

АНОТАЦІЯ

Мазур Т.М. Дефектна підсистема, оптичні та електричні властивості бездомішкових і легованих плівок кадмій телуриду. - 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, 2021.

На основі проведених експериментальних досліджень та відповідних теоретичних розрахунків виконано аналіз впливу парофазної технології тонких плівок на основі кадмій телуриду на формування системи дефектів, яка визначає комплекс їх структурних, електричних та оптичних властивостей для практичного застосування у якості матеріалів для систем оптоелектроніки та фотоелектричного перетворення енергії.

У першому розділі авторка виконала огляд літературних джерел щодо сучасного стану розвитку досліджень напівпровідників на основі CdTe для фотоелектричного перетворення енергії та визначила основні напрямки їх розвитку. Зокрема, акцентовано увагу на прикладних аспектах застосування таких матеріалів й окреслено вимоги до них. Проведено огляд робіт щодо вивчення особливостей Р-Т-Х діаграм фазової рівноваги у системі Cd–Te, проаналізовано значення констант рівноваги, які дають змогу встановити температурні режими випаровування бінарної сполуки. Розглянуто кристалічну структуру, фізико-хімічні, термодинамічні властивості кадмій телуриду. Виконано аналіз енергетичних та оптичних характеристик кадмію телуриду. Основний акцент в огляді зроблено на методах формування та моделях опису системи дефектів у бездомішковому та легованому кадмію телуріді.

У другому розділі дисертації наведено загальні принципи використовуваних у роботі методів синтезу бінарного CdTe (ізотермічний відпал, двотемпературний відпал), контролю відхилення від стехіометрії та осадження з парової фази: метод «гарячої стінки» та метод відкритого випаровування у вакуумі. Вказано на технологічні особливості

використовуваних установок. Детально описано методику формування наноструктурованих поверхневих шарів легуванням із водних розчинів та отримання шарів p -CdTe. Визначено технологічні фактори, які впливають на структурні, електричні та оптичні властивості таких шарів. Наведено перелік використовуваних методів контролю якості плівок (хімічний та фазовий склади, морфологія поверхні та мікротвердість тонких плівок на основі CdTe) та опис відповідного обладнання: атомно-силового та електронного скануючого мікроскопія, профілометр, інтерферометр. Виконано аналіз оптичних та спектральних методів дослідження, наведено опис застосовуваних у роботі спектральної установки для вивчення оптичного поглинання, оптичного відбивання, модулятора оптичного випромінювання, установки для дослідження λ -модульованих оптичних спектрів, установки для вимірювання спектрів фотолюмінесценції, дифракційного монохроматора, фотопомножувача. Особливості вимірювання електричних параметрів тонких плівок CdTe досліджено за допомогою функціональної установки автоматизованих вимірювань фотоелектричних параметрів імпедансних напівпровідникових плівок, а також наведено перелік використовуваного програмного забезпечення для обробки отриманих експериментальних даних.

У третьому розділі виконано аналіз кристалічної структури кристалів і плівок CdTe та запропоновано квазіхімічні рівняння нестехіометричних плівок кадмій телуриду. На основі використання квазіхімічних рівнянь визначено залежності рівноважної концентрації переважаючих власних атомних дефектів від парціального тиску пари кадмію і температури відпалу. Виконано аналіз поведінки домінуючих власних точкових дефектів у плівках кадмій телуриду та їх експериментального підтвердження методами фотолюмінесценції. Досліджено оптичні та електричні властивості плівок CdTe. Проведено серію тестових вимірювань імпедансних зразків. Проаналізовано фоточутливість плівок CdTe, яка є ефективним параметром у визначенні фотопровідності. Також розглянуто перспективи застосування тонкоплівкових гетероструктур CdTe в сонячній енергетиці.

Дефектну структуру матеріалу вивчали шляхом моделювання з використанням системи рівнянь квазіхімічних реакцій. Значення констант рівноваги квазіхімічних реакцій дефектоутворення в CdTe розраховували теоретично. Константи реакцій утворення нейтральних дефектів $K_{Te_2,V}$ і $K_{Cd,V}$ розраховували методом термодинамічних потенціалів, константи реакцій іонізації K_a , K'_a , K_b , K'_b та збудження власної провідності K_i розраховували використовуючи зонну теорію невироджених напівпровідників.

Показано, що у результаті температурного відпалу плівок CdTe спостерігається достатньо інтенсивна фотолюмінесценція, яка не спостерігалася у вихідних зразках. Поява інтенсивної люмінесценції після термічного впливу вказує на істотне зменшення ролі безвиpromінювальних процесів за участю поверхневих дефектів. Тому такий результат є важливим для отримання детекторів різного роду, оскільки в них будуть зменшуватися поверхневі струми втрат і рівень шумів та істотно (на ~ 2 порядки) зростати фоточутливість.

Розроблено метод відпалу на повітрі підкладок халькогенідів кадмію (CdTe, CdSe і CdS), який дозволяє отримувати на їх поверхні характерну для наноструктур зернистість. Атомно-силове мікроскопічне дослідження виявило дрібні пірамідальні елементи із латеральними розмірами 10-50 нм, які можуть об'єднуватися в більші з розмірами 100-300 нм. Показано, що після відпалу поверхня суттєво змінює свою морфологію внаслідок утворення таких пірамідок. Така зміна характеру поверхні CdTe, CdSe і CdS обумовлює можливість істотної модифікації властивостей матеріалу. Дослідження оптичного пропускання показали динаміку його величини в крайовій області. Так, для випадку CdTe встановлено, що відпал зумовлює зміщення положення максимуму дослідженого диференціального спектру пропускання до $\sim 1,3$ еВ. При цьому, на диференціальних кривих оптичного відбивання R'_ω положення максимуму не змінюється. У випадку CdSe і CdS спостерігаються аналогічні зміни спектрів.

Четвертий розділ присвячений аналізу дефектної структури плівок внаслідок хімічного легування Li та Ca, а також легуванням O за допомогою

термічних методів. Са, як елемент II групи, відіграє в кадмій телуриді роль ізовалентної домішки, яка, на відміну від звичайної домішки типу Li, не завжди утворює локальні рівні в забороненій зоні напівпровідника, проте може стимулювати генерацію власних точкових дефектів донорного або акцепторного типу. Для легування базовими підкладками служили пластинки розміром $4 \times 4 \times 1 \text{ мм}^3$, які вирізали з об'ємного кристалу CdTe. В результаті кип'ятіння підкладок у водяних суспензіях LiNO_3 і $\text{Ca(NO}_3)_2$ їх поверхневі шари змінюють електронну провідність на діркову, що підтверджується поведінкою термо-ЕРС. Після припинення процесу дифузії, який тривав 15 хв., 30 хв., 45 хв., 60 хв. зразки 3-5 разів ретельно промивали в кип'ячій дистильованій воді для видалення залишків солей. Розрахункові значення енергії іонізації з урахуванням сильної компенсації становлять 120 меВ для шарів CdTe:Li та (100 – 175) меВ для шарів CdTe:Ca, відповідно.

Для якісного опису процесів дефектоутворення у кристалічних структурах проведено кристалоквазіхімічний аналіз кадмій телуриду, легуваного Са та Li.

Досліджено електричні властивості шарів, утворених легуванням поверхні кристалу CdTe домішками Са та Li. Встановлено, що розрахований коефіцієнт дифузії для йонів Li виявився більш ніж у тричі вищий, ніж для йонів Са, оскільки йонний радіус Li значно менший (76 пм проти 99 пм для Са). Розрахована питома електропровідність поверхневого шару *n*-типу, при однакових концентраціях легуючої домішки і часах витримки, виявилася вищою більш ніж на порядок. Це дозволило зменшити загальний опір в 10-20 разів при переході від легування Са до легування Li.

Показано формування поверхнево-бар'єрних структур на базі підкладок CdTe:Li і CdTe:O, які мають набагато більшу висоту потенціального бар'єру в порівнянні з еталонними (бездомішковими) матеріалами.

Оцінено концентрацію вільних дірок в дифузійних шарах при кімнатних температурах, приймаючи товщину $d=10 \text{ мкм}$ для зразків обох типів. Виявлено, що концентрація дірок в отриманих шарах знаходиться в межах $(5-50) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Це доволі високі значення, беручи до уваги аномально низьку (~ 400 K) температуру легування.

Окремий інтерес викликають підкладки CdTe:O, у яких за певних умов відпалу утворюється поверхнева наноструктура. Такі шари формували методами термічного відпалу на повітрі. Поверхня зразків CdTe:O характеризується зернистою структурою з латеральними розмірами зерен 10-50 нм, які можуть об'єднуватися у більші (100-500 нм) субзерна. Кожна із цих груп зерен відіграє свою роль у формуванні фізичних властивостей поверхні підкладок CdTe:O і поверхнево-бар'єрних структур на їх основі. Потужність сонячного випромінювання для таких структур склала 69 мВт/см^2 .

У п'ятому розділі досліджено оптичні властивості та фотолюмінесценцію бездомішкового CdTe та легованих приповерхневих шарів на його основі. Оптичні властивості базового матеріалу CdTe визначали із досліджень оптичного пропускання T_ω і відбивання R_ω . Пропускання характеризується типовим спектральним розподілом в області енергій фотонів $\hbar\omega = 1\text{-}1,55 \text{ еВ}$. Монотонний характер залежності вказує на відсутність неконтрольованих домішок, які можуть бути внесені при вирощуванні. Разом з тим, у діапазоні $\hbar\omega \geq 1,55 \text{ еВ}$ спостерігається різкий спад інтенсивності пропускання, характер якого властивий довгохвильовому краю поглинання.

Досліджувались електричні, оптичні та люмінесцентні властивості нелегованого CdTe і спеціально легованих поверхневих шарів CdTe:Ca, CaTe:Li. Оптичні процеси поглинання, відбивання і люмінесценції вивчались на універсальній оптичній установці, яка дозволяла проводити вимірювання як за класичною методикою, так і з використанням методу λ -модуляції. Легування підкладок CdTe ізовалентною домішкою Ca не впливало на характер залежностей кривих оптичного поглинання. Легування CdTe ізовалентною домішкою Ca обумовлює формування інтенсивної фотолюмінесценції. Оцінка її квантової ефективності дозволила визначити величину $\eta \sim 8\text{-}10\%$ при 300 K. Слід зазначити, що для нелегованого матеріалу вона не спостерігалась навіть при

77 К. За літературними даними ж, при можливому легуванні іншими типами домішок отримували максимальне значення у межах 0,05-0,1%.

Внаслідок легування кадмію телуриду у водному розчині $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ спостерігалось утворення p -типу провідності поверхневого шару. Дослідження електричних характеристик омичних контактів показало відповідну лінійну залежність струму при зміні напруги і симетричність прямої та оберненої віток, що вказує на перспективність запропонованої технології отримання легованих ізовалентною домішкою шарів при виготовленні приладів твердотільної електроніки на основі CdTe .

Легування CdTe домішкою Li методом дифузії визначає можливість отримання високоефективного крайового випромінювання з $\eta = 12\%$. Люмінесценція у крайовій області формується міжзонною рекомбінацією вільних носіїв заряду і домінуючою рекомбінацією за участю утворених літієм центрів Li_{Cd} . Легування ж дозволяє отримувати шари $\text{CdTe}:\text{Li}$ високої якості і при цьому ніяк не впливати на властивості базових кристалів CdTe . Визначено технологічні режими легування, які дозволяють отримати інверсію типу провідності з n -типу на p -тип.

Проаналізовано поверхнево-бар'єрні діоди на основі підкладок CdTe , $\text{CdTe}:\text{Li}$ та $\text{CdTe}:\text{O}$. Встановлено, що модифікація підкладок призводить до збільшення ефективності сонячних елементів, причому найбільша спостерігається для поверхнево-бар'єрних діодів з квантово-розмірною поверхнею: $\eta(\text{CdTe}) = 5\%$, $\eta(\text{CdTe}:\text{Li}) = 9\%$, $\eta(\text{CdTe}:\text{O}) = 13\%$. Досліджено, що швидкість поверхневої рекомбінації в діодах, виготовлених на підкладках $\text{CdTe}:\text{O}$, на один і два порядки менше, ніж в структурах на базі $\text{CdTe}:\text{Li}$ та CdTe . Також досліджено, що інтенсивність I_{ph} фотолюмінесценції в ряді підкладок CdTe , $\text{CdTe}:\text{Li}$, $\text{CdTe}:\text{O}$ зменшується майже на три порядки. При цьому, ефективність крайової смуги випромінювання підкладок $\text{CdTe}:\text{O}$ при 300 К сягає кілька десятків відсотка.

Ключові слова: тонкі плівки CdTe , система дефектів, легування, поверхневий шар, оптичні властивості, фотолюмінесценція, фотоелектричні властивості.

SUMMARY

Mazur T.M. Defective subsystem, optical and electrical properties of impurity-free and doped cadmium telluride films. - Manuscript.

PhD thesis in specialty 104 - Physics and astronomy. - Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, 2021.

Based on experimental studies and relevant theoretical calculations, the analysis of the influence of cadmium telluride thin film vapor technology on the formation of a system of defects, which determines the complex of their structural, electrical and optical properties for practical use as materials for optoelectronics and photoelectric energy conversion.

In the first section, the author reviewed the literature on the current state of development of research on semiconductors based on CdTe for photoelectric energy conversion and identified the main directions of such research. In particular, attention is focused on the applied aspects of the use of such materials and outlined the requirements for them. A review of works on studying the features of P-T-X phase equilibrium diagrams in the Cd-Te system is carried out, the values of equilibrium constants are analyzed, which make it possible to establish the temperature regimes of evaporation of a binary compound. The crystal structure, physicochemical, thermodynamic properties of cadmium telluride are considered. The analysis of energy and optical characteristics of cadmium telluride is performed. The main emphasis in the review is made on the methods of formation and models of description of the system of defects in impurity-free and doped cadmium telluride.

In the second section of the dissertation, the general principles of the methods used in the work of synthesis of binary CdTe (isothermal annealing, two-temperature annealing), control of deviation from stoichiometry and deposition from the vapor phase are given: the "hot wall" method and the method of open evaporation in vacuum. The technological features of the used installations are specified. The method of forming nanostructured surface layers by doping from aqueous solutions and the preparation of *p*-CdTe layers is described detail. Technological factors that affect the structural, electrical and optical properties of such layers are identified. The list of used

methods of film quality control (chemical and phase compositions, morphology of the surface and microhardness of thin films based on CdTe) and the description of the corresponding equipment are given: atomic force and electron scanning microscopy, profilometer, interferometer. As for optical and spectral research methods, a description is given of the spectral setup used in this work to study optical absorption, optical reflection, an optical radiation modulator, a setup for studying λ -modulated optical spectra, a setup for measuring photoluminescence spectra, a diffraction monochromator and a photomultiplier. The features of measuring the electrical parameters of CdTe thin films are shown on the functional block diagram of the installation for automated measurements of the photoelectric parameters of impedance semiconductor films, as well as a list of software used for processing the obtained experimental data.

In the third section, the analysis of the crystal structure of crystals and films of CdTe and the quasi-chemical equations of nonstoichiometric cadmium telluride films are proposed. Based on the use of quasi-chemical equations, the dependence of the equilibrium concentration of superior intrinsic atomic defects on the partial pressure of cadmium vapor and the annealing temperature is determined. The analysis of the behavior of dominant intrinsic point defects in cadmium telluride films and their experimental confirmation by photoluminescence methods is performed. A series of test measurements of impedance samples was carried out. The photosensitivity of CdTe films, which is an effective parameter in determining the photoconductivity, has been investigated. The application of thin-film CdTe heterostructures in solar energy is also considered.

The defective structure of the material was studied by modeling using a system of equations of quasi-chemical reactions. The values of the equilibrium constants of quasi-chemical reactions K_{Te_2V} and $K_{Cd,V}$ of defect formation in CdTe were calculated theoretically. The reaction constants of the formation of neutral defects and were calculated by the method of thermodynamic potentials, the constants of the ionization reactions K_a , K'_a , K_b , K'_b , and the excitation of the intrinsic conductivity K_i were calculated using the band theory of nondegenerate semiconductors.

It was obtained that as a result of temperature annealing of CdTe films, a sufficiently intense photoluminescence was observed, which was not present in the initial samples. The appearance of intense luminescence after heat treatment indicates a significant reduction in the role of non-radiative processes involving surface defects. Therefore, this result is important for obtaining detectors of various kinds, because they will reduce the surface currents of losses and noise levels and significantly (by ~ 2 orders of magnitude) increase photosensitivity.

The method of annealing of cadmium chalcogenide substrates (CdTe, CdSe and CdS) in air is developed, which allows to obtain grain size characteristic of nanostructures on their surface. Atomic force microscopy study revealed small pyramidal elements with lateral sizes of 10-50 nm, which can be combined into larger ones with sizes of 100-300 nm. It is shown that after annealing the surface significantly changes its morphology due to the formation of such pyramids. This change in the nature of the surface of CdTe, CdSe and CdS causes a significant change in the properties of the material. Optical transmission studies have shown a change in its magnitude in the edge region. Thus, for the case of CdTe, it is shown that annealing causes a shift in the position of the maximum of the investigated differential transmission spectrum to ~ 1.3 eV. In this case, the position of the maximum does not change on the differential curves of optical reflection R'_ω . In the case of the studied CdSe and CdS, similar changes in the spectra are observed.

The fourth section is devoted to the analysis of the defective structure of films due to chemical doping of Li and Ca, as well as the doping of O using thermal methods. Ca, being an element of group II, it plays the role of an isovalent impurity in cadmium telluride, which, unlike ordinary Li-type impurities, does not always form local levels in the semiconductor band gap, but can stimulate the generation of donor or acceptor-type point defects. For doping, the base substrates were plates with a size of $4 \times 4 \times 1$ mm³, which were cut from a three-dimensional CdTe crystal. As a result of boiling the substrates in aqueous suspensions of LiNO₃ and Ca(NO₃)₂, their surface layers change the electronic conductivity to a hole, which is confirmed by a change in the sign of thermo-EMF. After the end of the diffusion process, which lasted 15

minutes, 30 minutes, 45 minutes, 60 minutes, the samples were thoroughly washed 3-5 times in boiling distilled water to remove residual salts. The calculated values of ionization energy, taking into account the strong compensation, are 120 meV for the CdTe:Li layers and (100 - 175) meV for the CdTe:Ca layers, respectively.

For a qualitative description of defect formation in crystal structures, a crystal quasi-chemical analysis of cadmium telluride doped with Ca and Li was carried out.

The electrical properties of the layers formed by doping the surface of the CdTe crystal with Ca and Li impurities are investigated. It was found that the calculated diffusion coefficient for Li ions turned out to be more than three times higher than for Ca ions, since the ionic radius of Li is much smaller (76 pm versus 99 pm for Ca). The calculated specific electrical conductivity of the *n*-type surface layer at the same dopant concentrations and exposure times turned out to be more than an order of magnitude higher. This made it possible to reduce the total resistance by a factor of 10-20 when going from doping with Ca to doping with Li.

The formation of surface barrier structures based on CdTe:Li and CdTe:O substrates, which have a much higher potential barrier height compared to the reference (impurity) materials, is shown.

The concentration of free holes in the diffusion layers at room temperature was estimated, assuming a thickness $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$ for samples of both types. It is obtained that the concentration of holes in the obtained layers is in the range $(5-50) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. These are quite high values, taking into account the abnormally low ($\sim 400 \text{ K}$) doping temperature.

Of particular interest are CdTe:O substrates, in which a surface nanostructure is formed under certain annealing conditions. Such layers were formed by thermal annealing in air. The surface of CdTe:O samples is characterized by a granular structure with lateral grain sizes of (10-50) nm, which can be combined into larger (100-500) nm subgrains. Each of these groups of grains plays a role in shaping the physical properties of the surface of CdTe:O and surface barrier structures based on them. The power of solar radiation for such structures was 69 mW / cm^2 .

In the fifth section, the optical properties and photoluminescence of pure CdTe and doped near-surface layers based on it are investigated. The optical properties of the base material CdTe were determined from studies of the optical transmission of T_ω and the reflection of R_ω . The transmission is characterized by a typical spectral distribution in the region of photon energies $\hbar\omega = 1-1.55$ eV. The monotonous nature of the dependence indicates the absence of uncontrolled impurities that can be introduced during cultivation. At the same time, in the range $\hbar\omega \geq 1.55$ eV there is a sharp decrease in the transmission intensity, the nature of which is characteristic of the long-wavelength absorption edge.

The electrical, optical and luminescent properties of undoped CdTe and specially doped surface layers of CdTe:Ca, CdTe:Li were studied. The optical processes of absorption, reflection and luminescence were studied on a universal optical installation, which allowed measurements to be performed both by the classical method and using the method of λ -modulation. Doping of CdTe substrates with an isovalent impurity Ca does not affect the nature of the dependences of the optical absorption curves. Doping CdTe with an isovalent impurity Ca causes the formation of intense photoluminescence. Evaluation of its quantum efficiency allowed to determine the value of $\eta \sim 8-10\%$ at 300 K. It should be noted that for undoped material it was not observed even at 77 K. According to the literature, with possible doping with other types of impurities received a maximum value of 0.05-0.1%.

Due to the doping of cadmium telluride in an aqueous solution of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ the formation of p-type conductivity of the surface layer was observed. A study of the electrical characteristics of ohmic contacts showed a corresponding linear dependence of the current with a change in voltage and the symmetry of the forward and reverse branches, which indicates that the proposed technology for obtaining layers doped with an isovalent impurity is promising in the manufacture of solid-state electronics devices based on CdTe.

Doping of CdTe with Li impurity by the diffusion method determines the possibility of obtaining highly efficient edge radiation with $\eta = 12\%$. Luminescence in the edge region is formed by interband recombination of free charge carriers and

dominant recombination with the participation of Li_{Cd} centers formed by lithium. Doping, on the other hand, makes it possible to obtain high quality CdTe:Li layers without affecting the properties of the basic CdTe crystals. The technological modes of doping are determined, which make it possible to obtain an inversion of the conductivity type from n -type to p -type.

Surface-barrier diodes based on CdTe, CdTe:Li and CdTe:O substrates are analyzed. It was found that the modification of substrates leads to an increase in the efficiency of solar cells, and the highest is observed for surface-barrier diodes with a quantum-well surface: η (CdTe) = 5%, η (CdTe:Li) = 9%, η (CdTe:O) = 13%. It was investigated that the rate of surface recombination in diodes fabricated on CdTe:O substrates is one and two orders of magnitude lower than in structures based on CdTe:Li and CdTe and also that the photoluminescence intensity I_{ph} in a number of substrates CdTe, CdTe:Li, CdTe:O decreases by almost three orders of magnitude. In this case, the efficiency of the edge emission band of CdTe:O substrates at 300 K reaches several tenths of a percent.

Keywords: CdTe thin films, defect subsystem, doping, surface layer, optical properties, photoluminescence, photoelectric properties.

Список основних публікацій за темою дисертації

1. Прокопів В.В., Горічок, І.В., Пилипонюк М.С., Бойчук В.М., Матеїк Г.Д., Мазур Т.М. Енергії заміщення аніонів та катіонів у кадмій та цинк телуридах. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2016. Т. 17, № 4. С. 504-506. DOI: 10.15330/pcss.17.4.504-506. (фахове видання).
2. Mazur T.M., Makhniy V.P., Prokopiv V.V., Slyotov M.M. Thermal annealing effect on optical properties of the cadmium telluride films. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2017. Vol. 9, No 5. P. 05047. DOI: [http://doi.org/10.21272/jnep.9\(5\).05047](http://doi.org/10.21272/jnep.9(5).05047). (фахове видання, Scopus).
3. Prokopiv V.V., Nykyruy L.I., Voznyak O.M., Dzundza B.S., Horichok I.V., Yavorskyi Ya.S., Matkivskyi O.M., Mazur T.M. The Thermoelectric Solar Generator. *Physics and chemistry of solid state*. 2017. Vol. 18, No 3. P. 372-376. DOI: 10.15330/pcss.18.3.372-375. (фахове видання, WoS).
4. Makhniy V.P., Mazur T.M., Berezovsky M.M., Kinzerska O.V., Prokopiv V.V. Hole Conductivity of Thin Layers of Cadmium Telluride with Li and Ca Impurities. *Physics and chemistry of solid state*. 2018. Vol. 19, No 4. P. 313-315. DOI: 10.15330/pcss.19.4.313-315. (фахове видання, WoS).
5. Mazur T., Prokopiv V., Turovska L. Quasi-chemistry of intrinsic point defects in cadmium telluride thin films. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2018. 671(1). P. 85-89. DOI: 10.1080/15421406.2018.1542088. (Scopus).
6. Dzundza B.S., Prokopiv V.V., Mazur T.M., Yurchyshyn L.D. Automation of measurements of photoelectric parameters of high-impedance semiconductor films. *Physics and chemistry of solid state*. 2018. Vol. 19, No 4. P. 363-367. DOI: 10.15330/pcss.19.4.363-367. (фахове видання, WoS).
7. Prokopiv V.V., Kostyuk O.B., Dzundza B.S., Mazur T.M., Turovska L.V., Matkivskyi O.M., Deychakivskyi M.V. Electrical properties of CdTe<Ca> thin layers. *Physics and chemistry of solid state*. 2019. Vol. 20, No 4. P. 372-375. DOI: 10.15330/pcss.20.4.372-375. (фахове видання, WoS).

8. Mazur M.P., Dzundza B.S., Mazur T.M., Prokopiv V.V. Method of research of photoelectric parameters of high impedance semiconductor films. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 2019. Vol. 3, No. 1. P. 30-36.
9. Makhniy V. P., Berezovskiy M. M., Kinzerska O. V., Mazur M. P., Mazur T. M., Prokopiv V. V. Prospects of using surface and barrier CdTe-diodes in solar energy. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2019. Vol. 16, No. 2. P. 32-42. DOI: 10.18524/1815-7459.2019.2.171227. (фахове видання).
10. Mazur T.M., Prokopiv V.V., Slyotov M.M., Mazur M.P., Kinzerska O.V., Slyotov O.M. Optical properties of CdTe doped Ca. *Physics and chemistry of solid state*. 2020. Vol. 21, No. 1. P. 52-56. DOI: 10.15330/pcss.21.1.52-56. (фахове видання, Scopus, WoS).
11. Prokopiv V.V., Dzundza B.S., Sharyn S.V., Mazur T.M., Turovska L.V., Matkivskyi O.M. Electrical Properties of Cadmium Telluride Thin Films Doped with Calcium and Lithium. *Physics and chemistry of solid state*. 2020. Vol. 21, No. 2. P. 232-237. DOI: 10.15330/pcss.21.2.232-237. (фахове видання, Scopus, WoS).

Список додаткових публікацій за темою дисертації

12. Prokopiv V., Horichok I., Mazur T., Matkivsky O., Turovska L. Thermoelectric materials based on samples of microdispersed PbTe and CdTe. *Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP - 2018)* (Zatoka, Odesa Region, 9-14 September 2018). Zatoka, Odesa Region, 2018. P. 01SPN57-1 - 01SPN57-4. DOI: 10.1109/NAP.2018.8915357 (Scopus, WoS).
13. Dzundza, B., Kostyuk, O., & Mazur, T. Software and Hardware Complex for Study of Photoelectric Properties of Semiconductor Structures. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (Kyiv, 16-18 April 2019). Kyiv, 2019. P. 635-639. IEEE DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783544 (Scopus).

14. Mazur T., Slyotov M., Mazur M., Prokopiv V., Kinzerska O., Slyotov O. Features of the cadmium chalcogenide substrates with surface nanostructure. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 35, No. 4. P. 621-625. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.112. (Scopus, WoS).
15. Mazur T.M., Makhniy V.P., Prokopiv V.V., Slyotov M.M. Effect of Thermal Annealing on the Optical Properties of Thin Films of Cadmium Telluride. XVI *International Conference «Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems»*: materials of conf. (Ivano-Frankivsk, 15-20 May 2017). Ivano-Frankivsk, 2017. P. 125.
16. 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.
17. Мазур Т.М., Прокопів В.В., Горічок І.В., Туровська Л.В. Квазіхімічна модель власних точкових дефектів у кристалах кадмій телуриду. V *Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»*: матеріали конф. (Кременчук, 17-19 травня 2018 р.). Кременчук, 2018. С. 94-95.
18. Mazur T., Prokopiv V., Turovska L. Quasi-chemistry of owned point defects in thin films of cadmium telluride. XI *International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-11)*: materials of conf. (Ivano-Frankivsk, 21 - 25 May 2018). Ivano-Frankivsk, 2018. P. 48.
19. Мазур Т., Прокопів В., Туровська Л. Квазіхімічний метод розрахунку власних точкових дефектів у тонких плівках телуриду кадмію. 8-ма *Міжнародна науково-технічна конференція "Сенсорна електроніка та мікросистемні технології" (СЕМСТ-8)*: матеріали конф. (Одеса, 28 травня – 1 червня 2018 р.). Одеса, 2018. С. 157.

20. 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 VI 2018). Rzeszow, Poland, 2018. P. 20.
21. Mazur T.M., Prokopiv V.V., Slyotov M.M., Slyotov O.M. Properties of fuels and quantum-dimensional structures based on CdTe. *The International research and practice conference "Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2018)": materials of conf.* (Kyiv, 27-30 August 2018). Kyiv, 2018. P. 728.
22. Прокопів В.В., Мазур Т.М., Гасюк І.М., Дзундза Б.С., Костюк О.Б., Яворський Я.С. Електричні властивості полікристалічних плівок CdTe. "VIII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників" (УНКФН-8): матеріали конф. (Ужгород, 2-4 жовтня 2018 р.). Ужгород, 2018. С. 412-413.
23. Мазур Т.М., Прокопів В.В., Дзундза Б.С., Туровська Л.В. Точкові дефекти у тонких плівках CdTe. *V Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи»:* матеріали конф. (Луцьк, 25-26 жовтня 2018 р.). Луцьк, 2018. С.42-43.
24. Мазур Т.М., Прокопів В.В., Сльотов М.М., Сльотов О.М. Властивості плівок та квантово-розмірних структур на основі CdTe. *III Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем" MEICS-2018:* матеріали конф. (Дніпро, 21-23 листопада 2018 р.). Дніпро, 2018. С. 211-212.
25. Mazur M.P., Dzundza B.S., Mazur T.M., Prokopiv V.V. Automated complex for research of semiconductor materials of solar power of the second generation. *III International Scientific-Technical Conference "Actual problems of renewable power engineering, construction and environmental engineering":* materials of conf. (Kielce, Poland, 7-9 February 2019). Kielce, Poland, 2019. P. 33.
26. Makhnii V.P., Mazur M.P., Mazur T.M., Prokopiv V.V. Prospects of using surface-barrier CdTe-diodes in solar energy. *III International Scientific-Technical Conference "Actual problems of renewable power engineering, construction and*

- environmental engineering*”: materials of conf. (Kielce, Poland, 7-9 February 2019). Kielce, Poland, 2019. P. 34.
27. Mazur T.M. Own Point Defects in Cadmium Telluride Thin Films. *XVII International Freik Conference “Physics and Technology of thin films and Nanosystems”*: materials of conf. (Ivano-Frankivsk, 20-25 May 2019). Ivano-Frankivsk, 2019. P. 82.
28. Mazur T.M., Makhniy V.P., Berezovsky M.M., Kinzerska O.V., Mazur M.P. Analysis of Methods of Obtaining CdTe Layers with Preper-Defective Hole Conductivity. *XVII International Freik Conference “Physics and Technology of thin films and Nanosystems”*: materials of conf. (Ivano-Frankivsk, 20-25 May 2019). Ivano-Frankivsk, 2019. P. 159.
29. Dzundza B.S., Prokopiv V.V., Mazur T.M., Turovska L.V., Yavorskyi Ya. S. Photosensitivity of Polycrystalline Films of Cadmium Telluride. *XVII International Freik Conference “Physics and Technology of thin films and Nanosystems”*: materials of conf. (Ivano-Frankivsk, 20-25 May 2019). Ivano-Frankivsk, 2019. P. 241.
30. Mazur T.M., Mazur M.P., Makhniy V.P., Berezovskiy M.M., Kinzerska O.V., Slyotov M.M. Optical properties of cadmium chalcogenide substrates with surface nanostructure. *The International research and practice conference “Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2019)”*: materials of conf. (Lviv, 27-30 August 2019). Lviv, 2019. P. 452.
31. Мазур Т., Мазур М. Тонкоплівкові гетероструктури CdTe в сонячній енергетиці. *IV Всеукраїнська науково-практична конференція “Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп’ютерних систем” MEICS-2019*: матеріали конф. (Дніпро, 27-29 листопада 2019 р.). Дніпро, 2019. С. 225-227.
32. Mazur T., Mazur M. Use of n-CdTe Single-crystal substrates in solar power engineering. *IV International Scientific-Technical Conference “Actual problems of renewable power engineering, construction and environmental engineering”*:

- materials of conf. (Kielce, Poland, 6-8 February 2020). Kielce, Poland, 2020. P. 131.
33. Prokopiv V., Mazur T., Dzundza B., Matkivskyi O. Electrical properties of thin layers of CdTe obtained by chemical obtained alloying with calcium ions. *IV International Scientific-Technical Conference "Actual problems of renewable power engineering, construction and environmental engineering"*: materials of conf. (Kielce, Poland, 6-8 February 2020). Kielce, Poland, 2020. P. 141.
34. Mazur T., Dzundza B., Prokopiv V. Electrical properties of thin films CdTe doped Ca and Li. *XII International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-12)*: materials of conf. (Kamianets-Podilskyi, 1-5 June 2020). Kamianets-Podilskyi, 2020. P. 61.
35. Mazur T., Slyotov M., Kinzerska O., Prokopiv V. Optical properties of CdTe doped Li. *The International research and practice conference "Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2020)"*: materials of conf. (Lviv, 26-29 August 2020). Lviv, 2020. P. 392.
36. Mazur T., Slyotov M., Prokopiv V. Optical properties of thin films CdTe doped Ca. *1st International Research and Practice Conference «Nanoobjects & Nanostructuring» (N&N-2020)*: materials of conf. (Lviv, 20-23 September 2020). Lviv, 2020. P. 18.

Патент

37. Спосіб отримання шарів телуриду кадмію з дірковою провідністю: Заявн.: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна. № u 2019 02327; заявл. 11.03.2019; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16/2019. 2 с.