

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації Яворського Ростислава Святославовича
на тему «Структурні, морфологічні та оптичні властивості тонкоплівкових
гетероструктур на основі сполук II-VI»
на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»
з галузі знань 10 «Природничі науки»**

Актуальність теми дослідження і отриманих результатів.
Результати аналізу досліджень оптичних та фотоелектричних характеристик тонкоплівкових матеріалів та гетероструктур, дозволяють зробити висновки про перспективу вивчення та практичного застосування сонячних фотоелементів 2-ої генерації. Зокрема:

- тонкі плівки та гетероструктури на основі напівпровідників II-VI (CdTe, CdS, ZnO) сьогодні вважаються найбільш перспективними матеріалами, які можуть конкурувати із кремнієвими фотоелементами;
- вакуумні методи осадження тонких плівок є економічно вигідними, технологічно простими і мають перспективу практичного використання;
- механізми зародження і процеси росту парофазних конденсатів, зокрема, сполук II-VI, мікро- і нанорозмірів на підкладках різної природи визначають оптичні, енергетичні та електричні характеристики конденсату;
- перевагами тонкоплівкових сонячних елементів є мала кількість вихідного матеріалу, можливість сучасних експериментальних технологій плавно регулювати вихідні властивості та, відповідно, створювати матеріали і структури із наперед заданими оптимальними характеристиками для ефективного практичного застосування.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що змінюючи технологічні фактори осадження тонких плівок із парової фази, можна отримати матеріал із наперед заданими структурними, оптичними та фотоелектричними характеристиками завдяки контролю морфології поверхні, процесів зародження

та росту плівок.

З огляду на проведений аналіз тема дисертаційної роботи, яка присвячена дослідженню впливу технологічних факторів осадження на оптичні, фотоелектричні та структурні характеристики тонкоплівкового матеріалу, *є актуальною*.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна результатів дослідження, одержаних особисто дисертантом, полягає у наступному:

1. Вперше виконано комплекс структурних, оптичних та електричних властивостей як окремих шарів, так і гетеросистем на основі матеріалів II-VI (ZnO, CdTe, CdS, CdS/CdTe, ZnO/CdS/CdTe), отриманих методом осадження з парової фази у вакуумі за різних технологічних умов (температури випаровування і осадження конденсату, час напilenня, вибір матеріалу підкладки), встановлено процеси зародження і росту плівок. Зокрема, встановлено, що плівки CdTe як на кремнієвій, так і на скляній підкладках формуються за механізмом росту Странскі-Крастанова. Плівки цинк оксиду ZnO формуються ж у вигляді планарних структур, але додатковий термічний вплив (відпал) спричинює утворення колоноподібних стовпчастих шарів.

2. Спектральні дослідження свідчать про досконалість отриманих плівок, на яку вказує наявність інтерференційної картини. Розміри ж поверхневих наноутворень складають (25 - 28) нм, а їх розподіл, відповідно до аналізу 2D автокореляційної функції та 3D Фур'є перетворень є рівномірним. Спостережувана періодичність у розміщенні таких наноутворень пояснена неузгодженістю по значеннях сталої ґратки матеріалу підкладки та осаджуваної плівки. Вказано на реконструкцію ґратки із збільшенням товщини плівки від початкової кубічної через моноклінну у гексагональну.

3. Вперше для бінарних матеріалів (CdTe, CdS) та їх гетероструктур на основі методу Сванеполя розраховано значення оптичних констант (показник заломлення n , товщина плівки d та коефіцієнт поглинання α). Уточнено значення оптичної ширини забороненої зони для плівок CdTe (1,48 eV) та CdS (2,42 eV) та показано, що залежно від технологічних параметрів осадження у методі

випаровування із відкритого вакууму, ширина забороненої зони зменшується, зокрема, для плівок CdTe від значень 1,54 до 1,43 eV.

4. Показано, що край поглинання формується прямими міжзонними оптичними переходами завдяки лінійному характеру залежностей $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$. Встановлені значення краю поглинання для осаджених плівок бінарних сполук складали: ~ 350 нм (ZnO), ~ 500 нм (CdS), ~ 800 нм (CdTe). Встановлено, що технологічні фактори суттєво впливають на їх властивості. Зокрема, край смуги поглинання, який для зразків CdTe починається близько 790-805 нм, зміщується до більшої довжини хвилі у міру зростання товщини зразків.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним завершеним науковим дослідженням. Викладені в ній висновки, які стосуються механізмів формування та оптичних властивостей напівпровідникових тонких плівок і гетероструктур сполук II-VI (CdTe, CdS, ZnO), вирощених з парової фази у вакуумі методами відкритого випаровування та лазерного розпилення за різних технологічних факторів, становлять особистий здобуток її автора. Опубліковані наукові праці містять положення, сформульовані особисто автором.

Ступінь достовірності результатів дослідження. Міра обґрунтованості та достовірності наукових положень, результатів і висновків дисертації забезпечена коректним використанням сучасних методів дослідження атомно-силової та скануючої електронної мікроскопії, енерго-дисперсійного та спектрофотометричного аналізів, а також теоретичних підходів, які обґрунтовано використовуються дослідницькими групами, що аналізують оптичні характеристики фотоелектричних матеріалів у провідних університетах світу. Сформульовані результати та висновки підтверджуються передовими дослідженнями інших наукових груп та не суперечать фундаментальним розділам цих теорій.

Практичне значення одержаних результатів полягає у встановленні та обґрунтуванні кореляцій між технологічними факторами осадження тонких плівок із парової фази у вакуумі та їх структурними, оптичними та фотоелектричними властивостями, розроблені теоретичні положення, комп'ютерні симуляції, методики складають основу для розробки

фотоелектричних систем 2-ої генерації.

Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувача в публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 45 наукових працях, зокрема: 1 розділі монографії, 16 статтях, з яких 1 – одноосібна, 15 включені до міжнародних наукометричних баз (Scopus, WoS), 1 патенті України та 27 матеріалах закордонних, міжнародних та всеукраїнських конференцій, що додатково відображають зміст дисертації.

Перелік основних публікацій Яворського Р.С. за темою дисертації

Статті, опубліковані у наукометричних базах Scopus та Web of Science

1. Yavorskyi R., Nykyruy L., Wisz G., Potera P., Adamiak S., Górny S. Structural and optical properties of cadmium telluride obtained by physical vapor deposition technique. *Applied Nanoscience*. 2019. Vol. 9, No. 5. P. 715–724. (Scopus, WoS), IF 3.58.
2. Wisz G., Virt I., Sagan P., Potera P., Yavorskyi R. Structural, Optical and Electrical Properties of Zinc Oxide Layers Produced by Pulsed Laser Deposition Method. *Nanoscale research letters*. 2017. Vol. 12, No. 1. P. 253-260. (Scopus, WoS) IF 3.41.
3. Nykyruy L. I., Yavorskyi R. S., Zapukhlyak Z. R., Wisz G., Potera P. Evaluation of CdS/CdTe thin film solar cells: SCAPS thickness simulation and analysis of optical properties. *Optical Materials*. 2019. Vol. 92. P. 319-329. (Scopus, WoS) IF 2.48.
4. Sawicka-Chudy P., Sibiński M., Rybak-Wilusz E., Cholewa M., Wisz G., Yavorskyi R. Review of the development of copper oxides with titanium dioxide thin-film solar cells. *AIP Advances*. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 010701 – 010701-15. (Scopus, WoS) IF 1.731.
5. Sawicka-Chudy P., Starowicz Z., Wisz G., Yavorskyi R., Zapukhlyak Z., Bester, M., Sibiński M., Cholewa M. Simulation of TiO₂/CuO solar cells with SCAPS-1D software. *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6, No. 8. P. 085918. (Scopus, WoS) IF 1.449.

6. Wisz G., Sawicka-Chudy P., Potera P., Sibiński M., Yavorskyi R., Głowa Ł., Cieniek B., Cholewa M. Morphology, composition, structure and optical properties of thermal annealed Cu₂O thin films prepared by reactive DC sputtering method. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2018. Vol. 672, No 1. P. 81-91. (*Scopus, WoS*) *IF* 0.7.
7. Wisz G., Virt I., Sagan P., Hatala I., Głowa Ł., Kaczor M., Yavorskyi R. Standard Si Photovoltaic Devices Improved by ZnO Film Obtained by Pulsed Laser Deposition // Fesenko O., Yatsenko L. (eds) *Nanophysics, Nanomaterials, Interface Studies, and Applications. NANO 2016. Springer Proceedings in Physics*. Springer, Cham. 2016. Vol. 195. P. 347-352. (*Scopus, WoS*).
8. Nykyrui L., Saliy Ya., Yavorskyi R., Yavorskyi Ya., Wisz G., Górny Sz., Schenderovsky V. CdTe Vapor Phase Condensates on (100) Si and Glass for Solar Cells // 7th International Conference on Nanomaterials - Applications & Properties (NAP)'2017. 2017. Vol. 1. P. 01PCSI26-1 – 01PCSI26-5. (*Scopus, WoS*).
9. Saliy Y. P., Nykyrui L. I., Yavorskyi R. S., Adamiak S. The Surface Morphology of CdTe Thin Films Obtained by Open Evaporation in Vacuum. *Journal of Nano- & Electronic Physics*. 2017. Vol. 9, No. 5. P. 410–416. (*Scopus, WoS*), *IF* 0.5.
10. Yavorskyi R. S., Zapukhlyak Z. R., Yavorskyi Ya. S., Nykyrui L. I. Vapor Phase Condensation for Photovoltaic CdTe Films. *Physics and Chemistry of Solid State* 2017. Vol. 18, No. 4. P. 410–416. (*WoS, Fax*).
11. Yaremiichuk O., Nykyrui 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. (*WoS, Fax*).
12. Wisz G., Nykyrui L., Yakubiv V., Hryhoruk I., Yavorskyi R. Impact of Advanced Research on Development of Renewable Energy Policy: Case of Ukraine. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*. 2018. Vol. 8, No. 4. P. 2367–2384. (*Scopus, WoS*).

13. Wisz G., Sawicka-Chudy P., Yavorskyi R., Potera P., Bester M. TiO₂/Cu₂O heterojunctions for photovoltaic cells application produced by reactive magnetron sputtering, *Materials Today: Proceedings*. 2019. (*Scopus, WoS*).
14. Saliy Ya. P., Yavorskyi R. S. The redistribution modeling of implanted impurity stimulated by vacancies. *Materials Today: Proceedings*. 2019. (*Scopus, WoS*).
15. Yavorskyi R. Features of optical properties of high stable CdTe photovoltaic absorber layer. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. Vol. 21, No. 2. P. 243–253. (*Scopus, WoS*).

Наукові фахові видання України

16. Фреїк Д. М, Яворський Я. С., Потяк В. Ю., Яворський Р. С. Секційні вакуумні нагрівачі для отримання парофазних конденсатів. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2012. Т. 13, №2. С. 509-511.

Розділ монографії

17. Nykyruy L., Yakubiv V., Wisz G., Hryhoruk I., Zapukhlyak Z., Yavorskyi R.. Book title: *Renewable Energy - Resources, Challenges and Applications*. Chapter title: *Energy policy at the EU – non-EU border: critical analysis, opportunities and improve for the future*. InTechOpen. London. ISBN 978-1-78984-284-5. (*Web of Science*).

Перелік додаткових публікацій за темою дисертації

18. Яворський Я. С., Ткачук А. І., Яворський Р. С., Марусяк В. Б. Технологія і властивості парофазних наноструктур на основі термоелектричного телуриду свинцю. *Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашикар'ювські читання 2012"* – 3-5 квітня 2012 р., Київ, Україна – С. 103-105.
19. Бачук В. В., Чав'як І. І., Яворський Я. С., Яворський Р. С. Топологія і механізми росту парофазних наноструктур сполук IV-VI. *Всеукраїнська з міжнародною участю конференція молодих вчених «Хімія, фізика та технологія поверхні»* – 15–16 травня 2012, Київ, Україна – С. 218-219.

20. Яворський Я. С., Яворський Р. С. Конструктивні особливості вакуумних мікропічок для осадження тонких плівок і наноструктур. *Всеукраїнська наукова конференція “Актуальні проблеми теоретичної, експериментальної та прикладної фізики” АПТЕПФ 2012 – 20-22 вересня 2012 р., Тернопіль, Україна – С. 30-32.*
21. Яворський Я. С., Яворський Р. С., Биліна І. С., Марусяк В. Б. Топологія та властивості наноструктур на основі плюмбум телуриду. *Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські Читання 2013» – 2-4 квітня 2013 року, Київ, Україна – С. 43-45.*
22. Javorsky Ja. S., Lopjanko M. A., Pavljuk M. F., Javorsky R. S., Lysyuk Yu. V. Vacuum Vapor-Phase Heaters for Vapor-Phase Condensates. *XIV International Conference «Physics and Technology of thin films and Nanosystems – 20-25 May 2013, Ivano-Frankivsk, Ukraine – P. 153.*
23. Jaworski R. S. Structure and Thermoelectrical Properties of Vapor-Phase Condensates LAST at Sital. *XV International Conference «Physics and Technology of thin films and Nanosystems – 11-16 May 2015, Ivano-Frankivsk, Ukraine – P. 233.*
24. Jaworski R., Jaworski Ja., Makovyshyn V. Structure and thermoelectric properties of the vapor-phase condensation LAST. *X Rzeszowska Konferencja Młodych Fizyków – 28-29 May 2015, Rzeszów, Poland –P. 10.*
25. Wisz G., Virt I., Jaworski R. Warunki wzrostu i własności cienkich warstw ZnO wytwarzanych w technologii PLD. *XI Rzeszowska Konferencja Młodych Fizyków – 2-3 VI 2016, Rzeszów, Poland –P. 19.*
26. Wisz G., Virt I., Sagan P., Potera P., Jaworski R. Structural optical and electrical properties of Zinc oxide layers obtained by pulsed laser deposition method. *The International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2016)” – 24-27 August 2016, Lviv, Ukraine – P. 364.*
27. Яворський Р. С., Никируй Л. І., Яворський Я. С., Запихляк Р. І. Перспективні тонкоплівкові матеріали із нановключеннями для сонячної енергетики. *Міжнародна науково-практична конференція «ЕКОГЕОФОРУМ-2017.*

Актуальні проблеми та інновації» – 22-25 березня 2017 р, Івано Франківськ, Україна – P. 259-260.

28. Yavorskyi R. CdTe and ZnO for heterojunctions in Solar Cells. *XVI International Conference «Physics and Technology of thin films and Nanosystems»* – 15-20 May 2017, Ivano-Frankivsk, Ukraine – P. 203.
29. Yavorskyi R., Wisz G., Virt I., Nykyrui L. Photoconductivity and Photovoltaic Properties of Zinc Oxide Thin Films. *XIV International Conference «Physics and Technology of thin films and Nanosystems»* – 15-20 May 2017, Ivano-Frankivsk, Ukraine – P. 316.
30. Yavorskyi R., Nykyrui L., Wisz G., Potera P., Adamiak S., Yavorskyi Ja., Yaremiichuk O., Malyarska I. Cienkie warstwy ZnO/CdTe dla ogniw fotowoltaicznych. *XII Rzeszowska Konferencja Młodych Fizyków* – 1-2 VI 2017, Rzeszów, Poland –P. 23-24.
31. Nykyrui L., Yaremiichuk O., Yavorskyi R., Kostiuk O. Scattering mechanisms in solid solutions of the PbTe – CdTe system. *XII Rzeszowska Konferencja Młodych Fizyków* – 1-2 VI 2017, Rzeszów, Poland –P. 40-41.
32. Wisz G., Yavorskyi R., Potera P., Bester M., Górny Sz., Mleczek Ł., Głowa Ł. TiO₂/Cu₂O heterojunction for PV application. *The International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2017)”* – 23-26 August 2017, Chernivtsi, Ukraine – P. 467.
33. Nykyrui L., Yavorskyi R., Wisz G., Potera P., Adamiak S., Górny Sz. Structure, optical and electrical properties CdTe prepared by vapor-phase condensation. *The International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2017)”* – 23-26 August 2017, Chernivtsi, Ukraine – P. 460.
34. Wisz G., Sawicka-Chudy P., Potera P., Sibiński M., Yavorskyi R., Głowa Ł., Cieniek B., Cholewa M. Morphology, composition, structure and optical properties of thermal annealed Cu₂O thin films prepared by reactive DC sputtering method // *The International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2017)”* – 23-26 August 2017, Chernivtsi, Ukraine – P. 355.

35. Прокопів В., Никируй Л., Мазур Т., Яворський Р., Малярська І. Механізми формування дефектної підсистеми у парофазних конденсатах кадмій телуриду. *II Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2017* – 22-24 листопада 2017 р, Дніпро, Україна – Р. 299-300.
36. Yavorskyi R., Nykyruy L., Zapuchliak Z., Yavorskyi Ya., Yaremiichuk O., Wisz G., Potera P. *XI International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-11)* – 21-25 Mai 2018, Ivano Frankivsk, Ukraine – 66.
37. Yavorskyi R., Nykyruy L., Yavorskyi Ya., Wisz G., Potera P., Adamiak S., Yaremiichuk O. Parametry optyczne cienkich warstw tellurku kadmu otrzymanych w technologii PVD. *XIII Rzeszowska Konferencja Młodych Fizyków* – 7-8 VI 2018, Rzeszów, Poland –P. 22-23.
38. Nykyruy L., Yavorskyi R., Wisz G., Yavorskyi Ya., Potera P., Adamiak S. Experimental and theoretical studies of CdTe solar cells. *The International research and practice conference "Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2018)"* – 27-30 August 2018, Kiev, Ukraine – P. 572.
39. Wisz G., Sawicka-Chudy P., Yavorskyi R., Zapukhlyak Z., Sibiński M., Bester M., Głowa Ł., Cholewa M. Characterization of $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$ photovoltaic structures on the base of capacitance simulations and measurements. *The International research and practice conference "Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2018)"* – 27-30 August 2018, Kiev, Ukraine – P. 399.
40. Nykyruy L., Yavorskyi R., Wisz G., Zapukhlyak Z., Yavorskyi Ya., Potera P. Effect of annealing on thermally evaporated CdTe thin films for photovoltaic absorber application. *XVII International Freik Conference "Physics and Technology of thin films and Nanosystems"* – 20-25 May 2019, Ivano-Frankivsk, Ukraine – P. 87.
41. Yavorskyi R. S. CdS as a window layer for photovoltaic application of II generation. *XVII International Freik Conference "Physics and Technology of thin films and Nanosystems"* – 20-25, May, 2019, Ivano-Frankivsk, Ukraine – P. 348.

42. Nykyruy L., Yavorskyi R., Wisz G., Yavorskyi Ya., Zapukhlyak Z. Structure and optical properties of CdTe thin films as absorber layer in photoelectric energy converters. *New materials for direct conversion of heat into electricity 2019* – 8 - 9 May 2019, Kraków, Poland – P. 93.
43. Yavorskyi R., Nykyrui L., Wisz G., Potera P., Adamiak S., Yavoskyi Ja. ZnO High Resistivity Transparent layers in CdTe thin films solar cells. *XIV Rzeszowska Konferencja Młodych Fizyków* – 6-7 VI 2019, Rzeszów, Poland – P.15
44. Yavorskyi R. Measurement of ZnO nanowire based CdTe thin film solar cells. *The International research and practice conference Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2019)* – 27-30 August 2019, Lviv, Ukraine – P.707.

Патенти

45. Спосіб отримання термоелектричного тонкоплівкового матеріалу на основі багатокомпонентних сполук Ag-Pb-Sb-Te (LAST): Заявл.: ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», Україна. № u 201800323; заявл. 11.01.2018; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11/2018. 2 с.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Яворського Ростислава Святославовича “Структурні, морфологічні та оптичні властивості тонкоплівкових гетероструктур на основі сполук II-VI” є завершеним науковим дослідженням в рамках поставлених мети і завдань, виконане дисертантом особисто. Вона свідчить про достатній рівень наукової підготовки її автора. Робота містить обґрунтовані та достовірні висновки і пропозиції. За змістом та оформленням вона відповідає встановленим вимогам.

Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 06.03.2019 р. № 167), наказу МОН України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Під час виконання дисертації аспірант дотримувався принципів академічної доброчесності, що підтверджено висновком експертної проблемної комісії за спеціальністю «104 Фізика та астрономія» від 26 серпня 2020 р. (протокол №05-26/7). За результатами перевірки та аналізу матеріалів дисертації не було виявлено ознак академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації, фальсифікації.

Враховуючи високий рівень виконаних досліджень, а також актуальність теми роботи, наукову новизну результатів та їх наукове і практичне значення, дисертація Яворського Ростислава Святославовича «Структурні, морфологічні та оптичні властивості тонкоплівкових гетероструктур на основі сполук II-VI» рекомендується до захисту у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензенти:

доктор фізико-математичних наук,

професор, професор кафедри

матеріалознавства і новітніх технологій

ДВНЗ «Прикарпатський національний

університет імені Василя Стефаника»

І.П. Яремій

доктор фізико-математичних наук,

професор, професор кафедри

матеріалознавства і новітніх технологій

ДВНЗ «Прикарпатський національний

університет імені Василя Стефаника»

І.М. Будзуляк

26.08.2020 р.

