

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

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, доцента,
асистента кафедри електроніки і енергетики
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

Сльотова Олексія Михайловича

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 дисертаційного дослідження

Створення нових приладів електроніки та пристроїв сонячної енергетики потребує глибокого дослідження процесів при створенні фоточутливих структур. Тому актуальним є добір відповідної технології їх виготовлення, яка б забезпечувала високу ефективність при реєстрації світлових потоків при їх використанні у відповідних приладах. Це зумовлює необхідність визначення властивостей фотоструктур і внеску відповідних явищ та їх особливості при керуванні ними, а також можливі способи керування ними з метою забезпечення нових властивостей і можливостей застосування. За наведеними результатами попередніх досліджень показана важлива роль структур CdTe/CdS. Вказане свідчить про актуальність і необхідність їх вивчення з метою визначення можливостей використання у прикладній фізиці, оптоелектроніці та різних системах інформатики і телекомунікації

Відповідно зазначені гетеросистеми CdTe/CdS заслуговують на особливу увагу у фотоелектронних процесах. Принципи їх формування обумовлюють необхідність покращення структурних властивостей контактуючих плівок CdTe і CdS, виявлення процесів при формуванні між ними перехідного стабільного

шару і встановлення можливості ефективного перетворення фотоприладами оптичної енергії. Особливо важливим постає розробка і реалізація методів осадження плівок, керування їх структурними і фотоелектричними процесами шляхом легування відповідними домішками. Вони також забезпечують високу ефективність перетворення сонячної енергії в електричну. При цьому актуальним є стабілізація параметрів фотоприймача і зменшення хаотичності його режимів експлуатації. Вивчення можливих процесів дифузії складових елементів, зокрема сірки, сприятиме також подальшому вдосконаленню і створенню нового типу апаратури та спеціальних систем діагностики.

Узгодженість спектральних характеристик сонячного випромінювання і чутливості фотодетекторів на основі CdTe порівняно із кремнієвими сонячними елементами обумовлюють особливе їх значення для практичних та теоретичних досліджень можливостей відновлюваної сонячної енергетики. Дисертація Вакалюк І.В. спрямована на розробку методів осадження плівок CdTe і CdS у вакуумі, дослідження їх структурних і фізичних властивостей та отримання структур із високою ефективністю перетворення сонячної енергії. Вирішення зазначених питань має велике значення для вирішення комплексної задачі розробки та експлуатації відновлюваних джерел енергії і створення систем перетворення сонячної енергії в електричну.

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі, базується на:

- розробленні технологічних режимів отримання тонких плівок CdTe, CdS методом вакуумного осадження за різних технологічних умов та визначення їх структурних характеристик;
- визначенні впливу легування домішкою In на структурні, оптичні та електрофізичні властивості CdTe;
- встановленні оптичних констант спектрів пропускання тонких плівок CdTe:In, CdS, CdTe та визначенні оптичні параметри гетеросистем CdTe/CdS;
- проведенні комп'ютерного моделювання технологічних і фізичних процесів, які визначають властивості отриманих тонких плівок CdTe, CdS, CdTe:In і фотоелектричних систем CdTe/CdS, та встановленні їх кореляції з фоточутливістю лабораторних прототипів з ефективністю 23,1% при їх теоретичних розрахунках 32%.

Наукова новизна.

У дисертаційній роботі Вакалюк Іванни Володимирівни отримано низку

нових наукових результатів, що суттєво доповнюють існуючі уявлення про структурні та оптичні властивості бінарних і легованих тонких плівок на основі CdTe та CdS, отриманих методом фізичного осадження у вакуумі. До основних положень, що характеризують наукову новизну дослідження, можна віднести наступні:

1. Встановлено закономірності формування проміжних шарів у гетероструктурах CdTe/CdS внаслідок міжшарової дифузії. Вперше обґрунтовано утворення шару Cd_5TeS_4 як результату взаємодії телуру й сірки в зоні міжшарового контакту.
2. Запропоновано модель дефектної підсистеми у легованому CdTe:In, яка враховує формування вакансій кадмію та заміщення вузлових атомів індієм. Це дозволяє точніше моделювати електрофізичні характеристики матеріалу.
3. Проведено детальний аналіз впливу параметрів осадження (зокрема тривалості, температури підкладки та товщини плівки) на морфологію поверхні плівок CdS і CdTe. Виявлено утворення характерної «лускоподібної» структури та її еволюцію зі збільшенням товщини.
4. Отримано дані щодо оптичних параметрів плівок CdTe, CdS та CdTe:In. Розраховано коефіцієнт поглинання, показник заломлення, оптичну провідність та ширину забороненої зони методами Сванеполя та Таука.
5. Виконано SCAPS-моделювання гетероструктур CdS/CdTe, з урахуванням реальних експериментальних даних. Показано, що включення проміжного шару Cd_5TeS_4 дозволяє досягти ефективності фотоелектричного перетворення до 22,9%, що є вагомим результатом для тонкоплівкових структур.

Практичне значення.

Результати дисертаційної роботи мають важливе прикладне значення для галузі фотоелектричних технологій, зокрема при створенні високоефективних тонкоплівкових сонячних елементів на основі CdTe та CdS. До найважливіших прикладних аспектів роботи можна віднести наступні:

1. Обґрунтовано оптимальні технологічні режими осадження плівок CdTe та CdS, які забезпечують рівномірну морфологію поверхні, високу прозорість у ближній інфрачервоній області та стабільність фізичних

параметрів. Це дозволяє підвищити ефективність поглинання та перетворення сонячного випромінювання.

2. Показано можливість регулювання параметрів гетероструктури шляхом контролю товщини та складу проміжного шару CdTeS , що формується внаслідок міжшарової дифузії. Це дає змогу покращити енергетичні характеристики сонячної комірки, зокрема зменшити рекомбінаційні втрати.
3. Розроблено рекомендації щодо використання SCAPS-моделювання для оптимізації структури фотоелектричних перетворювачів. Визначено, що ефективність перетворення енергії за оптимальних умов досягає 22,88%, що є високим показником для тонкоплівкових технологій.
4. Результати дослідження використано в освітньому процесі: окремі методики, зокрема SCAPS-моделювання та розрахунки оптичних констант, впроваджено у зміст навчальних дисциплін «Основи фотоелектрики» та «Наноматеріали і нанотехнології» для студентів фізико-технічного факультету.

Відповідність дисертації профілю спеціалізованої вченої ради.

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» представлена на здобуття ступеня доктора філософії повністю відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія.

Аналіз змісту дисертації.

Дисертаційна робота Вакалюк Іванни Володимирівни складається з з анотації (двома мовами), вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. У вступі чітко обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт, предмет, мету й завдання досліджень, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Дисертація викладена на 182 сторінках, містить 60 рисунки, 13 таблиць і 217 бібліографічних посилань. Матеріали дисертаційної роботи викладені у 4 статтях у фахових наукових журналах, які індексуються наукометричною базою Scopus, 2 статтях у фахових виданнях України (категорія Б) та оприлюднені на 10 міжнародних та 2 всеукраїнських конференціях.

У першому розділі вдало розглянуто сучасний стан досліджень фотоелектричних матеріалів на основі II–VI сполук, наведено розгорнутий

аналіз їх фізико-хімічних властивостей і відповідних характеристик, а також проведено огляд актуальності зазначеного для сонячної енергетики. Особливу увагу приділено використуванню у даному напрямку матеріалам і велике значення сполук CdTe та CdS, розглянуто їх переваги як базових за оптичними властивостями у порівнянні з іншими речовинами і тонкоплівковими на їх основі системами.

Другий розділ присвячено методології досліджень: описано технології і методики синтезу та осадження плівок, методи їх легування, особливо CdTe. Наведено сучасні фізичні та аналітичні методи досліджень структури і морфології плівок та особливості їх оптичних властивостей з урахуванням можливостей їх використання для досліджуваних речовин.

У третьому розділі наводяться результати досліджень і проводиться узагальнення визначених морфологічних і структурних властивостей тонких плівок CdTe, CdS та легованих речовин (CdTe:In). Авторка здійснює ретельний аналіз впливу технологічних режимів і параметрів на формування поверхневих структур, їх можливої дефектності та особливостей утворення гетеропереходів. Зроблено низку важливих і оригінальних висновків, зокрема про вплив часу осадження на характер морфології поверхні.

Четвертий розділ присвячено оптичним і фотоелектричним властивостям та відповідним характеристикам плівок, що визначені як експериментально, так і шляхом моделювання в системі SCAPS. Представлено виміряні спектри поглинання і відбивання, а також наведено результати розрахунку за ними ширини забороненої зони, а також коефіцієнтів пропускання й заломлення. Досліджено густину фотоструму у фотоструктурах CdTe/CdS як базових, так і з урахуванням утвореного проміжного шару CdS_{0.5}Te_{0.5}. Проведено за допомогою системи SCAPS моделювання роботи гетероструктур і визначено їх оптимальні параметри та можливості подальшого підвищення ефективності сонячних елементів.

Загалом, зміст дисертації є логічно структурованим, науково обґрунтованим і демонструє високий рівень володіння матеріалом. Наведений опис експерименту, методик дослідження та інтерпретації результатів свідчить про глибоке розуміння авторкою технології отримання та особливостей фізичних процесів, що відбуваються в тонких плівках, а також про її здатність до самостійного проведення комплексних наукових досліджень.

Загальна оцінка дисертаційної роботи є позитивною, але існують деякі зауваження:

1. При дослідженні фотоелектричних властивостей нанесених гетероструктур CdS/CdTe/Cu здобувачем розглянуто можливу взаємну дифузію атомів купруму. При цьому важливим є врахування авторкою активності таких процесів в ультратонких плівкових сонячних елементах (товщина до 1 мкм). На відповідних рис.3.14 і рис.3.15. наведено принципово важливі картини розподілу хімічних елементів і особливостей формування шарів структури. Було б доречним на них навести номери-позначення складових та відповідний опис їх природи у підписі під рисунками.

2. Важливим у проведених дослідженнях є встановлення впливу товщини складових шарів відповідних гетероструктур на формування фотоелектричних властивостей. Тому було б доцільним наведення відповідних даних про залежність їх ефективності саме від товщини осаджених компонентів.

3. При проведенні SCAPS-моделювання фотоелектричних параметрів встановлено зменшення ефективності фоточутливості при збільшенні ширини забороненої зони E_g шарів гетеросистеми. Відповідно до таких важливих результатів було б доцільним наведення спектральної залежності ефективності фоточутливості. Такі результати були б доцільні для добору оптимального діапазону реєстрації гетероструктурами світлових потоків.

4. Важливим для проведених досліджень постає їх практична цінність. Тому бажано було б при аналізі оптичних спектрів провести їх співставлення із існуючими аналогами. Така відповідна ілюстрація дозволить виявити особливо важливі для використання діапазони реєстрації, а також встановити можливості їх кореляції з фотоприймачами на основі інших матеріалів.

5. Дисертаційна робота написана хорошою науковою мовою, проте в ній зустрічаються окремі орфографічні та стилістичні помилки. Наприклад, на сторінці 24 в тексті пишеться "шарів, що формуються", на сторінці 27 "енергетично імпортозалежних держав", а у підписі до рис.2.7 відсутнє посилання на "(б)" тощо. Спостерігаються деякі розбіжності. Наприклад має місце розбіжність в позначенні складових у підписі до рис. 2.7 де 5 – маска, а в основному текстом (5) це екран. Присутні деякі неузгодженості у використанні термінів. Наприклад, поруч із терміном «вимірювання», зустрічається «вимір».

Проте наведені зауваження і побажання не впливають на загальний високий науковий рівень дисертації, не піддають сумніву основні наукові результати, отримані автором, та їх практичне значення.

Висновок. 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 роботою, яка містить великий обсяг досліджень, проведених автором. Основні результати дослідження достатньо висвітлені у наукових працях. За науково-прикладним рівнем виконання дисертації, актуальністю теми, обґрунтованістю і достовірністю наукових досліджень і висновків, науковою новизною та обсягом робота повністю відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. (зі змінами) «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та «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 № 44 від 12 січня 2022 р. (зі змінами), які висуваються до дисертацій, а її автор Вакалюк Іванна Володимирівна, безумовно, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, доцент,
асистент кафедри електроніки і енергетики
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Олексій СЛЬОТОВ