlamlari tarkibining Cd, S va Te MNI nisbatiga bog'liqligini o'rganish shuni ko'rsatdiki, o'stirish paytida qatlamlar

$T_{\text{II}} = 750^{\circ}\text{C}$, $\text{Grad } T_{\theta} = 30 \text{ grad/sm}$ va $W_{\text{H}_2} = 8 \text{ sm}^3/\text{min}$ sharoitda metallning MNI $I_{\text{S}} / (I_{\text{S}} + I_{\text{Cd}})$ nisbatiga bog‘liq ravishda chiziqli ($x = 0 \div 1$) o‘zgaradi.



1-rasm. $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qatlam tarkibining P_{CdTe} bug‘ bosimiga bog‘liqligi.

$$T_t = 750^{\circ}\text{C}$$

Bunday holda, I_{Cd} ning ortishi, ya’ni reaksiya kamerasida Cd kontsentratsiyasi qatlam tarkibining CdTe dan CdS gacha silliq o‘zgarishini ta’minlaydi. Chegara kompozitsiyalari $x = 0$ va $x = 1$ bo‘lgan qatlamlar $T_{\text{Cd}} = 0$ va $T_{\text{CdS}} = 0$ da olingan.

$\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qatlamlar x tarkibining o‘shishning termodinamik parametrlariga (T_m , T_t , $\text{Grad}T_{\theta}$) bog‘liqligini biz qabul qilgan kvazi muvozanatli diffuziya-kinetik model asosida osongina tushuntirish mumkin. Bunga ko‘ra, katta harorat gradientida, ya’ni $T_{\theta} = T_{\text{II}} + \theta \cdot \text{Grad}T_{\theta} > T_K$ bo‘lganda, reaksiya kamerasi devoridagi qatlamda kondensatsiya bo‘lmaydi va barcha bug‘langan material taglikga o‘tiradi. Binobarin, KMDO‘ paytida taglikga yotqizilgan komponentlar oqimi (R_k) reaktorga kiradigan komponentning (I_k) MNI ga teng. Bunday holda, qatlamlarning tarkibi komponentlarning MNI nisbati bilan belgilanadi, ya’ni:

$$x = \frac{Rk_2}{Rk_2 + Rk_1}, \quad (2)$$

KMDO‘ vaqtida $I_{k2}/(I_{k2} + I_{k1})$ dan x ning chiziqli o‘zgarishiga olib keladi.

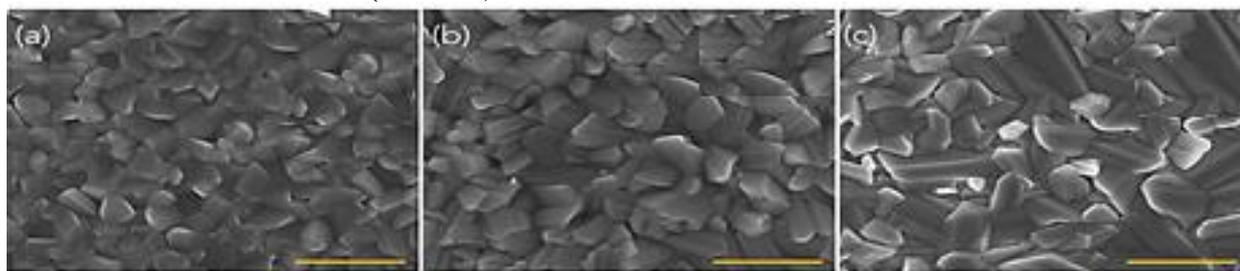
Kichik $\text{Grad } T_{\theta}$ va $T_K > T_{\theta}$ o‘rnatilganda material reaksiya kamerasining devoriga izotermik bo‘lmagan $I_k > R_k$ zonasida o‘tiradi. Binobarin, $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qatlamlarini o‘stirganda, reaksiya kamerasi devorining nisbatan yuqori harorati $T_d > T_t$ tufayli, unda kamroq uchuvchi komponentlarning kondensatsiyasi, CdS (49 kkal/mol) ustunlik qiladi. Natijada, ko‘proq uchuvchan CdTe (45 kkal/mol) bilan boyitilgan bug‘ taglikga etib boradi.

$\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qattiq qorishma qatlamlarini o‘stirish bo‘yicha tajribalar jarayonida vodorodning hajmli oqimining $W_{\text{H}_2} (1 \div 2) \cdot 10^2 \text{ sm}^3/\text{min}$ oralig‘ida o‘zgarishi bilan

tarkiblarning o'zgarishi aniqlandi. Bu yana bir bor shuni ko'rsatadiki, $P_e \ll 1$ da, reaktorda massa almashinuvi bug' fazasida komponentlarning tarqalishi orqali amalga oshiriladi.

Uchinchi "Sb₂Se₃ qatlamlarining morfologik, strukturaviy, elektr va optik xossalari" nomli bobda turli kompozitsiyadagi Sb₂Se₃ qatlamlarining morfologiyasi, tuzilishi, elektrofizik xossalari, elektr o'tkazuvchanlikning haroratga bog'liqligi, elektromikrozond va rentgen spektrli tahlil usullari yordamida o'rganish natijalari keltirilgan.

2-rasmda uch xil taglik haroratida olingan Sb₂Se₃ qatlamlarining SEM (SEM-skannerlovchi elektron mikroskop) tasvirlari ko'rsatilgan. 450°C da qatlamlarda $2 \div 3 \mu\text{m}$ hajmdagi kristalitlar mavjud bo'lib, ular bir-biri bilan o'zaro zich joylashgan. Bu qatlam yuzasining ko'ndalang yo'nalishi bo'yicha elektr o'tkazuvchanlikning kamayishiga sabab bo'lishi mumkin. 500°C da, kristalitlar yuqori zichlikka ega bo'lib, hamda ularning kattaligi yuqori, ya'ni ($5 \div 6$) mikron oralig'ida bo'ladi va qatlam ko'ndalang yo'nalishda kuchsiz elektr o'tkazuvchanligini ham ko'rsatdi. Boshqa tomondan, $T_t = 550^\circ\text{C}$ ga olingan Sb₂Se₃ qatlamlari, o'lchamlari $d > 10 \mu\text{m}$ dan yirikroq bo'lgan donachalardan tashkil topganini ko'rish mumkin. Ushbu namunaning yuzasi ko'ndalang yo'nalish bo'yicha tekislangan Sb₂Se₃ zanjirlarini namoyon etadi. Bu yuqori taglik haroratida (120) cho'qqining intensivligi ortishini va (211) cho'qqining yo'qolishiga sabab bo'lishi bilan izohlanadi (3-rasm).



(a) $T_s = 450^\circ\text{C}$

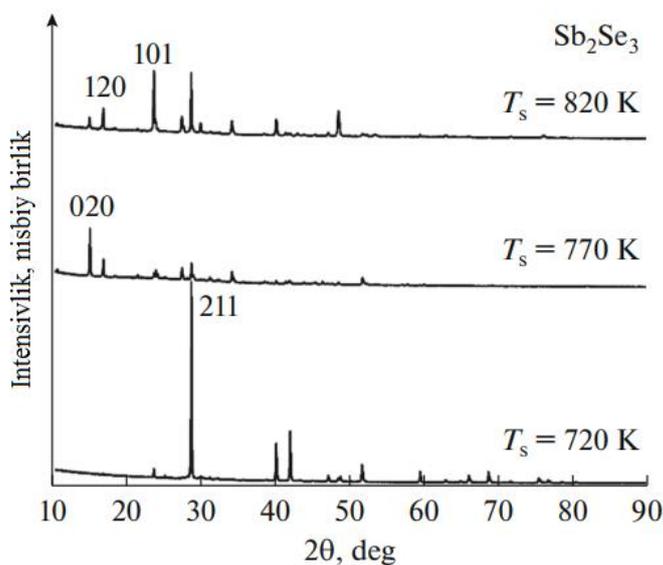
(b) $T_s = 500^\circ\text{C}$

(c) $T_s = 550^\circ\text{C}$

2-rasm. Har xil taglik haroratida olingan Sb₂Se₃ qatlamlar uchun skanerlovchi elektron mikroskop tasvirlari

2-rasmda har xil taglik haroratida Sb₂Se₃ qatlamlarining rentgen natijalari ko'rsatilgan. Barcha spektrlar ikkilamchi fazasiz hamda aralashmalarsiz, Sb₂Se₃ ortorombik Sb₂Se₃ (JCPDS 15-0861) standarti bilan mos keladi. Ko'rinib turibdiki, namunalar har xil kristallografik tuzilishga ega.

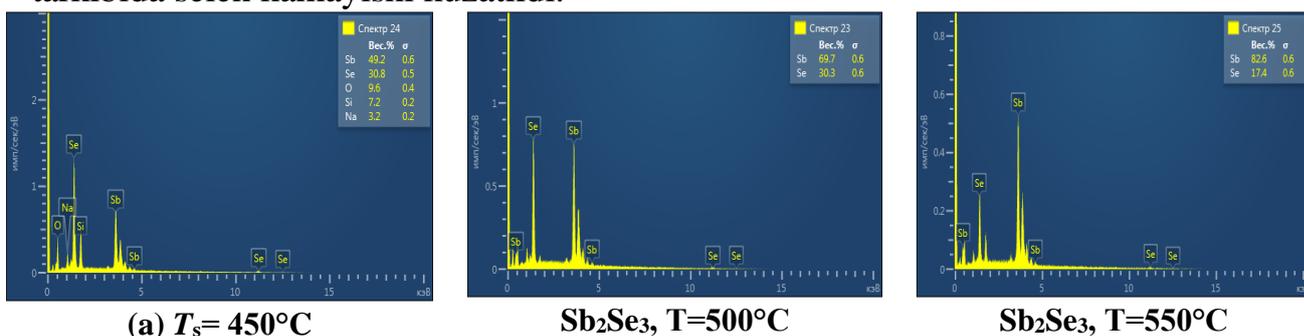
Sb₂Se₃ qatlami taglik harorati $T_t = 450^\circ\text{C}$ da intensiv (211) yo'nalishli diffraksiya cho'qqisi paydo bo'lganligi, qatlam yuqori kristallikka ega ekanligini ko'rsatadi. Taglik haroratining $T_t = 500^\circ\text{C}$ gacha ko'tarilishi bilan, Sb₂Se₃ yupqa qatlami hali ham polikristallik holatini saqlagan bo'lib, ammo Sb₂Se₃ (211) cho'qqisining intensivligi keskin pasayadi va intensivligi kichik (020) yo'nalishli cho'qqi paydo bo'ladi, bu qatlamning kristallanish darajasi pasayganligini ko'rsatadi.



3-rasm. Sb_2Se_3 materialining $900 \pm 10^\circ C$ bug‘lanish va $450^\circ C$, $500^\circ C$, $550^\circ C$ taglik haroratida sintez qilingan Sb_2Se_3 qatlamlarining rentgen-diffraksiya natijalari

foydalanish uchun samarasiz hisoblanadi. Shu nuqtai nazardan, Sb_2Se_3 qatlamini $T_t = 450^\circ C$ taglik haroratida yoki hatto pastroq haroratlarda o‘stirish muhimroqdir. Yo‘nalishi (211) bo‘lgan Sb_2Se_3 qatlamlari fotovoltaiq qurilmalar uchun optimal yo‘nalish ekanligi aniqlangan. Sb_2Se_3 qatlamlari KMDO‘ usulida taglikning past darajadagi haroratida quyosh elementlari uchun optimal yo‘nalishli piklarni olishni, bu esa Sb_2Se_3 absorber qatlamlarini kerakli yunalishda o‘stirishni boshqarish imkonini beradi.

4-rasmda $450^\circ C$, $500^\circ C$ va $550^\circ C$ taglik haroratlarida olingan Sb_2Se_3 qatlamlarining energiya dispersion analiz (EDX) tahlillari keltirilgan. Barcha qatlamlar tarkibida Sb miqdori stexiometrik tarkibdan ko‘pligini ko‘rish mumkin. 4 -rasmdan ko‘rinib turibdiki, qatlamdagi Se miqdori taglik harorati ortishi bilan kamaygan. Bu taglik harorati ortishi bilan Se atomlarining kinetik energiyasining ortishi va selen atomlarining desorbsiyasi sodir bo‘lishi bilan izohlanadi. Agar Se qatlam tarkibida kamayib ketsa, bu taqiqlangan zona kengligida chuqur sathlarning paydo bo‘lishiga olib keladi, bu esa rekombinatsiya jarayonlarini tezlashtiradi. $500 \div 550^\circ C$ taglik haroratlarida qatlamning kristallanish darajasi va qatlam tarkibida selen kamayishi kuzatildi.

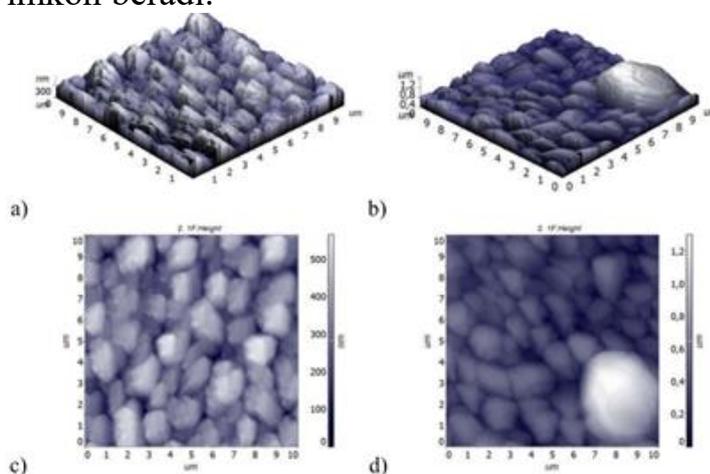


4-rasm. Sb_2Se_3 qatlamlarining energiyadispersion spektrining tasvirlari

O‘shish haroratida $T_t = 550^\circ C$ da qatlam polikristal, ammo (211) cho‘qqining intensivligi biroz pasayadi va bu haroratda kuchsiz (120) cho‘qqisi ham paydo bo‘ladi. $T_t = 450^\circ C$ da bir o‘lchamli Sb_2Se_3 zanjirlari o‘shish yo‘nalishi bo‘yicha, ya‘ni taglik yuzasiga perpendikulyar ravishda joylashadi. Boshqa tomondan, yupqa Sb_2Se_3 qatlamlari taglik haroratining $T_t = 500^\circ C$ va $T_t = 550^\circ C$ ga teng qiymatlarida o‘stirilganda, Sb_2Se_3 zanjirlari (120) yo‘nalishga mos keladigan taglik yuzasiga ko‘ndalang yo‘nalish bo‘ylab tekislanadi, bu quyosh elementlarida sifatida

Atom kuch mikroskopida termik ishlov berishdan oldin va keyin olingan qatlamlarning kristall tuzilishining morfologiyasi o'rganildi, natijalar 5-rasmda ko'rsatilgan. Atom kuch mikroskopi yordamida olingan tasvirlar qatlamning ikki jixatini ko'rsatadi. Birinchidan, o'stirilgan qatlamlarning yuzalarida bir nechta dog'lar bilan o'ralgan zich donachalar kuzatiladi (5 -a, b -rasm). Ikkinchidan, tavlangan qatlamlarda kristallararo masofa kichikroq bo'lgan bir xil taqsimlanish va teng donachalar o'lchamlarini ko'rish mumkin, bundan tashqari, bu donalar shaffofdir. (5b-rasm). Bu issiqlik bilan ishlov berishdan keyin qayta kristallanish ta'sirining belgisi bo'lishi mumkin.

Rentgen diffraksiyasi, elektron skanerlash mikroskopi va atom kuch mikroskopining tahliliga asoslanib, 450°C taglik haroratida olingan stixiometrik tarkibli Sb_2Se_3 qatlamlari polikristall, ortorombik tuzilishga ega ekanligi, (211) yo'nalishli intensiv chuqqi paydo bo'lganligi va donachalar o'lchami esa $4 \div 5 \mu m$ va bir xil, qatlam qalinligi esa $\sim 2 \div 3$ mikronga teng bo'ldi. 500°C haroratda olingan Sb_2Se_3 namunalari, qo'shimcha ravishda, (120) yo'nalishli polikristal tuzilishga ega, donachalar o'lchami $5 \div 6 \mu m$, lekin qatlamlar tarkibi stexiometrik kamayish borligi kuzatildi. Bu yupqa qatlamli quyosh elementlarini ishlab chiqarishga mos keladigan optimal tarkibdagi Sb_2Se_3 qatlamlarini o'stirish uchun taglik temperaturasi 450°C ga teng bo'lganda imkon beradi.

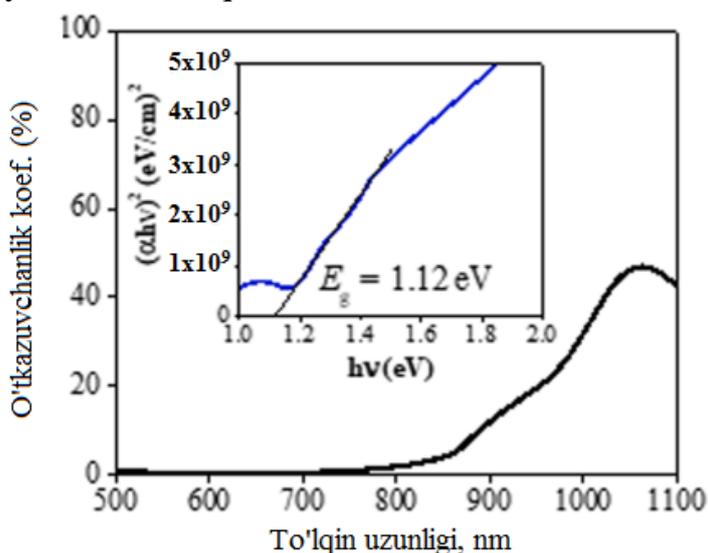


5 -rasm. (a, b) va (c, d) havoda 300°C haroratda tavlanihdan oldin, (a) va (c), shuningdek (b) va (d) tavlanihdan keyingi atom kuch mikroskopi tasvirlari, xamda mos ravishda 2D va 3D ko'inishda

Shisha tagliklarda o'stirilgan Sb_2Se_3 qatlamlari qarshiligining haroratga bog'liqligi o'lchandi. Qarshilikning haroratga bog'liqligi 80 ÷ 300 K harorat oralig'ida o'rganildi. Qarshilikning haroratga bog'liqligi faollashtirish xususiyatiga ega bo'lib, 450°C olingan Sb_2Se_3 qatlamlari uchun uchta faollashtirish energiyalari $\sim 0,15$ eV, 0,4 eV va 0,59 eV aniqlandi. 0,15 eV va 0,4 eV ga teng bo'lgan faollashtirish energiyalari qatlam tarkibida selen miqdori ko'p bo'lgan holatlarda paydo bo'ladigan Se_{Sb} antistrukturali akseptor defektlari hisoblanib asosiy zaryad tashuvchilar hisoblanadi. Sb_2Se_3 qatlamlari uchun topilgan 0,59 eV faollashtirish energiyasi, asosiy yutilish spektrlaridan topilgan qatlamlar taqiqlangan zona kengligining yarmiga teng. Faollashtirish energiyasining ko'rsatilgan qiymatlari

asosiy yutilish spektrlaridan topilgan qatlamlarning taqiqlangan soha kengligining taxminan yarmiga teng. Bu holat shuni ko'rsatadiki, o'rganilayotgan qatlamlardagi Fermi energiyasi taqiqlangan zona kengligining o'rtasiga yaqin joylashgan nuqsonlarning chuqur holatlari bilan barqarorlashadi. 273 K haroratda, qatlamlar o'rtacha $10^4 \div 10^7 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ qarshiligiga ega bo'ldi.

Taqiqlangan zona kengligining qiymatini aniqlash uchun xona haroratida Sb_2Se_3 qatlamlarining optik yutilish spektrlari o'rganildi. 6-rasmda to'g'ri optik o'tish uchun $(\alpha d h\nu)^2 \leftrightarrow h\nu$ (bu yerda d - qatlam qalinligi) mos koordinatalarda chizilgan optik yutilish koeffitsiyentining spektral bog'liqliklari ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, eksperimental bog'liqliklar ko'rsatilgan koordinatalarda chiziqli bo'ladi, bu Sb_2Se_3 uchun taqiqlangan zona kengligini $E_g = 1,12 \text{ eV}$ ga teng qiymatlarini aniqlash imkonini berdi.

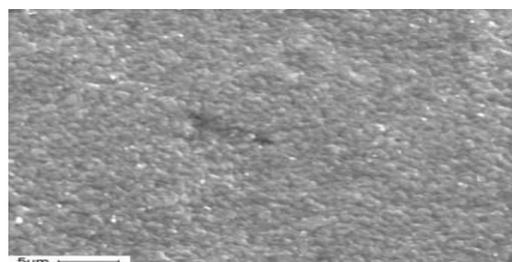
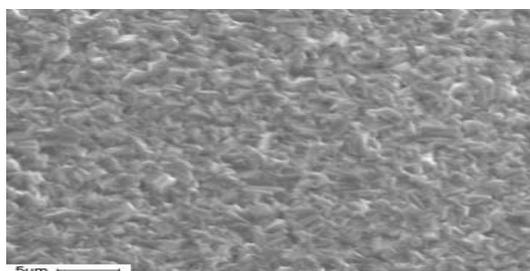


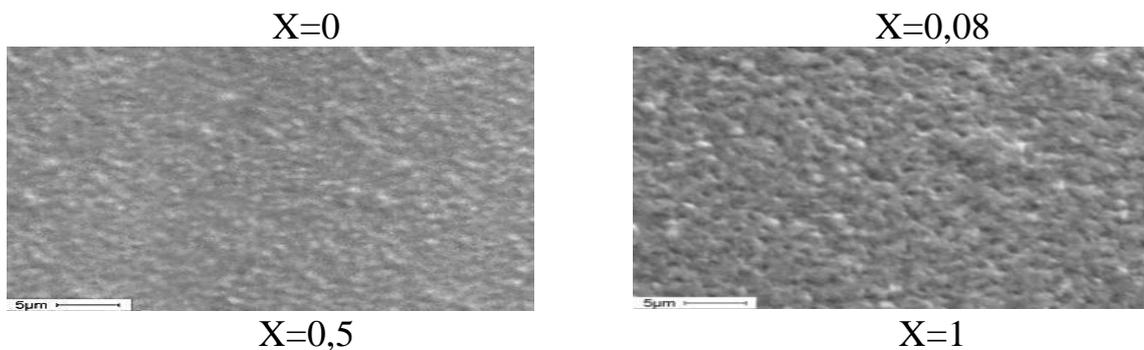
6 -rasm. Sb_2Se_3 yupqa qatlam uchun optik yutilish koeffitsiyentining spektral bog'liqliklari

To'rtinchi bob “ $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qattiq qotishmalarining morfologik, strukturaviy, elektr va optik xossalari” da turli kompozitsiyadagi $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qattiq qotishmalarining morfologiyasi, strukturasi, elektr va optik xossalarini o'rganishga bag'ishlangan. Manba sifatida sofligi mos ravishda 99,999 % bo'lgan izolyasiyalangan CdS va CdTe manbalaridan foydalanilgan. Qatlamlar borosilikat shisha taglik ustida 450°C haroratda o'stirilgan. Namunalar

atmosfera bosimida vodorod oqimida o'stirildi.

7-rasmda barcha namunalar uchun skaner elektron mikroskopining tasvirlari ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, shisha tagliklarga o'stirilgan namunalar turli xil kichik va katta mikrokristallardan tashkil topgan polikristallar tuzilishga ega. $0 \leq x \leq 1$ da $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ namunalarida tarkib nisbatlarining o'zgarishi donachalar o'lchamining kichiklashishiga, shuningdek, qatlamlar qalinligining pasayishiga va namunalar kichik donachali polikristal tuzilishga ega bo'lishiga olib kelgan. Qalinligi $1,0 \div 1,5$ mikron bo'lgan qatlamlarning donachalar o'lchami $0,5 \div 1,5$ mikronni tashkil qiladi.





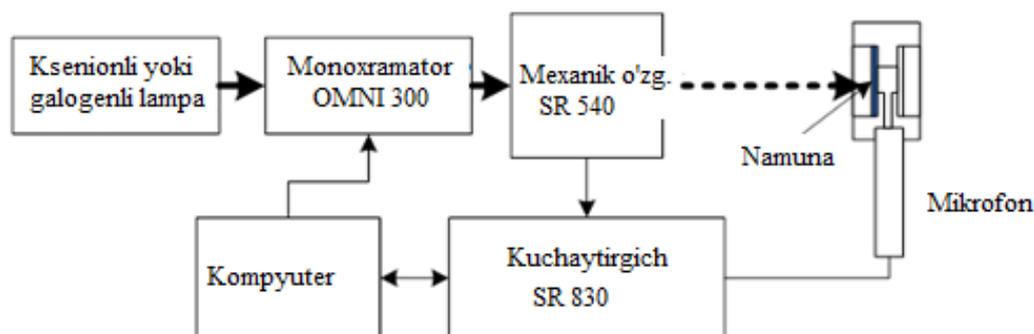
7-rasm. $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qatlamlari uchun skanerlovchi elektron mikroskopining $x = 0; 0,08; 0,5; 1$ qiymatlarida mos ravishdagi bug‘ fazasidagi tasvirlari

1-Jadval.

$\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ qatlamlari tarkibidagi Cd, Te va S elementlarning nisbati.

	CdTe			$\text{CdS}_{0,08}\text{Te}_{0,92}$			$\text{CdS}_{0,5}\text{Te}_{0,5}$			CdS		
Cd	49,1	49,9	49,8	58,1	57,9	58,2	54,2	54,5	54,1	50,7	50,7	50,8
Te	50,9	50,1	50,2	38,5	37,6	37,9	18	18	18,2			
S				3,4	4,5	3,9	27,8	27,3	27,7	49,3	49,3	49,2

Optik yutilish koeffitsiyenti $\beta(h\nu)$ spektrlarini aniqlash uchun fotoakustik qurilma ishlatilgan. Zaryad tashuvchilarning L_d diffuziya uzunligini aniqlash uchun Fotokuchlanish usuli qo‘llanilgan. Spektral fotoakustika eksperimentlari uchun ishlatiladigan eksperimental qurilma sxemasi 8-rasmda ko‘rsatilgan.



8-rasm. Spektral tajribalar uchun ishlatiladigan fotoakustik qurilma

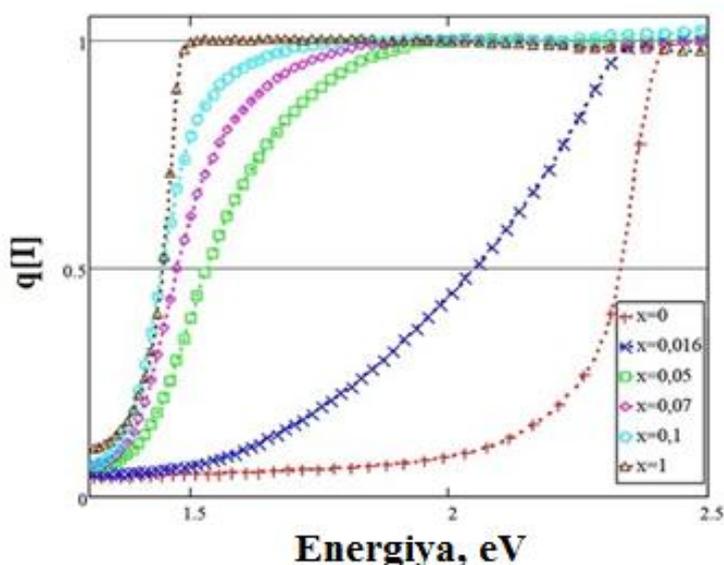
Namunalarining normallashtirilgan fotoakustik eksperimental amplituda spektrlari 9-rasmda ko‘rsatilgan. Nur modulyasiyasi chastotasi $\nu = 128$ Gs.

Fotoakustik signalning eksperimental amplitudali spektral xarakteristikalaridan, namunalarning optik yutilish koeffitsiyenti spektrlari hisoblab topildi. Buning uchun $R = 0$ va $R \neq 0$ qaytish koeffitsiyentining turli xil variantlarida quyidagi formulalar qo‘llanilgan:

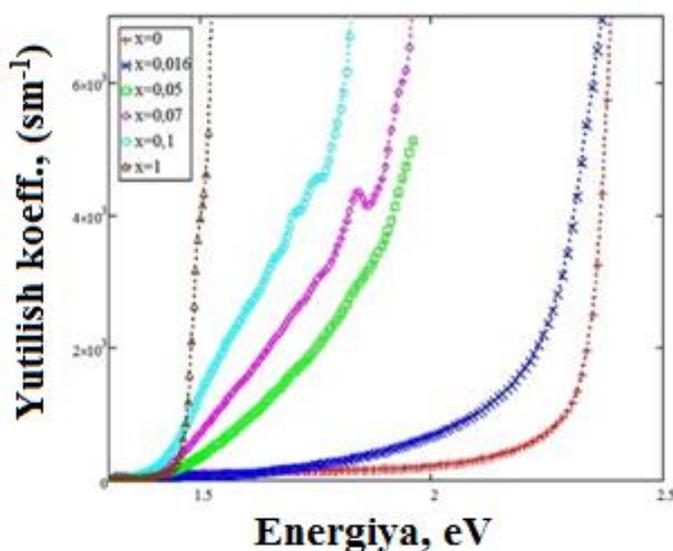
$$R=0 \text{ da } \beta(h\nu) = \frac{-\ln(1-q)}{d} \quad (3a)$$

$$R=0.25 \text{ da } \beta(h\nu) = \frac{-1}{d} \ln\left(\frac{1-q}{1-Rq}\right) \quad (3b),$$

bu yerda: d - namunaning qalinligi, R - optik qaytish koeffitsiyenti.



9-rasm. CdS_{1-x}Te_x namunalari uchun normallashtirilgan eksperimental fotoakustik signalning amplituda spektrlari



10-rasm. Formula (1b) bo'yicha hisoblangan CdS_{1-x}Te_x namunalari uchun optik yutilish koeffitsiyenti spektrlari, R = 0,25

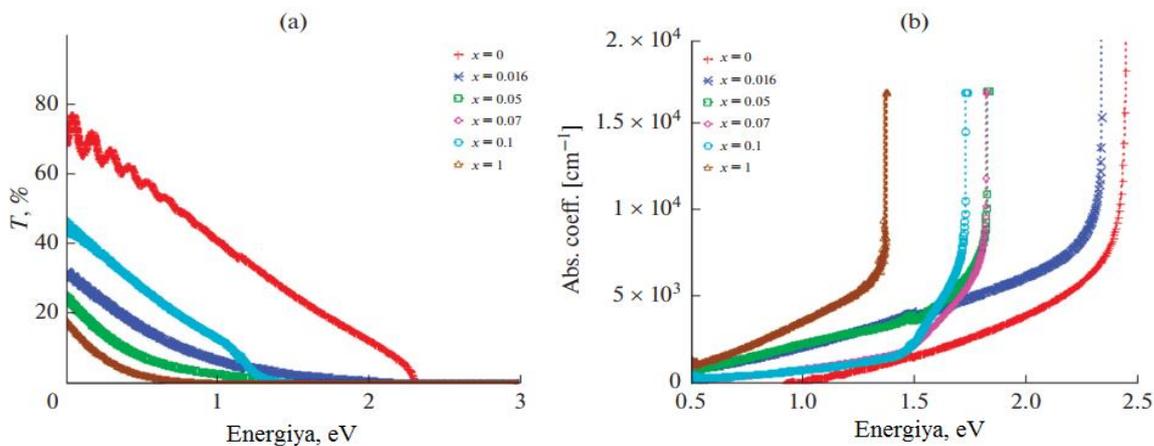
$$R=0 \text{ uchun } \beta(h\nu) = \frac{-\ln(T)}{d} \quad (4a)$$

$$R=0,25 \text{ uchun } \beta(h\nu) = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{(1-R^2) + \sqrt{(1-R)^4 + 4R^2T^2}}{2R^2T^2} \right) \quad (4b)$$

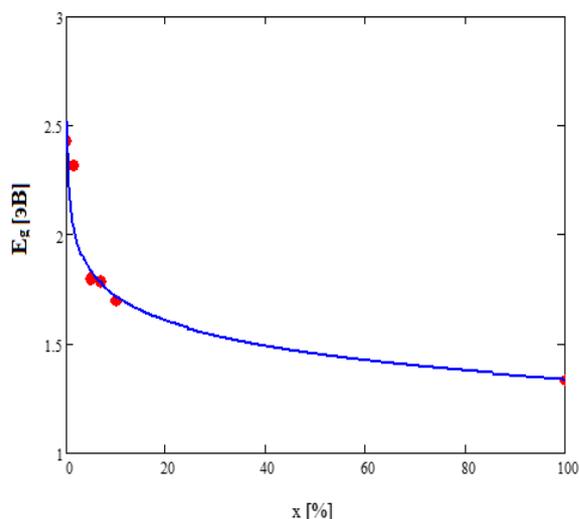
Namunalarning 11b - rasmda ko'rsatilgan optik yutilish koeffitsiyenti spektrlaridan Taus usuli bilan aniqlangan taqiqlangan zona kengligining qiymatlari, 2-jadvalning 2-ustunida keltirilgan va 12-rasmda tasvirlangan.

Optik yutilish koeffitsiyentining spektrlari R = 0,25 uchun shu tarzda hisoblab chiqilgan va 10-rasmda turli tarkibli qatlamlarning natijalari ko'rsatilgan.

eyin namunalarning optik o'tkazuvchanlik spektrlari o'lchandi. O'tkazuvchanlik spektrlari FLH-740 qatlam ushlagichi bilan jihozlangan JascoV-670 UV-VIS-NIR spektrofotometrida o'lchandi. Namunalarning eksperimental o'tkazuvchanlik spektrlari 11a - rasmda ko'rsatilgan. 11b - rasmda R = 0,25 uchun (4b) formula bo'yicha o'tkazuvchanlik spektrlaridan hisoblangan namunalarning optik yutilish koeffitsiyenti spektrlari ko'rsatilgan:



11-rasm. a) Optik o‘tkazuvchanlik spektrlari, b) CdS_{1-x}Te_x namunalari ning optik yutilish ko‘effitsiyenti spektrlari



12-rasm. Har xil tarkibli CdS_{1-x}Te_x namunalari ning taqiqlangan soha kengligi qiymatlari

2-Jadval.

O‘rganilayotgan namunalarning taqiqlangan zona kengligi qiymatlari

No	x (tarkib)	E_g , [eV]
1	0	2,44
2	0,016	2,32
3	0,05	1,80
4	0,07	1,79
5	0,1	1,70
6	1	1,34

CdS_{1-x}Te_x namunalari zaryad tashuvchilarining diffuziya uzunliklarining qiymatlari fotokuchlanish qurilma yordamida topildi va olingan eksperimental natijalar 3-jadvalda keltirilgan.

CdS_{1-x}Te_x namunalari uchun zaryad tashuvchilarning diffuziya uzunliklarining eksperimental olingan qiymatlari

X	L _d (Fotokuchlanish spektrlarining aproximasiyasi)
0	0,164μm (adabiyotdagi qiymati)
0,016	5 μm
0,05	17 μm
0,07	7,7 μm
0,1	15 μm
1	5μm, 0,1÷3,3μm (adabiyotdagi qiymati)

XULOSA

1. Sb₂Se₃ va CdS_{1-x}Te_x bo'yicha adabiyot ma'lumotlarini tahlil qilish asosida ular asosida samarali yupqa qatlamli QE larni yaratish imkoniyati, shuningdek ularni olish va samaradorligini oshirishning yangi fizik-texnologik usullarini izlash zarurati ko'rsatildi.

2. Sb₂Se₃ va CdS_{1-x}Te_x qatlamlarini o'tqazish jarayonining texnologik parametrlari o'rtasida ularning kristallofizik, morfologik, optik va elektrofizik xususiyatlari bilan o'zaro bog'liqlik o'rnatildi. Kondensatsiya haroratining optimal diapazonlari Sb₂Se₃ qatlamlari uchun 400°C÷450°C va CdS_{1-x}Te_x uchun 450°C ÷ 600°C ga mos kelishi aniqlandi.

3. CdS_{1-x}Te_x qatlamlari 0≤x≤1,0 oraliqning butun diapazonida uzluksiz qattiq qotishmalar qatorini tashkil etishi aniqlandi.

4. Sb₂Se₃ qatlamlari polikristalli ortorombik, CdS_{1-x}Te_x qatlamlari esa 0≤x≤0,6 tarkibli oraliqda polikristal kubik va 0,6≤x≤1,0 tarkibli oraliqda geksogonal qatlamlarga ega ekanligi ko'rsatilgan. Donachalar o'lchamlari asosan taglik haroratiga qarab 2÷5 mikron oraliq'ida o'zgarib turadi.

5. Sb₂Se₃ qatlamlarining optik taqiqlangan zona kengligi oraliq'i 1,1÷1,2 eV, CdS_{1-x}Te_x qatlamlari uchun esa tarkibiga qarab 1,46÷2,4 eV oraliq'ida nochiqlik o'zgarib turishi aniqlandi.

6. Sb₂Se₃ qatlamlarining elektr o'tkazuvchanligi p-tipga ega ekanligi va kondensatsiya haroratiga qarab 10⁻⁴ ÷ 10⁻⁸ (Om·sm)⁻¹ bo'lishi aniqlandi va bu qatlam tarkibida turli Se va Sb konsentratsiyasi bilan izohlanadi.

7. CdS_{1-x}Te_x qatlamlarining o'tkazuvchanlik turini qatlamlar tarkibiga qarab inversiyasi topildi. Namunalar 0 ≤ x ≤ 0.6 da n-tipli va 0,6 ≤ x ≤ 1.0 da esa p-tipli o'tkazuvchanlikka ega bo'lib chiqdi. CdS ning miqdori ortishi bilan elektr o'tkazuvchanligi 10⁻⁶ (Om·sm)⁻¹ dan 10⁻¹⁰ (Om·sm)⁻¹gacha kamaydi.

8. Polikristall Sb₂Se₃ qatlamlari donalarining o'lchami va joylashish zichligi ham taglik haroratiga bog'liq ekanligi aniqlandi. Xususan, 450°C taglik haroratida olingan Sb₂Se₃ qatlamlari 5÷6 μm gacha bo'lgan donachalar o'lchamlari bilan yaqin

oʻralgan sirt strukturasi hosil qiladi. Taglik harorati 550°C gacha koʻtarilganda, donachalar 8÷9 mikrongacha ortadi, lekin past haroratli taglikka nisbatan selen miqdori 20 % kamayishi aniqlandi.

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

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ШУКУРОВ АКБАРЖОН ХИДОЕВИЧ

**СТРУКТУРНЫЕ, МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК Sb_2Se_3 и $CdS_{1-x}Te_x$**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2022.1. PhD/FM 587.

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

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

Научный руководитель: Разыков Такхирджан Муталович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Рахматов Ахмад Зайниддинович
доктор технических наук, профессор

Илиев Халмурат Миджитович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Ташкентский университет информационных технологий

Защита диссертации состоится «05» «07» 2023 г. в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019. FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г.Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20). Тел: (+99871) 248-79-94, факс: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz

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

Автореферат диссертации разослан «21» 06. 2023 г.
(реестр протокола рассылки № 49 от 21.06. 2023 г.).



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

О.Х. Кулдашов,
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.т.н, доцент

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

ВВЕДЕНИЕ (АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)).

Актуальность и востребованность темы диссертации. В связи интенсивного развития интереса к возобновляемым источникам энергии по всему миру, возникает растущая потребность в доступных полупроводниковых материалах, которые широко распространены в природе, не являются вредными и обладают высокой эффективностью. Поэтому в современном полупроводниковом материаловедении большое внимание уделяется исследованиям, направленным на создание новые полупроводниковых соединений и твердых растворов с уникальными свойствами, пригодных для изготовления дешевых и эффективных солнечных элементов. Одним из перспективных направлений исследований в этой области, является создание фотопреобразователей на основе тонких пленок. На сегодняшний день наиболее эффективными из тонкопленочных солнечных элементов считаются те, которые созданы на базе пленок соединений CdTe, $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}(\text{S}, \text{Se})_2$, а также новые материалы Sb_2Se_3 , SnSe и твердых растворов $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$. Среди этих материалов Sb_2Se_3 и $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ характеризуются высоким коэффициентом поглощения, низкой стоимостью и оптимальной шириной запрещенной зоны, подходящей для получения эффективных солнечных элементов из-за их распространенности в земной коре.

Глобальные исследования тонких пленок Sb_2Se_3 и $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ для использования в солнечных элементах начались с 2014 года. Однако, несмотря на сравнительно короткий срок исследований, уже в 2019 году было сообщено о достижении эффективности преобразования 9,2 % солнечного элемента на основе соединения Sb_2Se_3 ¹. В последнее время получению тонких пленок Sb_2Se_3 и твердого раствора $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ осуществляется в условиях вакуума с большими энергозатратами и малыми поверхностями, но, несмотря на множество исследований в этом направлении, имеются ограниченные данные по получению тонких пленок Sb_2Se_3 и твердого раствора $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ на больших площадях по малозатратной и безвакуумной технологии, и, следовательно, существует ряд нерешенных вопросов, связанных с технологией получения этих материалов и создания солнечных элементов на их основе. Поэтому физико-химические и оптические свойства тонких пленок Sb_2Se_3 и $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ сильно различаются в зависимости от метода их получения и внешнего воздействия². В связи с этим исследования, проводимые в направлении получения тонких пленок Sb_2Se_3 и твердого раствора $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ при атмосферном давлении без вакуума, изучение их свойств и закономерностей образования их кристаллических структур, а также свойств структур, созданных на их основе, имеет большое научное и практическое значение для

¹Li Z, Liang X, Li G, Liu H, Zhang H, Guo J, et al. 9.2%-efficient core-shell structured antimony selenide nanorod array solar cells. // Nature communications. 2019; 10:125-132.

²Zeng K, Xue D-J, Tang J. Antimony selenide thin-film solar cells. // Semiconductor Science and Technology. 2016;31:063001.

физики полупроводников, полупроводникового материаловедения, и являются одним из актуальных вопросов физики материаловедения.

В Республике реализуются масштабные мероприятия в области исследований по разработке новых технологий и методов, способствующих повышению эффективности и широкому внедрению и использованию солнечной энергии. В этом отношении, в стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы, поставлены задачи, в том числе «..бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией, активное внедрение технологий «Зелёной экономики» во все сферы жизни, увеличение энергоэффективности экономики на 20 процентов»³. Для выполнения поставленных задач, в частности, большое научное значение имеет строительство новых производств на основе солнечной энергии, в том числе создание новых полупроводниковых материалов твердых растворов с электрофизическими свойствами, необходимыми для разработки новых типов солнечных элементов. С этой точки зрения, полупроводниковые тонкие пленки на основе Sb_2Se_3 , состоящие из компонент, имеющих малую степень вредности, а также ввиду их оптимальных оптических и фотоэлектрических свойств, считаются одним из перспективных и важных материалов для использования в производств дешёвых и экологически чистых солнечных элементов в большом объеме.

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

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

Степень изученности проблемы.

В настоящее время в ведущих мировых научных центрах и университетах ведутся исследования по изучению тонких слоев на основе Sb_2Se_3 и производству солнечных элементов на их основе. Например, в Университете

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

науки и технологий Хуажонг, Школе физики и инженерной физики, Лаборатории лазерной поляризации и информационных технологий Китайской Народной Республики исследования материалов на основе Sb_2Se_3 и CdS проводят ученые Цюйфу Цзэн К., Сюэ Д.Дж., Тан Дж. Ли З., Лян С., Ли Г., Лю Н, Zhang и др. Основная цель исследований — уменьшить дефекты, возникающие при росте тонкого слоя Sb_2Se_3 , и вырастить зерна с ориентацией в нужном направлении.

В странах СНГ также ведутся исследования в области тонких слоев для солнечных элементов под руководством М.С. Тиванова, заведующего кафедрой «Энергофизики» Белорусского национального университета. Узбекскими учеными Физико-технического института под руководством Т.М. Разыкова разработана новая технология получения поликристаллических тонких пленок на основе двоичных и многокомпонентных халькогенидных полупроводников методом химического молекулярно-пучкового осаждения (ХМПО).

Однако до сих пор не исследовано получение бинарного соединения Sb_2Se_3 и твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$ методом химического молекулярно-пучкового осаждения. Следовательно, проводимые исследования по изучению условий получения тонких пленок соединений Sb_2Se_3 и твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$, установлению закономерностей зависимости параметров микроструктуры, электрических и оптических свойств пленок, полученных предлагаемым в диссертации методом, а также изучение фотоэлектрических характеристик структур солнечных элементов, созданных на их основе, являются актуальной задачей полупроводникового материаловедения, физики полупроводников и представляют большой интерес как для науки, так и для практики.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ фундаментальных проектов Физико-технического института по теме под номером ФА-А3-Ф003: «Комплексные исследования и разработка тонкослойных солнечных элементов на основе новых типов халькогенидных материалов».

Целью исследований заключается в выявлении физико-технологических особенностей получения тонких пленок соединения Sb_2Se_3 и твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$ на стеклянных подложках методом химического молекулярно-пучкового осаждения, изучении закономерностей изменения микроструктуры, электрических и оптических свойств в зависимости от параметров технологического режима.

Задачи исследований:

получение сплава бинарного соединения Sb_2Se_3 , используемого в качестве испаряемого базового материала при осаждении тонких пленок Sb_2Se_3 методом ХМПО;

получение пленок соединения Sb_2Se_3 и твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$

методом ХМПО в условиях квазизамкнутого объема без вакуума в потоке водорода при различных условиях технологического процесса (температуры источника и подложки, скорости потока водорода и др.);

изучение зависимости морфологических, структурных, оптических и электрофизических свойств тонких слоев соединения Sb_2Se_3 и твердых растворов $CdS_{1-x}Te_x$ от различных технологических режимов;

изучение изменения морфологических, структурных, оптических и электрофизических свойств пленок Sb_2Se_3 и $CdS_{1-x}Te_x$ в зависимости от их состава.

Объектами исследования являются тонкие пленки соединения Sb_2Se_3 и твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$ различного состава ($0 \leq x \leq 1$), полученные на стеклянных подложках методом ХМПО, а также структуры, созданные на их основе.

Предметом исследования являются фазовый и химический составы, структурные характеристики, микроструктура, электрофизические и оптические свойства пленок соединения Sb_2Se_3 и твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$ различного состава ($0 \leq x \leq 1$).

Методы исследования. Для решения поставленных задач был использован простой технологический метод химического молекулярно-пучкового осаждения для выращивания полупроводниковых пленок Sb_2Se_3 и $CdS_{1-x}Te_x$, структурное совершенство твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$ было определено методом дифракции рентгеновского излучения, поверхностный рельеф пленок был измерен атомно-силовым и сканирующим электронным микроскопами, подвижности носителей заряда измерены методом Холла, современные методы фотоакустики и поверхностного фотонапряжения были применены для определения оптических свойств пленок, анализ вольт-амперных характеристик - для определения механизмов протекания тока, при определении границы поглощения света применен метод эллипсометрии, а также были использованы методы исследования температурной зависимости электропроводности.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые методом химического молекулярно-пучкового осаждения в условиях квазизамкнутого объема в потоке водорода получены тонкие пленки соединений Sb_2Se_3 и твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$ в широком диапазоне состава ($0 \leq x \leq 1$), обладающие электрофизическими параметрами, подходящими для создания дешевых и эффективных солнечных элементов;

методом дисперсионной рентгеновской спектроскопии установлено, что при скоростях потока водорода ≤ 10 см³/мин и ниже, количество (Se) в слоях Sb_2Se_3 выше 60 %, и на их рентгенограмме присутствуют фазы Se и Sb_2Se_3 , и при скоростях потока $15 \div 20$ см³/мин в пленке устанавливается стехиометрическое равновесие;

методом рентгеноструктурного анализа установлено, что пленки Sb_2Se_3 , осажденные при температурах подложки $T > 450^\circ C$, становятся обогащенными Sb и растут предпочтительно в кристаллическом направлении (120), а при

температурах подложки $T \leq 450^\circ\text{C}$ – обогащенными Se и растут перпендикулярно к поверхности подложки в направлении (211);

показано, что ширина запрещенной зоны твердого раствора $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ изменяется по нелинейной зависимости в интервале от 2,4 до 1,4 эВ с изменением состава в пределах ($0 \leq x \leq 1$);

установлено, что поликристаллические тонкие слои Sb_2Se_3 можно получать, регулируя соотношение интенсивностей пучков молекул Sb/Se в паровой фазе и потока элементов, выращенных на подложке, а их удельное сопротивление можно изменять в широком диапазоне $10^4 \div 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны физико-технологические основы получения тонких пленок соединения Sb_2Se_3 и твердых растворов $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ методом химического молекулярно-пучкового осаждения в условиях квазизамкнутого объема в потоке водорода;

на основе анализа экспериментальных данных показана возможность создания эффективных тонкопленочных солнечных элементов на основе пленок соединения Sb_2Se_3 и твердого раствора $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ в спектральном диапазоне fotocувствительности в интервале энергий фотонов от 2,4 эВ до 1,45 эВ.

Достоверность результатов исследований обеспечивается: применением стандартных технологических установок, высокоточных приборов и оборудования, современных научных и апробированных методов исследования морфологии, микроструктуры и локального элементного состава пленок с использованием энергодисперсионного рентгеновского анализатора марки EDX (Oxford Instrument) - Aztec Energy Advanced X-act SDD. Рентгеновские исследования «Panalytical Empyrean» были проведены в Центре передовых технологий при Министерстве инновационного развития Республики Узбекистан, и методы поверхностного напряжения (Surface voltage) и поверхностного фотонапряжения (surface photovoltage) использовались для определения оптических свойств пленок в Кошалинском технологическом университете (Польша).

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость полученных результатов заключается в том, что они позволяют определить механизмы роста и структурные свойства тонких пленок соединений Sb_2Se_3 и $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$, зависимость электрофизических и оптических свойств твердых растворов от технологических параметров.

Практическая значимость результатов исследований заключается в использовании метода получения тонких пленок Sb_2Se_3 и $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$, разработке новых методов получения тонких пленок и создании их твердых растворов, пригодных для получения эффективных солнечных элементов, а в дальнейшем - также разработка технологии получения тонких пленок.

Внедрение результатов исследования. На основе изучения морфологических, структурных, оптических и электрических свойств в пленках Sb_2Se_3 различного состава:

результаты оптимизации параметров пленок Sb_2Se_3 , полученные при исследовании электрофизических и оптических свойств пленок селенида сурьмы и солнечных элементов на их основе, были использованы в зарубежных журналах (Solar Energy Materials and Solar Cells. Impact Factor: 7,267. Vol.200, 15 September 2019, 109945; Solar Energy, Impact Factor: 5, 95. Volume 187, 15 July 2019, Pages 404-410; Solar Energy, Volume 188, Impact Factor: 5,95, August 2019, Pages 586-592). Использование научных результатов позволило улучшить морфологию и структуру пленок селенида сурьмы, управлять ориентацией их кристаллов, а также повысить эффективность преобразования солнечных элементов на их основе, доведя её до уровней ~4,5 %.

Результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, были использованы в Институте материаловедения АН РУз при выполнении проекта № МРБ-АН-2019-17 «Исследование широкополосных композиционных обратимых муфт для солнечных элементов» (2019 -2020 г.г.). При выполнении этого проекта были использованы структуры солнечных элементов CdS/CdTe-Ag, созданные в диссертационной работе в качестве образцов структур тонкопленочных солнечных элементов (Справка №2/1255-1271 от 01.06.2022 АН РУз.). Используя научные результаты, на основе гетероструктуры CdS/CdTe-Ag были созданы солнечные элементы с гетероструктурой: стекло/MgF₂:CaF₂/ZnO(Al)/CdS/CdTe-Ag, путем нанесения антиотражающего слоя MgF₂:CaF₂/ZnO(Al), позволяющего увеличить эффективность на 1,6%, за счет уменьшения отражения и увеличения тока короткого замыкания.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на 3 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 11 научных работах, 5 из них опубликованы в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 4 статьи в зарубежных международных журналах.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Она изложена на 123 страницах, включая 36 рисунков, 8 таблиц и список использованной литературы из 131 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и значимость темы диссертационной работы, 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 «**Современное состояние исследований в области получения пленок селенида сурьмы и твердых растворов теллурида кадмия сульфида и их свойства**» представлен литературный обзор, в который включены основные физико-химические свойства Sb_2Se_3 и твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$. Рассматриваются процессы дефектообразования в Sb_2Se_3 , а также роль точечных дефектов в электрофизических и оптических свойствах пленок Sb_2Se_3 . Приводится анализ литературных данных по методам получения и использования пленок указанных соединений. Кроме того, рассматриваются преимущества и недостатки технологических методов получения пленок на основе Sb_2Se_3 . На основе анализа имеющихся экспериментальных и теоретических данных сформулирована цель и постановлены задачи исследований.

Вторая глава под названием «**Особенности получения пленок Sb_2Se_3 и твердых растворов $CdS_{1-x}Te_x$ методом химического молекулярно-пучкового осаждения в потоке газа**» посвящена выращиванию пленок Sb_2Se_3 и твердых растворов $CdS_{1-x}Te_x$ различного состава методом ХМПО и методике комплексных исследований физических свойства пленок.

В настоящем разделе приводятся результаты термодинамического анализа физико-химических процессов, протекающих при синтезе пленок Sb_2Se_3 и ТР $CdS_{1-x}Te_x$ в квазизамкнутом объеме в атмосфере Sb , Se , Cd , Te бинарных соединений- CdS , $CdTe$, Sb_2Se_3 ТР $CdS_{1-x}Te_x$ с H_2 и равновесных парциальных давлений паров основных газовых частиц, присутствующих в паровой фазе. Описывается новая, экономичная, легко управляемая и воспроизводимая технология синтеза пленок Sb_2Se_3 и ТР $CdS_{1-x}Te_x$ методом химического молекулярно-пучкового осаждения в квазизамкнутом объеме в потоке водорода из дискретных источников и приводятся результаты молекулярно-кинетического анализа процессов массопереноса в квазизамкнутой реакционной камере технологического устройства.

Пленки Sb_2Se_3 были получены экономичным методом ХМПО при атмосферном давлении в потоке водорода. В качестве исходного материала использовались сплавы Sb_2Se_3 в процентах: 1) Sb -50 % и Se -50 %, 2) Sb -50,7 % и Se -49,3 %. Бинарные соединения сплавов Sb_2Se_3 получали следующим образом: отдельные элементы полупроводниковой чистоты Sb и Se помещали в кварцевые ампулы, в которых создавался высокий вакуум. Затем для создания сплавов Sb_2Se_3 , кварцевые ампулы помещали в муфельную печь и нагревали до $900^\circ C$ в течение 72 часов. После термического отжига

температура муфельной печи медленно снижалась до комнатной, со скоростью 50 град/ч. Кварцевые ампулы вынимались из муфельной печи и моментально охлаждались в ледяной воде. Сплавы Sb_2Se_3 извлекались путем разрезания кварцевых ампул. Чтобы проверить, были ли получены сплавы Sb_2Se_3 , был проведен рентгеноструктурный анализ с использованием дифракции рентгеновских лучей. Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что сплавы Sb_2Se_3 имеют орторомбическую кристаллическую структуру. Далее в контейнеры загружались сплавы Sb_2Se_3 стехиометрического состава, систему приводили в рабочее состояние и продували водородом, с целью удаления из нее атмосферных загрязняющих газов. Затем включают наружную печь реакционной камеры. Уровень нагрева определяется задаваемыми температурами осаждения. По достижении требуемого уровня нагрева подложки, включается печь индивидуального нагрева компонент A^5B^6 и доводят ее до требуемой температуры испарения. Температурный интервал испарений для выращивания пленок находился в пределах $600^\circ C \div 900^\circ C$, а температура подложки варьировалась в интервале $450^\circ C \div 550^\circ C$. Поток газа носителя водорода находился в диапазоне $7 \div 20$ см³/мин. Длительность процесса осаждения зависит от требуемой толщины пленок и находится в интервале от 30 до 60 мин. Толщина пленок Sb_2Se_3 составляет $1 \div 3$ мкм. Скорость осаждения лежала в диапазоне $30 \div 40$ нм/мин.

В ходе экспериментов по выращиванию пленок $CdS_{1-x}Te_x$ методом ХМПО в квазизамкнутом объеме в потоке водорода, нами установлено, что свойства пленок зависят в основном от термодинамических параметров процесса роста, т.е. от температур испарения компонентов осаждаемого материала $T_{и}$ и подложки $T_{п}$, а также от градиента температуры в данной пленке. С их помощью удалось управлять составом и другими свойствами пленок $CdS_{1-x}Te_x$ в широком диапазоне значений.

Для выяснения причины сложности характера изменения x от P_{CdTe} , была теоретически изучена зависимость состава ТР $CdS_{1-x}Te_x$ от состава равновесного пара, на основе данных термодинамического анализа. Результаты вычислений для $T = 1000$ К и $P_{CdS} = 2 \cdot 10^2$ Па, в виде зависимости $x(P_{CdTe})$, также приведены на рис.1. Как видно, экспериментальные кривые зависимости $x(P_{CdTe})$ для ТР $CdS_{1-x}Te_x$ соответствуют по характеру изменения. Однако, пленки $CdS_{1-x}Te_x$, полученные при $T_{п} = 750^\circ C$ (1023 К) и $P_{CdS} = 2,2 \cdot 10^3$ Па посредством ХМПО, содержат больше CdTe, чем предсказываемый теорией: $x_{(теор.)} > x_{(эксп.)}$. Тем не менее, соответствие характера изменения экспериментальной и теоретической кривых свидетельствует о том, что нелинейность $x(CdTe)$ обусловлена особенностями изменения активностей α_{CdS} и α_{CdTe} с изменением состава ТР $CdS_{1-x}Te_x$.

При ХМПО, когда каждый компонент осаждаемого соединения испаряется из отдельных источников, скорость потока пара компоненты, т.е. интенсивность молекулярного пучка (ИМП) (I_k), исходящая из контейнера и поступающая в реакторе, равна скорости испарения источника:

$$I_k = \frac{\Delta m_k}{\Delta t}, \quad (1)$$

где Δm_k – масса испарившегося материала за время Δt . Следовательно, зная Δm_k и Δt , можно легко определить I_k интересующие нас компоненты.

Изучение зависимости состава пленок $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ от соотношения ИМП Cd, S и Te при синтезе посредством ХМПО, показало, что при осаждении в условиях: $T_{\text{п}} = 750^\circ\text{C}$, $\text{Grad } T_{\theta} = 30$ град/см и $W_{\text{H}_2} = 8$ см³/мин, состав пленок изменяется линейно ($x = 0 \div 1$), в зависимости от соотношения ИМП

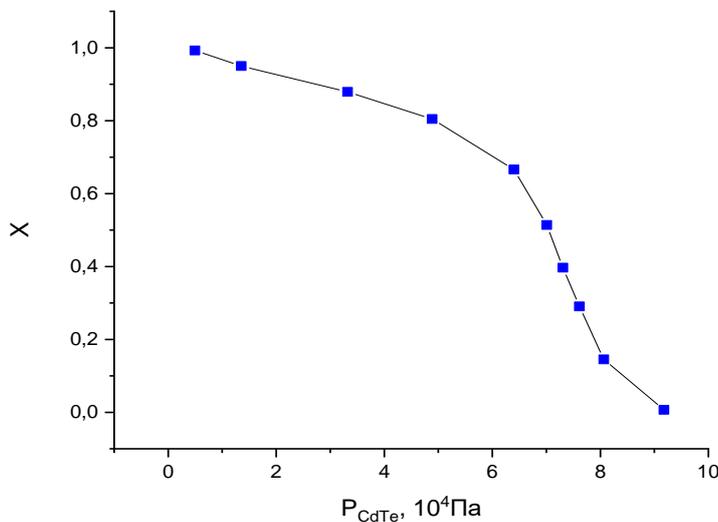


Рис. 1 Зависимость состава пленок $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ от давления пара P_{CdTe} $T_{\text{п}} = 750^\circ\text{C}$.

металлов $I_S/(I_S + I_{\text{Cd}})$. При этом увеличение I_{Cd} , т.е. концентрации Cd в реакционной камере обеспечивает плавное изменение состава пленок от CdTe к CdS. Пленки с граничными составами $x = 0$ и $x = 1$ получены при $T_{\text{Cd}} = 0$ и $T_{\text{CdS}} = 0$.

Зависимости состава x пленок $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ от термодинамических параметров ($T_{\text{и}}$, $T_{\text{п}}$, $\text{Grad}T_{\theta}$) роста легко объясняются на основе принятой нами квазиравновесной диффузионно-кинетической модели. Согласно которой при большом градиенте температуры, т.е. когда $T_{\theta} = T_{\text{п}} + \theta \cdot \text{Grad}T_{\theta} > T_{\text{к}}$, в пленке отсутствует конденсация материала на стенке реакционной камеры и весь испаряемый материал осаждается на подложке. Следовательно, при ХМПО поток компонентов ($R_{\text{к}}$), осаждаемых на подложке, равен ИМП компоненты ($I_{\text{к}}$), поступающего в ПКО. В этом случае состав пленок определяется соотношением ИМП компонентов, т.е.

$$x = \frac{Rk_2}{Rk_2 + Rk_1}, \quad (2)$$

что приводит к линейному изменению x от $I_{\text{к}2}/(I_{\text{к}2} + I_{\text{к}1})$ при ХМПО.

При установлении малого $\text{Grad } T_{\theta}$ и $T_{\text{к}} > T_{\theta}$, материал осаждается на стенке реакционной камеры в неизотермической зоне $I_{\text{к}} > R_{\text{к}}$. Следовательно, при выращивании пленок $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$, вследствие относительно высокой температуры стенки реакционной камеры $T_{\text{к}} > T_{\text{п}}$ на ней будет преобладать

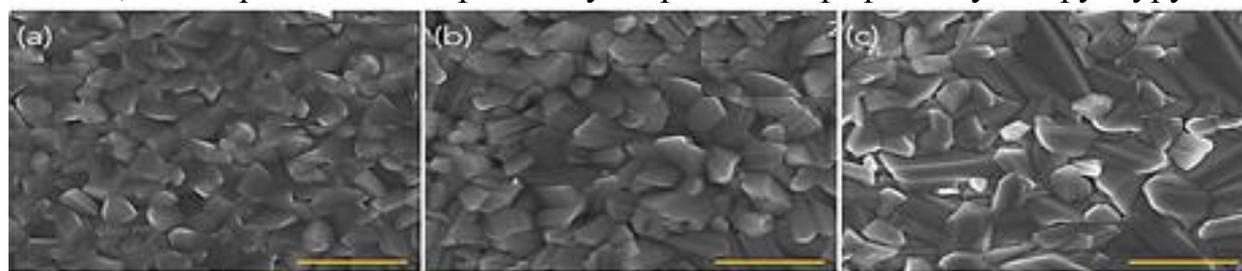
конденсация менее летучих компонентов – CdS (49 ккал/моль). В результате достигает подложки пар, обогащенный более летучим – CdTe (45 ккал/моль).

В ходе проведенных экспериментов осаждения пленок TP $CdS_{1-x}Te_x$, обнаружено изменение составов при изменении объемной скорости потока водорода W_{H_2} в интервале $(1 \div 2) \cdot 10^2$ см³/мин. Это еще раз свидетельствует о том, что при $P_e \ll 1$, массоперенос в реакторе осуществляется диффузией компонентов в паровой фазе.

В третьей главе под названием «**Морфологические, структурные, электрические и оптические свойства пленок Sb_2Se_3** » приведены результаты исследования морфологии, структуры и электрофизических свойств пленок Sb_2Se_3 различного состава с применением методов электромикроскопического, рентгеноспектрального анализа и температурной зависимости электропроводности.

На рис. 2 показаны СЭМ-изображения (СЭМ – сканирующий электронный микроскоп) пленок Sb_2Se_3 , осажденных при трех различных температурах подложки. При 450°C пленки содержат кристаллиты с размером 2÷3 мкм, хотя они контактируют друг с другом. Это может быть причиной плохой электропроводности вдоль поперечного направления поверхности пленки. При 500°C кристаллиты имеют более высокую плотность, однако их размер становится больше, находясь в диапазоне (5÷6) мкм, пленка также показала слабую электропроводность вдоль поперечного направления. С другой стороны, пленки Sb_2Se_3 , осажденные при $T_{п}=550^\circ\text{C}$, демонстрировали более крупные зерна $d > 10$ мкм. На поверхности этого образца изображены цепи 1D Sb_2Se_3 , которые выровнены вдоль поперечного направления. Это может объяснить появление сильного пика (120) и исчезновение пика (211) при высокой температуре подложки (рис.3).

На рис. 3 представлены результаты рентгенограммы пленок Sb_2Se_3 при разных температурах подложки. Все спектры хорошо согласуются с орторомбическим Sb_2Se_3 (JCPDS 15–0861), без вторичной фазы или примесей. Видно, что образцы имеют различную кристаллографическую структуру.



(a) $T_{п}= 450^\circ\text{C}$

(b) $T_{п}= 500^\circ\text{C}$

$T_{п}= 550^\circ\text{C}$

Рис. 2. Снимки сканирующего электронного микроскопа для пленок Sb_2Se_3 при различных температурах подложки

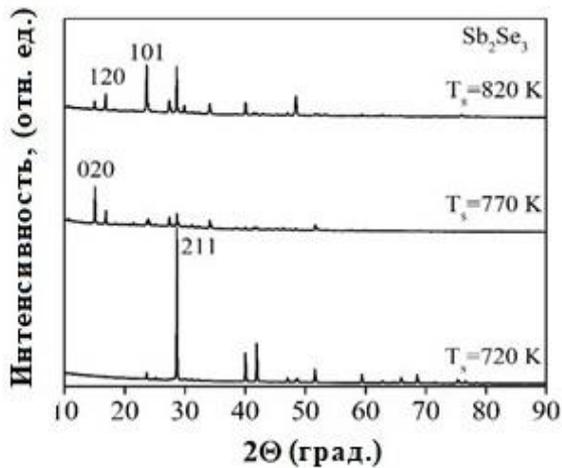


Рис. 3 Результаты рентгенодифракционного анализа пленок Sb_2Se_3 , синтезированных при температуре испарения материала Sb_2Se_3 $630 \pm 10^\circ C$ и температурах подложки $450^\circ C$, $500^\circ C$, $500^\circ C$

цепочки Sb_2Se_3 выравниваются вдоль направления роста, то есть перпендикулярно поверхности подложки. С другой стороны, когда тонкая пленка Sb_2Se_3 синтезируется при $T_{\text{п}}=500^\circ C$ и $T_{\text{п}}=550^\circ C$, цепи Sb_2Se_3 выравниваются вдоль поперечного направления, что соответствует ориентации (120), что является неэффективным для использования в качестве солнечных элементов. С этой точки зрения, осаждение пленки Sb_2Se_3 при температуре подложки $T_{\text{п}}=450^\circ C$ или даже при более низких температурах является предпочтительным. Было установлено, что Sb_2Se_3 с ориентацией (211) подходит для фотовольтаического применения. В методе ХМПО слои Sb_2Se_3 получают оптимальные направленные пики для солнечных элементов при низких температурах подложки, что позволяет управлять поглощающим слоям Sb_2Se_3 расти в нужном направлении.

На рис. 4 приведены результаты энергодисперсионного анализа (EDX) пленок Sb_2Se_3 полученных при температурах подложки $450^\circ C$, $500^\circ C$ и $550^\circ C$. Видно, что содержание Sb во всех пленках больше стехиометрического состава. Как видно из рис. 4, количество Se в слое уменьшалось с ростом температуры подложки. Это объясняется тем, что с увеличением температуры подложки повышается кинетическая энергия атомов Se, и происходит десорбция атомов селена. Если в составе пленки уменьшается Se, это приводит к появлению глубоких уровней в запрещенной зоне, что ускоряет рекомбинационные процессы. При температурах подложки $500^\circ C \div 550^\circ C$ наблюдали снижение уровня кристаллизации и содержания селена в составе пленки.

Была исследована на атомно-силовом микроскопе морфология кристаллического строения выращенной пленки до и после отжига, полученные результаты показаны на рис.5.

При увеличении температуры подложки до $T_{\text{п}}=500^\circ C$, тонкая пленка Sb_2Se_3 по-прежнему остается поликристаллической, но интенсивность пика (211) Sb_2Se_3 сильно уменьшается, и появляется слабый (020) пик, что указывает на низкую кристалличность пленки. При температуре роста $T_{\text{п}}=550^\circ C$ пленка получается поликристаллической, однако пик (211) немного уменьшается и при этой температуре также появляется слабый (120) пик Sb_2Se_3 . Возможно, что при $T_{\text{п}}=450^\circ C$ квазиодномерные

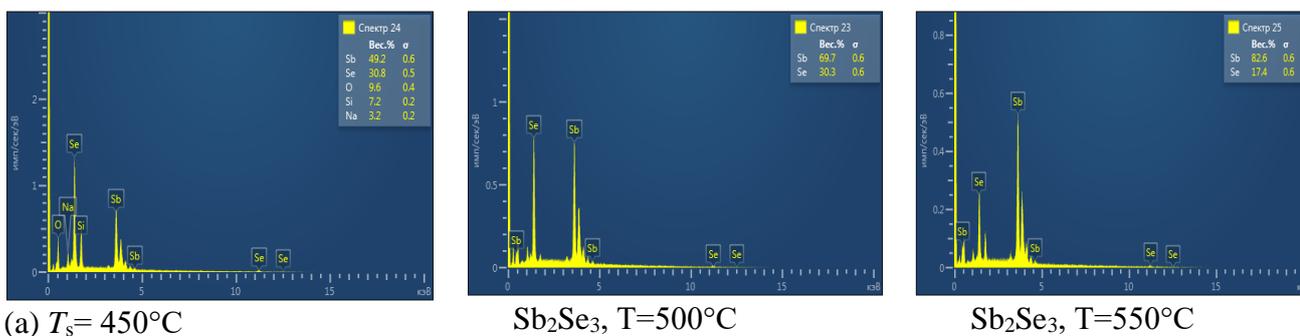


Рис. 4. Изображения энергодисперсионного спектра пленок Sb_2Se_3

Снимки пленки, полученные с помощью атомно-силового микроскопа, показывают два аспекта. Во-первых, на поверхностях выращенных пленок наблюдается довольно плотно упакованные микроструктуры с несколькими пятнами (рис. 5 а, б). Во-вторых, на отожженных пленках можно увидеть более однородное распределение и одинаковые размеры зерен с меньшим межкристаллитным расстоянием, к тому же эти зерна прозрачные. (рис. 5б). Это может быть признаком эффекта перекристаллизации после термообработки.

На основе данных рентгеноструктурного анализа, сканирующего электронного микроскопа и атомно-силового микроскопа было выявлено, что пленки Sb_2Se_3 стехиометрического состава, полученные при температуре подложки $450^\circ C$, имеют поликристаллическую сфалеритную структуру с ориентацией (211), размерами зерен $4\div 5$ мкм и с однородной толщиной пленок $\sim 2\div 3$ мкм. Образцы Sb_2Se_3 , полученные при $500^\circ C$, кроме того, обладали (120) направленную поликристаллическую структуру, размер зерен составлял $5\div 6$ мкм, но наблюдалось уменьшение стехиометрического состава. Это обуславливает вероятность выращивания пленок Sb_2Se_3 оптимального состава, которые применимы для изготовления тонкопленочных солнечных элементов, при температуре подложки $450^\circ C$.

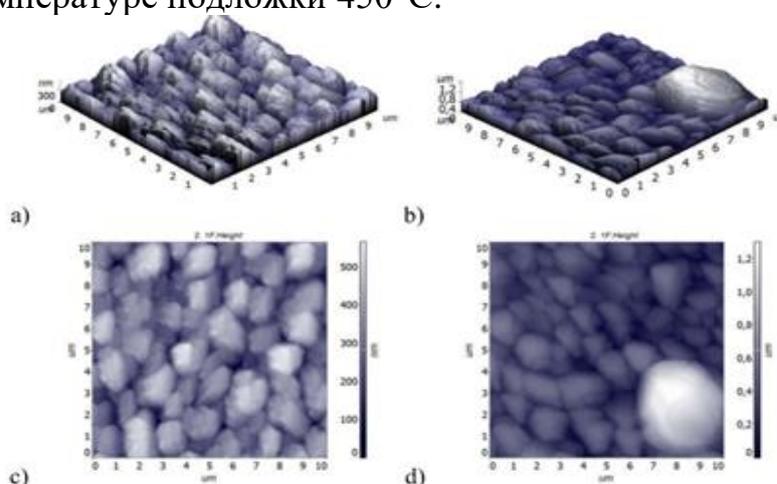


Рис.5. Снимки тонкой пленки Sb_2Se_3 до (а, с) и после (б, d) отжига в воздухе при $300^\circ C$, полученные на атомном силовом микроскопе причем (а) и (с), а также (б) и (d) представляют собой одни и тот же AFM-снимки, но с 2D и 3D видами, соответственно

Проведены измерения температурной зависимости удельного сопротивления пленок Sb_2Se_3 , выращенных на стеклянных подложках.

Температурная зависимость удельного сопротивления исследована в температурном диапазоне $80 \div 300$ К. Температурный ход удельного сопротивления носит активационный характер, причем энергия активации составила $\sim 0,15$ эВ, $0,4$ эВ и $0,59$ эВ для пленок Sb_2Se_3 полученных при температуре подложки $450^\circ C$. Энергии активации $0,15$ эВ, $0,4$ эВ являются доминирующими носителями заряда антиструктурных акцепторных дефектов Se_{Sb} , возникающих при высоком содержании селена в пленке. Энергия активации $0,59$ эВ, найденная для пленок Sb_2Se_3 , составляет половину ширины запрещенной зоны слоев, найденной из основных спектров поглощения. Указанные значения энергии активации примерно равны половине ширины запрещенной зоны пленок, найденной из спектров фундаментального поглощения. Это обстоятельство свидетельствует о том, что в исследованных пленках уровень Ферми стабилизирован глубокими состояниями дефектов, расположенными вблизи середины запрещенной зоны. При температуре 273 К пленки имели типичные значения удельного сопротивления $\sim 10^4 \div 10^7$ Ом·см.

С целью определения значения ширины запрещенной зоны исследованы спектры оптического поглощения пленок Sb_2Se_3 при комнатной температуре. Спектральные зависимости коэффициента поглощения, построенные в координатах, соответствующих прямым оптическим переходам $(\alpha d h\nu)^2 \leftrightarrow h\nu$ (где d — толщина пленки), представлены на рис. 6. Как видно, экспериментальные зависимости линеаризуются в указанных координатах, что позволило определить значения ширины запрещенной зоны $E_g = 1,12$ эВ для Sb_2Se_3 .

Четвертая глава «Морфологические, структурные, электрические и оптические свойства пленок твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$ » посвящена

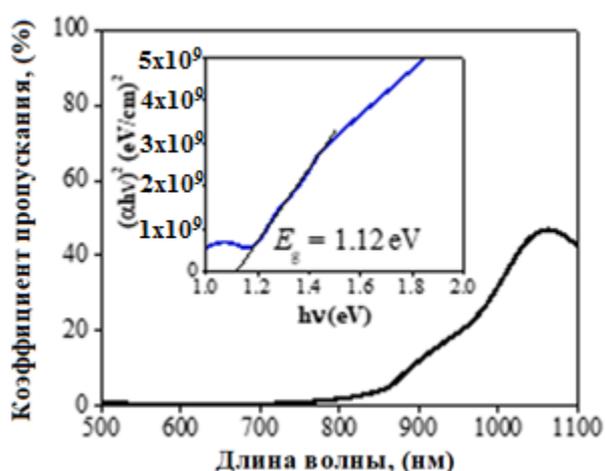


Рис.6. Спектральные зависимости коэффициента оптического поглощения для выращенной тонкой пленки Sb_2Se_3

влияния состава твердого раствора пленок $CdS_{1-x}Te_x$ на морфологические, структурные, электрические и оптические свойства данного материала.

В качестве источника были использованы изолированные источники CdS и $CdTe$ с чистотой $99,999\%$ и $99,999\%$ соответственно.

Пленки осаждались на боросиликатную стеклянную подложку и выдерживались при температуре $450^\circ C$. Образцы были выращены при атмосферном давлении в потоке водорода.

Снимки со сканирующего электронного микроскопа для всех образцов показаны на рисунке 7. Как видно из рисунка образцы, осажденные на

стеклянных подложках, имеют разную микроструктуру – мелкозернистые и крупнозернистые поликристаллы. Изменение соотношений составов в образцах $CdS_{1-x}Te_x$ при $0 \leq x \leq 1$ приводит к уменьшению размера зерен, а также к уменьшению толщины пленок, и образцы имеют мелкозернистую поликристаллическую структуру. Размеры зерен пленок, имеющих толщину $1,0 \div 1,5$ мкм составляет $0,5 \div 1,5$ мкм.

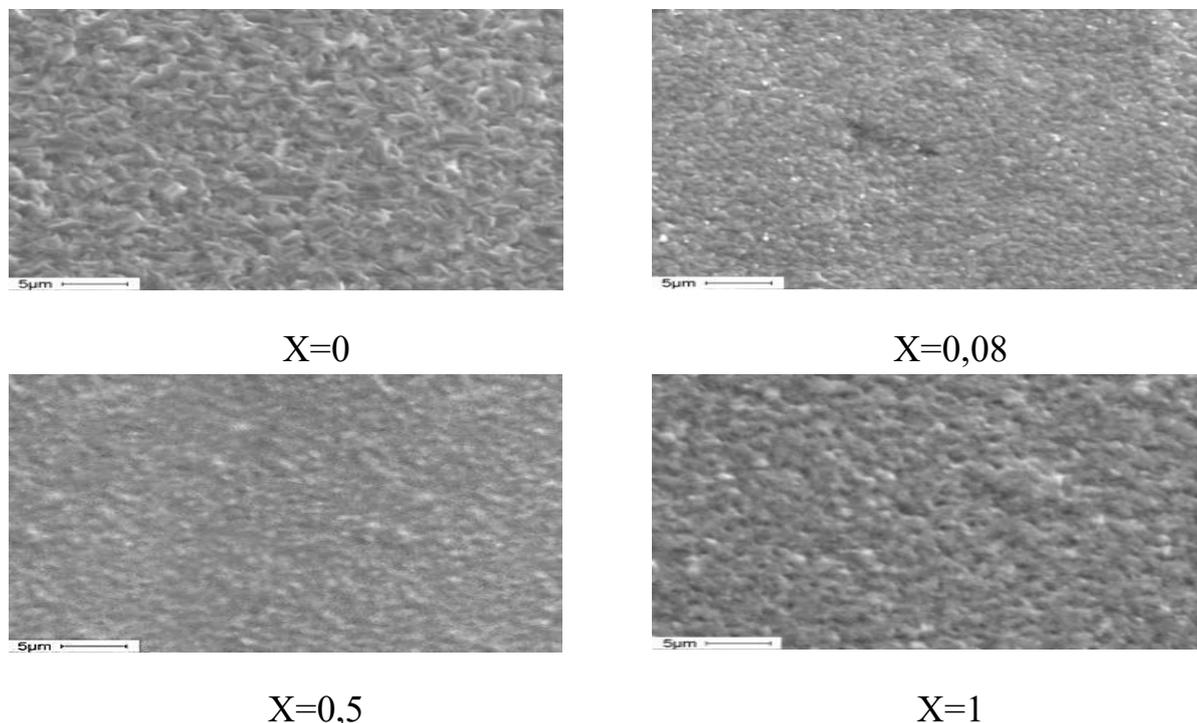


Рисунок 7. Снимки сканирующего электронного микроскопа для пленок $CdS_{1-x}Te_x$ при $x=0; 0,08; 0,5; 1$ в паровой фазе соответственно

Таблица 1.

Соотношения элементов Cd, Te и S в составах пленок $CdS_{1-x}Te_x$

	CdTe			CdS _{0,08} Te _{0,92}			CdS _{0,5} Te _{0,5}			CdS		
Cd	49,1	49,9	49,8	58,1	57,9	58,2	54,2	54,5	54,1	50,7	50,7	50,8
Te	50,9	50,1	50,2	38,5	37,6	37,9	18	18	18,2			
S				3,4	4,5	3,9	27,8	27,3	27,7	49,3	49,3	49,2

Фотоакустическая установка использовались для определения спектров коэффициента оптического поглощения $\beta(h\nu)$. Для определения диффузионной длины носителей L_d использовался метод ФотоЭДС. Экспериментальная установка, использованная для спектральных экспериментов фотоакустики, показана на рис. 8

Нормированные экспериментальные амплитудные спектры фотоакустического сигнала образцов представлены на рис.9. Частота модуляции света $f = 128$ Гц.

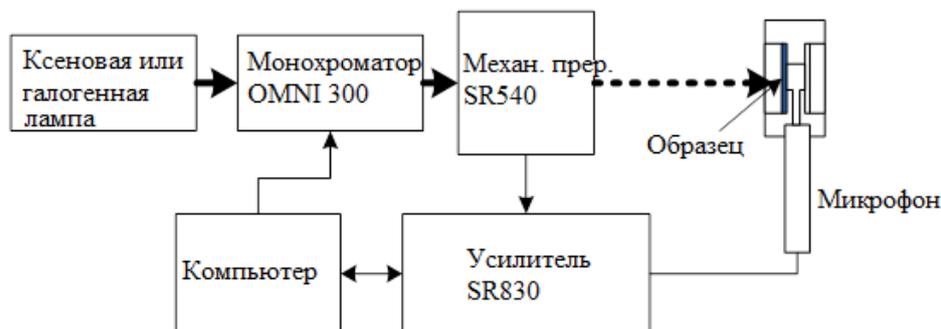


Рис. 8 Фотоакустическая установка, используемая для спектральных экспериментов

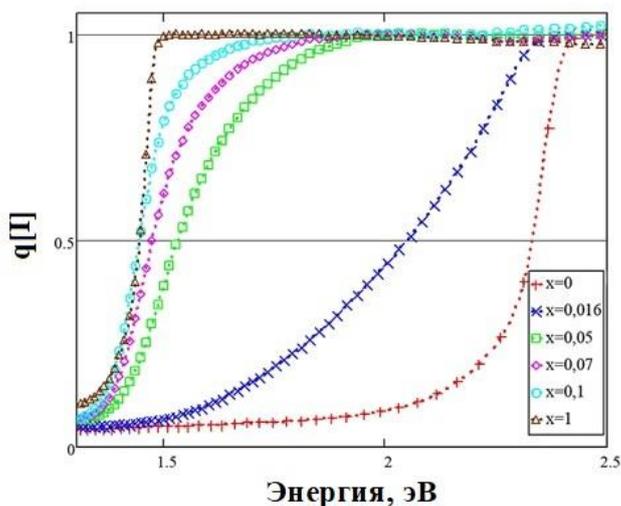


Рис.9. Нормированные экспериментальные амплитудные спектры фотоакустического сигнала для образцов $CdS_{1-x}Te_x$

По экспериментальным амплитудным спектральным характеристикам фотоакустического сигнала рассчитывались спектры коэффициента оптического поглощения образцов. Для этого были применены следующие формулы в различных вариантах коэффициента отражения $R=0$ и $R \neq 0$:

$$\text{для } R=0 \quad \beta(h\nu) = \frac{-\ln(1-q)}{d}, \quad (3a)$$

$$\text{для } R \neq 0 \quad \beta(h\nu) = \frac{-1}{d} \ln \left(\frac{1-q}{1-Rq} \right). \quad (3b),$$

где: d - толщина образца, R - коэффициент оптического отражения. Спектры коэффициента оптического поглощения были рассчитаны таким образом для $R = 0,25$, а результаты различных составов слоев представлены на рис.10.

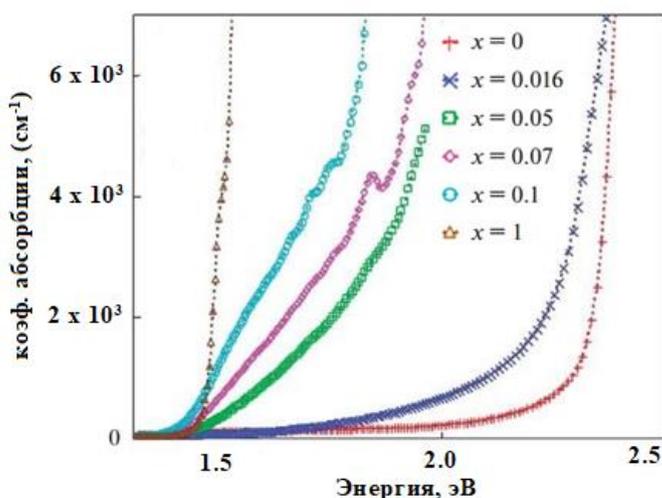


Рис.10. Спектры коэффициента оптического поглощения образцов $CdS_{1-x}Te_x$, рассчитанные по формуле (1b), $R = 0,25$

Затем были измерены спектры оптического пропускания образцов. Спектры пропускания были измерены на спектрофотометре Jasco V-670 UV-VIS-NIR, оборудованном держателем пленки FLH-740. Экспериментальные спектры пропускания образцов представлены на рис. 11a. Спектры коэффициента оптического поглощения образцов, рассчитанные из спектров пропускания по формуле (4b) и $R = 0,25$, представлены на рис. 11b:

для $R=0$ $\beta(h\nu) = \frac{-\ln(T)}{d}$, (4a)

для $R \neq 0$ $\beta(h\nu) = \frac{-1}{d} \ln \left(\frac{(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4R^2T^2}}{2R^2T} \right)$. (4b)

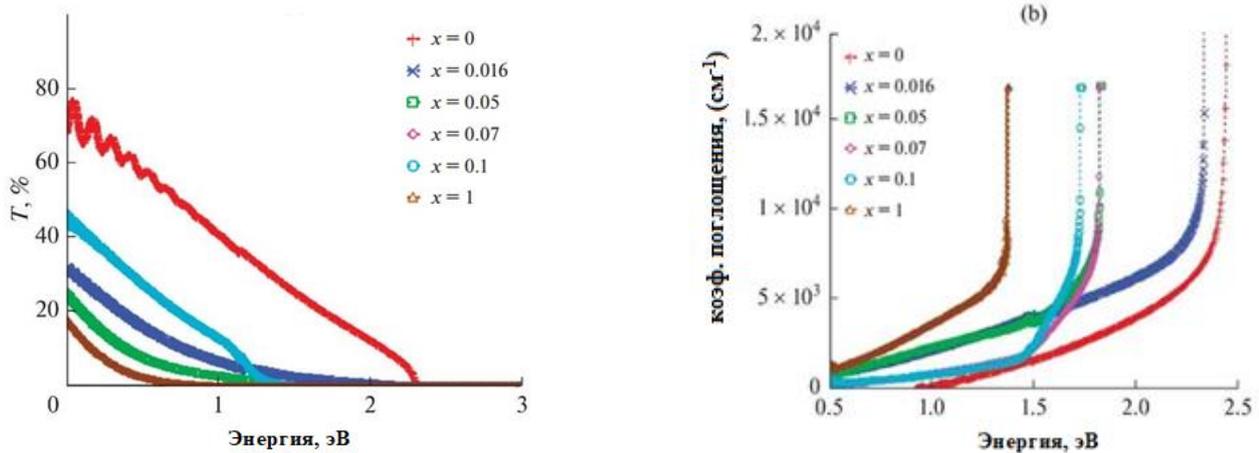


Рис. 11. а) Спектры оптического пропускания, б) Спектры коэффициента оптического поглощения образцов $CdS_{1-x}Te_x$

Значения энергетических зон E_g образцов, определенные методом Тауца из спектров коэффициента оптического поглощения, представленных на рис. 11b, собраны в столбце 2 таблицы 2 и представлены на рис. 12.

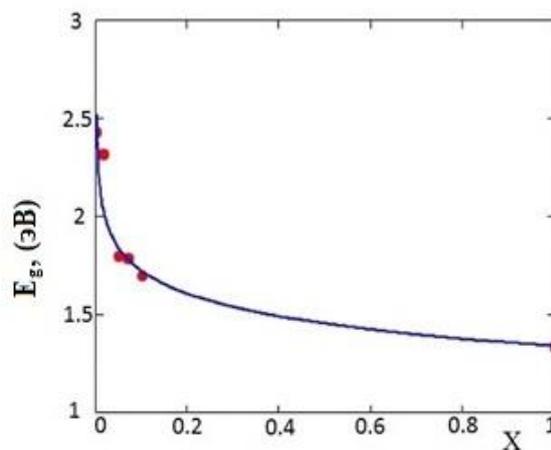


Рис.12. Значения энергетических зон E_g . различных составов образцов $CdS_{1-x}Te_x$

Таблица 2.

Значения ширины запрещенной зоны исследуемых образцов

No	x (соотношения)	E_g , [эВ]
1	0	2,44
2	0,016	2,32
3	0,05	1,80
4	0,07	1,79
5	0,1	1,70
6	1	1,34

Значения диффузионных длин носителей заряда образцов $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ были найдены с помощью фотоэлектрической установки, а полученные экспериментальные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3.
Экспериментальные значения диффузионных длин носителей заряда для образцов $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$

X	L_d (Аппроксимация спектров ФотоЭДСа)
0	0,164мкм (из литературы)
0,016	5 мкм
0,05	17 мкм
0,07	7,7 мкм
0,1	15 мкм
1	5мкм, 0,1÷3,3мкм (из литературы)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа литературных данных по Sb_2Se_3 и $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$, показана возможность создания эффективных тонкопленочных СЭ на их основе, а также необходимость поиска новых физико-технологических путей их получения и повышения эффективности.

2. Установлена корреляция между технологическими параметрами процесса осаждения пленок Sb_2Se_3 , $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ с их кристаллофизическими, морфологическими, оптическими, электрофизическими свойствами. Выявлены оптимальные диапазоны температур конденсации, которые соответствуют $400 \div 450^\circ\text{C}$ для пленок Sb_2Se_3 и $450^\circ\text{C} \div 600^\circ\text{C}$ для $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$.

3. Обнаружено, что пленки $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ образуют ряд непрерывных твердых растворов во всем диапазоне интервала $0 \leq x \leq 1,0$.

4. Показано, что пленки Sb_2Se_3 имеют поликристаллическую орторомбическую структуру, а пленки $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ поликристаллическую кубическую структуру в интервале составов $0,6 \leq x \leq 1,0$ и гексагональную в интервале составов $0 \leq x \leq 0,6$. Размеры зерен в зависимости от температуры подложки колеблются в пределах $2 \div 5$ микрон.

5. Установлено, что оптическая ширина запрещенных зон пленок $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ изменяется нелинейно в интервале $1,46 \div 2,4$ эВ в зависимости от их состава, а пленок Sb_2Se_3 в интервале $1,1 \div 1,2$ эВ.

6. Показано, что пленки Sb_2Se_3 имеют электропроводность p-типа и удельное сопротивление в пределах $10^{-4} \div 10^{-8}$ (Ом·см)⁻¹ в зависимости от температуры конденсации, что объясняется с различием концентраций компонентов Se и Sb.

7. Обнаружена инверсия типа проводимости пленок $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ в зависимости от состава пленок. Установлено, что образцы имеют n-тип проводимости при $0 \leq x \leq 0,6$ и p-тип при $0,6 \leq x \leq 1,0$. По мере увеличения количества CdS электропроводность уменьшалась с $10^{-6} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ до $10^{-10} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$.

8. Установлено, что размеры и плотности кристаллических зерен пленок Sb_2Se_3 зависят от температуры подложки. В частности, пленки Sb_2Se_3 , полученные при температуре подложки 450°C , образуют плотноупакованную структуру с размерами зерен $5\div 6$ мкм. При повышении температуры до 550°C размеры зерен увеличиваются до $8\div 9$ мкм, но при этом содержание селена становится на 20 % ниже, чем при низких температурах подложки.

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

PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE

SHUKUROV AKBARJON XIDOYEVICH

**STRUCTURAL, MORPHOLOGICAL, OPTICAL AND ELECTRICAL
PROPERTIES OF Sb_2Se_3 AND $CdS_{1-x}Te_x$ FILMS**

01.04.10-Physics of semiconductors

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

Tashkent-2023

INTRODUCTION (ABSTRACT OF PhD DISSERTATION)

The purpose of the research identification of physical and technological features of obtaining thin films of the Sb_2Se_3 compound and $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ solid solutions on glass substrates by chemical molecular beam deposition, studying the patterns of changes in the microstructure, electrical and optical properties depending on the parameters of the technological regime.

The objects of the research are thin films of the Sb_2Se_3 compound and $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ solid solutions of various compositions ($0 \leq x \leq 1$) obtained on glass substrates by the chemical molecular beam deposition (CMBD) method, as well as structures created on their basis.

The scientific novelty of the research consists of the following results:

for the first time, thin films of the Sb_2Se_3 compound and the $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ solid solution in a wide composition range ($0 \leq x \leq 1$) have been obtained by chemical molecular beam deposition under conditions of a quasi-closed volume in a hydrogen flow, which have electrophysical parameters suitable for creating cheap and efficient solar cells;

at a hydrogen flow rate of $\leq 10 \text{ cm}^3/\text{min}$, the amount of (Se) in the Sb_2Se_3 layers is higher than 60%, the presence of Se and Sb_2Se_3 phases in the X-ray diffraction pattern, the stoichiometric composition of the layer at an energy consumption of 15–20 cm^3/min is determined by the method of dispersive X-ray spectroscopy;

it has been established by X-ray diffraction analysis that Sb_2Se_3 films deposited at substrate temperatures $T > 450^\circ\text{C}$ become enriched in Sb and grow preferably in the crystalline direction (120), while at substrate temperatures $T < 450^\circ\text{C}$ they are enriched in Se and grow perpendicular to the substrate surface towards (211);

it is shown that the band gap width of the $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ solid solution varies a nonlinear dependence in the range from 2,4 to 1,4 eV with a change in composition within ($0 \leq x \leq 1$);

it was found that polycrystalline thin layers of Sb_2Se_3 can be obtained by adjusting the ratio of the intensities of beams of Sb/Se molecules in the vapor phase and the flux of elements grown on the substrate, and their resistivity can be changed in a wide range of $10^4 \div 10^8 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$.

Implementation of research results. Based on the study of morphological, structural, optical and electrical properties in Sb_2Se_3 films of various compositions:

the results obtained on optimizing the parameters of antimony selenide films were applied in studies to improve the electrical and optical properties of antimony selenide films and solar cells based on them in foreign journals (Solar Energy Materials and Solar Cells. Impact Factor: 7.267. Vol.200, 15 September 2019, 109945; Solar Energy, Impact Factor: 5.95. Volume 187, 15 July 2019, Pages 404-410; Solar Energy, Volume 188, Impact Factor: 5.95, August 2019, Pages 586-592). The use of scientific results made it possible to improve the morphology and structure of antimony selenide films, control their crystal orientation, and improve the conversion efficiency of solar cells based on them, which received an efficiency $\sim 4,5 \%$.

The results of the research conducted in the dissertation work were used at the

Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan in the implementation of project № MRB-AN-2019-17 "Research of broadband composite reversible couplings for solar cells" (2019 -2020). During the implementation of this project, the structures of CdS / CdTe-Ag solar cells, created in the dissertation work, were used as samples of the structures of thin-film solar cells (Reference №2/1255-1271 dated 01.06.2022 of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan). Using scientific results, based on the CdS/CdTe-Ag heterostructure, solar cells with the heterostructure: glass/MgF₂:CaF₂/ZnO(Al)/CdS/CdTe-Ag were created by applying an anti-reflection layer MgF₂:CaF₂/ZnO(Al), which allows increase efficiency by 1.6% by reducing reflection and increasing short circuit current.

Approbation of results of a research. The main results of the dissertation were discussed at 3 international and 3 republican conferences.

Publishing results. The main results on the topic of the dissertation were published in 11 scientific works; 5 of them were published in scientific journals recommended by the High Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of dissertation works, including 4 articles in foreign international journals.

The structure and scope of the dissertation. The work consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. It is presented on 123 pages, including 36 figures, 8 tables and a bibliography of 131 titles.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. T.M. Razykov, A. Patryn, M. Maliński, L. Bychto, B. Ergashev, K. Kouchkarov, A. Shukurov, M. Makhmudov and D. Isakov, Optical Properties of $CdS_{1-x}Te_x$ Thin Films Obtained by CMBD Method. // Applied Solar Energy Volume 57, Issue 3, 2021, pp. 181-187 (№3, Scopus, IF:1,2)
2. A. Mavlonov, A. Shukurov, F. Raziq, H. Wei, K. Kuchkarov, B. Ergashev, T. Razykov, L. Qiao. Structural and morphological properties of PLD Sb_2Se_3 thin films for use in solar cells. // Solar Energy 208 (2020), pp. 451-456. (№ 1. Web of science, IF:5,74)
3. T. M. Razykov, A. Kh. Shukurov, K. M. Kuchkarov, B. A. Ergashev, R. R. Khurramov, J. G. Bekmirzoyev & A. A. Mavlonov Morphological and Structural Characteristics of Sb_2Se_3 Thin Films Fabricated by Chemical Molecular Beam Deposition. // Applied Solar Energy. Volume 55, pp. 376–379 (2019). (№3, Scopus, IF:1,2)
4. T. Razykov, A. Shukurov, O. Atabayev, K. Kuchkarov, B. Ergashev, A. Mavlonov. Growth and characterization of Sb_2Se_3 thin films for solar cells. Solar Energy. 2018; 173, pp. 225-8. (№ 1, Web of science, IF:5,74)
5. Т.М. Разыков, К.М.Кучкаров, С. Болтаев, Б.Р.Кутлимуротов, А.А. Мавлонов. Характеристика тонких пленок Sb_2Se_3 , изготовленных методом химического парового осаждения. // Гелиотехника, 2017, №3 стр. 7-10. (01.00.00; №1).

II бўлим (II часть; part II)

6. T.M. Razykov, A.X. Shukurov, O.K. Atabayev, K.M. Kuchkarov, A.A. Mavlonov. Gas-transport deposition: optimization of growth technique for Sb_2Se_3 thin film deposition. // Труды международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Секция II. Физика полупроводников и твёрдого тела, их прикладные аспекты». 13–14 июня 2017 г., Ташкент, стр. 14-16.
7. Т.М. Разыков, А.Х. Шукуров, Р.Р Хуррамов. Получение пленок Sb_2Se_3 и изучение их структурных свойств. // «Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы», 28 май 2020 й., Ташкент. Стр. 147-152.
8. Т.М. Разыков, А.Х. Шукуров, Р.Р Хуррамов. Тонкие пленки Sb_2Se_3 , полученные на подложках щелочного стекла методом химического молекулярно-пучкового осаждения. // Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» 22-23 сентября 2020г, стр. 103-108.
9. А.Х. Шукуров, Т.М. Разыков. Морфологических и структурных характеристик тонких пленок Sb_2Se_3 синтезированных методом химического молекулярного пучкового осаждения. // “Яримўтказгичли

микроэлектроника, нанотехнологиялар ва ноанъанавий энергия манбалари физикасининг долзарб муаммолари” 2021-йил, 7-8-октябрь, Андижон шаҳри. стр. 54-58

10. Т.М. Razykov, Q.M. Qo‘chqarov, B.A. Ergashev, A.X. Shukurov, A. Olimov, M. Mahmudov, D.Z. Isaqov, M. Pirimmatov. Se bilan boyitilgan Sb_2Se_3 yuqqa qatlamlarining strukturaviy va elektrofizik xossalari. // “Яримўтказгичли микроэлектроника, нанотехнологиялар ва ноанъанавий энергия манбалари физикасининг долзарб муаммолари” 2021-йил, 7-8-октябрь, Андижон шаҳри. стр. 43-44
11. А.Х. Шукуров. Электрические свойства пленок твердого раствора $CdS_{1-x}Te_x$ различного состава. // “Яримўтказгичлар ва полимерлар физикасининг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани Тошкент, 2022 йил, 1-февраль. стр. 114-116

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” jurnali taxririya-tida taxrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi (20.06.2023).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturasida.

Shartli bosma tabog‘i: 3,25. Adadi 60. Buyurtma № 45.

Guvohnoma reestr № 10-4434

Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti
bosmaxonasida chop etilgan.

Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy.

