

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті  
Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты  
«Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасы

Өтеген Руслан Асылбекұлы

«Халькогенидті жұқа қабықшалардың оптикалық сипаттамаларын  
зерттеу»

## ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6В07109 – Инженерлік физика және материалтану білім беру  
бағдарламасы

Алматы 2024


ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті  
Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты  
«Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасы

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»  
Горно-металлургический институт  
им. С.А. Байқоңырова

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

«МНЖИФ» кафедра  
менгерушісі, PhD

  
К.К.Кудайбергенов

« 03 » \_\_\_\_\_ 2024ж.


ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы: «Халькогенидті жұқа қабықшалардың оптикалық сипаттамаларын  
зерттеу»

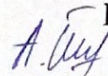
6B07109 – «Инженерлік физика және материалтану» білім беру  
бағдарламасы

Орындаған

Өтеген Р.А.

  
Пікір берген  
PhD, қауым профессор  
Ө.А. Байқоңыров атындағы ҚазҰУ  
М.С. Меткаримов Е. С.  
\_\_\_\_\_ 2024ж.

Ғылыми жетекші

PhD, аға оқытушы  
  
Шонғалова А.Қ.

« 03 » \_\_\_\_\_ 2024ж.

Алматы 2024



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті  
Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты  
«Материалтану, нанотехнология, және инженерлік физика» кафедрасы

**БЕКІТЕМІН**

«МНЖИФ» кафедра  
меңгерушісі, PhD

Кудайбергенов К.К.

« 13 » мамыр 2024ж.

**Дипломдық жұмысты орындауға**

**ТАПСЫРМА**

Білім алушы: Өтеген Руслан Асылбекұлы

Тақырыбы: «Халькогенидті жұқа қабықшалардың оптикалық сипаттамаларын зерттеу»

Университет ректорының "04" желтоқсан 2023 жылғы №548-П/Ө бұйрығымен бекітілген.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі " 13 " мамыр 2024 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы деректері:

1. Сурьма селенидінің құрылымдық сипаттамасы.
2. Сурьма селенидінің синтез жүргізу

Дипломдық жұмыста қарастырылған мәселелер тізімі:

- a) Сурьма селениді туралы жалпы шолу және жұмыс істеу принципі;
- б) тәжірибелік жұмыс жүргізу

Графикалық материалдар тізімі (міндетті сызбаларды дәл көрсете отырып):

жұмыс презентациясы слайдтарда      көрсетілген

Ұсынылған негізгі әдебиет 58 атаудан тұрады:

1. M. Frumar, J. Jedelsky, B. Frumarov, T. Wagner and M. Hrdlicka, Optically and thermally induced changes of structure, linear and nonlinear optical properties of chalcogenides thin films, *J. Non-Cryst. Solids*, 2003, **326–327**, 399–404.
2. Pelabon H. Thermal Analysis of the Systems Antimony-Tellurium and Selenium-Antimony // *Compt. Rend.* – 1906. – Vol.142. – P.

Дипломдық жұмысты дайындау  
КЕСТЕСІ

| Бөлім атаулары, қарастырылатын мәселелер тізімі | Ғылыми жетекшіге, кеңесшілерге көрсету мерзімдері | Ескерту |
|---|---|---------|
| Әдеби шолу                                      | 23.02.2024-28.03.2024                             |         |
| Тәжірибелік бөлім                               | 07.04.2024-25.04.2024                             |         |
| Дипломдық жұмысты алдын-ала қорғау              | 29.04.2024  |         |

Аяқталған дипломдық жұмыс үшін, оған қатысты бөлімдердің жұмыстарын көрсетумен, кеңесшілер мен норма бақылаушының қойған қолдары

| Бөлімдер атауы       | Кеңесшілер (аты-жөні, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы) | Қол қойылған күні | Қолы                |
|----------------------|---|-------------------|---------------------|
| Әдеби шолу           | Шонғалова А.Қ.<br>PhD, аға оқытушы                  | 10.05.2024        | <i>A. Шонғалова</i> |
| Тәжірибелік жұмыстар | Шонғалова А.Қ. PhD,<br>аға оқытушы                  | 10.05.2024        | <i>A. Шонғалова</i> |
| Норма бақылаушы      | Етиш Т.Е., т.ғ.м.,<br>ассистент                     | 13.05.2024        | <i>Т. Етиш</i>      |

Ғылыми жетекшісі:

*A. Шонғалова* Шонғалова А. Қ

Тапсырманы орындауға білім алушы:

*Өтеген Р. А.* Өтеген Р. А.

Күні

« 13 » мамыр 2024 ж.

## АНДАТПА

Бұл жұмыста  $Sb_2Se_3$  тұндыру бойынша зерттеуді ұсынамыз, яғни  $Sb_2Se_3$  электрохимиялық тұндыру тұрақты потенциалда үш электродты ұяшықта жүргізілді. Электрохимиялық тұндырудан кейін үлгілер 270-ден 350 С-қа дейінгі температурада аргонда күйдірілді. Алынған жұқа қабықшалар рентген сәулелерінің дифракциясы, Раман спектроскопиясы және оптикалық беріліс арқылы сипатталды. Тұндыру әдістерінің екеуі де бар болса да, сурьма оксидінің әртүрлі деңгейлері селенид фазасының сәтті түзілуін көрсетеді. Артықшылықты өсу әлеуеті табылды, ол өсу әдісіне және жасыту температурасына байланысты деп есептеледі.

## АННОТАЦИЯ

В данной работе мы представляем исследование осаждения  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ , а именно электрохимическое осаждение  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  проводили в трехэлектродной ячейке при постоянном потенциале. После электрохимического осаждения образцы отжигались в аргоне при температуре от 270 до 350 С. Характеризацию полученных тонких пленок проводили с помощью дифракции рентгеновских лучей, рамановской спектроскопии и оптического пропускания. Хотя существуют оба метода осаждения, различные уровни оксида сурьмы показывают успешное образование селенидной фазы. Обнаружен преимущественный потенциал роста, который, как предполагается, зависит от метода выращивания и температуры отжига.

## ANNOTATION

In this work, we present a study on the deposition of  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ , namely, the electrochemical deposition of  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  was carried out in a three-electrode cell at a constant potential. After electrochemical deposition, the samples were annealed in argon at temperatures from 270 to 350 C. The resulting thin films were characterized using X-ray diffraction, Raman spectroscopy and optical transmission. Although both deposition methods exist, varying levels of antimony oxide show successful formation of the selenide phase. A preferential growth potential was found, which is believed to depend on the growth method and annealing temperature.



## МАЗМҰНЫ

|   |    |
|---|----|
| КІРІСПЕ   | 9  |
| 1. ӘДЕБИ ШОЛУ   | 10 |
| 1.1 Халькогенидті материалдардың қолданылуы                       | 10 |
| 1.2 Сүрме селениді және оның оптоэлектрондық қасиеттері           | 15 |
| 1.3 Сурьма селенидінің құрылымдық сипаттамасы (кристалдық құрылым | 16 |
| 1.4 Селенидтің оптикалық және электрлік қасиеттері                | 18 |
| 1.5 Синтездеу әдістері  | 21 |
| 1.6 Гидротермиялық синтез.  | 23 |
| 1.7 Электрохимиялық тұндыру                                       | 25 |
| 1.8 Селенид сурменің артықшылықтары мен кемшіліктері              | 26 |
| 2. ТӘЖІРИБЕЛІК БӨЛІМ  | 27 |
| 2.1 Материалдар мен реактивтер                                    | 27 |
| 2.2 Құралдар мен жабдықтар. Ерітіндіні дайындау.                  | 28 |
| 2.3 Кристаллдық құрылымы мен оптикалық қасиеттерін сипаттау       | 32 |
| 2.4 Рентгендік құрылымдық зерттеу нәтижелері                      | 33 |
| 2.5 Раманның шашырау нәтижелері                                   | 33 |
| 2.6 Оптикалық спектрлерден жұтылу енін анықтау                    | 34 |
| ҚОРЫТЫНДЫ   | 36 |
| ҚЫСҚАРТЫЛҒАН СӨЗДЕР   | 37 |



## КІРІСПЕ

Жаңартылатын энергия көздері экологиялық тұрақтылық үшін өте маңызды, бұл орайда фотоэлектрлік құрылғылар (ФҚ) басты орынды алады. ФҚ-да негізгі материал болып табылатын кремний бірқатар шектеулерге ие, сол себепті бұл жұқа пленка сияқты балама технологияларды зерттеуді талап етеді. CIGS және CdTe негізіндегі ФҚ мысалға келтірілген жұқа пленка технологиясы артықшылықтарды ұсынады, бірақ материалдың тапшылығына байланысты қиындықтарға тап болды. Бұл элементтерге балама ретінде, керемет электрохимиялық және оптоэлектрондық қасиеттері бар перспективті жартылай өткізгіш ретінде сүрме селениді ( $Sb_2Se_3$ ) қоладнысқа ие болды.  $Sb_2Se_3$  литий-ионды батареялардан бастап күн батареяларына дейін, теориялық күн батареясының тиімділігі 30%-дан асатын әлеуетті қолданбаларға ие. Сонымен қатар, оның өндірістік құны құрамдас элементтердің кең таралуына байланысты перспективті болып табылады.

Дипломдық жұмыстың мақсаты - селенид сүрмесін синтездеу, құрылымдық және оптикалық қасиеттерін зерттеу.

# 1. ӘДЕБИ ШОЛУ

## 1.1 Халькогенидті материалдардың қолданылуы

Соңғы онжылдықтарда аморфты халькогенидтің жұқа қабықшалары технологиялық құрылғыларда практикалық қолданылуына байланысты бүкіл әлем бойынша зерттеушілердің қызығушылығын тудырды. Халькогенидті материалдар анықтамасы бойынша басқа электропозитивті элементтер (As, Bi және Ge) қосылған S, Se және Te сияқты бір немесе одан да көп халькогенді элементтері бар материалдар санаты болып табылады. Халькогендермен (S, Se және Te) біріктірілген бұл жұқа пленкалар әдетте ерекше шыны түзу қабілетіне, жоғары сыну көрсеткішіне (2-3,2), стандартты ( $300-350 \text{ см}^{-1}$ ) төмен фондық энергияға, жоғары жарық сезімталдығына және инфрақызыл аймақтың тамаша өткізгіштігіне ие. [1-2] Олар сондай-ақ стандартты көзілдіріктің сипаттамаларынан екі-үш есе үлкен сызықтық емес қасиеттерді көрсетеді, бұл оларды сызықтық емес оптика саласында перспективалы үміткер етеді. Бұл сипаттамалар оларды инфрақызыл детекторлар, инфрақызыл линзалар, жазықтық оптика, интегралды схемалар фотоника, лазерлер және басқа да сызықтық емес оптикалық құрылғылар сияқты әртүрлі азаматтық, Медициналық және әскери бұйымдарды өндіруге өте ыңғайлы етеді, олар кремний және фторидті көзілдіріктерге қарағанда ИҚ сәулеленуді толқын ұзындығында өткізу қабілетін қажет етеді. Бұл жұқа пленка материалдары байланыс, бейнелеу, қашықтықтан зондтау және лазерлік қуатты тарату арқылы инфрақызыл оптикада жұмыс істей алатын көптеген өнімдерді жақсартты. Қазіргі уақытта іргелі мәселе-көп функциялы құрылғыларға арналған материалдардың өнімділігін жақсарту және бағдарламалау мен қолданбалы мәселелерді шешуде тиімділікті, өнімділікті арттыру және қуат тұтынуды азайту мақсатына жету. Бұл жартылай өткізгіш материалдардың оптоэлектрлік қасиеттерін бақыланатын өзгертудің кеңінен қолданылатын әдісі-допинг. Қазіргі уақытта іздеудің жетекші бағыты-қажетті резонанстық қасиеттерге қол жеткізу үшін осы халькогенидтік жүйелердің құрамын бейімдеу, реттеу және бақылау. Мысалы, компоненттердің электртерістігінің шамалы айырмашылығы осы материалдардың ковалентті байланысуына әкеледі. Сонымен қатар, бұл гетерополярлы және гомополярлы байланыстары бар әртүрлі композицияларда әйнек түзудің кең аймағының пайда болуына әкеледі. Халькогенидті Материалдар 2 мкм-ден асатын толқын ұзындығында сәулеленуге мүмкіндік береді.

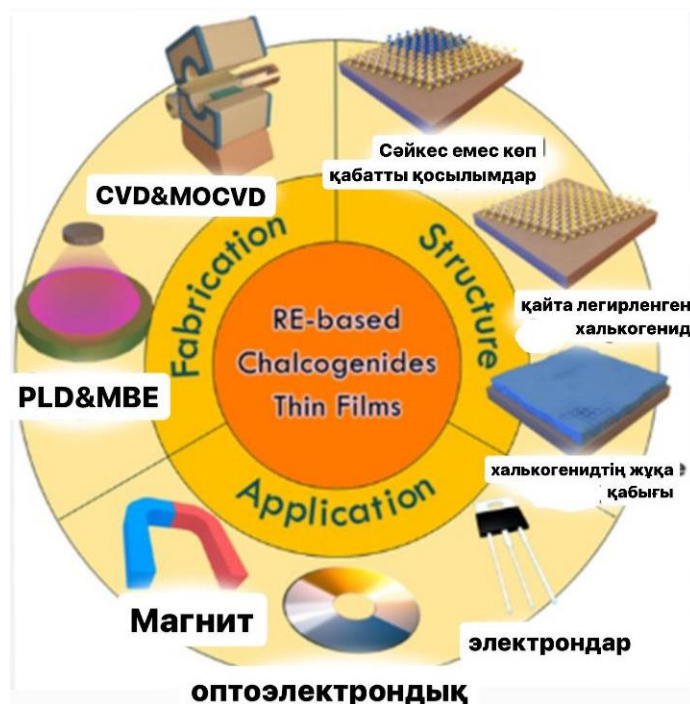
Бұл әйнектер кремний оксиді негізіндегі көзілдіріктерге қарағанда жоғары оптикалық қасиеттерге ие. Легирлеуші заттың тиісті мөлшері олардың композициялық қасиеттерін оңай өзгертеді, олардың тиімділігін, функционалдығын және т.б. арттырады, бұл оларды оптикалық құрылғыларда әртүрлі қолдану үшін перспективалы етеді. Халькогенид негізіндегі жұқа пленкалар фотоника мен аспап жасауда 0,6 мкм-ден 15 мкм-ге дейін кеңінен қолдануға ең танымал үміткерлер болып табылады. Оларды линзалар, терезелер, оптикалық талшықтар және т.б. сияқты пассивті құрылғыларға,

сондай-ақ лазерлік талшықтар, сызықтық емес құрылғылар және т. б. сияқты белсенді құрылғыларға қолданудың кең ауқымы оларды одан да тартымды етеді. халькогенидті шыны құрамындағы қолайлы металдарды легирлеу қажетті құрылымдық және оптикалық өзгерістерге әкеледі, бұл оларды әртүрлі қолданбаларға жарамды етеді. Халькогенидтік жүйе жеткілікті күшті электр өрісімен фото немесе термиялық әсер ету сияқты сыртқы әсерлерге ұшыраған кезде, белгілі бір сәттен кейін ол тұрақтылықты жоғалтады, бұл режимдердің ауысуына әкеледі. халькогенидті көзілдіріктің Бұл қасиеті электр өткізгіштікке, кристалдану қабілетіне, химиялық ретгілікке және т.б. Cu–ны Ge-te жұқа пленка жүйесіне қосу коммутациялық құрылғыларды өндіру үшін пайдалы тиісті ток импульсін беру арқылы жоғары қарсылық күйіне әкеледі. Cu және Ag жақсы өткізгіштік қасиеттерге ие, сондықтан Cu және Ag-ді Ge-Te жұқа пленка жүйесіне енгізу мағынасы бар. Ge–te жүйесі коммутация үшін шекті кернеумен байланысты коммутация өрісінің төмендеуіне әкеледі. Cu–Ge–Te жүйелері үшін де, Ag–Ge–Te жүйелері үшін де өрістің өзгеруімен көрсетілген тиімділік құрамы бар As–Te жүйесі үшін ұқсас тиімділікпен салыстырылады. Cu және Ag–ді Ge–Te жүйесіне қосу As және Se-ге енгізілген Ge-te жүйесіне қарағанда кішірек ауысу өрісін көрсетеді.  $As_{30}Cu_xSe_{70-x}$ -ке Cu енгізу  $x < 15$  құрамы үшін жағды ауыстыру қасиетін көрсетеді;  $x > 15$  кезінде композиция жоғары өткізгіштік күйінен ауысуды көрсетеді (қосулы.) төмен өткізгіштік күйіне (өшірулі.). Gete наносымындағы би допинг коммутация механизмін жақсартты және кристалды және аморфты күйлердің кедергісін арттырды, бұл жұқа пленкаларды деректерді сақтауға және фазаларды ауыстыруға жарамды етеді. Кең аумақта жоғары өткізу қабілеттілігінің арқасында бұл легирленген халькогенидті материалдар перспективалы сенсорлар болып табылады. Химиялық сенсордың ең маңызды сипаттамалары-потенциалды тұрақтылық, сезімталдық, қызмет ету мерзімі, композициялық шектеулер және т.б. Халькогенид негізіндегі Ион селективті сенсор үздіксіз өлшеу кезінде жақсы термиялық тұрақтылық пен сезімталдыққа ие.

Аудандағы өзекті мәселе жоғары тиімді нано және микро өлшемді жартылай өткізгіш оптоэлектрондық құрылғылар - бұл төмендететін жаңа материалдарды іздеу құны мен функционалдығын арттыратын технологиялық шешімдер. Соңғы уақытта байланыс сурьма селениді халькогенидтер мен үштік мыс-сурьма күкірт қосылыстары негізінде. Бұл материалдар әртүрлі салаларда қолданылады құрылымдық, оптикалық және электронды байланысты оптоэлектроника қасиеттері. Фильмдерді синтездеудің әртүрлі әдістерінің болуына қарамастан сурьма селениді және мыс сульфиді, оның ішінде сұйық фазадағы тұндыру, олардың көпшілігінде төмен сапада көрінетін кемшіліктер бар түпнұсқа фильмдер. Жоғары сапалы өнім алу әдістерінің бірі қажетті жартылай өткізгіш қасиеттері бар құрылым болып табылады вакуумдағы термиялық тұндыру. Бұл әдіс булануға негізделген бастапқы химиялық элементтердің ұнтақтары немесе олардың қосылыстары қашан температура  $500-600^{\circ}\text{C}$ . Дегенмен, талаптарды қанағаттандыру үшін ғана емес жұқа пленкалардың сапасы, сонымен қатар олардың өнеркәсіптік бейімделуі

ұсынылады мүмкіндік беретін кең қолжетімді технологияларды қолдану өнеркәсіптік ауқымда өндіру. Ең кең таралғандардың бірі және жұқа қабықшаны синтездеу үшін жиі қолданылатын өнеркәсіптік әдістер материалдар магнетронды шашырату және химиялық тұндыру болып табылады бу фазасы Халькогенидті шыныдағы Си және Cd легирлеуші элементтерінің ерекше құрамы өнеркәсіптік жұмыс орындарында химиялық тазалау үшін пайдалануға болатын қолайлы халькогенид негізіндегі сенсорды алуға мүмкіндік береді. Сурьма селенидіндегі фазалық тепе-теңдікті зерттеудің ізашарларыекі тәуелсіз француз ғалымдары Пелабон және Кретиен (1906). Мәні Chretien зерттеулері  $Sb_2Se_3$ -ті ерітуден тұрды, содан кейін ішінара айдау үшін сутегі ағынында қыздыру. Автор қисықты өлшеді материалды балқыту және оның негізінде төртеудің болуы туралы қорытындыға келді  $SbSe$ ,  $Sb_2Se_5$ ,  $Sb_3Se_4$  және  $Sb_2Se_3$  қосылымдары. Параллельді зерттеулер пелабон жүргізді, ол тепе-теңдік диаграммасын құра алды термиялық және микроскопиялық талдаулар [3-4.]. Расталды  $Sb_2Se_3$  фазасының болуы (49,31 ат.мас.% Se) және анықталмаған диапазон монотектикалық температурасы  $566^\circ C$  болатын сұйықтықтың араласуы. Алайда, басқа зерттеу топтарының кейінгі нәтижелері Chretien және relabon нәтижелерімен сәйкес келді. Жаңа нәтижелер көрсетті бұрын ұсынылған фазалық диаграммалардың қателігі [5-6]. Заманауи  $Sb_2Se_3$  фазалық диаграммасының толық көрінісі алғаш рет есептеліп ұсынылды жұмыс Gosh [7]. Басқа авторлардың алдыңғы есептеулері ішінара болғандықтан [8-9] ол ассоциацияланған [10, ] және сұйық ерітінділердің екі моделін салыстырды [8]. Екі модель де эксперименттік фазалық диаграммаға сәйкес келеді [11]. Өтпелі фазаларды нақтылауға және құрастыруға бағытталған зерттеулер дұрыс диаграмма 90-шы жылдарға дейін жүргізілді. Сурьма селенидінің күй диаграммасын зерттеу табылған жоқ. Туралы әдебиеттерді талдау жүйеде байқалады деген қорытындыға келеді сұйық күйдегі араласпайтын аймақ. Күй диаграммасы көрінісі  $Sb_2Se_3$  салқындату жылдамдығына байланысты, себебі стратификация орын алуы мүмкін тек баяу салқындату кезінде, өйткені екеуінің тығыздығының айырмашылығы сұйықтықтар аз. Жүйеде  $Sb_2Se_3$  қосылымының болуы орнатылған, балқу температурасы  $617^\circ C$  [7].



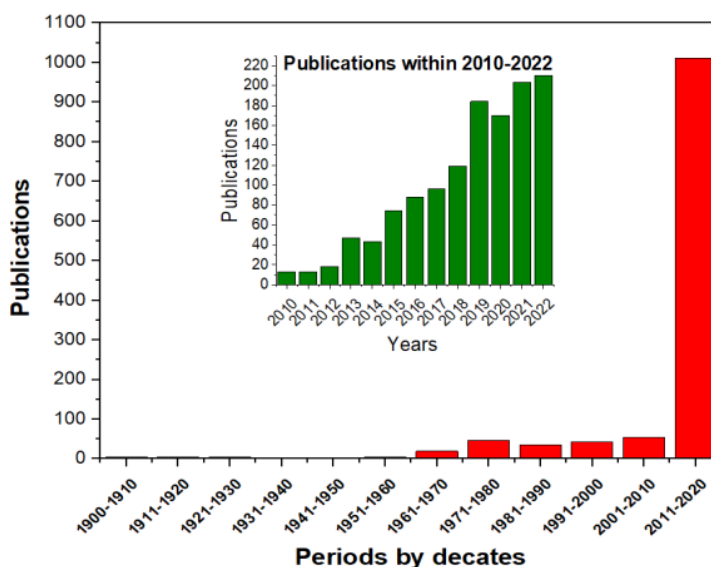


1 сурет – Халькогенидті материалдардың қолданылуы

Сонымен қатар, жартылай өткізгіштік зерттеулер жүргізілді сурьма селенидінің қасиеттері және оны әртүрлі оптоэлектрондарда қолдану аспаптар. Пелабон фазалық диаграмманы талдаумен бірге өлшемдер жасады бірнеше сурьма және селен қорытпаларының меншікті электр кедергісі [12- 13] Ол селен мөлшерінің жоғарылауымен екенін анықтады қарсылық 12 ол жоғарылап, температураның жоғарылауымен кері әсерін байқады. Сонымен қатар, селенид-сурьма қорытпаларының термоэдс өлшемдері жүргізілді. Сурьма селенидінің термопара ретінде қолданылуы туралы айтылады 1947 жылы Telkes шығармасында автор термоэлектриктерге теориялық шолу жасады Si, Sb бар материалдардағы әртүрлі жоғары термоэдс қорытпаларының қасиеттері, Bi, S, Se, Te. Электр кедергісі мен термоэдтерді егжей-тегжейлі зерттеу сурьма селенидінде 1950 жылы енгізілген [14].

Шешілетін ғылыми-техникалық мәселенің қазіргі жағдайын бағалау Мәселелер. Жоғары өнімділік үшін материалдардың жаңа түрлерін іздейді жаңа буын электрондық және оптоэлектрондық құрылғылар ешқашан болмайды тоқтады. Барған сайын электронды және оптоэлектронды құрылғылар, далалық транзисторлар [15] және фотодетекторлар [16] негізіндегі сияқты жұқа пленка материалдары тамаша қасиеттерді көрсетеді кең перспективалы әлеуетті балама болып табылады жартылай өткізгіш кремний қолданылады. Технологияның дамуымен және функциялар санының ұлғаюымен жартылай өткізгіш құрылғыларды орындай алады, қажеттілігі бар олардың көлемін кішірейту, осылайша олар үлкенірек біріктірілуі мүмкін ықшам құрылғылар. Нано және микроөлшемді жартылай өткізгіш материалдар мен құрылғылар неғұрлым ықшам және тиімді жасауға мүмкіндік береді аз орын алатын және энергияны аз тұтынатын құрылғылар. Пайдалану талаптарын қанағаттандыратын бірқатар материалдар бар төмен өлшемді құрылғылар. сипаттады жақындаған кезде

сурьма-селен қорытпаларындағы кедергінің өзгеруі  $Sb_2Se_3$  стехиометриялық құрамына қорытпа (Se 49,3 ат%). Бұл ретте қорытпа құрамындағы селенді 49,0-ден 49,3 ат % дейін ұлғайту арқылы, қарсылық 30 000 есе өсті. Мыспен салыстырғанда температурада  $25^\circ C$  сурьма селениді оң термоэдтерді көрсетті және автор ұсынды,  $Sb_2Se_3$  өткізгіштіктің р түріне ие. Эксперименттік негізінде Уилсон теориясын қолдана отырып, жартылай өткізгіштер үшін жолақ ені 0,8 эВ есептелген. кристалды зерттеу сурьма селенидінің құрылымын Donges жүргізді [17]. Зерттелді Сурьма селенидінің сурьма сульфидіне изоморфизмі ( $Sb_2S_3$ ) және құрылымдық сипатталған  $Sb_2Se_3$  параметрлері. Бұл деректер кейінірек басқа жұмыстарда расталды [18-19]. Қазіргі уақытта стандартты мәндер ретінде қабылданады  $Sb_2Se_3$  кристалдық торының келесі параметрлері:  $a = 1,1633$  нм,  $b = 1,1700$  нм және  $c = 0,3985$  нм [20].  $Sb_2Se_3$  тің тартымды ерекшеліктерінің бірі оның бір өлшемді (1D) кристалдық құрылымы және анизотропты қасиеттері.  $Sb_2Se_3$  Кристалы Ван-дер-Ваальс күштерімен байланысқан n таспалы байланыстардан ( $Sb_4Se_6$ ) тұрады (010) және (100) бағытында, ал күшті SB – se коваленттік байланыстары сілтемелерді [001] [21-22] бағытында бірге ұстауға мәжбүр етіңіз. Нәтижесінде бұл байланыстардың бағытталу сипаты айтарлықтай анизотропияға әкеледі. Теориялық есептеу (001) бағытына параллель жазықтықтар екенін көрсетті, жазықтықтардың түзілу энергиясы төмен басқалары үзілген байланыстардан бос жазықтықтармен аяқталады. Сонымен қатар, теориялық есептеулер мен эксперименттік нәтижелер көрсетті, тасымалдаушылардың (001) бағытындағы қозғалысы басқаларға қарағанда әлдеқайда жеңіл бағыттар бойынша. Осылайша, құрылғылар қамтамасыз етеді деп күтілуде жоғары Фото-жауап және жақсартылған өнімділік, егер Жарық сіңіргіш- $Sb_2Se_3$  ленталардан тұрады ( $Sb_4Se_6$ )<sub>n</sub>, төселген субстратқа тігінен. Бар фильмі бар бірінші ФЭП субстратқа аз көлбеу кристалды құрылым, тиімділікке 6,5 % жетті.



2 сурет – Сурьма селенидінің зерттеу бойынша жарияланымдардың өсуі

Осы сәттен бастап синтез туралы жарияланымдардың тұрақты өсуі байқалады  $Sb_2Se_3$  және оның қасиеттерін зерттеу. Потенциалды анықтау үшін  $Sb_2Se_3$  берілген онжылдықтар бойынша басылымдардың өсу кестесі (сурет №2). Өткен жылы болды бұл материал туралы 200-ден астам мақала жарияланды, бұл үш есе көп 13 олардың саны 2015 жылы. Негізгі қызығушылық соңғы жылдары сурьма селенидін қолдануға бағытталған фәп-тегі Жарық сіңіретін қабат. Бұл материал қатарға сәйкес келеді оптикалық сіңіру коэффициенті жоғары негізгі талаптар 105-тен астам см<sup>-1</sup> және тыйым салынған аймақтың ені 1,04-1,3 эВ. Бағыттан басқа фотовольтаика кристалдық құрылымының ерекшеліктеріне байланысты сурьма селениді ол икемді фотодетекторларда [21-22] және икемді фотовольтаика үшін қолданылады. 2023 жылы сурьма селенидін қосылыстарға қызығушылықтың артуы байқалады 220-дан астам мақала жарияланды. Тұтастай алғанда, шешіліп жатқан ғылыми-техникалық мәселенің қазіргі жағдайы жұқа қабықшалы жартылай өткізгіш материалдардың мәселелері жалғасудаизерттеушілер мен өнеркәсіп арасында үлкен қызығушылық тудырды. Нәтижелер зерттеулер мен әзірлемелер бұл материалдарды жаңада пайдалануға мүмкіндік береді қолданбалар және олардың өнеркәсіптік қолданылуын ынталандыру. Дегенмен, үшін технологиялық мәселелерді шешу бойынша жұмысты жалғастыру қажет өнеркәсіптік өндірісті кеңейту және өндіріс шығындарын азайту және зерттеу әдістерін оңтайландыру. Сондай-ақ оларды неғұрлым мұқият зерттеу оптикалық және электрондық қасиеттері

## 1.2 Сурьма селениді және оның оптоэлектрондық қасиеттері

Сурьма селениді ( $Sb_2Se_3$ ) өзінің тартымды оптоэлектрондық қасиеттеріне байланысты жұқа қабықшалы күн батареялары үшін перспективалы материал болып табылады. қажетті жолақ аралығымен сипаттар. өнімдері фотоэлектрлік және оптоэлектрондық қолданбалар [23–24]. Бұл қосылыстар әдетте жақсы химиялық тұрақтылықты, жоғары сіңіру коэффициенттерін және 1,1-ден бастап диапазондық аралық энергияларды көрсетеді. 1,6 эВ, бұл фотоэлектрлік термоэлектрлік қолданбаларға, сызықты емес оптикаға және оптоэлектронды құрылғыларға жарамды. [25]. Осы қосылыстардың ішінде сурьма селениді  $Sb_2Se_3$  жақсы электрлік және арқасында маңызды байланыс болып табылады оптикалық қасиеттер. Сурьма селениді - тар жолақ аралығы ~ 1,1 эВ, қолжетімді құны және жоғары сіңіру коэффициенті ~ 10<sup>5</sup> см<sup>-1</sup> болатын р-типті жартылай өткізгіш [26]. Сонымен қатар,  $Sb_2Se_3$  соңғы жылдары уәде берді. күн батареялары үшін сіңіргіш қабат және жақсы фотоэлектрлік өнімділікті көрсетеді қасиеттері [27-28]. Алдыңғы зерттеулер тиімділігін көрсетеді  $Sb_2Se_3$  негізіндегі жұқа қабықшалы күн батареяларын қолдану арқылы жетілдірілді эксперименттік және теориялық зерттеулер [29-30]. Алдыңғы зерттеулер тиімділігін көрсетеді  $Sb_2Se_3$  негізіндегі жұқа қабықшалы күн батареяларын қолдану арқылы жетілдірілді эксперименттік және теориялық зерттеулер [16–20]. Дайындалған күн батареясы Mo/ $Sb_2Se_3$ /CdS/ZnO/Al: ZnO/Al. тиімділігі

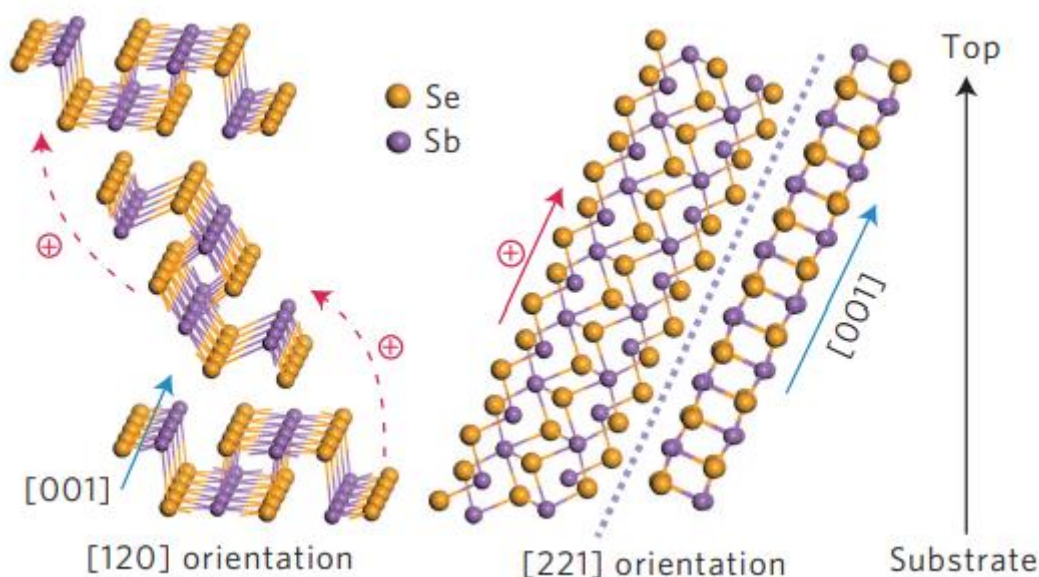
шамамен 3,47% және теориялық зерттеулерден [20] үшін шамамен 24,7% тиімділік көрсетті Күн батареясы ITO/NiO/Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/PCBM/Ag. Құрылым күн батареясы күн энергиясын тиімді пайдалануда маңызды рөл атқарады сондықтан, Бұл жұмыста біз Al/n-Si/Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/Ag күн батареяларын шығарамыз. ұяшықты алғаш рет термиялық булану әдісін қолданды. Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> жұқа қабықшаларын синтездеудің көптеген әдістері бар. термиялық булану [21], шашырату [22], импульстік сияқты лазерлік тұндыру [23], электродепозиция [13] және химиялық ваннаға тұндыру әдісі [24]. Осы синтездердің арасында Термиялық булану әдістері арзан тәжірибелік қондырғыны қолдану арқылы жүзеге асырылады және орындау оңай.

### 1.3 Сурьма селенидінің құрылымдық сипаттамасы (кристалдық құрылымы)

Догнес және т. б. 1950 жылы Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-ке қатысты изоструктуралық екендігі көрсетілді. Догнес Гофман сияқты атомдық параметрлерді ұсынды Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> өз кабинетінде. Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> кеңірек зерттеу тарихына ие болғандықтан, бұл тұжырым салыстырмалы зерттеулер арқылы материалдың физикалық қасиеттерін түсінуге көмектесті. Бірнеше зерттеу топтары Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> кристалдық құрылымының параметрлерін анықтап, өлшеді. 1957 жылы Тидсвелл және т. б. Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> және Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> ұқсас сипаттамалары бар қосылыстар екендігі расталды. Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> кристалдық торының параметрлері ( $a = 11,62 \pm 0,01 \text{ \AA}$ ,  $b = 11,77 \pm 0,01 \text{ \AA}$  және  $c = 3,962 \pm 0,007 \text{ \AA}$ ) олар дұрыс анықтады [8] және чандрасехаран мен соңғы деректермен сәйкес келеді Кунджоманой 2009 жылы бірлескен авторлармен бірге [9]. Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> тұрақты торлары, қалай болды Камруззаман мен авторлардың 2017 жылы көрсеткен,  $a = 11,73 \text{ \AA}$ ,  $b = 3,96 \text{ \AA}$  және  $c = 11,73 \text{ \AA}$ , бастапқы ұяшық көлемі  $544,12 \text{ \AA}^3$  [10]. Sb<sub>2</sub> Орналасқан Жері бір өлшемді құрылымға байланысты заряд тасымалдаушыларды рекомбинациялау үшін. Атомдар [Sb<sub>4</sub>Se<sub>6</sub>] N таспаларында ковалентті байланысқан, бірақ таспалар арасында әлсіз ван-дер-Ваальс өзара әрекеттесуі. Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Құрылымы Sb және Se атомдарын созатын шексіз ұзын тізбектерден тұрады төмен симметриялы c осіне параллель бірлік ұяшық Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> орторомбты құрылымға кристалданады ол рpma (62) кеңістіктік тобына жатады [31]. Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> кристалдық құрылымының параметрлері есептелді және бірнеше зерттеу топтарымен өлшенеді. Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> тұрақты кристалдық тор бар  $a = 11,62 \pm 0,01 \text{ \AA}$ ,  $b = 3,962 \pm 0,007 \text{ \AA}$  және  $c = 11,77 \pm 0,01 \text{ \AA}$ , бастапқы ұяшықтың көлемі  $0,524 \text{ нм}^3$  және тығыздығы  $5810 \text{ кг/м}^3$  болғанда [32]. "Байланысқан" Sb-Se арасындағы қашықтық  $2,576 \text{ \AA}$ -ден  $2,777 \text{ \AA}$ -ге дейін, "байланыссыз" Sb-Se арасындағы қашықтық  $2,98 \text{ \AA}$ -ден басталады. Бұрыштар Se-Sb-se және Sb-Se-Sb сәйкесінше  $86,6^\circ$ - тан  $96,0^\circ$ - қа дейін және  $91,0^\circ$ - тан  $98,9^\circ$ - қа дейін өзгереді. Sb<sub>2</sub>se<sub>3</sub> құрылымы c осі немесе ине осі деп аталатын SeSb-se тізбектерінен (таспалардан) тұрады. Сондықтан Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> бір өлшемді кристалдық құрылымға ие (1D) Sb<sub>4</sub>Se<sub>6</sub> сілтемелерінен жасалған таспалар, онда таспалардың өздері байланысты. таспалар арасындағы байланыстармен салыстырғанда берік, бұл да болып табылады заряд



тасымалдаушылардың анизотропты тасымалдануының негізгі себебі. Бір өлшемді құрылымның арқасында таспаларға параллель түзілетін дәндердің (ГЗ) шекаралары , шын мәнінде, олар заряд тасымалдаушылардың рекомбинациясына ықпал етпейді. Бұл әсіресе GBS-те болуы мүмкін негізгі шығын көзін азайту үшін пайдалы үш өлшемді байланысы бар поликристалды жұқа қабықша күн батареялары (3D). Қалай жоғарыда талқыланды,  $Sb_2Se_3$  кристалдық құрылымы құрылды орау таспалар  $[Sb_4Se_6]_n$ , олар бар квазиөлшемді кейіпкер (33). Таспалардың ішінде  $[Sb_4Se_6]$  n атомдар ковалентті байланысқан, ал ленталар арасында әлсіз ван-дер-Ваальс бар өзара әрекеттесу. Тығыздық функционалдығы теориясынан (DFT) жергілікті тығыздықты жуықтау әдісін қолданатын зерттеулер мұны көрсетті электрондық тығыздық таспалардың ішінде шоғырланған [34]  $Sb_2Se_3$  -тегі астық шекаралары электрлік қауіпсіз [35].  $Sb_2Se_3$  тің тартымды ерекшеліктерінің бірі оның бір өлшемді (1D) кристалдық құрылымы және анизотропты қасиеттері.  $Sb_2Se_3$  Кристалы Ван-дер-Ваальс күштерімен байланысқан n таспалы байланыстардан ( $Sb_4Se_6$ ) тұрады (010) және (100) бағытында, ал күшті Sb – Se коваленттік байланыстары сілтемелерді (001) [21, 22] бағытында бірге ұстауға мәжбүр етіңіз. Нәтижесінде бұл байланыстардың бағытталу сипаты айтарлықтай анизотропияға әкеледі. Теориялық есептеу (001) бағытына параллель жазықтықтар екенін көрсетті, (110), (120) сияқты жазықтықтардың түзілу энергиясы төмен басқалары үзілген байланыстардан бос жазықтықтармен аяқталады [21]. Сонымен қатар, теориялық есептеулер мен эксперименттік нәтижелер көрсетті, тасымалдаушылардың [001] бағытындағы қозғалысы басқаларға қарағанда әлдеқайда жеңіл бағыттар бойынша [21-22]. Осылайша, құрылғылар қамтамасыз етеді деп күтілуде жоғары Фото-жауап және жақсартылған өнімділік, егер Жарық сіңіргіш-  $Sb_2Se_3$  ленталардан тұрады ( $Sb_4Se_6$ )<sub>n</sub>, төселген субстратқа тігінен. Бар қабықша бар бірінші ФЭП субстратқа аз көлбеу кристалды құрылым, тиімділікке 6,5% жетті. Екінші жағынан, сіңіргіштің оңтайлы қалыңдығы-бұл құрылғылар үшін  $Sb_2Se_3$  диффузия ұзындығына байланысты 0,3–0,6 мкм диапазонымен шектелді не бәрі 0,3 мкм-ге тең электрондар [23] [22] бағытында. Осы әсерге байланысты [001] бағыты бойынша электрондардың диффузиясының үлкен ұзындығы 1,7 мкм-ге жақындады (бұл бағыт бойынша бес есе көп [23] [22]). Жұмыста [21] диффузия мәселесі ішінара синтез арқылы шешілді перпендикуляр бағытталған ( $Sb_4Se_6$ )<sub>N</sub> [23].



3 сурет – (120) бағдары және қолайлы бағдары бар  $Sb_2Se_3$  кристалдық құрылымы

#### 1.4 Селенидтің оптикалық және электрлік қасиеттері

Химиялық құрамы мен кристалдық құрылымы қатты әсер етеді  $Sb_2Se_3$  оптикалық қасиеттері. Көптеген есептерге сәйкес ені  $Sb_2Se_3$  поликристалды жұқа пленкалардың тыйым салынған аймағы 1,0-ден 1,3 эВ-ге дейін. [36] 300К кезінде  $Sb_2Se_3$  поликристалл жолағының жанама ені  $1,03 \pm 0,01$  эВ, ал жолақ жолағының тікелей ені  $1,17 \pm 0,02$  эВ. Бұл  $Sb_2Se_3$  диапазонының ені ( $E_g$ ) оңтайлы екенін көрсетеді эксперименттік және теориялық мәліметтерге сәйкес диапазон. Алайда, жолақ енінің мәндеріндегі айтарлықтай айырмашылықтар да атап өтілді жұмыста Мерино және басқалар., 2000 [37]. Фильмдерде тыйым салынған аймақтың енінің мұндай өзгеруі байқалды  $Sb_2Se_3$  жұқа қабықша әртүрлі қолдану арқылы алынғандықтан жауын-шашын әдістері және өсу жағдайлары. Күн батареяларында қолдану үшін материалдың тыйым салынған аймағының ені күн спектріне сәйкес келуі керек. Көптеген энергиясы жеткіліксіз фотондар материал арқылы өтеді, жоқ егер жолақ ені тым үлкен болса, электронды тесік жұптарын қалыптастыру. Жолақ диапазонының оптикалық ені 1,80 эВ және 1,75 эВ құрайды аморфты фаза және кристалды фаза үшін 1,50 эВ. Егер күйдіру температурасы болса ол 450 °C дейін көтеріледі, жолақтың оптикалық ені одан әрі төмендейді 1,40 эВ. Күйдіру температурасының жоғарылауымен тыйым салынған ені аймақтар азаяды.

Электронды тесік жұптарын тиімді алу үшін сіңіргіш қабат жоғары сіңіру коэффициентіне ие ( $>10^4$  см<sup>-1</sup>) идеалға күйдірілген пленка жоғары кристалдылыққа ие және оптикалық сіңіру коэффициенті көрінетін аймақта 10<sup>5</sup> см<sup>-1</sup>-ден асады. Фотоэлектрлік үшін жүйелер бұл мән өте тиімді. Байланысты  $Sb_2Se_3$  күйдірілген жұқа пленкалар үшін Фотон энергиясынан, ол тіркелген

өткізу спектрлерінен түрлендіріледі толқын ұзындығының диапазоны 200-2500 нм, шығынды есепке алмағанда шағылысу және шашырау. Күйдірілген пленка жоғары деңгейге ие болды кристалдылығы, орторомбтық құрылымы және оптикалық сіңіру коэффициенті  $10^5 \text{ см}^{-1}$  ден асады оптикалық ені бар көрінетін аймақта  $1,04 \pm 0,01$  эВ тыйым салынған аймақ [37].

1,2 эВ диапазонының ені және өте жоғары сіңіру туралы хабарлады. Күн батареясындағы әртүрлі қабаттардың сыну көрсеткіші дерлік болуы керек жоғары оптикалық қасиеттерді қамтамасыз ету үшін бірдей. Сыну көрсеткіші төмен қабат болған кезде жоғары сыну көрсеткіші бар екі қабаттың арасында орналасқан, ол өте жоғары күй тығыздығы және жарық пен материалмен жақсы әрекеттеседі [38]. Чао Чен және басқалар эллипсометр сыну көрсеткішін өлшеу нәтижелері туралы хабарлады (J. A. Woollam, RC2). Олар  $N = n + ik$  қатынасын қолданды, мұндағы  $n$ -күрделі сыну көрсеткіші;  $n$ -сыну көрсеткіші, ал  $k$  - әлсіреу коэффициенті.  $A$  -  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  қабықша мен  $c$ -  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  пленкасы үшін  $n$  және  $k$  екеуі де 193-1693 нм диапазонында анықталды.  $B$  толқын ұзындығының диапазоны 500 нм және одан жоғары айқын нәтиже  $n$  өте үлкен,  $a$ - $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  пленкалары үшін де,  $c$ -  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  қабықша үшін де шамамен 4. Барлық толқын ұзындығының диапазонында  $c$   $\text{Sb}_2\text{Se}_3$   $a$ -  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  -ке қарағанда тұрақты үлкен сіңіруді көрсетеді сіңіру коэффициенті  $k$ . Сыну көрсеткіші де, сіңіру коэффициенті де Диэлектрлік өткізгіштік ( $\epsilon$ ) маңызды компонент болып табылады органикалық күн батареяларының энергияны түрлендіру тиімділігі.

$E_{\text{real}}$  және  $e_{\text{ima}}$  диэлектрлік тұрақтылары спектроскопиялық эллипсометрия (SE) арқылы алынған 23,76 және 22,81 болды тиісінше, теориялық зерттеулер мұны көрсетті диэлектрлік тұрақтылар  $e_{\text{real}}$  және  $e_{\text{ima}}$  сәйкесінше 14,97 және 16,83 құрайды [10]. Алынған диэлектрлік өткізгіштік индий-галлий мыс диселенидіне (CIGS) қарағанда үлкен [39].  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  үлкен диэлектрлік өткізгіштігі азырақ дегенді білдіреді экситондардың байланыс энергиясы және электронды тесік жұбының ықтимал уақытша бөлінуі фотондармен сәулелену. Agilent E4980A.  $t$  құралының көмегімен 2 кГц-тен 2 МГц-ке дейінгі жиілік диапазонында диэлектрлік өткізгіштік анықталды. Олар параллель пластиналы конденсатордың конфигурациясы қолданылды. Бұл анықталды диэлектрлік өткізгіштік төменгі жиілікте 29-дан асады ( $\sim 2$  кГц) және радио толқындарының жиілігінде ( $\sim 2$  МГц) 18 деңгейінде Тұрақты болып қалады, бұл оның оптикалық диэлектрлік өткізгіштігіне ұқсас, яғни 14,3. Бұл болжамды  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  қабықшаларды пайда болғаннан кейін экситондар автоматты түрде бос электрондарға ыдырайды және тесіктер. Полимерлі раковинадан айырмашылығы, төмен диэлектрлік өткізгіштік экситондардың күшті байланысуына ықпал етеді, бұл экситондарды тиімді диссоциациялау үшін гетеро-өтпелі құрылымды қажет етеді [40].

$a$ - $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  (аморфты) үшін диэлектрикті анықтау нәтижелері туралы хабарлады толқын ұзындығы 612-1693 нм, 10,7–16,5 және  $c$ -  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  үшін Жазықтыққа перпендикуляр беттер (001), мысалы, беттер деп есептелді, (010), (110), және (120), ең көп таралған беттік энергияның ең төмен болуына, сондай-ақ болмауына байланысты коваленттік байланыстың үзілуі және үзілген

байланыстар. Сонымен қатар,  $Sb_2Se_3$  пленкаларының орташа беттік потенциалы 9,1 мВ екендігі анықталды, бұл айтарлықтай CIGS немесе czts ( $> 100$  мВ) фильмдерінен төмен. Осылайша,  $Sb_2Se_3$ -те ақауларға байланысты рекомбинацияның жоғалуы мүмкін деп болжауға болады егер беттер сәйкесінше бағдарланған болса, минимумға дейін азайтыңыз. Бұл ең танымал үш өлшемді Фото жұтқыштардан ерекшеленеді коваленттік байланыстардың үзілуі ақаулардың пайда болуына әкелетін құрылымдар GBS-тегі мемлекеттер [41]. Үш өлшемді поликристалды жұқа пленкалы күн батареяларында GBS ішіндегі заряд тасымалдаушылардың рекомбинациясы болуы мүмкін пассивация арқылы басылады-мысалы, CIGS жұқа пленкалы күн батареяларында мыс тапшылығы бар GBS-ті Мұқият дамыту арқылы емес күн сәулесіндегі  $CdCl_2$  немесе CD емес галогендермен жоғары температурада өңдеу  $CdTe$  элементтері [42]. Салыстыру үшін,  $Sb_2Se_3$ -те мұндай пассивация болмауы мүмкін алайда, жұқа қабықшаларын бағытын басқару маңызды болып табылады анизотропты арқасында күн батареясының жоғары тиімділігіне қол жеткізу факторлары физикалық қасиеттері [33]. Бұрын талқыланғандай, бір өлшемді таспа тәрізді морфология  $Sb_2Se_3$  әкеледі зарядты тасымалдаудың анизотропты қасиеттері.

Жалпы, Фильмдер  $Sb_2Se_3$  р-типіне жатады [43] Алайда, кейбіреулері  $Sb_2Se_3$  үлгілері Сыртқы Те (Wu) қоспаларын қосқанда n-типті өткізгіштігін көрсетеді ,Bi [44] немесе жоғары SB мазмұны ( $>60\%$ ) [45]. енгізіледі. Сонымен қатар, селеннің бос орны n-типті ақау болуы мүмкін немесе донор. Бастап күн батареялары  $Sb_2Se_3$  сіңіргішінің р-типті өткізгіштігін пайдаланады, бұл жұмыста талқылаулар р-түріне бағытталған  $Sb_2Se_3$ , егер басқаша көрсетілмесе. Жарық сезімталдығын зерттеген қараңғы және жарықтандырылған өткізгіштік мәндері бар жұқа  $Sb_2Se_3$  пленкалары  $2 \times 10^{-8}$  және  $1 \times 10^{-6}$  (ом/см)<sup>-1</sup> болды тиісінше . Жоғары туралы хабарлады  $22 \text{ см}^2$ -ге тең тесіктердің қозғалғыштығы  $V^{-1} \text{ с}^{-1}$   $Sb_2Se_3$  қабыршақ , бұл CZTS жұқа қабықшаларын да жоғары ( $10 \text{ см}^2 V^{-1} \text{ с}^{-1}$ ) немесе PbSe( $<1 \text{ см}^2 V^{-1} \text{ с}^{-1}$ ) . Дегенмен, кристалды дәндердің бағыты максималды сақтау арқылы күн батареясының тиімділігін арттыру үшін маңызды қозғалғыштық және минималды рекомбинация . Алайда, қолда бар мәліметтерге сәйкес, бос заряд тасымалдаушылардың тығыздығы ( $\approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) әлдеқайда төмен күн батареялары үшін оңтайлы мәні  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  , және оны дәл өлшеу қиын болуы мүмкін. Демек, бірнеше жұмыс  $Sb_2Se_3$ -те бос заряд тасымалдаушылардың тығыздығын арттыруға арналды.  $Sb_2Se_3$  бойынша алғашқы жұмыстарда айтарлықтай өзгеріс табылды 0,2–1,0 эВ кристалды  $Sb_2Se_3$  активтендіру энергиясы ( $E_a$ ). Бұл өзгеріс Ферми деңгейіндегі айырмашылықпен түсіндірілді, ол басқасында жазылған 0,54–0,66 эВ диапазонындағы энергия саңылауының позициясы немесе  $Sb_2Se_3$  пленкаларының қалыңдығына тәуелділігі . Активтендіру энергиясы химиялық энергиямен де байланысты болды құрамы бойынша  $E_a \text{ Sb}_x\text{Se}_{1-x}$  жұқа қабықшалар 1,0 эВ-ден 0,2 эВ-ге дейін төмендеді.



## 1.5 Синтездеу әдістері

Материалдың қасиеттері саласында қажетті мақсатқа жету үшін материалдың синтезделген бөлігі маңызды рөл атқарады.  $Sb_2Se_3$ -ті әртүрлі субстраттарда өңдеу үшін әртүрлі қосымшалар үшін көптеген физикалық және химиялық әдістер жасалды, мысалы, ыстық инъекция әдісі, сольвотермиялық әдіс, қатты фазалық реакция және т. б.  $Sb_2Se_3$  кристалдары көп мөлшерде болуы мүмкін қатты фазалық реакция арқылы оңай алынады. Чандрасехаран К. А. және т. б. Бриджман-Стокбаргер әдісімен кристалды өсіру туралы хабарлады. 99,99% тазалығы бар компоненттердің жеткілікті саны болды вакуумда ұзындығы 10 см және алдын ала тазартылған кварц ампулаларына оралған диаметрі 10 мм, қысымы  $10^{-5}$  торр. Жабық ампула тұрақты температурасы  $700^\circ\text{C}$  шамасында муфель пешіне орналастырылды 24 сағат. Материалды толығымен араластыру және реакция үшін ампуланы үнемі айналдырып отырды. Қыздыру тік градиент пеште жүзеге асырылды, ампуланы  $650^\circ\text{C}$  температурада 48 сағат ұстаңыз, содан кейін. Беттің қасиеттері тиімділік пен мінез құлыққа әсер етуі мүмкін пайдалану процесінде материал. Беттің ең жақсы қасиеттеріне жабынды қолдану арқылы қол жеткізуге болады әр түрлі физикалық және химиялық заттардың көмегімен бетіне тұндыру әдістері.

Тұндыру технологиясы өсіп келе жатқан қажеттіліктерді қанағаттандыру үшін жаңа материалдардың жұқа қабықшаларын жобалаудың маңызды құрамдас бөлігі болып саналады. өнеркәсіпке сенімді және мультидинамикалық материалдар қажет. Қолдану әдістеріне аймаққа байланысты ерекше назар аудару қажет қолданбалар, өйткені қолданудың барлық әдістері бірдей бола бермейді құрылым, морфология және т.б. сияқты қасиеттер [46]. Қарқынды прогресс физикалық газ фазасының тұндыру процестерінде (PVD) ерекше қасиеттері бар жабындарды коммерциялық пайдалануға ықпал етті. Көптеген қабаттар, газ фазасынан физикалық тұндыру процесінде алынған, барған сайын материалдардың функционалдығын арттыру үшін қолданылады. Бүрку әдістерінің танымалдығы қазіргі заманғы өнеркәсіпте Материалдарды өңдеу және олардың жоғары өнімділігі, экологиялық аспектілері мен экономикалық ойлары үшін кеңінен қолданылуының арқасында өсті. Әрбір бүрку әдісінің өзіндік ерекшелігі бар артықшылықтары. Газ фазасынан химиялық тұндыру (CVD) – тиімді жұқа пленкаларды жоғары сапалы өңдеуге арналған химиялық тұндыру процесі. Артықшылығы CVD болып табылады шөгінді пленкалардың консистенциясы. Бұл дегеніміз дәндердің мөлшері мен қалыңдығы бүкіл үлгі бойынша салыстырылады [47]. Үшін фотоэлектрлік жүйелер  $Sb_2Se_3$  бүрку әдісі белгілі жақсы біртектілік түріндегі артықшылықтар, толық вакуум жағдайында жұмыс істеу және мақсатты материалдардың құрамын тамаша беру [48].

Термиялық бүрку әдістерінің артықшылығы жауын-шашынның жоғары жылдамдығы, құрылыстың қарапайымдылығы және жабдықтың төмен құны болып табылады. Атомдық қабатты тұндыру (АСЛ) - бұл тұндырудың үнемді әдісі, өйткені ол жоғары қол жетімділікті қамтамасыз етеді және өнімділікті арттырады, бұл оны пленкаларды тұндырудың ең бәсекеге қабілетті әдісі етеді.

ALD ұнтақ үлгілері мен үлкен аумақтың беттеріне жабындарды оңай жағуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, мұның көп бөлігі төмен жұмыс температурасында қол жеткізіледі [49]. Бүрку дәстүрлі түрде кеңінен қолданылатын маңызды әдіс болып табылады.

$\text{CuInGaSe}_2$  (CIGS) сияқты жұқа пленкалы фотоэлектрлік технологиялар [50] және  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) [51]. Бұл процесс жақсы біртектілікпен, толық вакуумдық белсенділікпен және құрылымның керемет өзгеруімен танымал мақсатты материалдар. Максималды мәні бар  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  фотоэлектрлік құрылғылары алынады PCE. Бүрку кезінде, Орнату вакуумдық контейнердегі қысым  $10^{-4}$  Па деңгейінде, бүрку уақыты 1,5 сағатты құрады, және барлық үлгілердің қуаты шамамен 35 ватт. Жұмыс орнын реттеу арқылы қысым, ол оның құрылғының жұмысына әсерін зерттеді. Жақсы сапалы жұқа пленка алынды 1,5 Па жоғары қысымда және төмен қысымда пленканы бүрку арқылы екі қабатты құрылымды қосу қысым 1,0 Па.  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  кристалданған жұқа қабықшалар әр түрлі қысым, көрсетілген [48]. Олар сондай-ақ 0,3-тен 10 Па-ға дейінгі әртүрлі қысымдарда магнетронды бүрку әдісімен жұқа қабықшаларды Тұндыру және күйдіру туралы хабарлады 300 °C температурадағы пленкалар. қысым құрылымға әсер ететіні анықталды және морфология [52]. 0,5 Па қысыммен және 40 Вт бүрку қуатымен тұндырылды. Қоспалар  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  мақсатты беттері 15 минут ішінде алдын ала бүрку арқылы жойылды. Содан кейін тұндыру басталып, субстрат 20 айн/мин жылдамдықпен біркелкі жұқа  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  қабықшаны алу үшін айналдырылды. Барлық үлгілер үшін бүрку уақыты 60 минут болды [53].

Әр түрлі субстрат температуралары үшін. Бұл әдіс  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  жұқа қабықшалар шыны субстратқа жағу үшін қолданылады және қатты материалды буландыру үшін резистивті жылу көзін пайдаланады вакуумдық жүйеде жұқа қабықшалар. Жоғары вакуум жағдайында зат қызады Бу қысымы пайда болғанға дейін. Буланатын зат немесе бу ағыны вакуумдық камера арқылы жылу энергиясы арқылы өтеді және ол субстратқа түседі. Ұнтақты қыздыру кезінде  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  тез булану жүреді. буланудан бұрын  $5 \times 10^{-4}$  Па вакуум жасау үшін тұндыру қондырғысы айдалды. Ұнтақ  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  кварц тигельінде сақталды (цилиндрлік пішіні 2 текше см) вольфрам сымына желімделген. Тұндыру процесі өзгерту арқылы бақыланды вольфрам жіпінің қыздыру тогы. Булану процесінде субстраттың температурасы 423 °C-тан аспады ; әйтпесе  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ , ол қазірдің өзінде субстратқа жағылып, қайтадан буланып, кетіп қалады субстрат. FTO/ $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ /CDs/ $\text{ZnO}$  фотоэлектрлік жүйесінің прототипі жасалды  $\text{ZnO: Al / Au}$  [54] күн энергиясын 2,1% түрлендіру тиімділігі бар. Ин Чжэн Ли және оның авторлары сурьма селенидінің ұнтағы екенін анықтады, газ фазасынан термиялық тұндыру әдісімен алынған, тек бір кристалды құрылымы бар аз мөлшерде Sb. Булану әсері микроқұрылымда байқалды жұқа пленка. Нәтижелер жұқа қабықшалар материалы бірдей екенін көрсетті, сурьма селенид ұнтағы сияқты. Құрылым аморфты болды. Кейін үлгілерді жасыту жақсы кристалданған бір фазалы  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  алынды. тұндырылған жұқа қабықшалар (термиялық тұндыру әдісі) және 0-ге дейін күйдірілген жұқа қабықшаларға

арналған Сэм суреттері мен рентгенографиялары көрсетілген 20, 60 және 100 мин. Спрей пиролиз. Бұл компоненттер химиялық қосылыс түзу үшін әрекеттесетін ерітіндіні бүрку арқылы қыздырылған бетке жұқа қабықшалар қолдану әдісі [55]. Алынған  $Sb_2Se_3$  жұқа қабықшалары туралы хабарлады оңтайлы жағдайда сулы (А) және сулы емес орта (НА) бүрку арқылы пиролиз әдісімен субстрат температурасы мен ерітіндінің пропорциялары.  $SbCl_3$  және  $SeO_2$  ерітінділері су ортасы ретінде алынды, еріткіш ретінде  $H_2O$ .  $Sb/Se$  қатынасы  $2/3$  болды. Шоғырлану ерітінді  $0,1$  құрады. Бүрку жылдамдығы минутына  $5\text{ см}^3$ -1 болды. Температура жіңішке қабықшалар қалыңдығы  $0,46$  мкм болды. Сулы емес Орта үшін  $SbCl_3$  және  $SeO_2$  ерітінділері алынып, сірке қышқылы еріткіш ретінде пайдаланылды.  $Sb/Se$  қатынасы  $2/3$  болды. Ерітіндінің концентрациясы  $0,1$  болды. Бүрку жылдамдығы  $14\text{ см}^3$  болды минутына-1. Субстраттың температурасы  $200^\circ\text{C}$  және қалыңдығы болды жұқа қабықшалар- $1,78$  мкм. Зерттеу нәтижесінде алынған жұқа қабықшалар анықталды. Сулы емес орта (НА), күйдірілгеннен кейін поликристалды болады.

## 1.6 Гидротермиялық синтез.

Сурьма трихлориді ( $SbCl_3$ )  $0,1141$  г және СТАВ ( $CH_3(CH_2)_{15}N(Br)(CH_3)_3$ )  $0,1125$  г  $15$  мл ионсыздандырылған суда еріген. Біртекті суспензия магнитті араластыру кезінде  $10$  минут және ол суспензия деп аталды а.  $0,1297$  г натрий селениті ( $Na_2SeO_3$ ) және  $0,1130$  г натрий борогидридi ( $NaBH_4$ )  $15$  мл ионсыздандырылған ерітіндіде ерітілді су және біртекті қоспа пайда болғанша  $10$  минут бойы араластырылды, ол содан кейін А және В суспензиялары күшті араластырылды  $30$  минут ішінде магнитті араластыру арқылы алынған ерітінді құйылды автоклав сыйымдылығы және  $70\%$  дейін ионсыздандырылған су қосылды автоклавтың жалпы көлемі. Осыдан кейін автоклав орналастырылды кептіру камерасы  $200^\circ\text{C}$  температурада  $24$  сағ. қыздырғаннан кейін ерітінді ультрадыбыстық толқынның әсерінен жарты сағат бойы үзіліссіз центрифугаланды. Кейін Центрифугалау тұнба жиналды және этанолмен бірнеше рет жуылды, содан кейін ультрадыбыстық тазартылды. Ақыр соңында, алынған ұнтақ вакуумды кептіру пешіне  $70^\circ\text{C}$  температурада  $12$  сағ сурьма селенидінің нанолистерін алу. Құрылығыны зерттеу мүмкіндігін қамтамасыз ету үшін біз  $Sb_2(S,Se)$   $3$  пленкасын қолданамыз слойам CDs қабаты алынған CdS қабаты химиялық ваннада легирленген фтормен қапталған шыныдан жасалған субстратқа тұндыру қалайы оксиді (FTO)  $22,23$ .  $Sb$ ,  $S$  және  $Se$  көздері ретінде сәйкесінше  $KSbC_4H_4O_7$ ,  $Na_2S_2O_3$  және  $SeC(NH_2)_2$  (селеномочевина) қолданылады. Ішінде  $Sb_2(S,Se)$   $3$  пленкасын қолдану. Субстрат орналастырылған автоклав бетін төмен қаратып  $\sim 75^\circ$  бұрышпен Гидротермиялық тұндыру  $135^\circ\text{C}$  температурада жүзеге асырылады содан кейін  $N_2$  атмосферасында  $350^\circ\text{C}$  температурада күйдіріледі кристалдылықты арттыру үшін Атомдық  $Se/S$  қатынасын реттеу арқылы реттеуге болады селен мочевины/ $Na_2S_2O_3$  концентрациясының прогениторлық ерітіндідегі қатынасы.

Селеномочевина/Жүйелі зерттеу үшін 0%, 2,5%, 5% және 25%-ке тең прекурсорлық ерітінділерде  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  молярлық қатынасы қолданылады. Алдымен біз алынған пленкалардың кристалдылығын зерттейміз.  $\text{KSbC}_4\text{H}_4\text{O}_7$  және  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  реакциялық прекурсорларын қолдана отырып синтездеу нәтижесінде стибниттің типтік кристалдық құрылымы түзіледі.  $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$  пленкасының гидротермиялық тұндыруы және құрылғыны құрастыру.  $\text{Sb}_2$  Фильмі  $(\text{S,Se})_3 \text{KSbC}_4\text{H}_4\text{O}_7 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  көмегімен гидротермиялық әдіспен синтезделді,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  және селеномочевина сәйкесінше SB, S және SE көздері ретінде. Алдымен құрамында 40 мл ультра таза су бар автоклав резервуарына (50 мл) 20 мм  $\text{KSbC}_4\text{H}_4\text{O}_7 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  және 80 мм  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  қосылды. Содан кейін тұрақты араластыру кезінде мөлдір ерітіндіге 0,01 г (2 мм), 0,020 г (4 мм) немесе 0,1 г (20 мм) селеномочевина қосылды және олар сары біртекті ерітінді алды. Осыдан кейін CDs жабылған FTO шыны субстраты жоғарыдағы суға орналастырылды ерітінді

Артықшылықтары.  $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$  пленкасының гидротермиялық тұндыруы және құрылғыны құрастыру.  $\text{Sb}_2$  Фильмі  $(\text{S,Se})_3 \text{KSbC}_4\text{H}_4\text{O}_7 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  көмегімен гидротермиялық әдіспен синтезделді,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  және селеномочевина сәйкесінше SB, S және SE көздері ретінде. Алдымен құрамында 40 мл ультра таза су бар автоклав тефлоновый резервуарына (50 мл) 20 мм  $\text{KSbC}_4\text{H}_4\text{O}_7 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  және 80 мм  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  қосылды. Содан кейін тұрақты араластыру кезінде мөлдір ерітіндіге 0,01 г (2 мм), 0,020 г (4 мм) немесе 0,1 г (20 мм) селеномочевина қосылды және олар сары біртекті ерітінді алды. Осыдан кейін CDs жабылған FTO шыны субстраты жоғарыдағы суға орналастырылды ерітінді. Жұқа пленка  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  қапталған FTO (FTO/CdS) әйнегіне жағылды CDs-тен гидротермиялық жолмен,  $\text{C}_4\text{H}_4\text{KO}_7\text{Sb} \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$  және  $\text{Na}_2\text{SeSO}_3$  ретінде Сәйкесінше Sb және SE көздері.

Сонымен қатар,  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  тұндыруын жеделдету үшін тиомочевина қосылды. Атап айтқанда, 25 мл автоклавтың ішкі тефлон резервуарына 19 мл ультра таза су қосылды. Содан кейін сулы ерітіндіге 0,25 г  $\text{C}_4\text{H}_4\text{KO}_7\text{Sb} \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$  және 0,3 г тиомочевина қосылды тұрақты араластыру кезінде ұнтақтарды толығымен еріту. Содан кейін жоғарыда аталған мөлдір ерітіндіге 1 мл 0,1 м  $\text{Na}_2\text{SeSO}_3$  ерітіндісі қосылды және 2 минут араластырғаннан кейін біртекті ақ эмульсия пайда болды. Субстрат FTO / CdS жоғарыда аталған суға орналастырылды ерітінді және мөрленген. Гидротермиялық реактивті тұндыру  $100^\circ\text{C}$  температурада 2 сағат бойы өткізілді. Бөлмеге дейін салқындағаннан кейін температура алдыңғы пленка алынып тасталды және жуылды супер таза сумен және этанолмен, содан кейін  $100^\circ\text{C}$  температурада термиялық өңдеумен вакуум жағдайында 1 минут ішінде. Бұл фильм  $375^\circ\text{C}$  температурада біржола күйдірілді 10 минут ішінде  $\text{N}_2$ . Бөлме температурасына дейін салқындағаннан кейін FTO/CdS/ $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  пленкасын келесі мақсаттарда пайдалануға болады келесі құрылғыны жасау.



## 1.7 Электрохимиялық тұндыру

$Sb_2Se_3$  меншікті наноөткізгіштерін синтездеу. Көлемі 50 мл тамақты колбаға металл селен (0,3 ммоль, 24 мг), олеин қосылды қышқыл (0,9 ммоль, 256 мг) және 10 мл 1-октадец және қоспасы 1 сағат бойы  $100^\circ C$  вакуумда газсыздандырылды. Пісіру үшін сурьма прекурсорының ерітіндісі 0,3 ммоль сурьма хлориді (68 мг, Алдрих), 0,9 ммоль стеарин қышқылы (256 мг, Алдрих) және 4 мл 1-октадец (Алдрих) басқа колба бөлме температурасында 1 сағат бойы газсыздандырылып, азотпен үрленді. Сурьма прекурсорының ерітіндісі селен ерітіндісіне тез енгізілді және азот атмосферасында  $250^\circ C$  температурада беттік белсенді зат, қоспасы араластырылды сол температурада 10 минут, содан кейін бөлме температурасына дейін салқындатылды.  $Sb_2Se_3$  нано сымдары этанол қосу реакциясы арқылы тұндырылды және центрифугалау арқылы бөлінді.  $Sb_2Se_3$  жұқа пленкалары электро тұндыру әдісімен қолданылды үш электродты жасушада. Жұмысшы, анықтамалық және анти-электрод ретінде FTO әйнегі (F:SnO<sub>2</sub>), қаныққан каломель қолданылды электрод (SCE) және Pt. Бұл жұмыстағы барлық әлеуеттер салыстырмалы түрде берілген SCE. Тәжірибе 1,5 мм ваннадан басталды  $SbCl_3$ , 0,77 мм  $H_2SeO_3$  және 1,21 мм натрий цитраты (Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>).

Кешен түзуші ретінде Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> пайдаланылды. Қолданар алдында субстрат сабынмен жуылды, содан кейін біртекті шөгінділер алу үшін ацетон мен изопропил спиртімен өңделді. Циклдік вольтамметриялық негізінде өлшеу  $Sb_2Se_3$  тұндыру әлеуетінің диапазоны анықталды. Үлгілердің үш жиынтығы қолданылды және зерттелді: 1) жиынтық  $Sb_2Se_3$  пленкалары ваннадан тұрақты потенциалда (0,75 в қарсы SCE) қолданылды Se / Sb прекурсорларының әртүрлі арақатынастары бар және  $425^\circ C$  температурада күйдірілген 610 Торр температурада 1 мг Se бар N<sub>2</sub> атмосферасында 1 сағат; 2) екіншісінде орнату-алдыңғы ваннаның құрамы және күйдіру температурасы ( $425^\circ C$ ) тұрақты ұсталды және пленкалар әр түрлі жағдайда шөгінді 0,55 В-тан 0,95 В-қа дейінгі диапазонда, олардың әрқайсысы үшін 0,1 в айырмашылығы бар; және 3) үшін үшінші серия пленкалар бірдей ванналардан жиналды бұл жағдайда 0,75 в потенциалды қолдана отырып, алдыңғы концентрацияда жасыту температурасы 275-тен  $475^\circ C$ -қа дейін өзгерді.

$Ag_2Se$  безендірілген  $Sb_2Se_3$  наносымдарының синтезі.  $Ag_2Se$  нанобөлшектерін бекіту үшін  $Sb_2Se_3$  наносымдарының беттері бөлме температурасында жоғарыда көрсетілген  $Sb_2Se_3$  наносымдарының ерітіндісіне 3 ммоль күміс нитраты (0,51 мг, Алдрих) қосылды. Кейіннен температура  $100^\circ C$  дейін көтерілді, қоспасы осы температурада араластырылды Азот атмосферасында 90 минут, содан кейін бөлме температурасына дейін салқындатылды. Реакция нәтижесінде оларға  $Ag_2Se$  нанобөлшектері бекітілген  $Sb_2Se_3$  нанобөлшектері тұндырылды этанолды қосу арқылы және центрифугалау арқылы бөлінеді. Фото құрылғыларды жасау. Фото құрылғылар таза наноөткізгіштерден жасалған  $Sb_2Se_3$ , сондай-ақ  $Ag_2Se$  безендірілген  $Sb_2Se_3$  наноөткізгіштері. Гександа дисперсті наносымдар, SiO<sub>2</sub> (100 нм)Si

пластинасына жағылды, содан кейін  $O_2$  реактивті плазмалық өңдеу жүргізілді. Қалдық органикалық заттарды кетіру үшін ионды ою (RIE). Жеке нано сымдарға Ti (20 нм)/Au (100 нм) электродтарын қолдану үшін фотолитография және термиялық булану әдістері қолданылды. Фото құрылғының арнасының ұзындығы 4 мм. Кіріс кернеуі мен фото коммутация толқын ұзындығы 655 НМ (15 МВт/22см) лазермен өлшенеді кезінде бөлме температурасында.

## 1.8 Селенид сурьменің артықшылықтары мен кемшіліктері

Артықшылықтары:

- Электроника: Селенид сурьма электроника өнімдерінде пайдаланылады. Онда жұқа селендік халкоген және сурьма тамырлары біріктірілген. Олар транзисторлар мен фотосенсорлар кеңесінде пайдаланылады.
- Оптика: Селенид сурьма адамзаттың әрі машинаның көркемдігін көтеруге арналған лазерлі көмірлер мен оптикалық фильтрлердегі басқару элементтерін жасау үшін қолданылады.
- Медицина: Бірнеше медициналық қолданыстарда селенид сурьма пайдаланылады. Мысалы, кератит тісіндегі металлические селенид сурьма тамырлары және тағы басқа еріктердің туындысы үшін қолданылады.

Кемшіліктері:

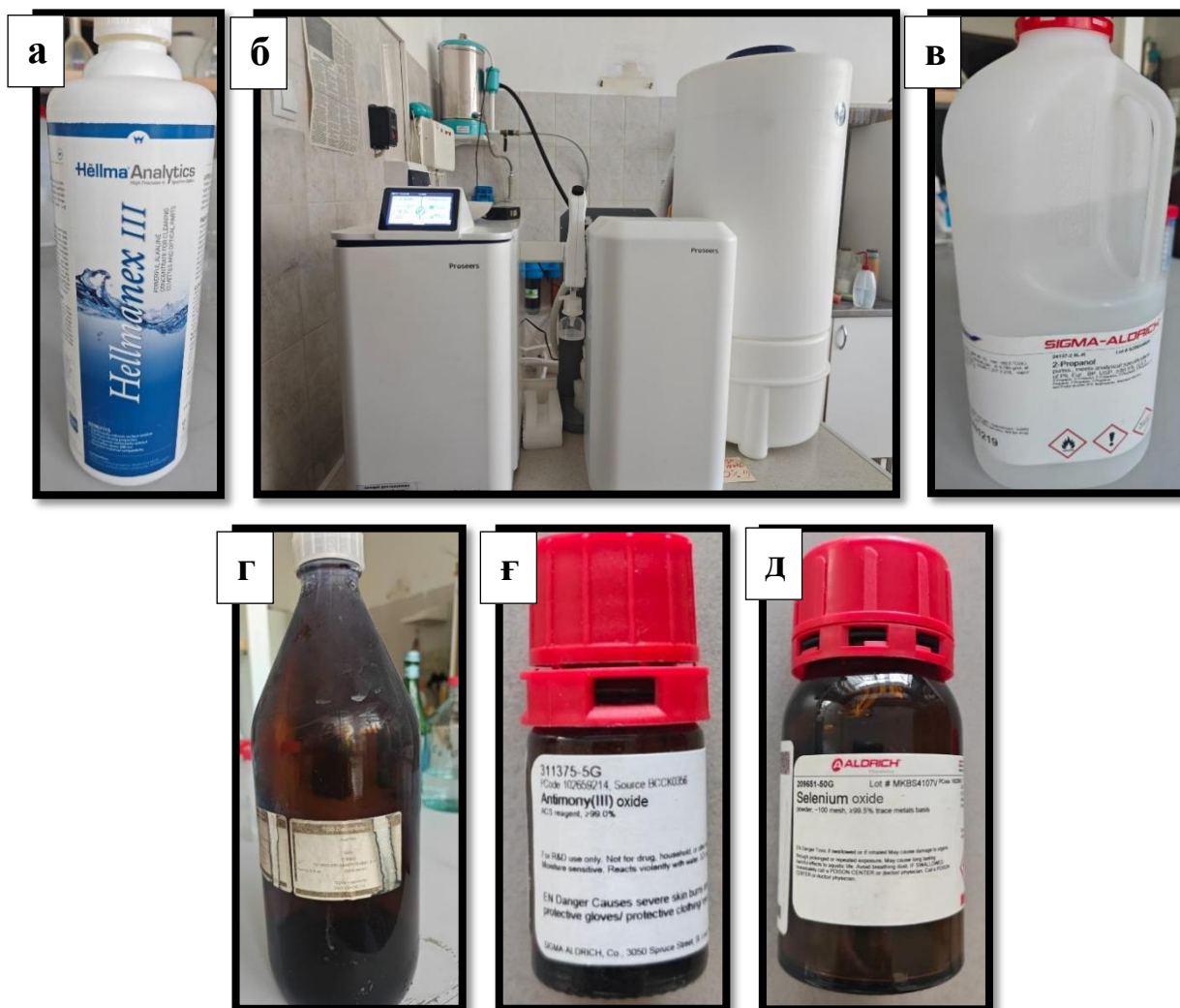
- Уыттылық: жоғары дозада сурьма селенидінің уыттылығы пайда болуы мүмкін. Жоғары дозада қолдану кейінгі ауруларға әкелуі мүмкін.
- Кемістік әрекеттілігі: Селенид сурьма тамырлары және әрекеттері жұқа қабықшасымен жаппай болып, олар аурулардың қарым-қатынасын қамтамасыз ететін әрекеттерді жасайды.
- Қайта құрамында көрмеу: Селенид сурьма депресия, аурулар мен басқа жағдайлар менің жақсартуына себеп болуы мүмкін. Селенид сурьманың артықшылықтары мен кемшіліктері көптеген аймақтардағы тауарларға байланысты болады. Бұл тауарды қолдануға алдымен, көрсетілген мәліметтерге сай, кез келген көздіктен қарауға сабыр тартуы маңызды.

## 2. ТӘЖІРИБЕЛІК БӨЛІМ

### 2.1 Материалдар мен реактивтер

Төсеніштер мен үлгілерді дайындау үшін келесі материалдар мен реактивтер қолданылды:

- Сілтілі сусабын (Helma Analytics, Ұлы Британия) (сурет 4 а);
- Ионсыздандырылған (DI) су. Ионсыздандырылған су арнайы қондырғыда алынды (Proseers, ҚХР) (сурет 4 б);
- Изопропанол, 99,5% (Sima Aldrich) (сурет 4 в);
- Ацетон, аса таза (ЗАО «ЭКОС 1») (сурет 4 г);
- Сүрме тотығы -  $Sb_2O_3$ , 99,5% (Sima Aldrich) (сурет 4 ғ);
- Селен тотығы -  $SeO_2$ , 99,5% (Sima Aldrich) (сурет 4 д);
- Аммоний хлориді -  $NH_4Cl$ , 99,5% (Sima Aldrich);
- Тұз қышқылы -  $HCl$ , аса таза (Sima Aldrich).



4 сурет – Үлгілерді дайындауға арналған материалдар мен реактивтер: а) сілтілі сусабын, б) ионсыздандырылған су алу қондырғысы, в) изопропанол, г) ацетон, ғ) сүрме тотығы, д) селен тотығы

## 2.2 Құралдар мен жабдықтар. Ерітіндіні дайындау

Синтездеу және талдау әдістемелердің кейбір бөлігі ТОО «Физика-техникалық институтының» фотоэлектрлік құрылғылар және құбылыстар зертханасының негізінде жүргізілді. Раман спектроскопиялық және рентгендік құрылымдық талдау нәтижелері әл-Фараби атындағы ҚазҰУ негізінде жасалынды.

Үлгілерді дайындау екі кезеңнен тұрады. Бірінші кезеңде төсеніштер май және басқа да ластанулардан тазланды. Төсеніштер ретінде фтор қосылған қалайы тотығы негізіндегі жабыны бар боросиликатты микроскоптың заттық шынысы (FTO/SLG). FTO төсеніші электрохимиялық тұндыру әдісіне электрод рөлін ойнады.

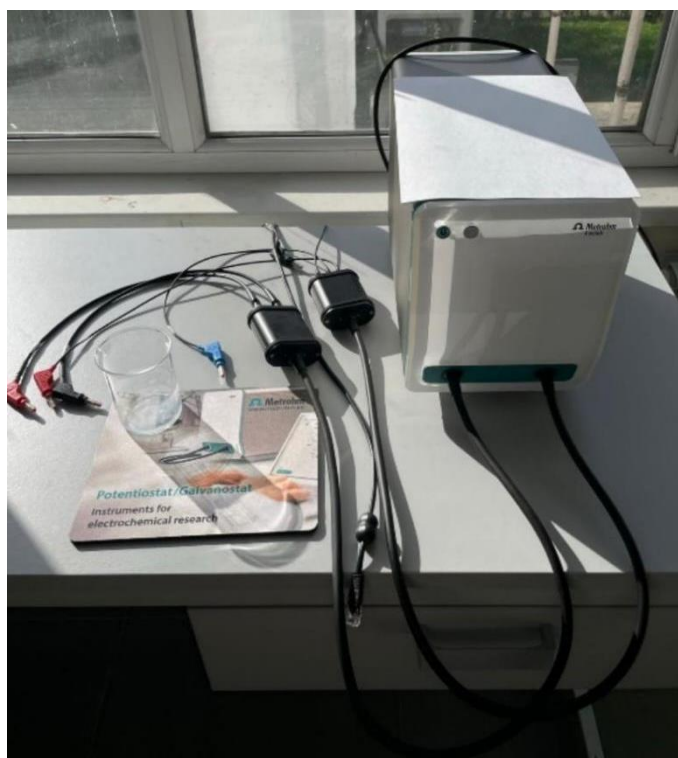
Төсеніштер алдымен сілтілік сусабынмен губка көмегімен тазаланды, содан соң сусабын төсеніштерден екі қайталап дистелденген сумен шайылды.

Дистильденген сумен шайылған төсеніштер ультрадыбыста 50°C жылуида изопропил спиртінде 10 минут бойы усталды. Этил спиртінен кейін төсеніштерді ацетонда 10 минут ультрадыбыста усталынды. Ацетоннан соң төсеніштер азот ағынында кептірілді.

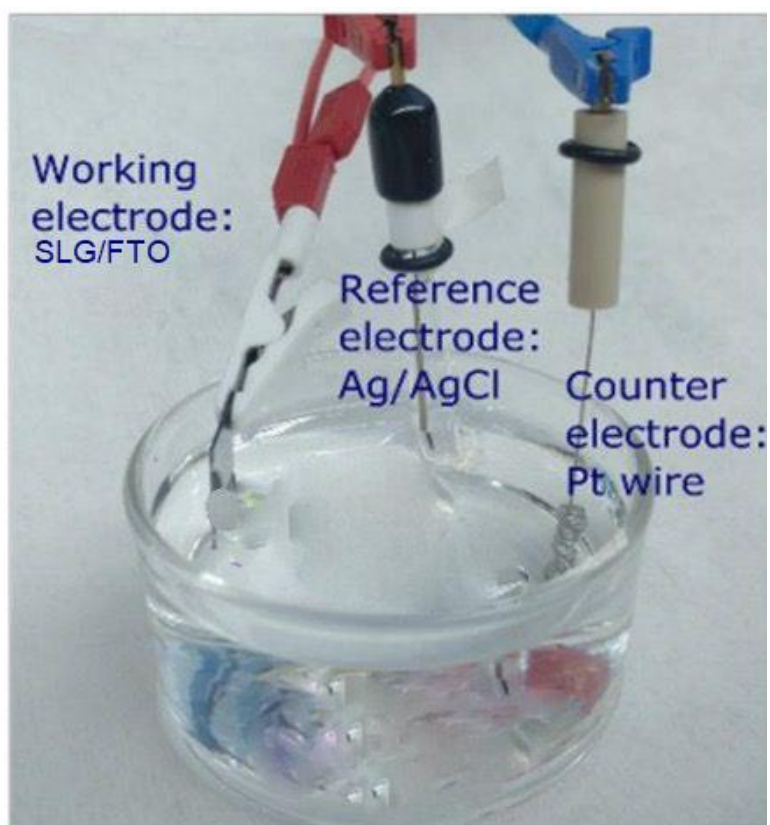
Екінші кезең қабыршақтар-үлгілерді синтездеуден тұрады. Дипломдық жұмыста үш электродты электрохимиялық әдіспен тұндыру қолданылды.  $Sb_2Se_3$  жұқа қабықшаларын тұндыру құрамында 0,003 М  $Sb_2O_3$ , 0,006 М  $SeO_2$  және 3,5 М  $NH_4Cl$  бар сулы электролит арқылы жүзеге асырылды. Ерітіндінің қышқылдығы  $HCl$  қосу арқылы рН 1,5 дейін реттелді. Электр тұндыру процесі бөлме температурасында 30 минут бойы тұрақты потенциал  $E = 0,4$  В болатын потенциостат-гальваностты (Vionic, Metrohm, Германия) қолдану арқылы жүзеге асырылды (сурет 5). Үш электродты электрохимиялық тұндыру кезінде шыны ұяшықта SLG/FTO төсеніші жұмыс электроды, платина спиралі көмекші электрод, ал күміс-күміс хлорид электроды (АҚШ КСІ-де  $Ag/AgCl$ ) эталондық электрод ретінде қызмет етті (сурет 6).

Келесі тұндыру процесі кезінде алынған үлгілер дистильденген су көмегімен шайылып, ауада кептірілді. Кептірілген үлгілер аргон атмосферасында күйдірілді 270 °С және 350 °С температурада. Осы әдіспен алынған үлгілер әрі қарай "ED270" және "ED350" деп белгіленеді.

Алынған үлгілердің морфологиясына талдау және қалыңдығы сканерлеуші электронды микроскоп (JEOL 6490 (LA), Жапония) көмегімен жасалды (сурет 7). Элементтік талдау энергодисперлеуші спектроскоп көмегімен жүргізілді (JEOL 6490 (LA), Жапония). Кристаллдық құрылымы жайлы ақпарат дифрактометр (Miniflex Rigaku, Жапония) көмегімен алынды (сурет 8). Молекулалық байланыстарға талдау раман спектроскопиясы (NTegraSpectra (NT-MDT) арқылы жүргізілді (сурет 9). Оптикалық қасиеттеріне талдау спектрофотометр көмегімен (UNICO SpectroQuest 2800) жасалды (сурет 10).



5 сурет – Потенциостат/галваностат (Metrohm)



6 сурет –  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  үш электродты ұяшықтағы электрохимиялық тұндыру





7 сурет – Сканерлеуші электронды микроскоп (JEOL 6490 (LA))



8 сурет – Дифрактометр (Miniflex Rigaku)



9 сурет – Раман спектроскопиясы (NTegraSpectra (NT-MDT))

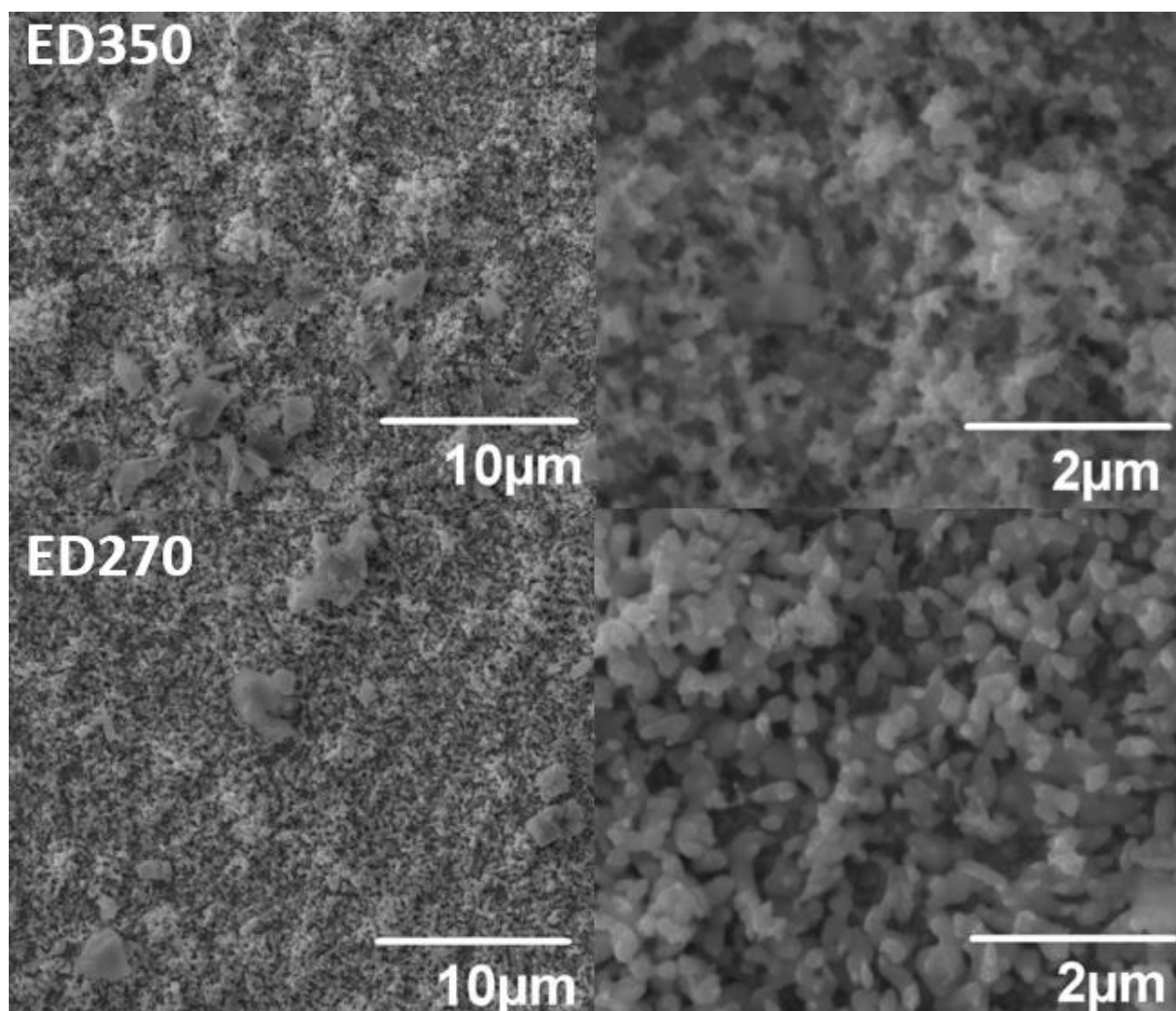


10 сурет– раман спектроскопиясы (NTegraSpectra (NT-MDT))

### 2.3 Морфология және элементтік талдау нәтижелері

Бұл бөлімде сканерлеуші электрондық микроскоп (СЭМ) көмегімен алынған нәтижелері талқыланады. Қабықшалардың қалыңдығы СЭМ көмегімен көлденең қима арқылы зерттелді. Қабыршақтардың қалыңдығы 250-270 нм құрайды. 11 суретте үлгілердің бедері көрсетілген. СЭМ талдауының нәтижелері 10 мкм және 2 мкм үлкейту кезінде жүргізілді. Суреттен көрініп тұрғандай екі температурада алынған үлгілер төсеніштің бедерін қайталап өскен. FTO жабынының бедерінің кедір бұдырлығы алынған әдісіне тәуелді болып өскен.

Энергиядисперсионды рентгендік спектроскопия көмегімен жасалған элементтік талдау 270 °С температурада қыздырылған үлгідегі [Se]/[Sb] қатынасы 1,62 көрсетті. 350 °С температурада қыздырылған үлгідегі [Se]/[Sb] қатынасы 1,40 құрайды. Сондай-ақ екі үлгіде де төсеніштегі Sn элементінің үлесі байқалады.

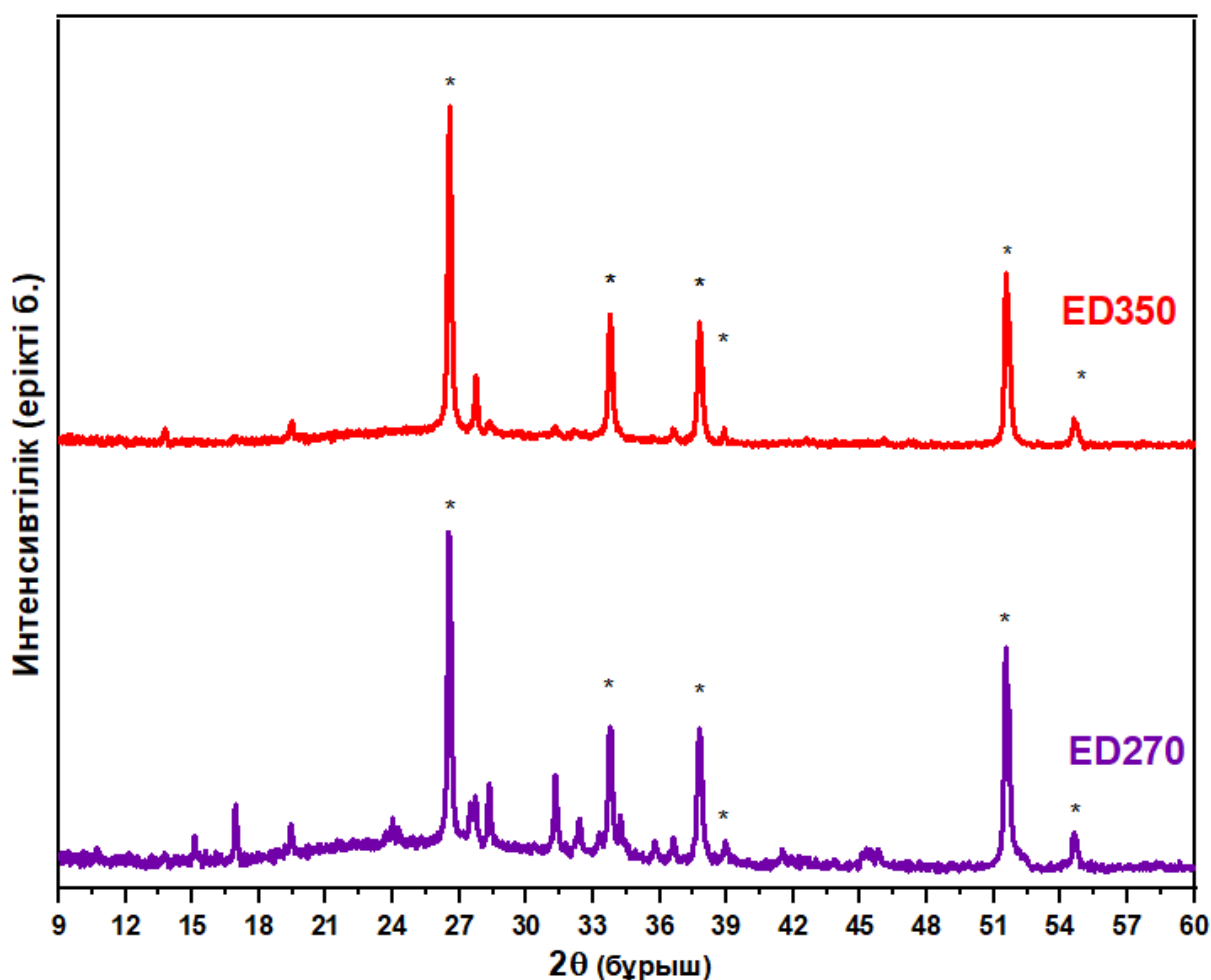


11 сурет – ED350 және ED270 үлгілерінің беткі бедері, СЭМ талдауының нәтижелері

## 2.4 Рентгендік құрылымдық зерттеу нәтижелері

Бұл бөлімде кристалды құрылымының зерттеу нәтижелері талқыланған. Үлгілердің барлығында  $Sb_2Se_3$  орторомбиялық фаза түзілген. Зерттеу нәтижесінде алынған спектрлер 12 суретте бейнеленген. Спектрлер мәліметтер банкінің (JCPDS) ұнтақ диффракция файлмен (PDF) салыстырылды.

Нәтиже бойынша ED270 және ED350 үлгісінде (120), (211), (221), (301) бағдар жазықтықтарына сәйкес келетін ең маңызды 16.80, 28.22, 31.18, 32.37 шыңдары. Бұл  $Sb_2Se_3$  кристалдық фазасы Pbnm (62) кеңістіктік тобы №15-0861 JCPDS картасының рентгендік диффракциялық стандартының орторомбиялық фазасының шыңдарына сай келді. Сондай ақ төсеніштің фазасы байқалады. Төсеніш фазасының шыңдары спектрлерде тиісінше жұлдызшалармен көрсетілген.

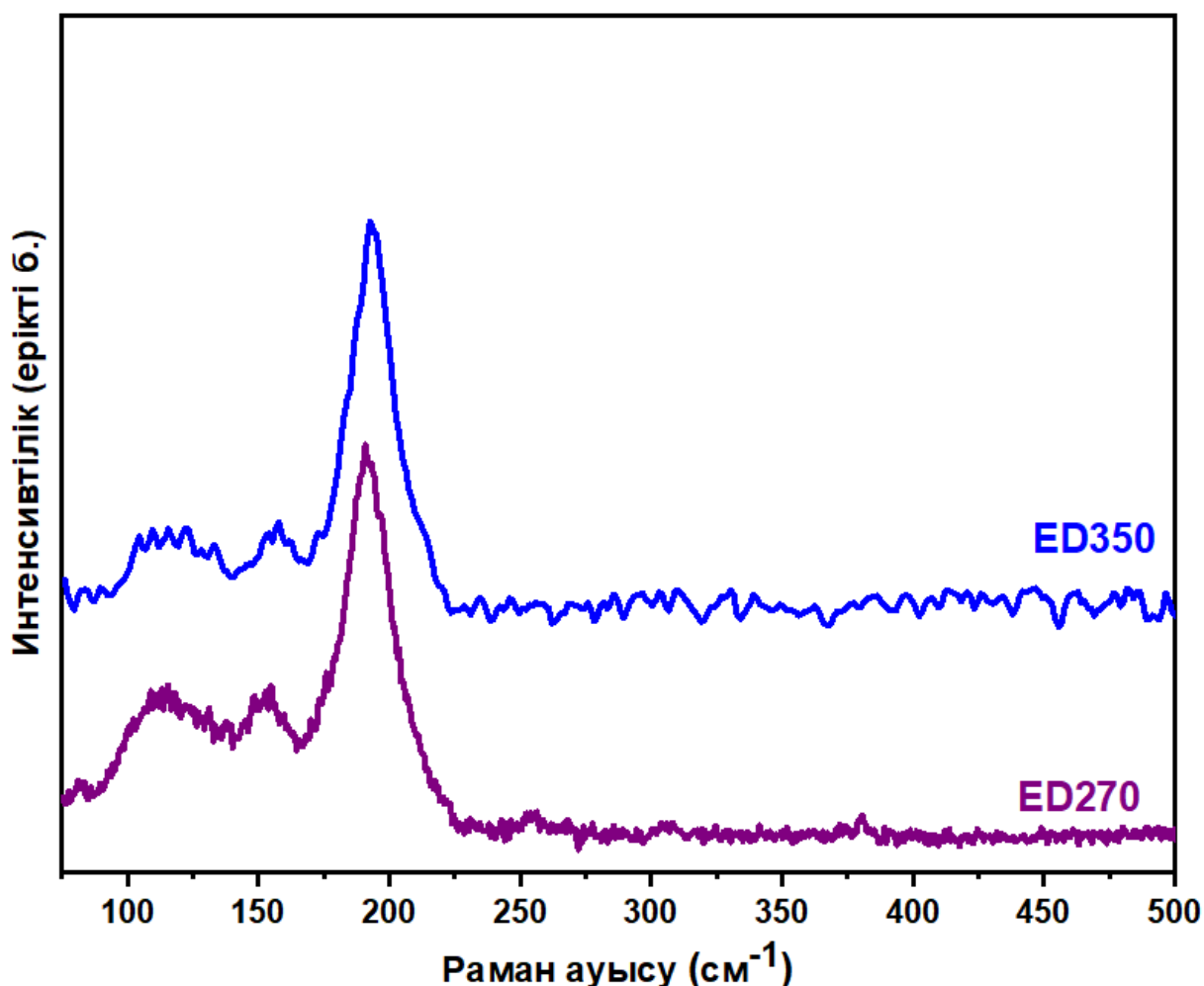


12 сурет– Рентгендік құрылымдық зерттеу нәтижелері

## 2.5 Раман шашырау нәтижелері

Комбинациялық жарық шашырау нәтижелері 632 нм қызыл лазер көмегімен зерттелді. Спектрлер 13 суретте көрсетілген. Спектрлерден  $150\text{ см}^{-1}$ ,  $190\text{ см}^{-1}$  және  $210\text{ см}^{-1}$  кезіндегі сүрме селенидінің негізгі Раман шыңдары

барлық үлгілерде анық байқалады. ED270 үлгісі (сурет 13): Негізгі шыңдардың кең амплитудасы байқалады ( $\sim 26 \text{ см}^{-1}$ ), бұл материалдың төмен кристалдылығына байланысты болуы мүмкін. Шыңның үлкен жолақ аумағына қарай ығысуы бұған себеп бола алады. Құрылымның деформациясымен және бетінің рельефтігімен байланысты (СЭМ нәтижелері) болуы мүмкін.

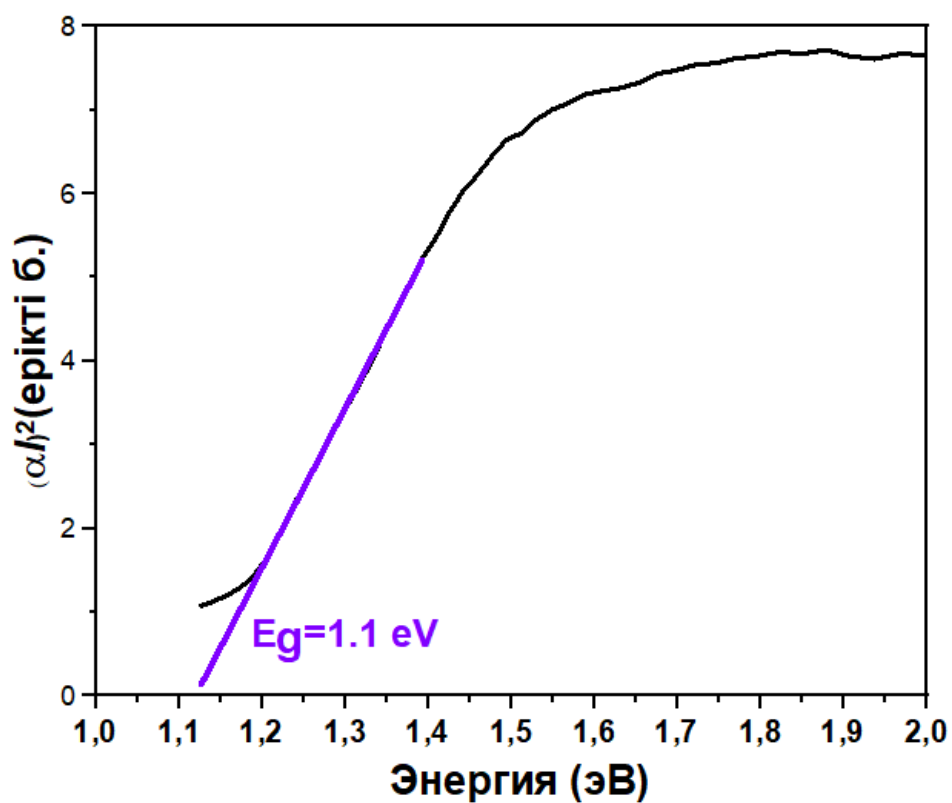


13 сурет – ED270 және ED350 үлгілердің Раман шашырау нәтижелері

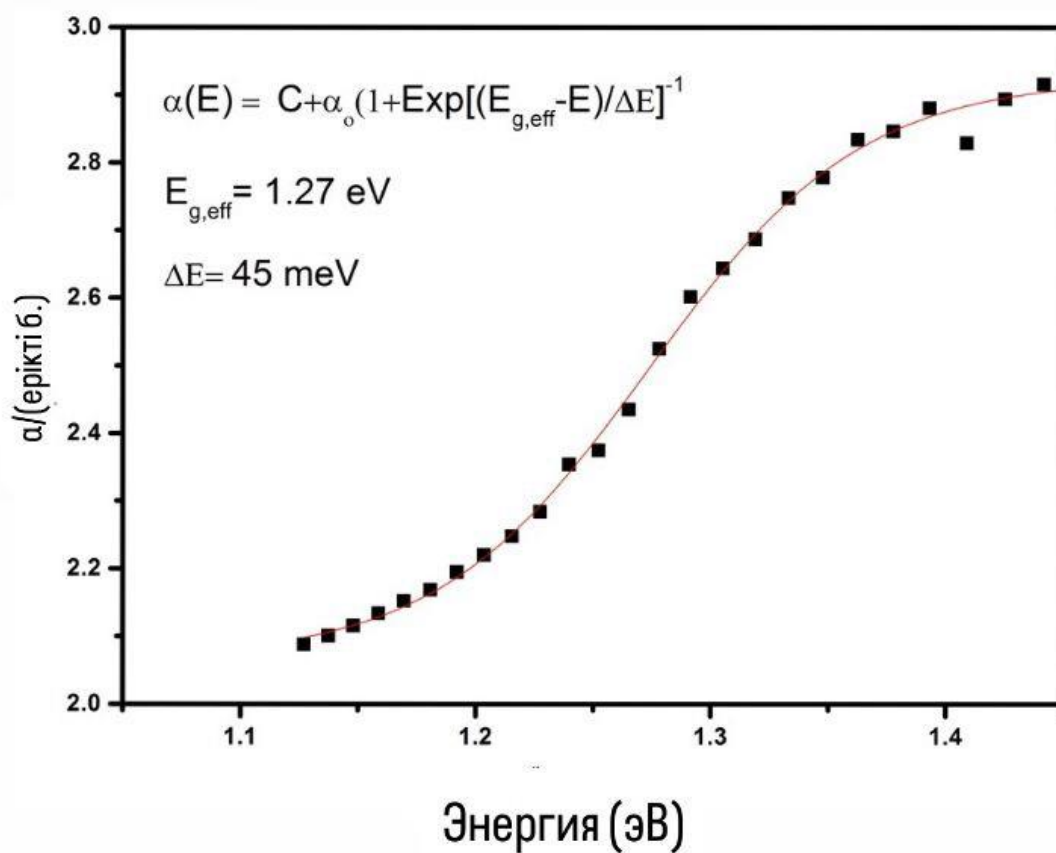
## 2.6 Оптикалық спектрлерден жұтылу енін анықтау

Көрінетін-жақын инфрақызыл шағылысу спектрлері бөлме температурасында спектрофотометрді пайдаланып 300 – 1200 нм диапазонында жазылды. Бұл дипломдық жұмыста зертеулерге 2 әдісті қолдандық таук әдісін және сигмоидты фитинг процедурасы. Таук әдісімен анықталған ED350 үлгісінің тыйым салынған аумағы 1,1 эВ құрады (сурет 14). ED270 жұтылу спектріне қолданылған сигмоидты фитинг процедурасы 1,27 эВ үшін тиімді жұтылу энергиясын береді (сурет 15).





14 сурет – Таук әдісімен анықталған ED350 үлгісінің тыйым салынған аумағы



15 сурет – ED270 үлгісінің тыйым салынған аумағы графигі

## ҚОРЫТЫНДЫ

$Sb_2Se_3$  сүрме селенидінің жұқа қабықшалары қарапайым әдіспен синтезделді - электрохимиялық тұндыру; Рентгенге құрылымдық сараптамасы үлгілерде орторомбиялық фазалы селенид сүрмесі түзілгенін көрсетеді. Раман спектроскопия көмегімен үлгілердің құрылым зерттелді.  $150\text{ см}^{-1}$ ,  $190\text{ см}^{-1}$  және  $210\text{ см}^{-1}$  кезіндегі  $Sb_2Se_3$  негізгі Раман шыңдары барлық үлгілерде. Тиімді оптикалық жолақ ені ED270 үлгісі үшін  $0,97\text{ эВ}$  құрайды.  $1,27\text{ эВ}$  тиімді оптикалық тиым салынған аумақтың ені  $270\text{ }^\circ\text{C}$  температурада күйдірілген үлгі үшін сигмоидальды абсорбциялық жуықтау арқылы анықталды, ал  $350\text{ }^\circ\text{C}$  температурада күйдірілген үлгі үшін Таук әдісімен  $1,1\text{ эВ}$  тиым салынған аумақ ені алынды.  $Sb_2Se_3$  негізіндегі жұқа қабықшалы күн батареяларын талдау да құрылғылардың салыстырмалы түрде жақсы жарыққа ие екенін көрсетті. Қолайлы жолақ аралығы мен жоғары сіңіру коэффициентіне байланысты бақылау, ал тасымалдаушы бақылау, яғни. Фотогенерацияланған тасымалдаушыларды жинау тиімділігін айтарлықтай жақсарту қажет. Жалпы, бұл зерттеу қамтамасыз етеді

Материалдың қасиеттері мен құрылғы сипаттамалары туралы негізгі білім және негізгі зерттеу бағыттарын ұсынады күн панелінің өнімділігінің шектеуші факторларын еңсеру.

## **ҚЫСҚАРТЫЛҒАН СӨЗДЕР**

CIGS - Мыс индий галий селениді.

СЭМ - Сканерлеуші электронды микроскоп.

FTO - фтор қосылған қалайы оксиді.

PVD - Вакуумдық шашырату.

DI - ионсыздандырылған су.

CVD - Газ фазасынан химиялық тұндыру.

ALD - Атом қабатының қолданылуы.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

3. M. Frumar, J. Jedelsky, B. Frumarov, T. Wagner and M. Hrdlicka, Optically and thermally induced changes of structure, linear and nonlinear optical properties of chalcogenides thin films, *J. Non-Cryst. Solids*, 2003, **326–327**, 399–404.
4. Pelabon H. Thermal Analysis of the Systems Antimony-Tellurium and Selenium-Antimony // *Compt. Rend.* – 1906. – Vol.142. – P.207–210.
5. Pélabon H. Sur les mélanges de certains sulfures et séléniures avec les métaux correspondants // *J. Chim. Phys.* – 1904. – Vol. 2. – P. 321-339.
6. Parravano M. System: Antimony-Selenium // *Gaz~ Chim. Ital.* – 1913. – Vol. 43. – P. 210-220.,
7. Ayukawa M. Research on Selin and antimony alloys // *Tokyo Acad. J.* – 1916. – Vol. 37, №3. – P. 319-324.
8. Ghosh G. The Sb-Se (antimony-selenium) system // *Journal of phase equilibria.* – 1993. – Vol. 14, №6. – P. 753-763
9. Hillert M., Jansson B. O., Sundman B. O., Ågren J. A two-sublattice model for molten solutions with different tendency for ionization // *Metallurgical Transactions A.* – 1985. – Vol. 16, №1. – P. 261-266., Myers M. B., Berkes J.S. Phase separation in amorphous chalcogenides // *Journal of Non-Crystalline Solids.* – 1972. – Vol. 8. – P. 804-815.
10. Clavaguera-Mora M.T., Clavaguera N., Onrubia J. Chemical short-range order and phase diagram calculations in some glass-forming chalcogenide systems // *Calphad.* – 1984. – Vol. 8, №2. – P. 163-17.
11. Jordan A.S. A theory of regular associated solutions applied to the liquidus curves of the Zn-Te and Cd-Te systems // *Metallurgical Transactions.* – 1970. – Vol. 1, №1. – P. 239-249
12. Predel B., Piehl J., Pool M.J. Contribution to the Understanding of the Thermodynamic Properties of Liquid Tl-Se-, Bi-Se-, Sb-Se-Alloys // *Z Metallkd.* – 1975. – Vol. 66, №7. – P. 388-395.
13. Pelabon H. Sur la Resistivite des Seleniures d'Antimoine // *Acad. des Sciences, Comptes Rendus.* -1911. T. 152. – C. 1302.
14. Pelabon H. Sur les Proprietes des Mixtes Selenium et Antimoine // *Annales de Chimie.* - 1920. - T.13. – C.121.
15. Cullity B. D., Telkes M., Norton J. T. Electrical resistivity and thermoelectric power of—Antimony-selenium alloys— // *JOM.* – 1950. – T. 2. – №. 1. – C. 47-52
16. Tan X., Li Q., Ren D. One dimensional MOSFETs for sub-5 nm highperformance applications: a case of Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> nanowires // *Physical Chemistry Chemical Physics.* – 2023
17. Xiao L., Liu Z., Feng W. Self-powered photodetector with fast response based on Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/Cu<sub>2</sub>S/Si heterojunction // *Optical Materials.* – 2023. – T. 137. – C. 113512.
18. Dönges E. Über Chalkogenohalogenide des dreiwertigen Antimons und Wismuts. I. Über Thiohalogenide des dreiwertigen Antimons und Wismuts

//Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. – 1950. – T. 263. – №. 1-3. – C. 112-132.

19.Tideswell N. W., Kruse F. H., McCullough J. D. The crystal structure of antimony selenide,  $Sb_2Se_3$  //Acta Crystallographica. – 1957. – T. 10. – №. 2. – C. 99- 102.,

20.Voutsas G. P. et al. The crystal structure of antimony selenide,  $Sb_2Se_3$  //Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials. – 1985. – T. 171. – №. 1-4. – C. 261-268.

21.Cook R. B. Handbook of Mineralogy-Volume 5, Borates, Carbonates, Sulfates //Rocks and Minerals. – 2004. – T. 79. – №. 2. – C. 137

22.Zhao M. et al. Sodium-mediated epitaxial growth of 2D ultrathin  $Sb_2Se_3$  flakes for broadband photodetection //Advanced Functional Materials. – 2020. – T. 30. – №. 13. – C. 1909849.,

23.Duan Z. et al.  $Sb_2Se_3$  Thin-Film Solar Cells Exceeding 10% Power Conversion Efficiency Enabled by Injection Vapor Deposition Technology //Advanced Materials. – 2022. – T. 34. – №. 30. – C. 2202969

24.F. Koç, M. Sahin, Appl. Phys. A 125, 705 (2019).

25.K.D. Arun, K.R. Thomas, S.V.V. Ganesh, M. Shkir, S.A.J. Thirumalai, Appl. Phys. A 30, 12566–12576 (2019).

26.Q. Hao, J. Pang, Y. Zhang, J. Wang, L. Ma, O.G. Schmidt, Adv. Opt. Mater. 6, 1 (2018),8-A.S.M. Ahmad, R. Shakil, K. Uzma, A. Zahid, A. Afzal, K.A. Mahmood, Appl. Phys. A 125, 713 (2019).

27.E.A. El-Sayad, J. Non. Cryst. Solids 354, 3806 (2008)13-A.P. Torane, K.Y. Rajpure, C.H. Bhosale, Mater. Chem. Phys. 61, 219 (1999).

28.K. Shen, C. Ou, T. Huang, H. Zhu, J. Li, Z. Li, Y. Mai, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 186, 58 (2018).

29.X. Hu, J. Tao, S. Chen, J. Xue, G. Weng, Z. Hu, J. Jiang, S. Chen, Z. Zhu, J. Chu, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 187, 170 (2018).

30.C. Yuan, L. Zhang, W. Liu, C. Zhu, Sol. Energy 137, 256 (2016)

31.Y. Cao, X. Zhu, H. Chen, X. Zhang, J. Zhou, Z. Hu, J. Pang, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 200, 109945 (2019).

32.Zeng et al., 2016; Zhou et al.,2014

33.Каракас пен Гонзе, 2005; Тидсвелл және басқалар, 1957; Зенг және басқалар, 2016.

34.Zhou et al.,2015

35.Tan et al., 2017

36.C. Chen, W. Li, Y. Zhou, C. Chen, M. Luo, X. Liu, J. Tang, Optical properties of amorphous and polycrystalline  $Sb_2Se_3$  thin films prepared by thermal evaporation, Appl. Phys. Lett. 107 (4) (2015).

37.Fern´andez, M. Merino, Preparation and characterization of  $Sb_2Se_3$  thin films prepared by electrodeposition for photovoltaic applications, Thin Solid Films 366 (1–2) (2000) 202–206.

- 38.Y. Lai, Z. Chen, C. Han, L. Jiang, F. Liu, J. Li, Y. Liu, Preparation and characterization of Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin films by electrodeposition and annealing treatment, *Appl. Surf. Sci.* 261 (2012) 510–514.
- 39.M. Dhankhar, O. Pal Singh, V.N. Singh, Physical principles of losses in thin film solar cells and efficiency enhancement methods, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 40 (2014) 214–223.
- 40.S. Minoura, K. Kodera, T. Maekawa, K. Miyazaki, S. Niki, H. Fujiwara, Dielectric function of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-based polycrystalline materials, *J. Appl. Phys.* 113 (6) (2013).
- 41.C. Chen, D.C. Bobela, Y. Yang, S. Lu, K. Zeng, C. Ge, J. Tang, Characterization of basic physical properties of Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> and its relevance for photovoltaics, *Front. Optoelectron.* 10 (1) (2017) 18–30.
- 42.Yin et al., 2014.
- 43.Bosio et al., 2016.
- 44.Lai et al., 2012a; Lai et al., 2012b.
- 45.Li et al., 2011; Sankapal et al., 2001.
- 46.Mustafa et al., 2011.
- 47.T.D.C. Hobson, O.S. Hutter, M. Birkett, T.D. Veal, K. Durose, Growth and characterization of Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> single crystals for fundamental studies, in: 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC, 2018.
- 48.Slonopas, N.K. Dhar, H. Ryan, J.P. Ferrance, P. Norris, A.K. Sood, Efficient optimization of the optoelectronic performance in chemically deposited thin films. *Thin Film Processes - Artifacts on Surface Phenomena and Technological Facets*, 107, 2017.
- 49.R. Tang, X. Chen, Y. Luo, Z. Chen, Y. Liu, Y. Li, G. Liang, Controlled sputtering pressure on high-quality Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin film for substrate configured solar cells, *Nanomaterials* 10 (3) (2020) 574.
- 50.S.-J. Cho, M.-J. Uddin, P. Alaboina, Review of nanotechnology for cathode materials in batteries, in: *Emerging Nanotechnologies in Rechargeable Energy Storage Systems*, Elsevier, 2017, pp. 83–129.
- 51.M. Kaelin, D. Rudmann, andamp, A.N. Tiwari, Low-cost processing of CIGS thin film solar cells, *Sol. Energy* 77 (6) (2004) 749–756.
- 52.H. Katagiri, K. Jimbo, W.S. Maw, K. Oishi, M. Yamazaki, H. Araki, andamp, A. Takeuchi, Development of CZTS-based thin film solar cells, *Thin Solid Films* 517 (7) (2009) 2455–2460.
- 53.X. Liang, X. Chen, Z. Li, G. Li, J. Chen, L. Yang, Y. Mai, Effect of deposition pressure on the properties of magnetron sputtering-deposited Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin-film solar cells, *Appl. Phys. A* 125 (6) (2019).
- 54.S. Chen, X. Hu, J. Tao, Effects of substrate temperature on material and photovoltaic properties of magnetron-sputtered Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin films, *Appl. Opt.* 58 (11) (2019) 2823.
- 55.X. Liu, J. Chen, M. Luo, M. Leng, Z. Xia, Y. Zhou, S. Qin, D.J. Xue, L. Lv, H. Huang, D. Niu, Thermal evaporation and characterization of Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin film for



substrate Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/CdS solar cells, ACS Appl. Mater. Interfaces 6 (13) (2014) 10687–10695.

56.J.B. Mooney, S.B. Radding, Spray pyrolysis processing, Annu. Rev. Mater. Sci. 12 (1) (1982) 81–101.

57.Nature.com/articles/s41560-020-0652-3

58.Sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X22000226

59.Pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.1c02393