

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОФІЗИКИ І РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Доброжан Андрій Ігорович

УДК 621.383:537.221

**ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ І
ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ ГЕТЕРОСИСТЕМ СУЛЬФІДУ І
ТЕЛУРИДУ КАДМІЮ ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ
МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ**

01.04.07 - фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» МОН України м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Хрипунов Геннадій Семенович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України,
проректор з науково-педагогічної роботи

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Береснєв В'ячеслав Мартинович,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна МОН України,
професор кафедри матеріалів
реакторобудування та фізичних технологій

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Прохоренко Євген Михайлович,
Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України,
провідний науковий співробітник відділу фізики взаємодії
випромінювання з речовиною

Захист відбудеться **«27» квітня 2021 р.** о **14⁰⁰** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.245.01 в Інституті електрофізики і радіаційних технологій НАН України за адресою: 61003, м. Харків, пров. Подільський, 2, корпус У-3, НТУ «ХПІ», ауд. 204.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України за адресою: 61024, м. Харків, вул. Гуданова, 13 і за посиланням:

<http://www.iert.kharkov.ua/ru/Acamedic%20Council.html>.

Відгук на автореферат дисертації надсилати на адресу: 61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28, а/с 8812.

Автореферат розісланий **«17» березня 2021 р.**

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.245.01



Пойда А.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час сонячні елементи (СЕ) на основі напівпровідникових тонкоплівкових (ТП) шарів сульфїду та телуриду кадмію (CdS та CdTe, відповідно) займають суттєвий обсяг ринку фотоелектричних перетворювачів. Ці матеріали при використанні в ТП СЕ мають низку переваг перед традиційними приладовими структурами на основі кристалічного кремнію завдяки своїм економічності, низькій енерго- та матеріалоємності. Це говорить про те, що дослідження з пошуку та створення нових технологій дешевого і ефективного виготовлення плівок CdS та CdTe приладової якості актуальні. СЕ з високою ефективністю, як правило, виготовлюються за допомогою високотемпературної технології сублімації з близької відстані, яка є досить дорогою і енергоємною технологією отримання напівпровідникових шарів. Також даний технологічний процес відбувається при високих значеннях температури підкладки, що в свою чергу виключає створення нових типів приладових структур, наприклад, на поліїмідних гнучких підкладках.

Для виготовлення високоефективних ТП СЕ серед низькотемпературних методів отримання плівок телуриду кадмію широко відомий в промисловості метод високочастотного магнетронного розпилення. При всіх перевагах, метод високочастотного магнетронного розпилення є дорогим методом отримання напівпровідникових структур. Серед методів магнетронного розпилення велику привабливість використання в технологічних ланцюгах має магнетронне розпилення на постійному струмі. Цей найбільш перспективний для підприємств електронного профілю України метод має високу здатність масштабувати виробничі потужності, а також має меншу вартість обладнання та витратних матеріалів. Результати дослідження високоефективних СЕ на основі функціональних ТП шарів сульфїду та телуриду кадмію, отриманих методами високочастотного магнетронного розпилення широко представлені в технічній науковій літературі. Однак набагато менша увага приділяється проведенню досліджень по оптимізації умов осадження методом магнетронного розпилення на постійному струмі плівок CdS і CdTe протягом однієї технологічної операції, формування гетеросистеми CdS/CdTe та її використання у складі СЕ.

Виходячи з високоенергетичних умов одержання, коли у зростаючих шарах, отриманих методом магнетронного розпилення, накопичуються радіаційні дефекти, можна спрогнозувати стабільність їх кристалічної структури та фізичних властивостей до подальшого радіаційного впливу. Широко відомо з технічної літератури, що телурид і сульфід кадмію є радіаційностійкими матеріалами. На основі кристалів CdTe і дрібних монокристалів CdS виготовляють сцинтиляційні датчики. Але дослідження радіаційної стійкості сонячних елементів на основі телуриду кадмію, за рідким виключенням, не проводяться. При цьому основна увага приділяється впливу електронного пучка та потоку протонів на ефективність таких приладових структур. Таким чином проблема радіаційної стійкості даних приладових структур залишається актуальною. В першу чергу, тому що актуальним

є дослідження можливості стабільного використання плівкових СЕ на основі телуриду кадмію на об'єктах з підвищеним радіаційним фоном, таких як зони розташування сонячних електростанцій поблизу АЕС, могильників радіоактивних відходів, або використання СЕ на гнучких поліімідних підкладках в космічному просторі під постійним впливом іонізуючого випромінювання.

Виходячи з цього, незважаючи на прогрес у вдосконаленні конструктивно-технологічних рішень у виготовленні ТП СЕ на основі базового шару CdTe для наземного використання, задача дослідження можливості отримання методом магнетронного розпилення на постійному струмі плівок сульфїду та телуриду кадмію приладової якості та аналіз впливу дії різного іонізуючого випромінювання на кристалічну структуру і оптичні властивості цих плівок з метою створення сонячних елементів на їх основі залишається актуальною технічною задачею фізики твердого тіла.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

Робота виконувалась на кафедрі фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» у рамках держбюджетних тем № 0116U000934 «Розробка конструктивного рішення гнучкої тонкоплівкової сонячної батареї для гібридної термофотоенергетичної установки автономного теплопостачання» (2016 – 2018 рр.); № 0118U002049 «Фізичні основи створення металевих матеріалів та напівпровідникових приладових структур для ядерної, термоядерної та позаатмосферної геліоенергетики» (2018 – 2020 рр.).

Мета роботи і задачі дослідження.

Мета дисертаційної роботи полягає у розробці фізико-технологічних основ отримання методом нереактивного магнетронного розпилення на постійному струмі плівкових шарів сульфїду та телуриду кадмію для їх використання в якості функціональних шарів сонячних елементів та дослідження впливу іонізуючого випромінювання на кристалічну структуру та оптичні властивості таких плівок та вихідні параметри і світлові діодні характеристики сонячних елементів на їх основі.

Для досягнення поставленої мети для тонкоплівкових шарів сульфїду та телуриду кадмію, отриманих методом нереактивного магнетронного розпилення на постійному струмі, необхідно було вирішити комплекс задач фундаментального та прикладного характеру:

1. Дослідити вплив технологічних параметрів нереактивного магнетронного розпилення на постійному струмі на кристалічну структуру та оптичні властивості плівок сульфїду кадмію.

2. Дослідити вплив технологічних параметрів нереактивного магнетронного розпилення на постійному струмі на кристалічну структуру та оптичні властивості плівок телуриду кадмію.

3. Дослідити вплив іонізуючого випромінювання на кристалічну структуру та оптичні властивості плівок сульфїду та телуриду кадмію отриманих методом нереактивного магнетронного розпилення на постійному струмі.

4. Провести порівняльні дослідження впливу іонізуючого випромінювання на вихідні параметри та світлові діодні характеристики сонячних елементів на основі гетеросистеми сульфїду та телуриду кадмію отриманих методом неактивного магнетронного розпилення на постійному струмі.

Об'єкт дослідження – кристалічна структура, оптичні властивості плівок сульфїду та телуриду кадмію, отриманих методом магнетронного розпилення на постійному струмі, та вихідні параметри приладових структур на їх основі.

Предмет дослідження – вплив конструктивно-технологічних рішень отримання шарів сульфїду та телуриду кадмію при їх використанні як функціональних шарів тонкопліткових сонячних елементів на вихідні параметри таких приладів, а також на деградаційну стійкість таких приладових структур під впливом іонізуючого космічного випромінювання.

Методи дослідження. Функціональні шари сульфїду та телуриду кадмію конденсувались методом неактивного магнетронного розпилення на постійному струмі в модернізованій промисловій установці ВУП-5М. Дослідження кристалічної структури плівок CdS та CdTe рентгендифрактометричними методами проводилось за допомогою рентгендифрактометра ДРОН-4М, методом растрової електронної мікроскопії за допомогою растрового електронного мікроскопа VEGA3-TESCAN. Дослідження оптичних властивостей плівок CdS та CdTe проводилось методами оптичної спектрометрії за допомогою оптичного спектрофотометру СФ-2000. Для вивчення ефективності фотоелектричних процесів у пліткових сонячних елементах на основі гетеросистеми CdS/CdTe проводилися вимірювання та аналітична обробка їх світлових вольт-амперних характеристик.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше за рахунок нагрівання поверхні мішені для інтенсифікації теплового випромінювання вторинних електронів в зоні магнетронового розряду і зниження електричного опору мішені в результаті теплової генерації основних носіїв методом магнетронного розпилення на постійному струмі виготовлені тонкопліткові шари сульфїду та телуриду кадмію приладової якості.

2. Вперше встановлено, що оптичні характеристики досліджених плівок CdS та CdTe нечутливі до опромінення жорстким ультрафіолетом, незважаючи на зафіксоване експериментально збільшення періоду кристалічної ґратки та областей когерентного розсіювання.

3. Вперше підтверджена стабільність параметрів кристалічної структури та оптичних властивостей плівок сульфїду та телуриду кадмію, отриманих методом магнетронного розпилення на постійному струмі, після дії електронного випромінювання з енергією часток 20 кеВ.

4. Вперше встановлено, що короткотерміновий вплив потоку високоенергетичної гелієвої плазми не погіршує кристалічних властивостей базових шарів телуриду кадмію, а, маючи характер високотемпературного відпалу у приповерхневому шарі плівок, зменшує розтискаючі макронапруження дефектних плівок CdTe метастабільної гексагональної фази.

5. Вперше експериментально показано, що для СЕ на основі базового шару CdTe, отриманого магнетронним розпиленням на постійному струмі, на відміну від СЕ на основі базових шарів CdTe, отриманих високотемпературними методами осадження у квазізамкненому об'ємі, термічного випаровування та традиційних приладових структур на основі монокристалічного кремнію, після опромінення жорстким ультрафіолетовим випромінюванням з головною модою енергії квантів 10,5 еВ спостерігається незначне зростання ККД.

6. Вперше експериментально встановлено, що для СЕ на основі базового шару CdTe отриманого магнетронним розпиленням на постійному струмі, в порівнянні з СЕ на основі базового шару CdTe, отриманого високотемпературним методом осадження у квазізамкненому об'ємі, спостерігається менша схильність до деградації вихідних параметрів після дії електронного випромінювання з енергією часток 75 кеВ.

7. Вперше встановлено, що циклічний високоенергетичний вплив гелієвої плазми з густиною енергії $\geq 0,2$ МДж/м² безпосередньо на фронтальну або тильну поверхню тонкоплівкового СЕ на основі базового шару CdTe без залежності від методу отримання структурних шарів призводить до абсолютного зниження його вихідних параметрів та світлових діодних характеристик та повного його руйнування.

Практичне значення одержаних результатів.

При густині струму плазмового розряду 1,1 мА/см² та швидкості осадження 25 нм/хв. отримано шари CdS гексагональної модифікації. Ширина забороненої зони CdS в отриманих плівках складає $E_g = 2,38 - 2,41$ еВ. При товщині 160-370 нм, ці плівки не мають наскрізних пор, на відміну від плівок одержаних термічним випаровуванням при тій же товщині, і після відпалу у вакуумі їх оптична прозорість зростає до 90%. Такі характеристики отриманих плівок дають змогу використовувати їх у якості «широкозонного вікна» у фотоперетворювачах на основі гетеропереходів CdS/CdTe без ризику їх закорочування.

При густині струму плазмового розряду 2,2-5,4 мА/см² та швидкості осадження 200 нм/хв. отримано шари CdTe метастабільної гексагональної модифікації товщиною до 5 мкм. Ширина забороненої зони CdTe отриманих шарів різної товщини становить 1,52-1,54 еВ. Після хлоридної обробки в результаті фазового переходу в'юрцит-сфалерит досліджені плівки CdTe містять тільки стабільну кубічну модифікацію з параметром кристалічної ґратки $a = 6,4905$ Å. Такі плівки телуриду кадмію можуть бути використані в якості базових шарів сонячних елементів на основі полікристалічних гетеросистем CdS/CdTe.

За допомогою використання методу магнетронного розпилення на постійному струмі можливо отримувати функціональні шари CdS та CdTe для СЕ на основі гетеросистеми CdS/CdTe на гнучких поліімідних підкладках зі значенням ККД таких приладових структур на рівні 3,1%. Попереднє охолодження до кімнатної температури гетеросистеми поліімід/ІТО/CdS та послідуочий нагрів до $T_n = 280 - 320^\circ\text{C}$ безпосередньо перед процесом осадження шару CdTe впливає на рекристалізацію структури шару CdS. Зменшення негативного впливу

дрібнокристалічного дефектного шару на міжфазній границі CdS/CdTe позитивно впливає на кристалічну структуру зростаючого базового шару та збільшення розміру зерна в шарах CdTe.

Сонячні елементи на основі базового шару CdTe, отриманого магнетронним розпиленням на постійному струмі, мають стабільні вихідні параметри та світлові діодні характеристики під впливом опромінення жорстким ультрафіолетом з головною модою енергії квантів 10,5 eV і часом опромінення 8 годин та дії електронного випромінювання після 45 хвилин дії електронного випромінювання при струмі 0,2 мкА і напрузі прискорення електронного пучка 75 кВ на рівні зміни ККД приладової структури + 0,02 відн. од. та - 0,11 відн. од. відповідно в порівнянні з СЕ, гетеросистеми CdS/CdTe яких конденсувались вакуумними методами квазізамкненого об'єму, термічного випарювання, та монокристалічними кремнієвими СЕ.

Результати дисертації впроваджено у технологічний процес Товариством з обмеженою відповідальністю НМУ «Електропівденмонтаж» (м. Харків). Це підтверджено Актом передачі та використання науково-технічних результатів дисертаційного дослідження, який міститься у Додатку А дисертації.

Особистий внесок здобувача. Автор дисертації особисто здійснював пошук та аналіз літературних джерел за темою дисертації, брав участь у постановці мети і задач дослідження, виборі експериментальних методик, в обговоренні і аналізі отриманих результатів досліджень, написанні всіх статей і тез доповідей. Дисертант в різних фізико-технологічних умовах на різних підкладках отримував плівки сульфїду та телуриду кадмію, проводив аналітичну обробку експериментальних рентгендифрактограм для визначення структурних параметрів досліджуваних об'єктів. Вимірював та здійснював послідовуючу аналітичну обробку експериментальних спектральних залежностей для дослідження оптичних характеристик отриманих шарів. Виконував вимірювання та проводив аналітичну обробку світлових вольт-амперних характеристик для визначення вихідних параметрів та світлових діодних характеристик досліджуваних сонячних елементів на основі гетероструктури CdS/CdTe. Автор обробляв та інтерпретував результати електронно-мікроскопічних досліджень, брав участь у підготовці та оформленні матеріалів для публікацій.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації пройшли апробацію на: 7-ма Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» СЕМСТ-7 (Одеса, 2016); VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-7 (Дніпро, 2016); XVI Міжнародної конференції «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем» МКФТТПН-XVI (Івано-Франківськ, 2017); IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties NAP-2017 (Zatoka, Ukraine, 2017); IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON (Kyiv, Ukraine, 2017); IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF-2017 (Lviv, Ukraine, 2017); V Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» НМІТФ-

2018 (Кременчук, 2018); VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” СЕМСТ-8 (Одеса, 2018); IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties NAP-2018 (Zatoka, Ukraine, 2018); VIII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-8 (Ужгород, 2018); XVII International Freik Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems ICPTTFN-XVII (Івано-Франківськ, 2019); IEEE 9th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties NAP-2019 (Odesa, Ukraine, 2019).

Публікації. Результати досліджень, викладених у дисертації, опубліковані у 19 наукових працях, з яких 4 статті опубліковані у виданнях, що індексуються міжнародною науково-метричною базою даних «Scopus», 3 статті опубліковані в спеціалізованих наукових журналах, що входять до переліку фахових видань МОН України, 3 матеріалів міжнародних конференцій, що входять до міжнародної науково-метричної бази даних «Scopus», та 9 тез доповідей міжнародних і вітчизняних наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, переліку використаних джерел із 136 джерел і 2 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 146 сторінок (з яких власне текстова складова міститься на 112 сторінках), у тому числі 53 рисунок та 12 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації; показано зв’язок роботи з науковими темами; визначено мету і задачі дослідження, об’єкт і предмет досліджень; наведено методи дослідження; сформульовано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів; визначено особистий внесок здобувача та наведено інформацію про апробацію результатів дисертації, публікації та структуру і обсяг дисертації.

У першому розділі «Конструктивні особливості та технологія отримання сонячних елементів на основі гетеросистеми сульфїду та телуриду кадмію» розглянуто загальні характеристики методів магнетронного розпилення напівпровідникових тонкоплівкових шарів. Розглянуто вплив параметрів технології виготовлення на кристалічну структуру, фізичні властивості тонких напівпровідникових плівок сульфїду кадмію CdS та телуриду кадмію CdTe. Розглянуто вплив електронного та протонного випромінювання на кристалічну структуру та оптичні властивості тонкоплівкових шарів CdS та CdTe та вихідні та світлові діодні параметри сонячних елементів на основі гетеросистеми CdS/CdTe.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить, що метод магнетронного розпилення на постійному струмі має переваги порівняно з використанням інших вакуумних методів конденсації тонких плівок, а саме – економічність, можливість масштабування виробничих потужностей, низькі температури підкладки, високе відношення потужності іонного потоку на мішень до всієї потужності системи,

високу енергетичну ефективність процесу іонного розпилення та високу енергетичну ефективність всієї системи розпилення, але має технологічні складнощі з розпилюванням напівпровідникових матеріалів.

Виявлено, що напівпровідникові плівки сульфїду та телуриду кадмію приладової якості виготовлюють методом високочастотного магнетронного розпилення з послїдувальною термічною та/або хлоридною обробкою для отримання сонячних елементів з ККД вище 10%. Однак відсутня інформація щодо виготовлення методом магнетронного розпилення на постійному струмі гетеросистем CdS/CdTe для створення сонячних елементів на їх основі.

Виявлено, що дослідження впливу іонізуючого випромінювання на структуру та оптичні характеристики шарів сульфїду та телуриду кадмію, а також вихідних параметрів та світлових діодних характеристик СЕ на основі гетеросистем CdS/CdTe базується виключно на дослідженнях впливу випромінювання високої густини потоку високоенергетичних електронів та протонів, що не розглядає інші складові спектру космічного випромінювання та не в повному обсязі відображає вплив та механізми дії такого випромінювання на вихідні параметри СЕ у космічному просторі.

На основі узагальнення літературних даних сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі «Методика отримання та дослідження зразків» викладено спосіб отримання тонких напівпровідникових шарів сульфїду та телуриду кадмію методом магнетронного розпилення на постійному струмі і методи дослідження їх властивостей.

Для отримання тонких плівок напівпровідників CdS та CdTe методом неактивного магнетронного розпилення на постійному струмі був розроблений і виготовлений магнетрон, адаптований до конструкції стандартної промислової вакуумної установки ВУП-5м. Джерелом розпилення матеріалу служила мішень, що являє собою диск діаметром 74 мм, спресований з порошку сульфїду кадмію чи телуриду кадмію чистотою 99,99%. Пресування мішені відбувалося методом вологого пресування з використанням виготовленої пресувальної форми та з використанням ізопропілового спирту при високому тиску до утворення твердої таблетки. Після дії гідравлічного пресу на матеріал мішені відбувався процес відпалу мішені у вакуумі при залишковому тиску більше $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па і температурі 60-80°C протягом 3 годин задля зменшення вмісту органічних забруднень.

Мішень розташовувалася на поверхні магнетрона. Особливістю будови магнетронної системи є те, що контур охолодження охоплював лише магнітну систему, тому не було примусового охолодження розпиленої мішені.

Підкладка та нагрівач, особливістю якого був радіаційний спосіб нагріву підкладки, розташовувалася у тримачі підкладок. Підкладка фіксувалася так, щоб площа контакту підкладки з металевими частинами конструкції була мінімальною, що давало можливість зменшувати тепловідведення. Така конструкція давала змогу рівномірно по площі розігрівати підкладку до встановленої температури в інтервалі 20-350°C і підтримувати температуру з точністю приблизно 4°C за допомогою

ручної системи регулювання. Для вимірювання температури підкладки використовували хромель-алюмелеву термопару, гарячий кінець якої, з метою поліпшення теплового контакту, знаходився безпосередньо на матеріалі підкладки.

Загальний тиск розпилювального газу, необхідний для стабільної роботи магнетрона, становив 0,6-0,9 Па. Вимірювання вакууму проводилося за допомогою штатного цифрового вакуумметра вбудованого у ВУП-5м. Відстань від підкладки до мішені не перевищувала 50 мм, при цьому неоднорідність одержуваної плівки по товщині, з урахуванням геометричного фактора, не перевищує 5%.

Попереднє розпилення мішені, з метою видалення сорбованих її поверхнею сторонніх атомів, починалося з подачі напруги на катод магнетрона. Підкладку при цьому пересували в положення, в якому було б виключено потрапляння на її поверхню атомів, розпилених з мішені. Далі температуру підкладки зменшували до значення, обраного в якості робочого в даному експерименті, після чого підкладка разом з секцією нагрівача та тепловим екраном встановлювалася безпосередньо над мішенню. З цього моменту починалася конденсація розпилених з мішені атомів на підкладку. Вихід з режиму конденсації здійснювався шляхом відключення електроживлення магнетрона та нагрівача підкладки.

В роботі тонкі плівки сульфїду кадмію та телуриду кадмію формували методом нереактивного магнетронного розпилення на постійному струмі на скляних підкладках, а також на поліїмідних плівках Urilex без та з підшаром прозорого плівкового електроду ІТО/ФТО.

Кристалічну структуру та наявність кристалічних фаз в тонких плівках і наноструктурованих масивах визначали за допомогою рентгендифрактометричного аналізу (РДА) із використанням ДРОН-4м. Морфологію поверхні аналізували за допомогою електронної мікроскопії із використанням растрового електронного мікроскопа SEM «Tescan Vega 3 LMN». Дослідження спектральних залежностей коефіцієнтів пропускання T і відбиття R в спектральних діапазонах 300-1100 нм і 400-800 нм, відповідно, виконувалося за допомогою спектрофотометру СФ-2000 і приставки дзеркального і дифузного відбиття СФО-2000.

Для створення умов короткохвильового або жорсткого (100-279 нм) ультрафіолетового випромінювання було використано лампу бар'єрного розряду з робочим газом аргонем. Така лампа має максимальну енергетичну світимість у площині вікна лампи $\sim 10^{20}$ - 10^{21} квант/м² з головною модою енергії квантів 10,5 еВ, що відповідає довжині хвилі $\lambda \geq 118$ нм. Опромінені зразки щільно притискали до вікна лампи площиною 1 см² для забезпечення максимального світлового потоку, що надходив на поверхню опромінених зразків, та відсутності впливу іонізованих газів повітря.

Для дослідження впливу електронного випромінювання на структурні та оптичні властивості плівок CdS і CdTe їх було піддано опроміненню за адаптованою методикою з використанням електронного пучка штатного растрового електронного мікроскопу. Параметри опромінення становили: струм катоду 10^{-5} А, напруга 20 кВ. Площа опромінення становила 0,5 см², тривалість процесу – 600 с. Енергія електронів при цьому становила 20 кеВ, густина електронного потоку

$1,25 \cdot 10^{14}$ електронів/см²с, що відповідає загальній дозі опромінення $2,4 \cdot 10^5$ Грей, за умови маси напівпровідникової плівки з підкладкою $5 \cdot 10^{-4}$ кг.

Для електронного опромінення зразків СЕ на основі гетеросистеми CdS/CdTe використовували інший растровий електронний мікроскоп EMV-100 BR при струмі 0,2 мкА, генерований таким чином електронним пучком який протікає по електричному колі «зразок-заземлення». Обладнання дало можливість одночасно поставити 3 зразки та опромінити кожний зразок діаметром електронної плями 3 мм, площа опромінення становила 7 мм². Зразки були склеєні на столику мікроскопа струмопровідним клеєм. Напруга, що прискорює електронний пучок, у всіх експериментах підтримувалася постійною 75 кВ, тому енергія пучка електронів становила 75 кеВ. Час дії електронного опромінення складав 2700 с та густина струму в режимі випромінювання електронів 0,29 А/м², що відповідає високим дозам, поглиненого електронного випромінювання в діапазоні $1,5 \cdot 10^6$ Гр, і густині потоку електронів $1,8 \cdot 10^{14}$ е/см²с.

Для дослідження впливу потоку гелієвої плазми на структурні та оптичні властивості плівок CdTe та вихідні та світлові діодні параметри СЕ на основі гетеросистеми CdS/CdTe їх було піддано опроміненню шляхом генерації стиснутих плазмових потоків з густиною потоку близько 10^{18} см⁻³, при густині потоку енергії 0,2 МДж/м². Досліди проводилися із використанням чистого гелію при початковому тиску 266,64 Па. Амплітуда струму розряду в прискорювальному каналі становила близько 500 кА. Густина потоку плазми на 1 імпульс становила $\approx 2 \cdot 10^{23}$ м⁻². Температура всередині плазми була в інтервалі 60-120 еВ ($1 \text{ eV} \approx 1,16 \cdot 10^4$ К). Використовували 5 імпульсів, тривалість одного імпульсу дорівнювала 1 мкс. Перед кожним плазмовим імпульсом поверхня мала кімнатну температуру, під впливом He-плазми зразки розігрівалися. Довжина пауз між імпульсами була достатньою для охолодження зразків до кімнатної температури.

Для дослідження вихідних параметрів сонячних елементів на основі гетеросистеми CdS/CdTe (коефіцієнта корисної дії, густини струму короткого замикання, напруги холостого ходу і фактору заповнення) проводилося вимірювання їх світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ) у режимі освітлення АМ 1,5 при потужності світлового потоку $W = 100$ мВт/см². Подальша аналітична обробка ВАХ шляхом апроксимації експериментальних ВАХ теоретичною залежністю давала можливість визначити діодні характеристики таких сонячних елементів, а саме густину фотоструму (J_ϕ) та світлові діодні характеристики: густину діодного струму насичення (J_0), шунтуючий (R_{III}) і послідовний (R_{II}) електроопір і коефіцієнт ідеальності діода (A).

У третьому розділі «Кристалічна структура та оптичні властивості плівок сульфїду та телуриду кадмію, отриманих методом магнетронного розпилення на постійному струмі» викладено результати дослідження кристалічної структури, морфології поверхні, оптичних властивостей плівок сульфїду та телуриду кадмію, отриманих методом магнетронного розпилення на постійному струмі. Описано

методику активації процесу розпилення напівпровідникових мішеней сульфїду кадмію та телуриду кадмію магнетронним розпиленням на постійному струмі.

Метод магнетронного розпилення на постійному струмі реалізується за рахунок нагрівання поверхні мішені для інтенсифікації теплового випромінювання вторинних електронів в зоні магнетронного розряду і зниження електричного опору мішені в результаті теплової генерації основних носіїв заряду при температурах напівпровідникової мішені 156-166°C. Це дає змогу запобігти накопиченню заряду на мішені і досягти швидкостей розпилення в ≈ 10 разів більше, аніж значення, які характерні для високочастотного магнетронного розпилення.

При густині струму плазмового розряду 1,1 мА/см² та швидкості осадження 25 нм/хв отримані шари CdS гексагональної модифікації (рис. 1). Ширина забороненої зони CdS в отриманих плівках складає $E_g = 2,38-2,41$ еВ. При товщині 160-370 нм, ці плівки не мають наскрізних пор, на відміну від плівок одержаних термічним випаровуванням при тій же товщині, і після відпалу у вакуумі їх оптична прозорість зростає до 90% (рис. 2). Такі характеристики отриманих плівок дають змогу використовувати їх у якості «широкозонного вікна» у фотоперетворювачах на основі гетеропереходів CdS/CdTe без ризику їх закорочування.

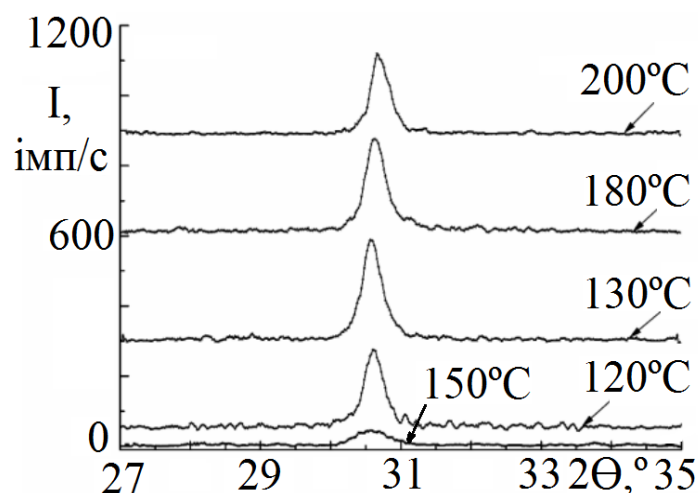


Рис. 1. Типові дифрактограми зразків шарів CdS в залежності від температури підкладки у вихідному стані.

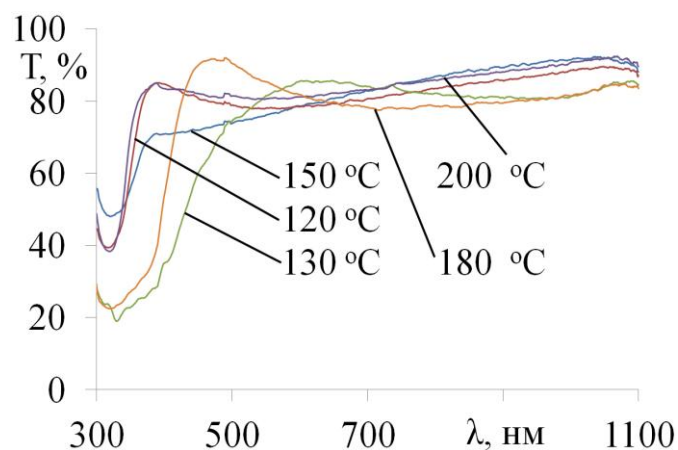


Рис. 2. Залежності коефіцієнтів пропускання відпалених у вакуумі зразків сульфїду кадмію в залежності від температури підкладки.

При густині струму плазмового розряду 2,2-5,4 мА/см² та швидкості осадження 200 нм/хв отримані шари CdTe метастабільної гексагональної модифікації товщиною до 5 мкм. Ширина забороненої зони CdTe отриманих шарів різної товщини становить 1,52-1,54 еВ (рис. 3). Після хлоридної обробки в результаті фазового переходу в'юрцит-сфалерит досліджені плівки CdTe містять тільки стабільну кубічну модифікацію з параметром кристалічної ґратки $a = 6,4905$ Å (рис. 4). Такі плівки

телуриду кадмію можуть бути використані в якості базових шарів сонячних елементів на основі полікристалічних гетеросистем CdS/CdTe.

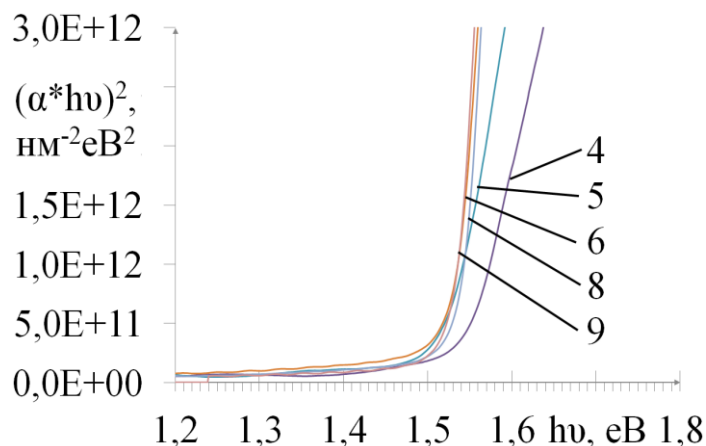


Рис. 3. Графіки залежності $(\alpha \cdot hv)^2 = f(hv)$ типових зразків телуриду кадмію (зразки 4-6, 8-9), отриманих методом магнетронного розпилення на постійному струмі.

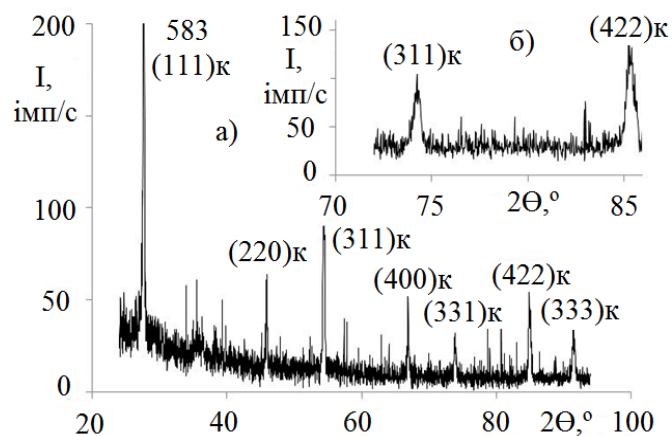


Рис. 4. Рентгендифрактограма типового зразка телуриду кадмію: а) після хлоридної обробки та відпалу на повітрі, б) «нахильні» зйомки даного зразку.

У четвертому розділі «Вплив іонізуючого випромінювання на структуру та оптичні властивості функціональних шарів сонячних елементів на основі гетеросистеми CdS/CdTe» викладено результати дослідження структури і оптичних властивостей виготовлених методом магнетронного розпилення на постійному струмі плівок сульфїду кадмію та телуриду кадмію на аморфних скляних підкладках. Показано результати обробки таких тонкопліткових зразків жорстким ультрафіолетовим випромінюванням, дії електронного випромінювання та гелієвої плазми.

Методом рентгендифрактометричного аналізу досліджено структурні параметри, шляхом спектрофотометричних досліджень визначено оптичні властивості тонких плівок сульфїду та телуриду кадмію до та після дії іонізуючих опроміненнь.

Після опромінення жорстким ультрафіолетом з головною модою енергії квантів 10,5 еВ період ґратки для плівок сульфїду кадмію збільшується від $c = 6,77(01) \text{ \AA}$ до $c = 6,78(88) \text{ \AA}$, що може бути пов'язано з утворенням точкових дефектів та дефектних комплексів. В результаті опромінення жорстким ультрафіолетом спостерігається зменшення ширини піків на рентгендифрактограмах шарів CdS і CdTe, що пов'язано зі збільшенням областей когерентного розсіювання D в результаті часткової рекристалізації приповерхневих шарів досліджених плівок. За результатами оптичних досліджень можна стверджувати, що оптичні характеристики досліджених плівок CdS і CdTe нечутливі до опромінення жорстким ультрафіолетом.

Структурні зміни в кристалічній структурі досліджених плівок сульфїду кадмію та телуриду кадмію, які підлягали дії електронного випромінювання з

енергією часток 20 кеВ, можна пояснити наявністю рухливих радіаційних точкових структурних дефектів в тонкому приповерхневому шарі плівок. Ці точкові структурні дефекти не групуються у кластери з причини їх незначної наявності в об'ємі плівок. В той час оптичні характеристики напівпровідникових плівок сульфїду та телуриду кадмію, які отримані методом магнетронного розпилення на постійному струмі, виявилися нечутливими до дії електронного випромінювання.

Після циклічної високоенергетичної дії потоку гелієвої плазми з густиною енергії $\geq 0,2$ МДж/м² безпосередньо на поверхню тонкоплівкового зразку телуриду кадмію зміни в кристалічній структурі досліджених плівок можна пояснити впливом короткотермінового високотемпературного відпалу у приповерхневому шарі плівок. Такий вплив не погіршує кристалічних властивостей базових шарів телуриду кадмію, зменшуючи розтискаючі макронапруження дефектних плівок CdTe метастабільної гексагональної фази (рис. 5). Зафіксовані зменшення середнього коефіцієнта прозорості на 62% та віддзеркалення на 20% для плівок CdTe та збільшення коефіцієнту поглинання і ширини забороненої зони телуриду кадмію до значення 1,53 еВ після дії потоку гелієвої плазми (рис. 6) можна пояснити менш розвиненою поверхнею зразків тонких плівок CdTe, порівняно з вихідним станом базових шарів.

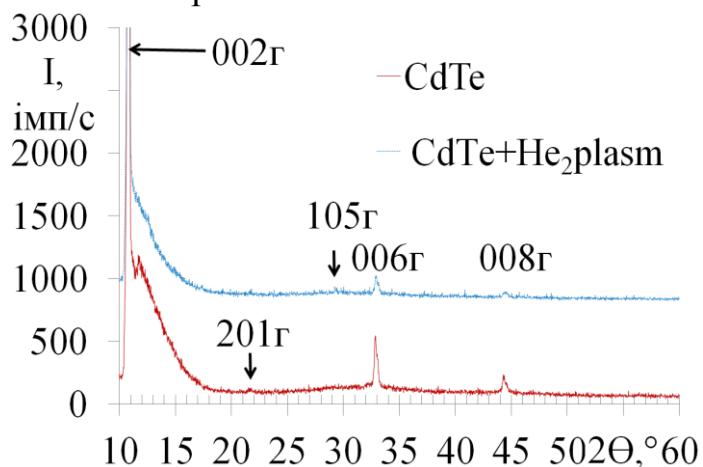


Рис. 5. Типові дифрактограми плівок CdTe у вихідному стані та після дії потоку гелієвої плазми (CdTe+He₂plasm).

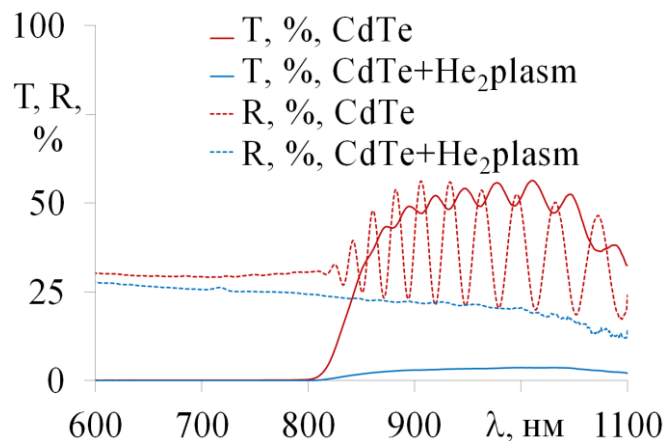


Рис. 6. Оптичні залежності коефіцієнтів пропускання та віддзеркалення плівок CdTe у вихідному стані та після дії потоку гелієвої плазми (CdTe+He₂plasm).

У п'ятому розділі «Вплив іонізуючого випромінювання на вихідні та світлові діодні характеристики сонячних елементів на основі телуриду кадмію» представлені результати дослідження впливу жорсткого ультрафіолетового випромінювання, дії електронного випромінювання та гелієвої плазми на вихідні параметри та світлові діодні характеристики сонячних елементів, виготовлених на основі гетеросистеми CdS/CdTe різними вакуумними методами, а саме методом квазізамкненого об'єму, термічного випаровування та магнетронного розпилення на постійному струмі.

За допомогою методу магнетронного розпилення на постійному струмі отримано функціональні шари CdS та CdTe для СЕ на основі гетеросистеми CdS/CdTe на гнучких підкладках зі значенням ККД таких приладових структур на рівні 3,1%. Але враховуючи, що матеріал підкладки, тобто, поліімід, може піддаватися деградації під впливом іонізуючих випромінювань різного типу, прийнято рішення для легшого відокремлення змін, які стосуються власне приладової структури і зменшення невизначеності в результатах досліджень подальші дослідження впливу елементів космічного іонізуючого випромінювання на вихідні та світлові діодні параметри СЕ на основі телуриду кадмію були проведені для сонячних елементів на скляних підкладках.

Для порівняння результатів впливу жорсткого ультрафіолетового випромінювання на вихідні параметри та світлові діодні характеристики сонячних елементів на основі гетеросистеми CdS/CdTe було прийнято рішення провести попереднє дослідження аналогічного впливу на монокристалічний кремнієвий сонячний елемент. У промислових зразків монокристалічних кремнієвих СЕ після 8 годин опромінення жорстким ультрафіолетовим випромінюванням з головною модою енергії квантів 10,5 еВ значення ККД зменшилось на 0,07 відн. од. Зменшення значень вихідних параметрів монокристалічного кремнієвого СЕ пояснюється незворотньою деградацією просвітлюючого покриття, яка призводить до зменшення фотоструму та при подальшому опроміненні такий зразок може втратити повністю фотоелектричні властивості.

Для СЕ на основі базового шару CdTe отриманого магнетронним розпиленням на постійному струмі після 8 годин опромінення жорстким ультрафіолетовим випромінюванням з головною модою енергії квантів 10,5 еВ зі сторони тильного контакту значення ККД зросло на 0,02 відн. од. У аналогічних СЕ, базові шари яких отримано методами квазізамкненого об'єму та термічного випаровування, після опромінення жорстким ультрафіолетом зміна ККД приладу становила + 0,01 відн. од. та - 0,08 відн. од., відповідно. Стабільність вихідних параметрів та світлових діодних характеристик СЕ на основі базового шару CdTe отриманого магнетронним розпиленням на постійному струмі пояснюється накопиченням точкових дефектів на границі зерна базового шару CdTe та перешкоджанням механізму дифузії атомів Си вздовж границь зерен у напрямку гетеропереходу.

Для СЕ на основі базового шару CdTe отриманого магнетронним розпиленням на постійному струмі після 45 хвилин дії електронного випромінювання при струмі 0,2 мкА та напрузі прискорення електронного пучка 75 кВ значення ККД зменшилось на 0,11 відн. од. Порівняно з СЕ, базові шари якого отримано методами квазізамкненого об'єму, зміна ККД приладу складала - 0,22 відн. од.

Низька схильність до деградації та стабільність значень вихідних параметрів та діодних характеристик СЕ на основі гетеросистеми CdS/CdTe, отриманої методом магнетронного розпилення на постійному струмі, під дією жорсткого ультрафіолету з енергією квантів 10,5 еВ та прискореного електронного пучка з енергією електронів 75 кеВ на рівні зміни ККД приладової структури + 0,02 відн. од. та

– 0,11 відн. од., відповідно, дає можливість використовувати такі СЕ у середовищах з агресивним іонізуючим випромінюванням під час довготривалого строку служби.

Циклічний високоенергетичний вплив гелієвої плазми з густиною енергії $\geq 0,2$ МДж/м² безпосередньо на фронтальну або тильну поверхню тонкоплівкового СЕ на основі базового шару CdTe призводить до абсолютного зниження його вихідних параметрів та світлових діодних характеристик та повного його руйнування без залежності від методу отримання структурних шарів. Це обмежує застосування СЕ на основі базового шару CdTe в умовах високоенергетичного впливу гелієвої плазми.

У додатку А наведено документ про впровадження результатів дисертаційного дослідження.

У додатку Б наведено список праць, опублікованих автором за темою дисертації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу отримання методом магнетронного розпилення на постійному струмі тонкоплівкових шарів сульфїду та телуриду кадмію для подальшого використання у складі сонячних елементів на основі гетеросистеми CdS/CdTe, а також встановлено наслідки впливу іонізуючого випромінювання на кристалічну структуру та оптичні властивості таких плівок та вихідні параметри і світлові діодні характеристики сонячних елементів на їх основі.

Основні результати роботи можна сформулювати у вигляді таких висновків:

1. Методом магнетронного розпилення на постійному струмі одержано тонкоплівкові шари сульфїду та телуриду кадмію при використанні нелегованих мішеней при швидкості осадження не менш 25 нм/хв та 200 нм/хв, відповідно. Магнетронне розпилення реалізується за рахунок нагрівання поверхні мішені для інтенсифікації теплового випромінювання вторинних електронів в зоні магнетронного розряду і зниження електричного опору мішені в результаті теплової генерації основних носіїв заряду при температурах напівпровідникової мішені 156-166°C. Це дає змогу запобігти накопиченню заряду на мішені і досягти швидкостей розпилення в 10 разів більше, аніж значення, які характерні для ВЧ магнетронного розпилення.

2. При густині струму плазмового розряду 1,1 мА/см² та швидкості осадження 25 нм/хв отримані шари CdS гексагональної модифікації. Ширина забороненої зони CdS в отриманих плівках складає $E_g = 2,38-2,41$ еВ. При товщині 160 – 370 нм, ці плівки не мають наскрізних пор, на відміну від плівок одержаних термічним випаровуванням при тій же товщині, та після відпалу у вакуумі їх оптична прозорість зростає до 90%. Такі характеристики отриманих плівок дозволяють використовувати їх як «широкозонні вікна» у СЕ на основі гетеропереходів CdS/CdTe без ризику закорочування приладової структури.

3. При густині струму плазмового розряду $2,2-5,4 \text{ mA/cm}^2$ та швидкості осадження 200 nm/hv отримані шари CdTe метастабільної гексагональної модифікації товщиною до 5 мкм . Ширина забороненої зони CdTe отриманих шарів різної товщини становить $1,52-1,54 \text{ eV}$. Після хлоридної обробки в результаті фазового переходу в'юрцит-сфалерит досліджені плівки CdTe містять тільки стабільну кубічну модифікацію з низьким рівнем макродеформацій з параметром кристалічної ґратки $6,4905 \text{ \AA}$, що наближається до еталонного значення $6,48 \text{ \AA}$. Такі плівки телуриду кадмію можуть бути використані як базові шари сонячних елементів на основі полікристалічних гетеросистем CdS/CdTe.

4. Попереднє охолодження до кімнатної температури гетеросистеми поліїмід/ITO/CdS після осадження шару сульфїду кадмію при температурі 150°C та послїдуючий нагрїв до $T_p = 280-320^\circ\text{C}$ безпосередньо перед процесом магнетронного осадження шару CdTe викликає рекристалізацію структури шару CdS. В результаті відбувається зменшення негативного впливу дрібнокристалічного дефектного шару на міжфазній границі CdS/CdTe, що обмежує розмір зерна в шарах CdTe та якість кристалічної структури усередині зерна та зростання ККД до $3,1\%$.

5. У плівках CdS на відміну від плівок CdTe після 8 годин опромінення жорстким ультрафіолетовим випромінюванням з головною модою енергії квантів $10,5 \text{ eV}$ спостерігається збільшення періоду кристалічної ґратки до $c = 6,78(88) \text{ \AA}$. При цьому для сульфїду та телуриду кадмію в результаті часткової рекристалізації приповерхневих шарів розмір областей когерентного розсіювання збільшується до 18 та 26 nm , відповідно, а оптичні характеристики не змінюються. В результаті, на відміну від SE на основі монокристалічного кремнію, ККД SE на основі базового шару CdTe отриманого магнетронним розпиленням на постійному струмі після опроміненням жорстким УФ не зменшується, а збільшується $0,02$ від. од.

6. Спостережена експериментально більша стабільність під дією жорсткого УФ вихідних параметрів та світлових діодних характеристик SE на основі базового шару CdTe, отриманого магнетронним розпиленням на постійному струмі, на відміну від базових шарів отриманих термічним випаровуванням і осадженням в квазізамкненому об'ємі, пояснюється накопиченням точкових дефектів на границі зерна базового шару CdTe що перешкоджає дифузії атомів Си вздовж границь зерен у напрямку гетеропереходу.

7. В плівках сульфїду та телуриду кадмію, які підлягали дії електронного випромінювання з енергією часток 20 keV , експериментально спостерігається зменшення областей когерентного розсіювання до значень $15-16 \text{ nm}$, що обумовлено наявністю рухливих радіаційних точкових структурних дефектів, які не групуються у кластери, в тонкому приповерхневому шарі плівок. При цьому оптичні характеристики плівок CdS і CdTe виявилися нечутливими до дії електронного випромінювання.

8. Для SE на основі базового шару CdTe, отриманого магнетронним розпиленням на постійному струмі, в порівнянні з базовими шарами отриманими осадженням у квазізамкненому об'ємі, після 45 хвилин дії електронного

випромінювання з енергією часток 75 кеВ спостережене відносне зниження ККД менше у два рази та складає 0,11 відн. од.

9. В плівках CdTe, отриманих методом магнетронного розпилення після дії потоку гелієвої плазми – 5 імпульсів з густиною потоку енергії $\geq 0,2$ МДж/м², спостерігаються зміни морфології поверхні та зменшення розтискаючих макронапружень дефектних плівок CdTe метастабільної гексагональної фази до рівня $2,5 \cdot 10^{-3}$ відн. од., середній коефіцієнт прозорості зменшується на 62%, коефіцієнт віддзеркалення на 20%, ширина забороненої зони телуриду кадмію збільшується до значення 1,53 еВ. При цьому вплив гелієвої плазми для СЕ призводить до абсолютного зниження його вихідних параметрів та світлових діодних характеристик, повного його руйнування.

10. Плівкові СЕ на основі базового шару CdTe, отримані методом магнетронного розпилення, можуть використовуватися в умовах жорсткого УФ та електронного опромінення. Проте їх використання в умовах високоенергетичного впливу гелієвої плазми обмежено.

ОСНОВНІ ПУБЛІКЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Структура і оптичні властивості плівок CdTe, отриманих методом магнетронного розпилення / Г.С. Хрипунов, Г.І. Копач, М.М. Харченко, **А.І. Доброжан** // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – Одеса, 2016. – Т. 13, – № 3. – С. 58-66.

2. Гнучкі сонячні елементи на основі базових шарів CdTe, отриманих методом магнетронного розпилення / Г.С. Хрипунов, Г.І. Копач, Р.В. Зайцев, **А.І. Доброжан**, М.М. Харченко // Журнал нано- та електронної фізики. – Суми, 2017. – Т. 9, - № 2. – С. 02008-1-02008-5.

3. The influence of physical and technological magnetron sputtering modes on the structure and optical properties of CdS and CdTe films / G.S. Khrypunov, G.I. Kopach, M.M. Harchenko, **A.I. Dobrozhan** // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – Kyiv, 2017. – Т. 20, - № 2. – С. 262-267.

4. Structure and optical properties CdS and CdTe films on flexible substrate obtained by DC magnetron sputtering for solar cells / G.I. Kopach, R.P. Mygushchenko, G.S. Khrypunov, **A.I. Dobrozhan**, M.M. Harchenko // Journal of Nano- and Electronic Physics. – Sumy, 2017. – Vol. 9. - № 5. – P. 05035-1 - 05035-6.

5. Structure and Properties of the Cadmium Sulfide Films Received by Magnetron Dispersion Method / R.V. Zaitsev, M.V. Kirichenko, R.P. Migushchenko, N.V. Veselova, G.S. Khrypunov, **A.I. Dobrozhan**, L.V. Zaitseva // Journal of Nano- and Electronic Physics. – Sumy, 2017. – Vol. 9. - № 6. – P. 06020-1 – 06020-5.

6. Structure and optical properties of CdS polycrystalline layers for solar cells based on CdS/CdTe / G.S. Khrypunov, G.I. Kopach, **A.I. Dobrozhan**, R.P. Mygushchenko, O.Y. Kropachek, V.M. Lyubov // Functional Materials. - Kharkiv, 2019. – Vol. 26. – № 1. – P. 23-26.

7. Вплив жорсткого ультрафіолету на структуру та оптичні властивості шарів CdS та CdTe / Г.І. Копач, **А.І. Доброжан**, Г.С. Хрипунов, Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, Р.В. Зайцев, А.В. Меріуц // Фізика і хімія твердого тіла. – 2019. – Т. 20, - №2. – С. 165-170.

8. Структура і оптичні властивості плівок CdTe, отриманих методом магнетронного розпилення / Г.І. Копач, Г.С. Хрипунов, М.М. Харченко, **А.І. Доброжан** / 7-ма Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (СЕМСТ-7), 30 трав.-3 черв. 2016 р., Одеса: тези доповідей. – Одеса: «Астропринт», 2016. – С. 130.

9. Вплив фізико-технічних режимів магнетронного розпилення на структуру та оптичні властивості плівок CdS та CdTe / Копач Г.І., Хрипунов Г.С., Харченко М.М., **Доброжан А.І.** / VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (УНКФН-7), 26-30 вер. 2016р., Дніпро: матеріали конференції. – Кременчук: Видавець ПП Щербатих О. В., 2016. – С. 275-276.

10. Structure and optical properties CdS and CdTe films on flexible substrate obtained by DC magnetron sputtering for solar cells / Kopyach G.I., Mygushchenko R.P., Khrypunov G.S., **Dobrozhn A.I.**, Harchenko M.M. / Матеріали XVI Міжнародної конференції «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем» (МКФТТПН-XVI), 15-20 травня 2017 р., Івано-Франківськ: матеріали конференції. - Івано-Франківськ: ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», 2017. - P. 152.

11. Properties of CdTe films prepared by DC magnetron sputtering / Kirichenko M.V., Zaitsev R.V., **Dobrozhn A.I.**, Khrypunov G.S., Kharchenko M.M. / IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), May 29 – June 2, 2017, Kyiv: Conference proceedings. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. - PP. 355-359.

12. Structure and optical properties of CdS nanoscale thin films obtained by direct current magnetron sputtering / G.I. Kopyach, R.P. Mygushchenko, G.S. Khrypunov, **A.I. Dobrozhn**, M.M. Harchenko / IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP-2017), 10-15 september 2017, Zatoka: Scientific Edition Part 3. – Суми: СумДУ. – PP. 03NE11-1 - 03NE11-4.

13. Adopting of DC Magnetron Sputtering Method For Preparing Semiconductor Films / M.V. Kirichenko, R.V. Zaitsev, **A.I. Dobrozhn**, G.S. Khrypunov, M.M. Kharchenko IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017), October 17-20, 2017, Lviv. - P.108-111.

14. Оптичні властивості та морфологія поверхні плівок CdTe, отриманих магнетронним розпиленням / **Доброжан А.І.**, Зайцев Р.В., Кіріченко М.В., Копач Г.І. V Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (НМІТФ-2018), 17-19 травня 2018р., м. Кременчук. - Тези доповідей. - Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. - С. 64-66.

15. Структура і оптичні властивості полікристалічних шарів CdS для фотоперетворювачів на основі CdS/CdTe / Копач Г.І., Хрипунов Г.С., Мигущенко

Р.П., **Доброжан А.І.**, Любов В.М. VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (СЕМСТ-8), 28 травня – 1 червня 2018 р., м. Одеса. - Тези доповідей. - Одеса "Астропринт", 2018. - С. 178.

16. Study solid solutions in CdS/CdTe heterosystem obtained by DC magnetron sputtering / **Dobrozhn A.I.**, Kopach G.I., Mygushchenko R.P., Khrypunov G.S., Kharchenko M.M. IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP-2018), 9-14 september 2018, Zatoka. – Proceedings. Scientific Edition Part 3 - Суми: СумДУ, 2018. – PP. 04NCEE11-1 - 04NCEE11-4.

17. Вплив жорсткого ультрафіолету на структуру та оптичні властивості шарів CdS та CdTe / Копач Г.І., **Доброжан А.І.**, Мигущенко Р.П., Хрипунов Г.С., Мериуц А.В., Любов В.М. VIII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (УНКФН-8), 2-4 жовтня 2018р., м. Ужгород. - Тези доповідей. - Ужгород: ТОВ "Рік-У", 2018. - С. 295-296.

18. Structure and optical properties of CdTe and CdS thin films after hard ultraviolet irradiation / Kopach G.I., **Dobrozhn A.I.**, Khrypunov G.S., Mygushchenko R.P., Kropachek O.Y., Zaitsev R.V., Meriuts A. V. XVII International Freik Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems (ICPTTFN-XVII), May 20-25, 2019, Ivano-Frankivsk. – Abstract book. – Ivano-Frankivsk: Publisher Vasyl Stefanyk Precarpatian National University, 2019. - 367с. – С. 96.

19. Structure and Optical Properties of CdS Thin Films after Hard Ultraviolet Irradiation / **Dobrozhn A.**, Kopach G., Mygushchenko R., Kropachek O., Meriuts A. IEEE 9th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP-2019), 15-20 september 2019, Odesa. – Proceedings. Scientific Edition Part 2 - Суми: СумДУ, 2019. – PP. 02NEE02-1 - 02NEE02-3.

АНОТАЦІЯ

Доброжан А.І. Вплив іонізуючого випромінювання на структуру і властивості пліткових гетеросистем сульфїду і телуриду кадмію отриманих методом магнетронного розпилення на постійному струмі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України. – Харків. – 2021.

Дисертація присвячена встановленню впливу технологічних параметрів магнетронного розпилення на постійному струмі тонкопліткових шарів сульфїду та телуриду кадмію на їх кристалічну структуру, морфологію, оптичні властивості і на вихідні параметри експериментальних сонячних елементів на їх основі. Представлені результати дослідження впливу жорсткого ультрафіолетового випромінювання, дії електронного випромінювання та гелієвої плазми на структуру та оптичні характеристики плівок CdS та CdTe, отриманих методом магнетронного розпилення на постійному струмі, а також на вихідні параметри та світлові діодні характеристики сонячних елементів, виготовлених на основі гетеросистеми CdS/CdTe різними вакуумними методами, а саме методом квазізамкненого об'єму, термічного випаровування та магнетронного розпилення на постійному струмі.

Ключові слова: магнетронне розпилення на постійному струмі, плівки телуриду кадмію, плівки сульфїду кадмію, базові шари, сонячні елементи, світлові вольт-амперні характеристики, вихідні параметри, світлові діодні характеристики, іонізуюче випромінювання.

АННОТАЦИЯ

Доброжан А.И. Влияние ионизирующего излучения на структуру и свойства пленочных гетеросистем сульфида и теллурида кадмия полученных методом магнетронного распыления на постоянном токе. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. - Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины. - Харьков. - 2019.

Диссертация посвящена установлению влияния технологических параметров магнетронного распыления на постоянном токе тонкопленочных слоев сульфида и теллурида кадмия на их кристаллическую структуру, морфологию, оптические свойства и на выходные параметры экспериментальных солнечных элементов на их основе. Представлены результаты исследования влияния жесткого ультрафиолетового излучения, действия электронного излучения и гелиевой плазмы на структуру и оптические характеристики пленок CdS и CdTe, полученных методом магнетронного распыления на постоянном токе, а также на выходные параметры и световые диодные характеристики солнечных элементов, изготовленных на основе гетеросистемы CdS/CdTe различными вакуумными методами, а именно методом квазизамкнутого объема, вакуумного термического испарения и магнетронного распыления на постоянном токе.

Ключевые слова: магнетронное распыление на постоянном токе, пленки теллурида кадмия, пленки сульфида кадмия, базовые слои, солнечные элементы, световые вольт-амперные характеристики, выходные параметры, световые диодные характеристики, ионизирующее излучение.

ABSTRACT

Dobrozhan A.I. – Influence of ionizing radiation on the structure and properties of cadmium sulphide and cadmium telururide film heterosystems obtained by DC magnetron sputtering. - Manuscript.

A dissertation for degree of the candidate of sciences in technics by specialty 01.04.07 – Solid state physics. – Institute of Electrophysics & Radiation Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the creation of physical and technological bases of obtaining sulfide and cadmium telluride film layers by a direct current magnetron sputtering method for the creation of film solar cells based on them and to the research of ionizing radiation influence on structure and optical properties of these films and output parameters, light diode characteristics of film solar cells made on them.

For the first time, the production of wide-band semiconductors thin-film layers, which have low conductivity at room temperatures, by the method of DC magnetron sputtering has been substantiated and implemented. The method has been implemented by

heating the target surface to intensify the thermal radiation of secondary electrons in the magnetron discharge zone and reduce the electrical resistance of the target as a result of thermal generation of the main charge carriers at semiconductor target temperatures of 156-166°C. This prevents the accumulation of charge on the target and achieves sputtering speeds 10 times higher than RF magnetron sputtering values.

Thin film layers of CdS and CdTe have been obtained by the DC magnetron sputtering method. The CdS layers of the hexagonal modification have been obtained at a plasma discharge current density of 1.1 mA/cm² and a deposition rate of 25 nm/min. At a thickness of 160-370 nm, these films do not have through pores, in contrast to the films obtained by thermal evaporation at the same thickness, and after annealing in vacuum, their optical transparency increases to 90%. Such characteristics of the obtained films allow using them as a "wide-zone window" in solar cells based on CdS/CdTe heterojunctions without the risk of their shorting. The CdTe layers of metastable hexagonal modification up to 5 μm thick have been obtained at a plasma discharge current density of 2.2-5.4 mA/cm² and a deposition rate of 200 nm/min. After a chloride treatment, the investigated CdTe films contain only stable cubic modification and can be used as base layers of solar cells based on polycrystalline CdS/CdTe heterosystems.

It has been established that it is possible to obtain functional layers of CdS and CdTe for solar cells based on a CdS/CdTe heterosystem on flexible polyimide substrates with the value of efficiency of such structures at 3.1% by using the DC magnetron sputtering method. Pre-cooling to a room temperature of the polyimide/ITO/CdS heterosystem and subsequent heating to T_S=280-320°C immediately before the process of the CdTe layer magnetron sputtering cause recrystallization of the CdS layer structure. As a result, the negative effect of the fine-crystalline defective layer on the CdS/CdTe interfacial boundary is reduced, which limits the grain size in the CdTe layers and the quality of the crystal structure inside the grain.

It has been experimentally proven that CdS and CdTe films obtained by the DC magnetron sputtering under the action of an ionizing radiation, such as hard ultraviolet and electron radiation, are not prone to degradation of the crystal structure and optical parameters. The short-term effect of the high-energy helium plasma flux has the character of high-temperature annealing in the CdTe surface layer, reduces the compressive macrostresses in the film and increases the absorption coefficient and the band gap of the material to 1.53 eV.

It has been shown that solar cells based on the base layer of CdTe obtained by magnetron sputtering on direct current have stable output parameters and light-emitting diode characteristics under the hard ultraviolet irradiation with the main mode of quantum energy of 10.5 eV and the irradiation time of 8 hours and electron radiation after 45 minutes of action of electron radiation at a current of 0.2 μA and the acceleration voltage of the electron beam 75 kV at the level of change in the efficiency of the instrument structure +0.02 a.u. and -0.11 a.u. respectively, in comparison with solar cells, CdS/CdTe heterosystems which were condensed by vacuum methods of quasi-closed volume, thermal evaporation, and single-crystal silicon solar cells .

Keywords: DC magnetron sputtering, cadmium sulfide films, cadmium telluride films, base layers, solar cells, light volt-ampere characteristics, output parameters, light diode characteristics, ionizing radiation.