

АНОТАЦІЯ

Вакалюк І.В. Структурні та оптичні властивості бінарних та легованих тонких плівок на основі CdTe, CdS, отриманих методом фізичного осадження у вакуумі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія. – Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано - Франківськ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню морфології поверхні, структурних та оптичних властивостей бінарних та легованих тонких плівок на основі CdTe, CdS. Проведено аналіз дифузійних процесів, що відбуваються в шарах фотоелектричних плівок під час їх осадження методом термічного випаровування у вакуумі. На основі експериментальних досліджень та відповідних теоретичних розрахунків виконано моделювання фотоелектричної гетеросистеми CdTe/CdS у системі комп'ютерної симуляції SCAPS.

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, визначено об'єкт і предмет аналізу, сформульовано мету та основні завдання. Окреслено наукову новизну отриманих результатів, розкрито їхнє практичне значення. Подано відомості про публікації за темою дослідження та апробацію результатів дисертації.

У першому розділі представлено аналіз наукових джерел, які відображають сучасний стан дослідженої теми, проаналізовано стан альтернативної енергетики в Україні, зокрема розвиток та впровадження сонячних енергетичних технологій. Розглянуто основні тенденції, технологічні досягнення та перспективи впровадження інноваційних матеріалів. Проаналізовано основні ключові аспекти розвитку та перспективи використання тонкоплівкових сонячних технологій на основі CdTe, CIGS та їх ефективності. Наведено пошарову структуру і енергетичну зонну діаграму типових сонячних елементів. Особливу увагу приділено фізико-хімічним, структурним, електрофізичним, енергетичним характеристикам бінарних напівпровідникових сполук II-VI. Також проведено огляд джерел щодо впливу поверхневих ефектів

на електрофізичні параметри тонких плівок CdTe, що є ключовими факторами для оптимізації структури.

У другому розділі проведено аналіз досліджень, присвячених вивченню особливостей P–T–x діаграм фазової рівноваги системи Cd–Te, контролю відхилення від стехіометрії, описано технологічні аспекти синтезу. Розглянуто значення констант рівноваги, що дозволяють визначити оптимальні температурні умови випаровування бінарної сполуки. Описано методику проведення двотемпературного відпалу.

Детально розглянуто основні методи легування CdTe та вплив легуючих домішок на електричні, оптичні та структурні властивості матеріалу. Здійснено аналіз основних методів (фізичних та хімічних) осадження тонких плівок. Описано технологію отримання тонкоплівкових парофазних конденсатів за різних технологічних умов методом фізичного осадження у вакуумі. Наведено конструктивні особливості експериментальної установки, вказано на технологічні режими осадження та виконано їх модифікацію, відповідно до поставлених завдань. Розглянуто методику визначення мікротвердості тонких плівок за Віккерсом та товщини інтерференційним методом за допомогою мікроінтерферометра.

Проведено аналіз функціональних характеристик діагностичного обладнання, застосованого для структурного вивчення тонкоплівкових матеріалів. Розглянуто методи ідентифікації хімічного складу, оцінки морфологічних особливостей поверхні, а також дослідження механізмів зародження та росту тонких плівок. Наведено опис відповідного обладнання: атомно-силового мікроскопа (АСМ), скануючого електронного мікроскопа (СЕМ), енергодисперсійного X-променевого аналізу (EDS) та X-променевої фотоелектронної спектроскопії (XPS).

Розглянуто методи для визначення оптичних характеристик тонких плівок методами спектрофотометрії для вивчення оптичного поглинання та відбивання. Описано програмне середовище комп'ютерних симуляцій та базові принципи

SCAPS-1D, створене для моделювання електричних характеристик (на постійному та змінному струмі) фотоперетворювачів з гетеропереходами.

У третьому розділі наведено основні технологічні параметри отримані методом фізичного осадження у вакуумі тонких плівок CdS, CdTe, CdTe:In. Проведений експрес-аналіз поверхні свіжонапилених плівок отриманої за допомогою мікроскопа – твердоміра вказав на формування рівномірної поверхні без наявності структурних неоднорідностей, що підтверджує доцільність отримання плівок методом фізичного осадження у вакуумі. На основі даних X-променевої фотоелектронної спектроскопії досліджено елементний склад плівок CdTe і CdS. Методом енергодисперсійної X-променевої спектроскопії (EDS) встановлено масовий склад отриманих матеріалів. Показано, що склад є близьким до стехіометричного співвідношення. Методами скануючої електронної та атомно-силової мікроскопії проаналізовано морфологію поверхні тонких плівок CdS і CdTe осаджених за різних технологічних факторів. Встановлено залежність морфології поверхні плівок від технологічних факторів осадження. Зокрема, для плівок CdS показано формування поверхневих утворень у формі «луски». Зокрема, плівки меншої товщини мають «лускоподібну» структуру, тобто конденсат утворює окремі пластини на поверхні плівки. Розмір цих пластин і сама їх наявність визначається часом осадження. Характерною особливістю методу термічного випаровування у вакуумі став висновок про те, що збільшення часу плівок осадження призводить до зменшення розмірів «луски» (зменшення латеральних розмірів поверхневих утворень). Ще одним важливим результатом дисертаційної роботи став висновок про те, що збільшення часу осадження призводить до розмитості контурів таких пластин, а для найбільш товстих плівок воно взагалі відсутнє. Таким чином, зі збільшенням тривалості осадження поверхневі пластинки поступово зменшуються в розмірах. А з товщини плівок понад 1000 нм пластинки вже не визначаються як окремі пласкі структури, і їх можна розглядати, як суцільну поверхню.

Проведено аналіз дефектної структури CdTe:In, який дає змогу коректно інтерпретувати оптичні властивості матеріалу та враховувати базові

характеристики дефектів під час комп'ютерного моделювання його фотоелектричних параметрів. Наведено рівняння електронейтральності та запропоновано моделі формування системи дефектів для CdTe легованого In (однзарядні вакансії у позиції кадмію та заміщення індієм вузлових атомів кадмію).

Отримано та досліджено характеристики фотоелектричної структури на основі гетеропереходу CdS/CdTe. Хімічний склад гетероструктури досліджено за допомогою TEM у режимі зйомки високої роздільної здатності (HAADF). Проведений аналіз показав, що процес фізичного осадження у вакуумі призводить до активації дифузійних процесів між сусідніми шарами відносно CdTe, що викликало зміни в оптичних та електричних характеристиках цілої фотоелектричної гетероструктури. Дослідження підтверджує наявність дифузії сірки в матрицю CdTe. Формування шару $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ відбувається поблизу межі розділу CdTe/CdS. Найбільш ймовірним механізмом є утворення проміжного шару Cd_5TeS_4 , що зумовлене взаємною дифузією атомів сірки (S) і телуру (Te) між шарами CdTe та CdS.

Крім того, показано, що нагрівання скляної підкладки спричинює випаровування частини атомів купруму із контактного шару. При цьому формується проміжний шар Cu_xTe , який утворює зворотний контакт із нижчим питомим опором, формуючи сильно вироджені сполуки $p^+-\text{Cu}_x\text{Te}$ та наступний шар CdTe із легуючою домішкою Cu. Показано, що дифузія Cu в CdS викликає перекидання його по межах зерен, а дифузія Cu в плівку CdTe спричинює формування дефектів, які зменшують термін служби фотогенерованих носіїв. Таким чином, зроблено висновок, що коригуючи кількість надлишку атомів купруму, можна плавно впливати на властивості гетероструктури. Так, надлишок Cu спричинює пониження ефективності через збільшення рекомбінації носіїв, якщо має місце дифузія надлишку Cu до передньої області, а також через вплив на висоту бар'єру.

У четвертому розділі наведено спектри оптичного пропускання та відбивання тонких плівок CdS, CdTe та CdTe:In різної товщини нанесених на

скляні підкладки. Спектральні характеристики експериментально досліджено із використанням спектрофотометра Agilent Technologies Cary Series UV-Vis-NIR. Оптичні властивості вивчали шляхом аналізу залежності коефіцієнта пропускання від довжини хвилі. Тонкі плівки CdS характеризуються високою прозорістю в ближній інфрачервоній області спектра. Коефіцієнт пропускання отриманий в межах 70–95%, що свідчить про доцільність використання матеріалу як віконного шару в гетероперехідних сонячних елементах. Спостерігається різкий край оптичного поглинання близько 550 нм, що відповідає ширині забороненої зони CdS (2,4 eV). Плівки CdTe мають високу прозорість у ближньому інфрачервоному спектрі та середній коефіцієнт пропускання, що варіюється від 57% до 80%. Усі плівки демонструють різкий край поглинання близько 850 нм, що узгоджується з шириною забороненої зони CdTe, незалежно від товщини плівки. Інтерференційні максимуми та мінімуми в спектрах оптичної прозорості свідчать про високу однорідність плівок по товщині. Спектр CdTe:In демонструє інтерференційні смуги при $\lambda > 800$ нм. Плівки мають високу прозорість у ближній інфрачервоній області з максимальним коефіцієнтом пропускання 93,02 % для зразка товщиною 540 нм.

Оптичні константи, зокрема коефіцієнт поглинання, показник заломлення, теоретичну товщину плівки та оптичну провідність, визначали за методом Сванеполя. Максимальний коефіцієнт поглинання тонких плівок CdTe легованих In становить $2,7 \cdot 10^3$ (см⁻¹) для зразка товщиною 580 нм. Проведено розрахунок оптичної ширини забороненої зони для CdS допомогою методики Таука, показано, що отримані значення добре узгоджуються з літературними даними.

Теоретично визначено характер поведінки показника заломлення $n(\lambda)$ тонких плівок CdTe:In. Показано, що його значення зменшується зі збільшенням довжини хвилі і знаходиться в межах 2,54–2,62. Різке ж збільшення показника заломлення при довжині хвилі < 900 нм зумовлене зменшенням пропускання поблизу краю власного поглинання.

Отримано значення оптичної ширини забороненої зони за допомогою методу Таука, які знаходяться в межах 2,27–2,61 еВ. Показано, що оптичне поглинання наближається до нуля при нижчих енергіях фотонів, але не до абсолютного нуля (ефект хвоста Урбаха).

За допомогою комп'ютерного середовища SCAPS змодельовано фотоелектричні характеристики, як для окремих шарів, так і для гетероструктур типу CdTe/CdS («передній контакт / скло / CdS / CdS_{0.5}Te_{0.5} / CdTe / задній контакт»). Показано можливість формування проміжного шару Cd₅TeS₄ за рахунок міжшарової дифузії, що підвищує ефективність гетеросистеми до 22,91%. Аналіз показав, що зміна товщини проміжного шару мало впливає на ефективність, але варіація ширини забороненої зони істотно змінює показники: зменшення ширини забороненої зони до 1,34 еВ знижує ефективність до 10,78%.

Ключові слова: тонкі плівки, телурид кадмію, сульфід кадмію, оптичні властивості, гетероструктури, фотоелектрична комірка, структурні властивості, сонячні елементи, спектри пропускання, спектри відбивання.

SUMMARY

Vakaliuk I.V. Structural and optical properties of binary and doped thin films based on CdTe, CdS obtained by physical vapor deposition in vacuum. – Qualification scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 10 Natural Sciences in the specialty 104 Physics and Astronomy. – Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, 2025.

The dissertation is dedicated to the study of surface morphology, structural and optical properties of binary and doped thin films based on CdTe and CdS. An analysis of diffusion processes occurring in the layers of photovoltaic films during their deposition by thermal evaporation in vacuum was conducted. Based on experimental research and corresponding theoretical calculations, modeling of the CdTe/CdS photovoltaic heterostructure was carried out using the SCAPS computer simulation system.

The introduction substantiates the relevance of the research, defines the object and subject of analysis, and formulates the aim and main objectives. It outlines the scientific novelty of the obtained results and highlights their practical significance. Information is provided regarding publications on the research topic and the approbation of the dissertation results.

The first chapter presents an analysis of scientific sources reflecting the current state of research on the topic, as well as an overview of the status of alternative energy in Ukraine, with a particular focus on the development and implementation of solar energy technologies. It examines the main trends, technological achievements, and prospects for the introduction of innovative materials. Key aspects of the development and future potential of thin-film solar technologies based on CdTe and CIGS, along with their efficiency, are analyzed. The layered structure and energy band diagram of typical solar cells are provided. Special attention is given to the physicochemical, structural, electrophysical, and energetic characteristics of binary II-VI semiconductor compounds. A review of sources on the impact of surface effects on the electrophysical parameters of CdTe thin films is also included, as these are critical factors for optimizing the structure.

The second chapter provides an analysis of studies focused on the characteristics of the P–T–x phase equilibrium diagrams of the Cd–Te system and the control of deviations from stoichiometry. Technological aspects of synthesis are described. The significance of equilibrium constants is considered, enabling the determination of optimal temperature conditions for the evaporation of the binary compound. The methodology for performing two-temperature annealing is also outlined.

The main methods of CdTe doping and the influence of dopant impurities on the electrical, optical, and structural properties of the material are examined in detail. An analysis of the main methods (both physical and chemical) for thin film deposition is conducted. The technology for obtaining thin-film vapor-phase condensates under various technological conditions by physical vapor deposition in vacuum is described. The structural features of the experimental setup are presented, the technological deposition modes are specified, and their modification is carried out in accordance with

the research objectives. The methodology for determining the microhardness of thin films using the Vickers method, as well as thickness measurement using the interference method with a microinterferometer, is discussed.

An analysis of the functional characteristics of the diagnostic equipment used for the structural study of thin-film materials is presented. Methods for chemical composition identification, assessment of surface morphological features, and investigation of the nucleation and growth mechanisms of thin films are considered. A description of the relevant equipment is provided: atomic force microscope (AFM), scanning electron microscope (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

Methods for determining the optical characteristics of thin films using spectrophotometry to study optical absorption and reflection are considered. The software environment for computer simulations and the basic principles of SCAPS-1D, developed for modeling the electrical characteristics (under direct and alternating current) of heterojunction-based photovoltaic devices, are described.

The third chapter presents the main technological parameters of thin CdS, CdTe, and CdTe:In films obtained by physical vapor deposition in vacuum. A rapid analysis of the surface of freshly deposited films, conducted using a microhardness tester-microscope, indicated the formation of a uniform surface without structural inhomogeneities, confirming the feasibility of using vacuum physical vapor deposition for film fabrication. Based on X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) data, the elemental composition of CdTe and CdS films was investigated. The mass composition of the obtained materials was determined using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), showing a composition close to stoichiometric ratio.

The surface morphology of CdS and CdTe thin films deposited under various technological conditions was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM). A dependence of surface morphology on the deposition parameters was established. In particular, for CdS films, the formation of surface structures resembling "scales" was observed. Thinner films exhibited a "scale-like" structure, where the condensate formed discrete platelets on the film surface. The

size and presence of these platelets were found to depend on the deposition time. A notable feature of the thermal vacuum evaporation method was the finding that increased deposition time led to a reduction in the size of the "scales" (i.e., a decrease in the lateral dimensions of the surface structures). Another important result of the dissertation was the conclusion that increasing the deposition time also led to blurring of the edges of these platelets, which were not distinguishable at all in the thickest films. Thus, with increasing deposition time, the surface platelets gradually decreased in size, and for films thicker than 1000 nm, the platelets were no longer distinguishable as separate flat structures and could be considered a continuous surface.

An analysis of the defect structure of CdTe:In was carried out, enabling accurate interpretation of the material's optical properties and consideration of the fundamental characteristics of defects during computer modeling of its photovoltaic parameters. The electroneutrality equation is presented, and models for defect system formation in indium-doped CdTe (single-charged vacancies in the cadmium position and substitution of indium for nodal cadmium atoms) are proposed.

The characteristics of a photovoltaic structure based on a CdS/CdTe heterojunction have been obtained and investigated. The chemical composition of the heterostructure was examined using transmission electron microscopy (TEM) in high-angle annular dark-field (HAADF) imaging mode. The analysis revealed that the process of physical vacuum deposition activates diffusion processes between adjacent layers with respect to CdTe, which leads to changes in the optical and electrical properties of the entire photovoltaic heterostructure. The study confirms the presence of sulfur diffusion into the CdTe matrix. The formation of a $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ layer occurs near the CdTe/CdS interface. The most probable mechanism involves the formation of an intermediate Cd_5TeS_4 layer, resulting from mutual diffusion of sulfur (S) and tellurium (Te) atoms between the CdTe and CdS layers.

It was also demonstrated that heating of the glass substrate leads to the evaporation of a portion of copper atoms from the contact layer. As a result, an intermediate Cu_xTe layer is formed, which creates a back contact with lower specific resistivity, leading to the formation of heavily doped $p^+-\text{Cu}_x\text{Te}$ compounds and a

subsequent CdTe layer doped with Cu. It was shown that Cu diffusion into CdS induces grain boundary segregation, while Cu diffusion into the CdTe film leads to the formation of defects that reduce the lifetime of photogenerated carriers. Therefore, it was concluded that by adjusting the amount of excess copper atoms, it is possible to smoothly influence the properties of the heterostructure. An excess of Cu causes a decrease in efficiency due to increased carrier recombination – particularly if Cu diffuses into the front region – as well as due to its effect on the barrier height.

Chapter four presents the optical transmission and reflection spectra of thin films of CdS, CdTe, and CdTe:In of various thicknesses deposited on glass substrates. The spectral characteristics were experimentally studied using an Agilent Technologies Cary Series UV-Vis-NIR spectrophotometer. The optical properties were investigated by analyzing the wavelength dependence of the transmittance coefficient. CdS thin films exhibit high transparency in the near-infrared region of the spectrum. The transmittance coefficient was found to range from 70% to 95%, indicating the suitability of the material for use as a window layer in heterojunction solar cells. A sharp absorption edge is observed around 550 nm, corresponding to the bandgap of CdS (2,4 eV). CdTe films demonstrate high transparency in the near-infrared region, with an average transmittance ranging from 57% to 80%. All films show a sharp absorption edge around 850 nm, consistent with the bandgap of CdTe, regardless of film thickness. The presence of interference maxima and minima in the optical transparency spectra indicates high uniformity of the films in thickness. The CdTe:In spectrum displays interference fringes at wavelengths $\lambda > 800$ nm. The films exhibit high transparency in the near-infrared region, with a maximum transmittance of 93,02% for the sample with a thickness of 540 nm.

The optical constants, including the absorption coefficient, refractive index, theoretical film thickness, and optical conductivity, were determined using the Swanepoel method. The maximum absorption coefficient of indium-doped CdTe thin films was found to be $2,7 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ for the sample with a thickness of 580 nm. The optical bandgap of CdS was calculated using the Tauc's method, and the obtained values show good agreement with data reported in the literature.

The wavelength-dependent behavior of the refractive index $n(\lambda)$ of CdTe:In thin films was theoretically determined. It was shown that the refractive index decreases with increasing wavelength and lies in the range of 2,54-2,62. A sharp increase in the refractive index at wavelengths below 900 nm is attributed to a decrease in transmittance near the intrinsic absorption edge.

The optical bandgap values, obtained using the Tauc's method, range from 2,27 to 2,61 eV. It was demonstrated that the optical absorption approaches zero at lower photon energies but does not vanish completely, indicating the presence of the Urbach tail effect.

Photovoltaic characteristics were simulated using the SCAPS simulation environment for both individual layers and heterostructures of the CdTe/CdS type ("front contact / glass / CdS / CdSTe / CdTe / back contact"). The possibility of forming an intermediate Cd_5TeS_4 layer due to interlayer diffusion was demonstrated, which increases the efficiency of the heterostructure to 22,91%. The analysis showed that variations in the thickness of the intermediate layer have a minor impact on efficiency, whereas changes in the bandgap significantly affect performance: reducing the bandgap to 1,34 eV leads to a decrease in efficiency to 10,78%.

Keywords: thin films, cadmium telluride, cadmium sulfide, optical properties, heterostructures, photovoltaic cell, structural properties, solar cells, transmission spectra, reflection spectra.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті, що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science:

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>

Статті у фахових виданнях України (категорія Б):

1. Вакалюк І., Яворський Р., Замуруєва О., Катанова Л., Скіпальський, М. Фотовольтаїчні матеріали: поточні ефективності та майбутні виклики. Фізика та освітні технології. 2023. № 3. С. 3–12.

DOI: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-1>

URL: <http://journals.vnu.volyn.ua/index.php/physics/article/view/1466>

2. Олексин Ж.Р., Никируй Л.І., Яворський Р.С., Малярська І.В., Матківський О.М., Замуруєва О.В., Федосов С.А. Моделювання впливу

параметрів буферного шару на властивості фотоелектричної комірки. Наукові нотатки. 2021. № 72. С. 204-2016.

DOI: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2021.72.31>

URL: https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/article/view/698

Публікації, що засвідчують апробацію результатів дослідження

1. Вакалюк І.В., Яворський Р.С., Грицяк М.Д., Глеб В.Ф., Никируй Л.І., Федосов С.А. Особливості фотоелектричних характеристик гетероструктури Pt/CdS/CdTe/Cu/glass отриманої методом фізичного осадження з парової фази. VIII Міжнародна науково-практична конференція «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та перспективи»: матеріали конф. (м. Луцьк, 18-19 жовтня 2024 р.). Луцьк, 2024. С. 19-21.

URL: https://drive.google.com/file/d/1Vb5l3wdr-ZPvTvxiBzYdQxY4C_V5Autq/view?pli=1

2. Скіпальський М., Замуруєва О., Яворський Р., Вакалюк І. Тонкоплівкові сонячні елементи на основі CdTe. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем» (MEICS-2023): матеріали конф. (Дніпро, 22-24 листопада 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 208-209.

URL: https://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/2023/materiali%20konf/25_MEICS-2023.pdf

3. Vakaliuk I.V., Yavorskyi R.S., Naidych B.P., Nykyruy L.I., Katanova L.O., Zamuruieva O.V. Optical and photoelectric properties of CdTe:In thin films deposited by PVD technique. IEEE 13th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties: materials of conf. (Bratislava, Slovakia, 10-15 September 2023). Bratislava, Slovakia, 2023. P. 10nee-50.

URL: https://ieeenap.org/data/Book_of_Abstracts_NAP_2023.pdf

4. Vakaliuk I.V., Nykyruy L.I., Yavorskyi R.S., Fedosov S.A., Hrytsyak M.D., Ilnytskiy R.V. Features of In Doping on Spectral Properties of CdTe Thin Films. XIX International Freik Conference "Physics and Technology of thin films and

Nanosystems”: materials of conf. (Ivano Frankivsk, 9-14 October 2023). Ivano Frankivsk, 2023. P. 92.

URL: https://kfhtt.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/48/2023/10/abstract-book_2023.pdf

5. Vakaliuk I.V., Nykyruy L.I., Ilnitsky R.V., Naidych B.P., Yavorskyi R.S., Matkivskyi O.M., Katanova L.O. The morphology investigation of the cadmium sulphide thin films for solar cell applications. International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials (NANO - 2022)”: materials of conf. (Lviv, Ukraine, 25-27 August 2022). Lviv, Ukraine, 2022. P. 393.

URL: <https://nano-conference.iop.kiev.ua/assets/files/nano22bookOfAbstracts.pdf>

6. Nykyruy L.I., Yavorskyi R.S., Wisz G., Sawicka-Chudy P., Vakaliuk I.V., Naidych B.P., Yavorskyi Ya.S. Morphology and Growth Mechanisms of CdTe Thin Film. International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials (NANO - 2022)”: materials of conf. (Lviv, Ukraine, 25-27 August 2022). Lviv, Ukraine, 2022. P. 347.

URL: <https://nano-conference.iop.kiev.ua/assets/files/nano22bookOfAbstracts.pdf>

7. Maliarska I. V., Ilnitsky R.V., Naidych B.P., Matkivskiy O. M., Zapukhlyak Z. R., Katanova L. O. Optical and photoelectric properties of the CdTe: Cu layer. 9th International conference "Nanotechnology and nanomaterials" (NANO-2021): materials of conf. (Lviv, Ukraine, 25 - 27 August 2021). Lviv, Ukraine, 2021. P. 347.

URL: <https://kfa.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/198/2025/04/23.pdf>

8. Maliarska I.V., Ilnytskiy R.V., Oleksyn Z.R., Nykyruy L.I., Yavorskiy R.S. SCAPS modelling of the photovoltaic properties of the Copper dopind of CdTe films. XVIII International Freik Conference “Physics and Technology of thin films and Nanosystems”: materials of conf. (Ivano Frankivsk, 11-16 October 2021). Ivano Frankivsk, 2021. P. 188.

URL: https://kfhtt.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/48/2021/11/Abstract_Book_-2021.pdf

9. Maliarska I., Mazur T., Turovska L., Prokopiv V. Investigation of defect formation in thin films of cadmium telluride. XIII Rzeszowska Konferencja Młodych Fizyków: materials of conf. (Rzeszow, Poland, 7-8 June 2018). Rzeszow, Poland, 2018. P. 20.

URL: <https://kfa.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/198/2025/04/tezy-rzeszowska-konferencja-2018.pdf>

10. 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: матеріали конф. (Дніпро, 22-24 листопада 2017 р.). Дніпро, 2017. С. 299-300.

URL: <http://lib.pu.if.ua:8080/bitstream/123456789/7062/1/MEICS-2017.pdf>

11. Прокопів В.В., Туровська Л.В., Бойчук В.М. Малярська І.В. Дефектна підсистема і кристалохімічна модель амфотерної дії домішки вісмуту у плюмбум та станум телуридах. IV Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: матеріали конф. (Кременчук, 26-28 травня 2016 р.) Кременчук, 2016. С. 144-145.

URL: <http://lib.pu.if.ua:8080/handle/123456789/7083>

12. Prokopiv V.V., Pysklynets U.M., Starko I.Yu., Maliarska I.V. Quasi-Chemical Anayisis of Point Defects in Cadmium Telluride Crystals Doped by Bromine. XV International Conference «Physics and technology of thin films and nanosystems». Ivano-Frankivsk, 2015. P. 284.

URL: http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/7065/1/%d0%a2%d0%b5%d0%b7%d0%b815_PRK_1.pdf