

Голові разової спеціалізованої
вченої ради ДФ 20 051.139
Прикарпатського національного
університету імені Василя Стефаника,
доктору фізико-математичних наук,
професору Салію Ярославу Петровичу

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, старшого наукового співробітника,
професора кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки
Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника

Дзундзи Богдана Степановича

на дисертацію **Вакалюк Іванни Володимирівни**

**«Структурні та оптичні властивості бінарних та легованих тонких плівок
на основі CdTe, CdS, отриманих методом фізичного осадження у вакуумі»,**
подану на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 10 Природничі
науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія

Актуальність теми

У зв'язку зі зростаючими запитами на відновлювані джерела енергії та необхідністю зменшення залежності від викопного палива, особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на удосконалення сонячних енергетичних технологій. Серед відомих тонкоплівкових матеріалів сполуки CdTe та CdS вирізняються високою ефективністю перетворення сонячної енергії в електричну, стабільністю та відносною дешевизною виробництва. Однак підвищення їх ефективності потребує глибшого розуміння структурних, оптичних та електрофізичних властивостей, особливо при варіюванні технологічних параметрів осадження й легування. Дослідження процесів міжшарової дифузії та формування дефектних станів у гетероструктурах CdTe/CdS є ключовим для оптимізації роботи фотоелементів. Тому комплексне

вивчення впливу технологічних режимів на властивості таких плівок, а також моделювання їхніх електрофізичних характеристик є вчасним, науково обґрунтованим і має актуальне прикладне значення для розвитку сонячної енергетики.

У дисертаційній роботі Вакалюк І.В., на основі експериментальних досліджень і теоретичних методик запропоновано комплексні рішення щодо вдосконалення технологій фізичного вакуумного осадження плівок. Проведено аналіз структурних та оптичних характеристик матеріалів, а також виконано розрахунки їх енергетичних параметрів. Комп'ютерне моделювання фотоелектричних властивостей гетероструктури підтвердило ефективність запропонованих підходів. Отримані результати є достовірними та актуальними в контексті сучасних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів

У дисертаційній роботі отримано результати, які дозволили доповнити існуючі дані про структурні, морфологічні та оптичні властивості тонких плівок CdS, CdTe, а також встановити фізико-хімічні і технологічні фактори, що забезпечують оптимальні значення фотоелектричних параметрів.

Зокрема:

Проведено ґрунтовний аналіз дифузійних процесів, що відбуваються у шарах фотоелектричних плівок при їх осадженні методом термічного випаровування у вакуумі. Зокрема, обґрунтовано формування проміжних шарів типу Cu_xTe чи $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$. Показано, що механізм дифузії міді в об'ємі CdTe сприяє утворенню шару Cu_2Te із високою рухливістю основних носіїв, а перехідний шар Cd_5TeS_4 суттєво покращує структурні та фотоелектричні параметри гетероструктури.

Виконано розрахунок оптичних констант, таких як показник заломлення n , товщина плівки d та коефіцієнт поглинання α для тонких плівок CdTe легованих індієм на основі методу Сванеполя.

Обґрунтовано оптимальні режими осадження плівок CdS, що забезпечують високий рівень пропускання світла.

Встановлено, що легування плівок CdTe індієм призводить до утворення дефектів типу вакансій кадмію, що відповідає псевдобінарній сполуці CdTeIn₂Te₃ та сприяє збільшенню середнього коефіцієнта пропускання до 93,02%.

Виконано комп'ютерне моделювання гетероструктури CdTe/CdS у середовищі SCAPS з урахуванням проміжних шарів, що дало змогу з високою точністю оцінити ефективність перетворення енергії. Проаналізовано вплив товщини і ширини забороненої зони проміжного шару на фотоелектричні характеристики структури.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці науково обґрунтованих підходів до оптимізації структури та технології формування тонкоплівкових фотоелектричних елементів на основі CdTe. Результати SCAPS-моделювання та експериментів дозволили встановити критичні параметри осадження, що забезпечують високі оптичні та електрофізичні характеристики структур, зокрема – підвищену прозорість, ефективне світлопоглинання й оптимальні товщини шарів. Обґрунтовано доцільність контролю формування проміжного шару Cd₅TeS₄ для покращення ефективності перетворення енергії. Отримані результати мають прикладне значення для проєктування ефективних гетероструктур у фотоелектриці та вже частково реалізовані в освітньому процесі при підготовці студентів.

Аналіз змісту дисертації.

За змістом дисертація Вакалюк Іванни Володимирівни «Структурні та оптичні властивості бінарних та легованих тонких плівок на основі CdTe, CdS, отриманих методом фізичного осадження у вакуумі» відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів і висновків.

У першому розділі здійснено аналіз наукових джерел щодо властивостей бінарних сполук CdTe та CdS і їх застосування в сонячній енергетиці. Розкрито актуальні напрями розвитку тонкоплівкових гетероструктур і їх переваги порівняно з традиційними кремнієвими технологіями.

У другому розділі подано теоретичні основи синтезу матеріалів CdTe, зокрема особливості фазових переходів, легування та впливу відхилень від стехіометрії. Детально описано методику фізичного осадження плівок у вакуумі та представлено експериментальні підходи до дослідження їхніх властивостей.

У третьому розділі наведено результати морфологічного, структурного та хімічного аналізу плівок CdS, CdTe та CdTe:In. Досліджено формування поверхневих утворень і вплив технологічних параметрів на структуру плівок. Встановлено особливості міжшарової дифузії та її вплив на характеристики гетероструктур.

У четвертому розділі проаналізовано оптичні властивості отриманих плівок. Визначено коефіцієнти пропускання, ширину забороненої зони та інші оптичні параметри. Виконано чисельне моделювання гетеропереходів CdTe/CdS у середовищі SCAPS, що дозволило оцінити вплив структурних факторів на ефективність сонячних елементів.

Робота завершується висновками, у яких стисло та логічно узагальнено основні наукові й практичні результати, отримані в ході дослідження. Це свідчить про самостійний характер і завершеність дисертаційного дослідження Вакалюк І.В. Зміст дисертації викладено в цілому послідовно, з достатньою доступністю та зрозумілістю для сприйняття.

Повнота викладу основних результатів дисертації в наукових і фахових виданнях.

Основні наукові положення дисертації, висновки та рекомендації Вакалюк І.В. достатньо повно представила у 18-ти працях, а саме: 4-х наукових статтях, опублікованих у фахових наукових виданнях, які індексуються наукометричними базами Scopus та/або Web of Science, 2 статті у фахових виданнях України (категорія Б), а також у 12-ти тезах доповідей на Міжнародних та Всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Обсяг і кількість наукових публікацій відповідають вимогам МОН України щодо оприлюднення основного змісту дисертації для здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія. Подані публікації

відображають основні положення дисертаційної роботи та засвідчують наукові результати, отримані автором.

Дані про відсутність текстових запозичень та порушення академічної доброчесності.

Під час детального розгляду дисертації порушень академічної доброчесності та елементів фальсифікації не виявлено. Авторка використовує посилання на свої наукові публікації, публікації інших авторів та джерел.

Зауваження до змісту та оформлення дисертації:

1. Пункт 2 наукової новизни сформульовано не достатньо чітко, зокрема, не зовсім зрозуміло чи вперше визначені відповідні оптичні константи для тонких плівок CdTe легованих індієм, із використанням методу Сванеполья, та який саме результат отримано на основі проведених розрахунків. Хоча у висновках отриманий результат розрахунків частково описаний.

2. Розділ 2.2 “Методи легування CdTe” носить більше оглядовий характер, і не дає повного розуміння які саме з описаних методів були використанні у роботі для отримання CdTe легованого In, і чому саме In було вибрано як оптимальну домішку.

3. На рис. 4.1. представлений важливий у практичному та науковому значенні експериментальний результат. Зразок 5a демонструє високе і практично рівномірне пропускання в широкому діапазоні довжин хвиль від 500 нм до 2200 нм, на відміну від інших зразків де коефіцієнт пропускання нижчий та різко спадає при частотах довжинах хвиль 700 нм. Будо б добре більш детально обґрунтувати чим зумовлено таке суттєве покращення оптичних характеристик даного зразка, та до яких товщин зберігається дана тенденція.

4. Отримані результати моделювання можна було б значно підсилити експериментальними дослідження фотоелектричної ефективності отриманих тонкоплівкових комірок в реальних умовах сонячного випромінювання.

5. На деяких рисунках не вказані одиниці вимірювання температури, зокрема рис. 2.2. Також на різних рисунках використовуються різні одиниці вимірювання температури, зокрема градуси Кельвіна і Цельсія (рис 2.2, рис. 2.3).

6. У роботі допущені поодинокі орфографічні та стилістичні помилки, зокрема, провідність замість провідність (ст. 139), вісі X замість осі X (ст. 143)

Проте наведені недоліки та зауваження не стосуються основних результатів і висновків роботи та не впливають на її загальну позитивну оцінку.

Загальний висновок та оцінка дисертації

На підставі вищезазначеного можна зробити висновок, що дисертаційна робота Вакалюк Іванни Володимирівни «Структурні та оптичні властивості бінарних та легованих тонких плівок на основі CdTe, CdS, отриманих методом фізичного осадження у вакуумі» є завершеною науковою працею з оригінальним авторським дослідженням, яке повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44 (зі змінами) та вимогам до оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 № 40 (зі змінами) а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Рецензент:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки
Прикарпатського національного
університету імені Василя Стефаника

Богдан ДЗУНДЗА