

АНОТАЦІЯ

Яворський Р.С. Структурні, морфологічні та оптичні властивості тонкоплівкових гетероструктур на основі сполук II-VI – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія. ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», Івано-Франківськ, 2020.

На основі проведених комплексних експериментальних досліджень та відповідних теоретичних розрахунків виконано аналіз впливу структурних, морфологічних і оптичних властивостей верхнього шару ZnO, «віконного шару» CdS, поглинального шару CdTe та їх гетероструктур на ефективність фотоелектричної комірки.

У першому розділі здійснено огляд літературних джерел стосовно фізико-хімічних, термодинамічних, структурних та оптичних властивостей напівпровідникових сполук II-VI (CdTe, CdS, ZnO). Зокрема, розглянуто особливості фазових діаграм бінарних сполук, подано значення констант рівноваги, які дають змогу чітко встановити температурні режими випаровування бінарної сполуки. Для сформованої гетеро структури детально проаналізовано зонну і кристалічну структуру кожного із шарів. Описано фізичний зміст оптичних параметрів, таких як коефіцієнти поглинання, проходження та відбивання, оптична ширина забороненої зони кожного матеріалу, а також основні процеси що супроводжуються при взаємодії електромагнітної хвилі із поверхнею тонкої плівки.

Другий розділ дисертаційного дослідження стосується технології синтезу бінарних сполук CdS та CdTe та отримання тонкоплівкових парофазних конденсатів на підкладах зі скла та (100) кремнію за різних технологічних умов осадження. Наведено конструктивні особливості установки, технологічні режими осадження та їх модифікація для конкретних задач. Також проаналізована кінетика процесу осадження тонких плівок із парової фази, механізми зародження, формування і росту тонкоплівкових наноконденсатів, вплив умов осадження на швидкість росту окремого шару. Охарактеризовано

процес лазерного імпульсного осадження для вирощування тонких плівок оксиду цинку. Виконано опис функціональних особливостей діагностичного обладнання, яке використано для структурного аналізу, зокрема, для визначення фазового і хімічного складу, морфології поверхні та встановлення процесів зародження і росту плівок досліджуваних матеріалів: скануючий електронний мікроскоп (СЕМ), атомно-силовий мікроскоп (АСМ), установок для проведення енерго-дисперсійного (EDS) та X-променевого-дифракційного (XRD) аналізу, профілометр; спектральних методів досліджень: спектрофотометр. Детально розглянуто основні принципи застосовуваних у роботі теоретичних методик: розрахунки оптичних констант методами Сванеполья та Таука, а також симуляційних пакетів.

У третьому розділі, методами скануючої електронної та атомно-силової мікроскопії наведено аналіз дослідження формування морфології поверхні тонких плівок CdS і CdTe, осаджених на підкладки із скла та (100) кремнію методом відкритого випаровування у вакуумі. Серія зразків осаджувалась за різних технологічних факторів. Плівки ZnO вирощували методом лазерного імпульсного осадження на підкладках із скла і кремнію.

Із фазового аналізу методом EDS слідує, що осаджені плівки характеризуються стехіометричним складом. Крім того, виходячи із аналізу дифракційного спектру, тонких плівок CdTe/скло спостерігається незначне зміщення піків дифракції у бік меншого кута, що свідчить про те, що шар CdTe знаходиться під напруженням стиску, оскільки обчислені значення $a_0 = 6.500 \text{ Å}$ та $a_0 = 6.497 \text{ Å}$ перевищують значення для стандартного зразка порошку ($6,481 \text{ Å}$). Напруги, що виникають у тонкій плівці, є подвійними: внутрішніми і зовнішніми. Внутрішні напруги можуть бути спричинені умовами, що склалися під час осадження плівки (температура підкладки, швидкість осадження тощо), тоді як зовнішні напруги визначаються різницею коефіцієнтів теплового розширення між підкладкою та тонкою плівкою.

На основі АСМ-досліджень встановлено, що ріст тонких плівок CdTe як на кремнієвій, так і на скляній підкладках за досліджуваних значень технологічних факторів реалізується за механізмом Странскі-Крастанова –

спершу наростає шар CdTe із подальшим утворенням на конденсованій плівці окремих рівномірно розподілених нанооб'єктів. Причому, найбільш ймовірна висота рельєфу становить близько 25 нм для плівок осаджених на кремнієвих підкладках та близько 35 нм для плівок, осаджених на скляних підкладках.

Виконуючи аналіз поверхні за допомогою побудованих на основі АСМ-зображень 2D-кореляційних функцій, встановлено що для товстих і тонких плівок, вирощених на кремнієвих підкладках, а також тонких плівок, вирощених на склі, спостерігаються періодичні ряди. Наявність періодичних рядів проявляється на зображеннях в оберненому просторі, отриманих перетворенням Фур'є, що підтверджує технологічно контрольований ріст плівки. Об'єкти на поверхні тонкої плівки розташовуються у квадратній (2D) ґратці. Зі збільшенням товщини плівки спостерігається реконструкція ґратки через моноклінну у гексагональну.

Четвертий розділ присвячений аналізу спектральних характеристик тонких плівок CdTe, CdS та ZnO на підкладках із скла. Проведено розрахунок оптичної ширини забороненої зони відповідно до методу Таука. Оптичні константи, такі як коефіцієнт поглинання, показник заломлення, теоретично розрахована товщина плівки, коефіцієнт екстинції та оптична провідність визначали використовуючи метод Сванеполья. Плівки CdTe відрізняються високою прозорістю в ближній інфрачервоній області та середнім коефіцієнтом пропускання, який коливається від 57% до 80%. Усі плівки демонстрували дуже різкий край поглинання поблизу 850 нм, що відповідає ширині забороненої зони CdTe, незалежно від товщини плівки. Крім того, спостережувана інтерференційна картина в спектрах оптичної прозорості є вказівкою на однорідність осаджених плівок по товщині. Ці результати також підтверджуються структурним аналізом, що можна пояснити різницею між показниками заломлення плівки та підкладки, а також через наявність численних точок відбивання.

На вирощених і відпалених плівках ZnO проявляються різні механізми розсіювання носіїв заряду. У цих плівках показано наявність точкових дефектів, пов'язаних із киснем, зокрема, це вакансії кисню (V_O) та міжвузлові атоми

кисню (O_i). Відпал в атмосфері кисню дозволяє зменшити **кількість** точкових дефектів.

Розрахункові значення оптичної ширини забороненої зони тонких плівок ZnO показують збільшення ширини із підвищенням температури підкладки. Це можна пояснити значним зсувом електронної густини Бурштайна. Наявність хвоста у видимому діапазоні спектра поглинання пояснюється енергією Урбаха – індуковане оптичне поглинання власних дефектів. Вона визначається із емпіричного закону Урбаха, яка вказує на спінообмінну взаємодію між електронами провідності та електронами, локалізованими дефектами, а також їх взаємодією з фононами.

У п'ятому розділі проведено оптимізацію кінцевої комірки, використовуючи середовище комп'ютерних симуляцій фотоелектричних комірок – SCAPS. Аналіз гетероструктури проводився на основі вольт-амперних характеристик. Визначено оптимальні параметри осадження кожного із шарів. Тонкі плівки на основі CdTe продемонстрували не високі значення ККД $\sim 12,18\%$, фактор заповнення при цьому складав FF $\sim 65\%$. Для покращення ефективності у якості «віконного шару» додатково використовувався шар CdS. Експериментально товщина віконного шару CdS коливалася від 10 до 100 нм, тоді як інші параметри шару поглинання CdTe товщиною $d = 3$ мкм залишалися постійними. Зменшення товщини віконного шару CdS призводить безпосередньо до підвищення ефективності сонячних елементів за рахунок зменшення втрат поглинання, що відбуваються у ньому, а також можливого підвищення струму короткого замикання. Більше того, зменшення товщини CdS збільшує можливість дифузії CdS до CdTe в процесі виготовлення сонячних елементів. Така дифузія між віконним шаром та шаром поглинача може зменшити деформацію, що виникає внаслідок невідповідності (сталіх) ґратки, і, таким чином, викликає зменшення дефектів в інтерфейсі.

Ключові слова: тонкі плівки II-VI, оптичні властивості, гетероструктури, фотоелектрична комірка, метод Сванеполья, структурні властивості, сонячні елементи.

SUMMARY

Yavorskyi R.S. Structural, morphological and optical properties of thin-film heterostructures based on compounds II-VI - Manuscript.

PhD thesis in specialty 104 - Physics and astronomy. Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, 2020.

Based on complex experimental studies and relevant theoretical calculations, the analysis of the influence of structural, morphological and optical properties of the upper ZnO layer, the "window layer" of CdS, the absorption layer of CdTe and their heterostructures on the efficiency of the photoelectric cell was performed.

The first chapter reviews the literature on physicochemical, thermodynamic, structural and optical properties of semiconductor compounds II-VI (CdTe, CdS, ZnO). In particular, the features of phase diagrams of binary compounds are considered, the values of equilibrium constants are given, which allow to clearly establish the temperature regimes of evaporation of a binary compound, have been studied. The band and crystal structure of each of the layers are analyzed in detail for the corresponding heterostructure.

The physical content of optical parameters, such as the absorption coefficient, transmission and reflection coefficients, the optical width of the band gap of each material, as well as the main processes that accompany the interaction of the electromagnetic wave with the surface of the thin film is represented.

The second chapter of PhD thesis research concerns the technology of synthesis of binary compounds CdS and CdTe and obtaining thin-film vapor-phase condensates on glass and (100) silicon substrates under different technological conditions of deposition. The design features of the installation, technological modes of deposition and their modification for specific tasks are described. The kinetics of the deposition process of thin films from the vapor phase, the mechanisms of nucleation, formation and growth of thin-film nanocondensates, the influence of deposition conditions on the growth rate of a single layer are also analyzed. The process of laser pulse deposition for growing thin films of zinc oxide is described.

The process of laser pulse deposition for growing thin films of zinc oxide is described. The functional features of diagnostic equipment used for structural

analysis are presented, in particular, for determination of phase and chemical composition, surface morphology and establishment of nucleation and growth processes of films of investigated materials is performed: scanning electron microscope (SEM), atomic force microscope (AFM), installations for energy dispersion (EDS) and X-ray diffraction (XRD) analysis, profilometer; spectral research methods: spectrophotometer. The main principles of theoretical methods used in thesis are considered in detail: calculations of optical constants by Swanepoel and Tauc methods, as well as simulation packages. The main principles of theoretical methods and simulation packages used in thesis are considered in detail: calculations of optical constants by the methods of Swanepoel and Tauc.

The third chapter presents an analysis of the study of the surface morphology formation of CdS and CdTe thin films by scanning electron and atomic force microscopy deposited on glass and (100) silicon substrates by open evaporation in vacuum. A series of samples was deposited by various technological parameters. ZnO thin films were deposited by laser pulse deposition on glass and silicon substrates.

From the phase analysis by the EDS method it follows that the deposited films are characterized by a stoichiometric composition. In addition, based on the diffraction spectrum of CdTe/glass thin films, there is a slight shift of the diffraction peaks towards a smaller angle, which indicates that the CdTe layer is under compressive stress, because the calculated values of $a_0 = 6.500 \text{ \AA}$ and $a_0 = 6.497 \text{ \AA}$ exceed for a standard powder sample ($6.481 \text{ \AA}$). The stress developed in the thin film is double: internal and external. Internal stress can be caused by conditions prevailing during film deposition (substrate temperature, deposition rate, etc.), while external stress are determined by the difference in thermal expansion coefficients between the substrate and the thin film.

Based on AFM studies, it was found that the growth of CdTe thin films on both silicon and glass substrates at the studied values of technological factors is realized by the Stransky-Krastanov mechanism - first the CdTe layer grows with the subsequent formation of individual uniformly distributed nano on the condensed film. Moreover, the most probable relief height is about 25 nm for films deposited on silicon substrates and about 35 nm for films deposited on glass substrates.

Based on AFM studies, it was found that the growth of CdTe thin films on both silicon and glass substrates at the certain technological modes is realized by the Stransky-Krastanov mechanism - first the CdTe layer grows with the subsequent formation of individual uniformly distributed nanoobjects on the deposited film. Moreover, the most probable relief height is about 25 nm for films deposited on silicon substrates and about 35 nm for films deposited on glass substrates.

Performing surface analysis using 2D-correlation functions based on AFM images, it was found that for thick and thin films grown on silicon substrates, as well as thin films grown on glass, periodic series are observed. The presence of periodic series is manifested in the images in reciprocal space obtained by the Fourier transform, which confirms the technologically controlled growth of the film. Nanoobjects on the surface of the thin film are arranged in a square (2D) lattice. As the film thickness increases, the lattice is reconstructed through a monoclinic to a hexagonal one.

The fourth chapter is devoted to the analysis of the spectral characteristics of CdTe, CdS and ZnO thin films on glass substrates. The optical width of the band gap was calculated according to the Tauc method. Optical constants such as absorption coefficient, refractive index, theoretically calculated film thickness, extinction coefficient and optical conductivity were determined using the Swanepoel method. CdTe films are characterized by high near-infrared transparency and an average transmittance ranging from 57% to 80%. All films showed a very sharp absorption edge near 850 nm, which corresponds to the band gap of CdTe, regardless of the film thickness. In addition, the observed interference pattern in the spectra of optical transparency is an indication of the homogeneity of the deposited films in thickness. These results are also confirmed by structural analysis. This can be explained by the fact that there is a difference between the refractive indices of the film and the substrate, as well as due to the presence of numerous points of reflection.

Various mechanisms of charge carrier scattering are manifested on as-grown and annealed ZnO films. These films show the presence of oxygen point defects, including oxygen vacancies (V_O) and interstitial oxygen atoms (O_i). Annealing in oxygen atmosphere reduces a number of point defects.

The calculated values of the optical band gap of ZnO thin films show an increase in width with increasing substrate temperature. This can be explained by a significant shift in Burstein's electron density. The presence of the tail in the visible range of the absorption spectrum is explained by the Urbach energy, that indicates the spin-exchange interaction between conduction electrons and electrons, localized defects, and their interaction with phonons.

In the fifth chapter the optimization of the developed cell using solar cell capacitance simulator – SCAPS – is performed. The analysis of the heterostructure was performed on the basis of current–voltage characteristics. The optimal deposition parameters of each of the layers were determined. CdTe-based thin films did not show high efficiency values of $\sim 12.18\%$, the fill factor FF was $\sim 65\%$. CdS was additionally used as a "window layer" to improve efficiency. Experimentally, the thickness of the CdS window layer ranged from 10 to 100 nm, while other parameters of the absorption layer CdTe with a thickness $d = 3 \mu\text{m}$ remained constant. Reducing the thickness of the CdS window layer directly leads to an increase in the efficiency of solar cells by reducing the absorption losses that occur in it, as well as a possible increase in short-circuit current. Moreover, reducing the thickness of CdS increases the possibility of diffusion of CdS to CdTe in the manufacturing process of solar cells. Such diffusion between the window layer and the absorption layer can reduce the deformation caused by the mismatch of the lattice parameters, and thus causes a reduction in defects in the interface.

Keywords: thin films II-VI, optical properties, heterostructures, photoelectric cell, Swanepoel method, structural properties, solar cells.

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. Nykyrui 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., Nykyruy 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., Nykyruy 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., 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. (*WoS, Fax*).
 12. Wisz G., Nykyruy 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 "Лашкарьовські 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., Біліна 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., Запужляк 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 – P. 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, 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. № и 201800323; заявл. 11.01.2018; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11/2018. 2 с.