

АНОТАЦІЯ

Куршук С.І. Тонкі плівки оксиду міді, вуглецевих і вуглецевмісних матеріалів та гетероструктури на їх основі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича МОН України, Чернівці, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розробці технологічних режимів напилення тонких плівок CuO , вуглецевих і вуглецевмісних матеріалів з заданими та відтворюваними електричними та оптичними властивостями, а також показано можливість їх практичного застосування у сучасних гетероструктурних електронних і оптоелектронних приладах.

Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатку.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи; сформульовано мету, основні задачі, об'єкт та предмет дослідження; вказано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів; подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, її структуру та обсяг.

У першому розділі дисертації представлено літературний огляд, який свідчить про значну зацікавленість учених з усього світу в дослідженні тонких плівок оксиду міді та графіту, а також у розробці вискоєфективних приладів оптоелектронних приладів на їх основі.

Аналіз фізичних властивостей тонких плівок оксиду міді показав, що цей матеріал, завдяки його унікальним фізичним властивостям, придатний для використання як шар поглинач в сонячних елементах. Однак ці властивості суттєво залежать від технологічних режимів напилення тонких плівок. Останні досягнення ефективності сонячних елементів на основі оксиду міді становлять 8,4%, а теоретично розрахований максимум на основі моделі Шоклі–Квайссера для сонячного елемента на основі CuO становить приблизно 30%. Проаналізовано можливості застосування тонких плівок графіту як шару вікна в гетероструктурних оптоелектронних приладах. Встановлено, що такі плівки

доцільно використовувати цією метою. Останнім часом вони широко застосовуються в різноманітних приладах електроніки та фотовольтаїки.

У другому розділі дисертації методом реактивного магнетронного розпилення, при постійному струмі в універсальній вакуумній установці Leybold-Heraeus L560 виготовлено тонкі плівки CuO на скляних підкладках, температура яких складала 300 К та 523 К. Досліджено структурні, електричні та оптичні властивості для отриманих зразків тонких плівок CuO, а саме представлено розподіл на поверхні елементів, які входять до складу цих плівок, визначено елементний склад, розмір зерен, енергію активації, оптичну ширину забороненої зони, показник заломлення. Проведено аналіз кривих спектрів пропускання і відбивання для плівок CuO, нанесених на скляні підкладки. Елементний склад тонких плівок та морфологію поверхні отримано за допомогою скануючого електронного мікроскопа (MIRA3 FEG, Tescan), оснащеного детектором відбитих електронів (BSE) і енергодисперсним рентгенівським детектором (EDX). Встановлено, що розмір зерен для плівок, отриманих при нижчій температурі підкладки D , становить ~ 16 нм, а для плівок, отриманих при вищій температурі, – $D \sim 26$ нм. На дифрактограмах тонких плівок CuO спостерігається більша інтенсивність піків для тонких плівок, отриманих при вищих температурах підкладки CuO №2, що може бути зумовлено кращою структурною досконалістю тонких плівок та більшим розміром зерен. Унаслідок дослідження електричних властивостей з'ясовано, що температурні залежності електричного опору для тонких плівок CuO мають напівпровідниковий характер, тобто опір зменшується при збільшенні температури. Чотиризондовим методом виміряно величини поверхневого опору плівок: зразок №1 - $\rho = 18,69$ кОм/□, зразок № 2 - $\rho = 5,96$ кОм/□. На основі незалежних вимірювань коефіцієнтів відбивання і пропускання визначено оптичну ширину забороненої зони (E_g^{op}) для двох зразків екстраполяцією прямолінійної ділянки кривої $(ahv)^2 = f(hv)$ на вісь hv . Для зразка CuO №1 $E_g^{op} = 1,62$ еВ; для зразка CuO №2 $E_g^{op} = 1,65$ еВ. Для тонких плівок CuO №2 також використано конвертний метод для обчислення основних оптичних коефіцієнтів

$E_g^{op} = 1,72$ eВ. Отримані значення E_g^{op} , визначені двома методами, добре корелюють між собою.

Методом спреї-піролізу при температурі $T_s = 350^\circ\text{C}$ 0.2 М водного розчину солі $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ отримано тонкі плівки CuO р-типу товщиною $d = 0,3$ мкм. Проаналізовано електричні та оптичні властивості плівок. Визначено енергію активації, яка дорівнює $E_a = 0.27$ eВ, та тангенс кута нахилу $\text{tg}\alpha = 3.12$. Зі спектральної залежності $(ah\nu)^2 = f(h\nu)$ тонких плівок CuO визначено ширину забороненої зони, яка дорівнює $E_g = 1.54$ eВ.

Показано можливість використання тонких плівок оксиду міді (CuO) як активного шару в тонкоплівкових сонячних елементах зі структурою скло/ІТО/графіт/ CuO/Ni . За допомогою трансферметрікс-симуляції отримано швидкість генерації носіїв заряду шляхом моделювання розподілу оптичного поля. Теоретичні порогові значення ефективності фотоелектричних пристроїв визначено для різних товщин активного шару з використанням нормалізованої інтенсивності світла, еквівалентної спектру AM1.5. Вольт-амперні характеристики, змодельовані напівемпіричними методами, засвідчують, що ефективність фотоелектричного перетворення залежить від товщини активного шару, з ефективністю 25,2% для плівок CuO товщиною 500 нм.

У третьому розділі дисертації представлено результати дослідження структурних, оптичних та електричних властивостей тонких плівок графіту в залежності від твердості стержнів (2Н, Н, НВ, В та 2В), отриманих методом “олівець-на-напівпровіднику”. Такі дослідження мають велике значення для подальшої розробки високоефективних приладів на основі гетеропереходів для електроніки та оптоелектроніки. За допомогою скануючого електронного мікроскопа одержано типові зображення поверхні, утворені відбитими електронами (BSE), і показано при трьох збільшеннях (100x, 500x і 1000x). Оскільки стержні досліджуваних олівців складаються із сумішей глини та графіту, проведено більш детальний аналіз елементів, з яких складаються стержні. EDS-аналіз показав, що основними складниками досліджуваних стержнів є очищений графітовий порошок, а також O, Al і Si, що входять до складу каоліну, формула якого $\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$, або $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – головна

складова частина звичайної глини. Визначено елементний склад мікрооб'єму досліджуваних зразків. Незважаючи на похибку, яка виникає при визначенні складу С і О ($\sim 12\%$), можна стверджувати, що все ж зберігається закономірність між вмістом графіту і твердістю олівця. Тобто чим більший вміст графіту — тим м'якший стержень. Середня товщина всіх досліджуваних плівок становила ~ 150 нм, оскільки товщина плівок, отриманих таким методом, в основному визначається шорсткістю поверхні соляної підкладки. Нарисовані плівки графіту мають вищий питомий опір, ніж об'ємні зразки (стержні олівців), з яких вони виготовлені. Опір плівок зростає при зростанні твердості олівців, що зумовлено зростанням кількості домішки глини в графіті, яка є діелектриком. Встановлено, що зростання твердості олівця приводить до зростання пропускання.

Виготовлено діоди Шотткі графіт/n-Si-методом електронно-променевого випаровування графіту на підкладки кремнію n-типу провідності. Досліджено вплив товщини плівок графіту на фотоелектричні та електричні властивості цих діодів. З'ясовано температурні залежності шунтуючого та послідовного опорів діодів. При прямому та зворотному зміщеннях визначено домінуючі механізми струмопереносу через досліджувані діоди. Обчислено чутливість та детективність виготовлених діодів Шотткі графіт/n-Si. Досліджувані гетеропереходи володіють яскраво вираженими діодними характеристиками з коефіцієнтом випрямлення для структури з тоншою плівкою $RR \approx 5 \cdot 10^2$, а для структури з товстішою плівкою $RR \approx 10^2$.

Гетероструктури типу діодів Шотткі графіт/p-InP виготовлено шляхом перенесення нарисованої графітової плівки на підкладку InP p-типу провідності. Встановлено домінуючі механізми струмопереносу через діоди Шотткі графіт/p-InP: це багатоступінчасті тунельно-рекомбінаційні процеси за участю поверхневих станів на межі розділу графіт/p-InP при прямому зміщенні та тунелювання при зворотному зміщенні. Досліджувані гетеропереходи мають яскраво виражені діодні характеристики з коефіцієнтом випрямлення $k \approx 10^2$ (при $V = 1$ В). Показано, що створені графітові/p-InP діоди Шотткі мають висоту потенційного бар'єра 0,71 еВ.

Досліджено електричні і фотоелектричні властивості органічно-неорганічного гетеропереходів Графіт/PEDOT:PSS/n-CdZnTe, сформованих за допомогою нанесення тонких плівок PEDOT:PSS на підкладки CdZnTe. Встановлено температурні залежності висоти потенціального бар'єра та послідовного опору і шунтуючого опорів органічно-неорганічного з досліджень вольт-амперних характеристик гетеропереходів Графіт/PEDOT:PSS/n-CdZnTe. Встановлено домінуючі механізми струмопереносу через органічно-неорганічні гетеропереходи Графіт/PEDOT:PSS/n-CdZnTe при прямих і зворотних зміщеннях. Показано, що такі гетероструктури фоточутливі й можуть використовуватися як фотоприймачі.

Розроблено фотодіоди для ультрафіолетової, видимої та близької інфрачервоної області спектра на основі унікального поєднання радіаційно стійких функціональних матеріалів: тонкоплівкового напівметалевого графіту та монокристалічного напівпровідника CdZnTe. Фотодіоди на основі Графіт/CdZnTe проявляють максимальну чутливість на рівні $0,25 \text{ A W}^{-1}$ та володіють детективністю на рівні $6,5 \times 10^{11}$ Джонс, що близько до найкращих гетеропереходних фотодіодів, виготовлених на основі твердого розчину CdZnTe. Пристрої також характеризуються швидкими часами відгуку підйому/спаду (1,2/7,2 мкс) і широким лінійним динамічним діапазоном (77 дБ). Запропоновані фотодіоди можуть використовуватися в космічних і земних застосуваннях з високим рівнем іонізуючого випромінювання.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати досліджень, проведених у рамках цієї дисертаційної роботи, мають велике практичне значення для розробки різних електронних та оптоелектронних приладів на основі бар'єрних гетероструктур із відтворюваними та стабільними характеристиками за різних умов експлуатації.

1. Розроблено технологію виготовлення, методом реактивного магнетронного розпилення, напівпровідникових полікристалічних плівок CuO р-типу провідності з розміром зерен $D \sim 26$ нм, шириною забороненої зони $E_g^{op} = 1.65$ eV та поверхневим опором - $\rho = 5,96 \text{ k}\Omega/\square$, що особливо актуально для виготовлення фотоелектричних перетворювачів.

2. Запропоновано простий, екологічно безпечний та дешевий метод отримання високоякісного графену з використанням кухонного блендера й органічного розчинника полівінілпіролідону як нетоксичного диспергатора. Графен, отриманий таким способом, доцільно використовувати для створення оптоелектронних приладів.

3. Виготовлено органічно-неорганічні гетероструктури Графіт/PEDOT:PSS/n-CdZnTe та показано, що такі гетероструктури фото чутливі й можуть використовуватися як фотоприймачі.

4. Розроблено фотодіоди для ультрафіолетової, видимої та близької інфрачервоної областей спектра на основі унікального поєднання радіаційно стійких функціональних матеріалів: тонкоплівкового напівметалевого графіту та монокристалічного напівпровідника CdZnTe. Фотодіоди на основі Графіт/CdZnTe проявляють максимальну чутливість на рівні $0,25 \text{ A W}^{-1}$ та володіють детективністю $6,5 \times 10^{11}$ Джонс, що близько до найкращих гетеропереходних фотодіодів, виготовлених на основі твердого розчину CdZnTe. Пристрої також характеризуються швидкими часами відгуку підйому/спаду (1,2/7,2 мкс) і широким лінійним динамічним діапазоном (77 дБ). Запропоновані фотодіоди можуть використовуватися в космічних і земних приладах із високим рівнем іонізуючого випромінювання.

Ключові слова: оксид міді, графіт (графен), наночастинки, структурні і оптичні властивості, електричні параметри, термодинамічні процеси, CdTe (CdZnTe), напівпровідникові гетеропереходи, фотовольтаїка (сонячні елементи), фотодіоди Шоттки, заборонена зона, механізми струмопереносу, рекомбінація, провідність, квантова ефективність.

ABSTRACT

S.I. Kuryshchuk. Thin films and heterostructures based on copper oxide, carbon and carbon-containing materials. – Qualifying scientific project on manuscript rights.

Thesis on search for the Doctor of Philosophy degree in specialty 104 – Physics and Astronomy. – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Chernivtsi, 2023.

The dissertation is dedicated to the development of technological regimes for the deposition of thin films of CuO, as well as carbon and carbon-containing materials with specified and reproducible electrical and optical properties. It also demonstrates the practical application of these materials in modern heterostructural electronic and optoelectronic devices.

The introduction justifies the choice of the topic and the relevance of the work, formulates the aim, main tasks, object and subject of research, highlights the scientific novelty and practical value of the obtained results, provides information about the author's contribution, the work's approval, its structure, and scope.

The first chapter of the dissertation presents a literature review, indicating significant global interest in the research of copper oxide thin films and graphite, as well as the development of high-efficiency optoelectronic devices based on them.

An analysis of the physical properties of thin films of copper oxide has shown that this material, due to its unique physical properties, is a promising candidate for use as an absorber layer in solar cells. However, these properties depend significantly on the technological deposition regimes of these thin films. Recent advancements in the efficiency of solar cells based on copper oxide reach 8.4%, while the theoretically calculated maximum based on the Shockley-Queisser model for a CuO-based solar cell is approximately 30%. Additionally, the possibilities of using thin graphite films as a window layer in heterostructural optoelectronic devices have been analyzed, and it has been established that these films are a good candidate for such purposes and have been widely applied in various electronics and photovoltaic devices in recent years.

In the second chapter of the dissertation CuO thin films were produced by the method of reactive magnetron sputtering at direct current in a universal vacuum system Leybold-Heraeus L560 on glass substrates, the temperature of which was: 300 K and 523 K. The structural, electrical and optical properties for the obtained samples of CuO thin films were studied, namely: elemental composition, distribution of elements on the surface, which are part of these films, grain size, activation energy, optical band gap, refractive index, analysis of curves of transmission and reflection spectra for CuO thin films deposited on glass substrates. The elemental composition

of the thin films and the surface morphology were performed using a scanning electron microscope (MIRA3 FEG, Tescan) equipped with a reflected electron detector (BSE) and an energy-dispersed X-ray detector (EDX). It was found that the grain size for films obtained at a lower substrate temperature D is ~ 16 nm, and for films obtained at a higher temperature – D ~ 26 nm. On the diffractograms of CuO thin films, a higher peak intensity is observed for thin films obtained at higher CuO no. 2 substrate temperatures, which may be due to better structural perfection of thin films and larger grain size. From the study of electrical properties, it was found that the temperature dependences of the electrical resistance for CuO thin films have a semiconductor character, ie the resistance decreases with increasing T . The surface resistance of the films was measured by the four-probe method: no. 1 – $\rho = 18,69$ k Ω/\square , sample no. 2 – $\rho = 5,96$ k Ω/\square . Based on independent measurements of the reflection and transmission coefficients, the optical band gap was determined for the two samples by extrapolation of the rectilinear section of the curve $(\alpha hv)^2 = f(hv)$ to the hv axis. For the sample CuO №1 $E_g^{op} = 1.62$ eV; for the sample CuO no. 2 $E_g^{op} = 1.65$ eV. For CuO no. 2 thin films, the envelope method was also used to determine the basic optical coefficients $E_g^{op} = 1.72$ eV, and the obtained E_g^{op} values determined by the two methods correlate well with each other.

Thin films (300 nm thick) of CuO of p-type conductivity were precipitated using spray pyrolysis method from 0.2 M of aqueous $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ salt solution on preheated (up to 350 °C) glass and siall substrates. The structure and electrical and optical properties of the films are analyzed. The grain size of CuO thin films (24 nm) was calculated using the XRD analysis. The activation energy equals to $E_a = 0.27$ eV, which may indicate that the conduction is due to the transition of charge carriers from the valence band to working acceptor level. From the spectral dependence $(\alpha hv)^2 = f(hv)$ of CuO thin films, the band gap width $E_g = 1.46$ eV was determined.

Investigated the potential of copper oxide (CuO) thin films as active layers in thin-film solar cells with a Glass/ITO/Graphite/CuO/Ni structure. Furthermore, the generation rate of charge carriers was derived by modelling the optical field distribution using a transfer metric simulation. Theoretical thresholds for photovoltaic device efficiency were determined for varying active layer thicknesses by employing a

normalized light intensity equivalent to that of the AM1.5 spectrum. The current-voltage characteristics are modeled by semi-empirical methods, which illustrate that the photovoltaic conversion efficiency depends on the thickness of the active layer. The highest performance of the simulated structure of the solar cell was 25.2%, which was obtained for the 500 nm CuO films.

In the third chapter of the dissertation, the research results of studying the structural, optical and electrical properties of thin films of graphite depending on the hardness of the rods (2H, H, HB, B and 2B) obtained by the "Pencil-on-semiconductor" method. Such studies are of great importance for the further development of highly efficient devices based on heterojunctions for electronics and optoelectronics. Typical images of the surface formed by reflected electrons (BSE) were obtained using a scanning electron microscope and shown at three magnifications (100x, 500x and 1000x). Since the cores of the studied pencils consist of mixtures of clay and graphite, a more detailed analysis of the elements that make up the cores was conducted. EDS analysis showed that the main components of the studied rods are purified graphite powder, as well as O, Al and Si, which are part of kaolin whose formula is $H_4Al_2Si_2O_9$, or $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ - the main component of ordinary clay. The elemental composition of the microvolume of the studied samples was also determined. Regardless of the error that occurs when determining the composition of C and O (~ 12%), it can be argued that there is still a regularity between the graphite content and the hardness of the pencil. That is, the higher the graphite content, the softer the rod. The average thickness of all investigated films was ~ 150 nm since the thickness of the films obtained by this method is mainly determined by the roughness of the surface of the salt substrate. Drawn graphite films have a higher resistivity than bulk samples (pencil rods) from which they were made. The resistance of the films increases with an increase in the hardness of pencils, due to an increase in the number of clay impurities in graphite, which is a dielectric. It was found that an increase in stick hardness leads to an increase in transmission.

Graphite/n-Si Schottky diodes were fabricated by electron beam evaporation of graphite on n-type silicon substrates. The influence of the thickness of graphite films on the photoelectric and electrical properties of these diodes has been studied. It is

determined that our Schottky diodes can be used in the form of photodiodes and solar cells. The temperature dependences of shunt and series resistances of diodes were also investigated.

In the case of forward and reverse bias, the dominant mechanisms of current transfer through the studied diodes were determined. The responsivity and detectivity of our Schottky graphite/n-Si diodes were also calculated.

The studied heterojunctions have pronounced diode characteristics with a rectification coefficient for a structure with a thinner film $RR \approx 5 \cdot 10^2$, and for a structure with a thicker film $RR \approx 10^2$.

Schottky graphite/n-Si photosensitive diodes with different thicknesses of graphite films were fabricated using the electron beam evaporation method: structure №1 $d = 25$ nm, structure №2 $d = 40$ nm. It was established that the Schottky graphite/n-Si diodes produced have a potential barrier height: for structure №1 $\phi_0 = 0,46$ eV, for structure №2 $\phi_0 = 0,56$ eV. In direct displacements, the dominant mechanisms of current transfer are well described within the framework of the generation-recombination model. Research has shown that such Schottky diodes are photosensitive. When the sample is illuminated by white light with an intensity of 80 mW/cm², the reverse current I_{light} is greater than the current in the dark I_{dark} by almost two orders of magnitude for a structure with a smaller film thickness, and for a structure with a larger film thickness, it increases by only one order of magnitude.

Schottky graphite/p-InP diodes were first fabricated by transferring the drawn graphite film to an InP substrate with a hole-type conductivity. As a result of research, the main mechanisms of current transfer through Schottky diodes graphite / p-InP were determined: these are multistage tunneling-recombination processes involving surface states at the graphite / p-InP interface and tunneling, which is described by Newman's formula at direct displacement; tunneling with reverse displacement. The studied heterojunctions have pronounced diode characteristics with a rectification coefficient $k \approx 10^2$ (at $V = 1$ V). It is shown that the created graphite/p-InP Schottky diodes have a potential barrier height of 0.71 eV.

The results of an investigation of the electrical and photoelectrical properties of the Graphite/PEDOT:PSS/n-CdZnTe organic-inorganic heterojunction formed by the

deposition of thin films PEDOT:PSS on CdZnTe substrates. The $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ solid solution with low Zn content was grown by the Bridgman method at low cadmium vapor pressure and had a low resistivity $\rho \approx 10^2 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$. The values of the series resistance R_s and shunt resistance R_{sh} of the Graphite/PEDOT:PSS/n-CdZnTe organic-inorganic heterojunction were determined from the dependence of their differential resistance R_{dif} . The temperature dependencies of the height of the potential barrier of the Graphite/PEDOT:PSS/n-CdZnTe organic-inorganic heterojunction was determined from the I-V characteristics. The dominating current transport mechanisms through the Graphite/PEDOT:PSS/n-CdZnTe organic-inorganic heterojunctions were determined.

We proposed a self-powered UV-vis-NIR Schottky junction photodiode based on a unique combination of radiation-hard functional materials: thin-film semi-metal Graphite and CdZnTe single-crystal compound semiconductor. The Graphite/CdZnTe Schottky junction photodiodes exhibit a maximum responsivity of 0.25 A W^{-1} and detectivity of $6.5 \times 10^{11} \text{ Jones}$, close to the best heterojunction photodiodes based on CdZnTe solid solution. The devices are also characterized by short rise/fall times (1.2/7.2 μs) and a wide linear dynamic range (77 dB). The proposed photodiodes are promising for applications in space and terrestrial areas with high levels of ionizing radiation.

The practical significance of the obtained results.

The results of the research conducted within the framework of this dissertation have significant practical importance for the development of various electronic and optoelectronic devices based on barrier heterostructures with reproducible and stable characteristics under various operating conditions.

1. A technology has been developed for the fabrication of semiconductor polycrystalline CuO films of p-type conductivity using reactive magnetron sputtering. These films have grain sizes of approximately $D \approx 26 \text{ nm}$, an energy bandgap of $E_g^{op} = 1.65 \text{ eV}$, and a surface resistance of $\rho = 5.96 \text{ k}\Omega/\cdot\text{cm}$. This is particularly relevant for the production of photovoltaic converters.
2. A simple, environmentally friendly, and cost-effective method for obtaining high-quality graphene has been proposed, utilizing a household blender and an organic

solvent, polyvinylpyrrolidone (PVP), as a non-toxic dispersant. Graphene obtained through this approach can be employed in the creation of optoelectronic devices.

3.Organic-inorganic heterostructures consisting of Graphite/PEDOT:PSS/n-CdZnTe have been fabricated, demonstrating that such heterostructures are photosensitive and can be utilized as photodetectors.

4.Photodiodes have been developed for the ultraviolet, visible, and near-infrared regions of the spectrum, based on a unique combination of radiation-resistant functional materials: thin-film semimetallic graphite and single-crystal semiconductor CdZnTe. Graphite/CdZnTe-based photodiodes exhibit maximum sensitivity at the level of 0.25 A/W and possess a detectivity of 6.5×10^{11} Jones, which is comparable to the best heterojunction photodiodes manufactured using CdZnTe solid solutions. These devices also feature fast rise/fall response times (1.2/7.2 μ s) and a wide linear dynamic range (77 dB). The proposed photodiodes can be employed in both space and terrestrial applications with a high level of ionizing radiation.

Keywords: copper oxide, graphite (graphene), nanoparticles, structural and optical properties, electrical parameters, thermodynamic process, CdTe (CdZnTe), semiconductor heterojunction, photovoltaics (solar cell), photodiodes Schottky, band gap, charge transport mechanisms, recombination, conductivity, quantum efficiency.