

Рішення
разової спеціалізованої вченої ради
про присудження ступеня доктора філософії

Здобувач ступеня доктора філософії Іванна ВАКАЛЮК, 1996 року народження, громадянин України, освіта вища: закінчила у 2018 році ДВНЗ “Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника” за спеціальністю «Фізика та астрономія»; працює провідним фахівцем відділу аспірантури і докторантури Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, виконала акредитовану освітньо-наукову програму Фізика та астрономія.

Разова спеціалізована вчена рада ДФ 20 051.139, утворена наказом № 357 т. в. о. ректора Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника Міністерства освіти і науки України, м. Івано-Франківськ, від 30 квітня 2025 року, у складі:

Голови разової спеціалізованої вченої ради –	Ярослава САЛІЯ – доктора фізико-математичних наук, професора, професора кафедри кафедри фізики та астрономії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.
Рецензентів –	Івана ЯРЕМІЯ – доктора фізико-математичних наук, професора, професора кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника; Богдана ДЗУНДЗИ – доктора технічних наук, старшого наукового співробітника, професора кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.
Офіційних опонентів –	Олексія СЛЮТОВА – доктора технічних наук, доцента, асистента кафедри електроніки і енергетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича; Михайла ПОПА – кандидата фізико-математичних наук, доцента, доцента кафедри прикладної фізики та квантової електроніки ДВНЗ «Ужгородський національний університет».

на засіданні 20 червня 2025 року прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки Іванні ВАКАЛЮК на підставі публічного захисту дисертації «Структурні та оптичні властивості бінарних та легованих тонких плівок на основі CdTe, CdS, отриманих методом фізичного осадження у вакуумі» за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Дисертацію виконано у Прикарпатському національному університеті імені Василя Стефаника Міністерства освіти і науки України, м. Івано-Франківськ.

Наукові керівники: Любомир НИКИРУЙ, кандидат фізико-математичних наук, професор, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, завідувач кафедри фізики та астрономії та Ільницький Роман Васильович, доктор фізико-математичних наук, професор, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, завідувач відділу аспірантури і докторантури, професор кафедри прикладної фізики та наноматеріалів (за сумісництвом).

Дисертацію подано у вигляді спеціально підготовленого рукопису.

Наукова новизна дисертаційного дослідження зумовлена поставленими завданнями та результатами їх розв'язання. У науковій роботі вперше:

- проаналізовано дифузійні процеси, що відбуваються у шарах фотоелектричних плівок при їх осадженні методом термічного випаровування у вакуумі. Зокрема, обґрунтовано формування проміжних шарів типу Cu_xTe чи $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$. Причому, 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 Сванеполья.

- обґрунтовано технологічні режими осадження плівок CdS методом фізичного осадження у вакуумі, які характеризуються високим коефіцієнт пропускання у видимій та ближній інфрачервоній області ($\sim 70\text{-}95\%$). Показано, що мінімальне пропускання спостерігалось в ультрафіолетовій області при довжині хвилі менше 500 нм.

- досліджено, що легування плівок CdTe індієм призводить до утворення дефектів типу вакансій кадмію, що відповідає псевдобінарній сполуці $\text{CdTe-In}_2\text{Te}_3$ та сприяє збільшенню середнього коефіцієнта пропускання до 93,02%.

- проведено комп'ютерне моделювання фотоелектричних характеристик у середовищі SCAPS як для окремих шарів, так і для гетероструктури типу CdTe/CdS . Виконане у дисертаційній роботі моделювання показало ефективність перетворення енергії на рівні для гетероструктури типу CdTe/CdS на рівні $\sim 23\%$ із врахуванням проміжних шарів, що формуються за рахунок взаємодифузії елементів у процесі осадження.

- проаналізовано вплив товщини проміжного шару та його ширини забороненої зони, яку можна змінювати контролем технологічних параметрів, на фотоелектричну ефективність.

Практичне значення дослідження полягає в тому, що в роботі

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено вплив технологічних факторів на ефективність фотоелектричної комірки. Зокрема, SCAPS-симуляції дозволили визначити оптимальні товщини шарів, при яких можна отримати максимальні фотоелектричні ефективності. Товщина ж шару однозначно задається часом осадження, який є визначальним у технологічній карті осадження плівок. Зокрема, встановлено, що оптимальними товщинами є ~150 нм для контактного шару, ~50 нм для абсорбційного шару та 3-5 мкм для робочого шару CdTe.

- доповнено обґрунтування технологічних режимів осадження плівок з парової фази у відкритому вакуумі. Зокрема, показано, що плівки CdS, осаджені на скляні підкладки, характеризуються високим коефіцієнтом пропускання у видимій та ближній інфрачервоній області (~70-95%). Для плівок товщиною понад 500 нм характерна висока прозорість, що свідчить про можливість їх ефективного використання у якості абсорбційних шарів фотоелектричних елементів.

- показано можливість утворення проміжного шару Cd_5TeS_4 за рахунок міжшарової дифузії. Контроль технологічних режимів осадження плівок дозволяє плавно коригувати параметри плівки чи гетероструктури за рахунок зміни як товщини (час осадження матеріалу та його кількість), так і складу такого проміжного шару (від якого суттєво залежить значення ширини забороненої зони). Комп'ютерне моделювання показало, що за оптимальних умов можна отримати ефективність перетворення енергії на рівні 22,88% із фактором заповнення 69,7%.

- результати дисертаційного дослідження, які актуальні з навчально-методичної точки зору ввійшли у окремі розділи навчальних курсів для студентів Фізико-технічного факультету Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Зокрема, особливості SCAPS-моделювання та розрахунки оптичних характеристик включені у предмет «Основи фотоелектрики», а технологічні особливості формування шарів нанометрового діапазону методи дослідження структури плівок – у предмет «Наноматеріали і нанотехнології».

Дисертація виконана державною українською мовою.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (217 найменування), додатків. Загальний обсяг роботи – 182 сторінки.

Дисертація відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. (зі змінами) «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», що відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 № 44 (зі змінами).

Здобувач має 18 наукових публікацій за темою дисертації: 4 статті у фахових наукових журналах, які індексуються наукометричною базою Scopus; 2 статті – у фахових журналах України (категорія Б) та 12 тез доповідей на

міжнародних та всеукраїнських конференціях, що відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 №44 (зі змінами):

1. Vakaliuk I.V., Yavorskyi R.S., Naidych B.P., Nykyruy L.I., Katanova L.O., Zamuruieva O.V. Optical properties of CdTe:In thin films deposited by PVD technique. Journal of Nano-and Electronic Physics. 2023. Vol 15, № 5. P. 05023. (Scopus).

DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(5\).05023](https://doi.org/10.21272/jnep.15(5).05023)

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85176566017&origin=resultslist>

2. Mazur T.M, Mazur M.P, Vakaliuk I.V. Solar cells based on CdTe thin films (Part II). Physics and Chemistry of Solid State. 2023. Vol. 24, № 1. P. 134-145. (Scopus, WoS).

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.24.1.134-145>

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85160326777&origin=resultslist>

3. Vakaliuk I.V., Yavorskiy R.S., Nykyruy L.I., Naidych B.P., Yavorskyi Ya.S. Morphology and optical properties of CdS thin films prepared by Physical Vapor Deposition method. Physics and Chemistry of Solid State. 2022. Vol. 23, №. 4. P. 669-677. (Scopus, WoS).

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.669-677>

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85145557043&origin=resultslist>

4. Yaremiichuk O., Nykyruy L., Zapukhlyak Z., Yavorskyi R., Potera P., Malyarska I., Fedoryk O. Optical Properties of CdS/CdTe Heterojunction Prepared by Physical Vapor Deposition Technique. Physics and Chemistry of Solid State. 2018. Vol. 19, No. 3. P. 209–216. (Scopus, WoS).

DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.19.3.209-216>

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85145557043&origin=resultslist>

У дискусії взяли участь голова і члени спеціалізованої вченої ради та присутні на захисті фахівці:

1. Ярослав САЛІЙ – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та астрономії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Оцінка позитивна, зауважень немає.

2. Іван ЯРЕМІЙ – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики і матеріалознавства Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Оцінка позитивна, зауважень немає.

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

Оцінка позитивна, зауважень немає.

4. Олексій СЛЬОТОВ – доктор технічних наук, доцент, асистент кафедри електроніки і енергетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

Оцінка позитивна, зауважень немає.

5. Михайло ПОП – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри прикладної фізики та квантової електроніки ДВНЗ «Ужгородський національний університет».

Оцінка позитивна, зауважень немає.

Результати відкритого голосування:

«За» 5 членів ради,

«Проти» немає членів ради.

На підставі результатів відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада ДФ 20 051.139 Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, Міністерства освіти і науки України, м. Івано-Франківськ присуджує Іванні ВАКАЛЮК ступінь доктора філософії (PhD) з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Відеозапис трансляції захисту дисертації додається.

Голова разової
спеціалізованої вченої ради



Салій

Ярослав САЛІЙ