

УДК 537.9

doi:10.20998/2413-4295.2024.04.01

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗІЙНОЇ ДОВЖИНИ НЕРІВНОВАЖНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В БАЗОВИХ ШАРАХ ТЕЛУРИДУ КАДМІЮ

**А. І. ДОБРОЖАН<sup>\*</sup>, Г. С. ХРИПУНОВ<sup>1</sup>, А. Л. ХРИПУНОВА<sup>2</sup>, М. С. ХРИПУНОВ<sup>1</sup>,  
М. В. КІРІЧЕНКО<sup>1</sup>, Р. В. ЗАЙЦЕВ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> кафедра мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра педагогіки та психології управління, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: dobr.abs@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Тонкоплівкові зразки телуриду кадмію були виготовлені за допомогою термічного вакуумного випарювання з метою дослідження дифузійної довжини неосновних носіїв заряду. Аналіз початкового стану проводили за допомогою рентгеноструктурних досліджень телуриду кадмію, конденсованого на скляних підкладках. Аналіз виявив два дифракційних відбиття, що відповідають відзеркаленням сімейств кристаллографічних площин (111) і (333). Розрахунки показали, що розміри областей когерентного розсіювання склали 93 нм і 56 нм, а значення мікродеформацій визначено як  $11,6 \times 10^{-3}$  і  $4,8 \times 10^{-3}$  для цих площин відповідно. Електроннографічні дослідження ідентифікували вісь зони сформованих плівкових структур [110]. Крім того, спостерігалось двійниковування та формування шаруватої субструктури всередині тонких плівок телуриду кадмію. Мікроскопічні дослідження поверхні дозволили зрозуміти рельєф поверхні, виміряний на рівні приблизно 130 нм, і розмір полікристалічного зерна, визначений як 1 мкм. Для дослідження електрофізичних властивостей тонких плівок телуриду кадмію застосовано метод спектральної залежності малосигнальної поверхневої фотоелектричної напруги. Розрахована довжина дифузії неосновних носіїв заряду становить 0,45 мкм, що становить половину розміру зерна в 1 мкм. Крім того, досліджено коефіцієнт пропускання телуриду кадмію в діапазоні довжин хвиль 800–900 нм. Енергія оптичної забороненої зони становила 1,4 еВ, що трохи менше, ніж 1,5 еВ, що спостерігається для монокристалічного телуриду кадмію. Підсумовуючи, плівкові структури телуриду кадмію, отримані термічним вакуумним випарюванням, демонструють електрофізичні та електричні параметри, нижчі за монокристалічний телурид кадмію. Ці характеристики, зокрема низька дифузійна довжина неосновних носіїв і короткий час загасання електричного сигналу, роблять такі плівкові структури придатними для використання в пристроях, що вимагають тривалої стабільності під впливом часу, екстремальних температур, електричних полів і випромінювання.

**Ключові слова:** поверхнева фотоелектрична напруга; плівка телуриду кадмію; термічне вакуумне випарювання; дифузійна довжина; спектр пропускання; електроннографія

## STUDY OF THE DIFFUSION LENGTH OF NONEQUILIBRIUM CHARGE CARRIERS IN CADMIUM TELLURIDE BASE LAYERS

**A. DOBROZHAN, G. KHRYPUNOV<sup>1</sup>, A. KHRYPUNOVA<sup>2</sup>, M. KHRYPUNOV<sup>1</sup>,  
M. KIRICHENKO<sup>1</sup>, R. ZAITSEV<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Department of Micro- and Nanoelectronics, National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Pedagogy and Psychology of Management, National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Thin film samples of cadmium telluride were obtained using thermal vacuum evaporation to study the diffusion length of minority charge carriers. Initial state analysis was conducted through X-ray structural studies of cadmium telluride condensed on glass substrates. The analysis revealed two diffraction reflections corresponding to the crystallographic planes (111) and (333). Calculations showed that the sizes of coherent scattering regions were 93 nm and 56 nm, while microstrain values were determined as  $11.6 \times 10^{-3}$  and  $4.8 \times 10^{-3}$ , respectively, for these planes. Electron diffraction studies identified the zone axis of the formed film structures as [110]. Additionally, twinning and forming a layered substructure within the cadmium telluride thin films were observed. Microscopic surface studies provided insights into the surface relief, measured at approximately 130 nm, and the polycrystalline grain size, determined to be 1 micrometer. The method of spectral dependence of small-signal surface photovoltage was employed to investigate the electrophysical properties of cadmium telluride thin films. The diffusion length of minority charge carriers was calculated to be 0.45 micrometers, which is half the size of the grain dimensions. Furthermore, the transmittance coefficient of cadmium telluride was examined in the wavelength range of 800–900 nm. The optical bandgap energy was 1.4 eV, slightly lower than the 1.5 eV observed for monocrystalline cadmium telluride. In conclusion, cadmium telluride film structures produced by thermal vacuum evaporation exhibit electrophysical and electrical parameters inferior to monocrystalline cadmium telluride. These characteristics, particularly the low diffusion length of minority carriers and short electrical signal decay times make such film structures suitable for use in devices requiring long-term stability under the influence of time, extreme temperatures, electric fields, and radiation.

**Keywords:** surface photovoltage; cadmium telluride film; thermal vacuum evaporation; diffusion length; transmission spectra; electron diffraction

### Вступ

Плівки телуриду кадмію, порівняно з епітаксіальними шарами твердих розчинів на основі

з'єднань АЗВ5, протягом десятків років продовжують залишатися недооціненими напівпровідниковими матеріалами оптоелектроніки незважаючи на оптимальну для фотоелектричного перетворення у

наземних умовах ширину забороненої зони 1,45 eV, високий коефіцієнт оптичного поглинання, який обумовлює можливість використання як абсорбера шар товщиною кілька мікрометрів, і наявністю матеріало- та енергозберігаючих технологій отримання фоточутливих плівок CdTe [1–4]. У теперішній час широкомасштабне промислове виробництво налагоджено тільки для плівокових сонячних елементів на основі телуриду кадмію [5]. Одним із технологічних факторів, що забезпечують створення високоефективних СЕ є забезпечення збільшення дифузійної довжини генерованих під дією світла нерівноважних носіїв заряду що досягається при проведенні обов'язкової «хлоридної» обробки [6].

У той же час створення високочастотних оптоелектронних приладових структур разом із високою фоточутливістю вимагає зменшення часу життя нерівноважних носіїв заряду до наносекунд і відповідного зниження дифузійної довжини менш ніж 1 мкм. Для цього, наприклад, у з'єднаннях шари АЗВ5 формують при низьких температурах осадження [7,8]. Для можливості використання плівок телуриду кадмію необхідно визначити дифузійну довжину нерівноважних носіїв заряду та з'ясувати які структурні фактори мають вплив на її величину. Таким чином комплексні дослідження кристалічної структури та дифузійної довжини нерівноважних носіїв заряду є актуальними з точки зору розширення сфери застосування плівок телуриду кадмію в СВЧ оптоелектроніці.

#### Мета роботи

Для подальшої оптимізації технології виготовлення елементів електронного захисту та інших тонкоплівокових приладових структур на основі телуриду кадмію провести дослідження кристалічної структури, поверхні та дифузійної довжини нерівноважних носіїв заряду в базових шарах CdTe, виготовлених методом вакуумного термічного випарювання.

#### Основна частина

Як свідчать літературні джерела [9,10] для створення економічної промислової технології отримання плівокових шарів телуриду кадмію перспективно використовувати метод термічного випарювання. Для отримання цим методом стехіометричних базових шарів телуриду кадмію температура осадження не повинна перевищувати 300°C, що дозволяє як прозорі підкладки застосовувати не лише економічні натрійвімісні стекла, а й поліімідні плівки, термостабільність яких в даний час досягає 450°C. Крім того, збільшення розмірів випарного тиглю при реалізації методу термічного випарювання дозволяє отримувати базові шари на значній площі (~1м<sup>2</sup>). Важливою технологічною перевагою вакуумного випарювання

при організації широкомасштабного виробництва є те, що цей метод добре освоєний електронною промисловістю України. Необхідно також відзначити, що метод термічного вакуумного випарювання дозволяє реалізувати високопродуктивний промисловий спосіб подачі гнучкої підкладки в зону конденсації – рулонну технологію. Осадження плівок телуриду кадмію здійснювалося на підкладку зі скла зі шаром прозорого і провідного ІТО. Температура підкладки складала 300°C, температура випарника 750°C.

Для дослідження структурних особливостей базових шарів телуриду кадмію застосовувався рентгенодифрактометричний метод, який передбачав автоматичний запис дифракційного спектру при безперервному 2θ-скануванні в інтервалі кутів 2θ=20-120° з фокусуванням по Бреггу-Брентано в випромінюванні мідного анода. При такому знімку дифракційної картини утворюються відбиття, що формуються сімействами площини [hkl], що розташовані паралельно поверхні зразка. Цей метод широко використовують для аналізу кристалічної структури плівок телуриду кадмію [11,12].

Для дослідження морфології поверхні використовувався метод тунельної мікроскопії. Структурні дослідження тонких плівок телуриду кадмію, проводилися після їх відділення від підкладки методом електронографії та просвічуальної електронної мікроскопії.

#### Обговорення результатів

Результати рентгеноструктурного дослідження тонких плівок телуриду кадмію приведено на рис. 1. Аналіз рентгеноструктурних досліджень типового зразка CdTe, отриманого методом термічного вакуумного випарювання приведено в таблиці 1. У таблиці наведені положення піка 2θ, міжплощинна величина d, інтегральна інтенсивність піку I, інтегральна напівширина піку FWHM, розмір області когерентного розсіяння D, розрахована за рівнянням Шеррера та величина мікронапружень в плівці ε.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що на рентгенограмі присутні два кратні піки від сімейств кристалографічних площин (111) та кратний йому (333) на кутах 2θ 23,48° та 75,87° відповідно. Розраховані значення області когерентного розсіяння становлять 93,15 нм та 56,31 нм відповідно вказаним кристалографічним площинам. Рівень мікронапружень в даних текстурованих плівках високий і становить 7,5·10<sup>-3</sup> відносних одиниць в середньому значенні.

Рентгенодифрактометричні дослідження були доповнені електронографічними дослідженнями та дослідженнями методом просвічуальної електронної мікроскопії тонких плівок телуриду кадмію з товщиною 0,5 мкм після їх відділення від підкладки.

Аналіз електронограми (рис. 2а) дозволив визначити вісь зони – [110], що належить одночасно

двом орієнтаціям кристалітів CdTe з ГЦК ґратками ( $a=0,641$  нм). На «cross-section» темнопольному зображенні структури (рис. 2б) полосчастий контраст виділяє горизонтальні шари плівки, утворені кристалітами CdTe в двійниковій орієнтації. Електроннограмми, отримані від сусідніх шарів, мають дзеркальну симетрію і при накладенні дають картину, наведену на рис. 2, а. У напрямку від підкладки до вільної поверхні плівки товщина цих шарів збільшується від 0,6 до 1,2 мкм.

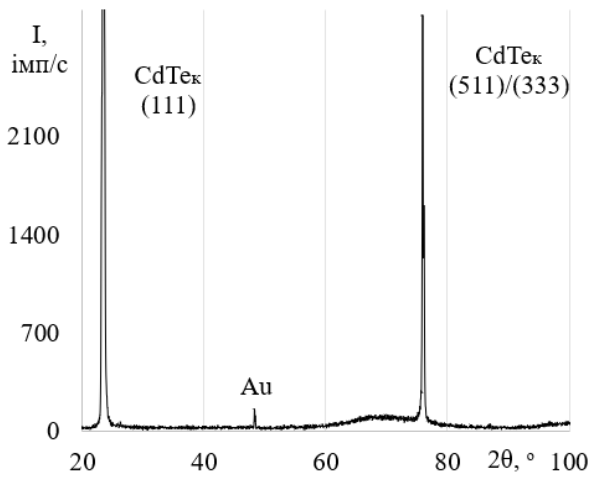


Рис. 1 – Рентгенодифрактометричний спектр типового зразка телуриду кадмію, отриманого методом термічного вакуумного випарювання

Таблиця 1 – Результати рентгенодифрактометричних досліджень типового зразка плівки телуриду кадмію, отриманого методом вакуумного термічного випарювання

Матеріал hkl	$2\theta, ^\circ$	d, нм	I, імп./с	D, нм	$\varepsilon \cdot 10^{-3}$ , відн. од.
CdTe (куб) (111)	23,48	0,38	10494,09	93,15	11,58
Au	48,29	0,19	16,07	-	-
CdTe (куб) (511)/(333)	75,87	0,13	543,05	56,31	4,80

У межах одного шару субструктура (рис. 2в) характеризується високою густиною дефектів упаковки по площинам {111}. Наявність двійників по комплексу сімейств площин {111} в плівці CdTe з аксіальною текстурою <111> можлива за умови вихідної паралельної орієнтації (111) і багаторазового двійника за схемою, коли площини {002} двійника першого і {111} другого порядку стають майже паралельними поверхні плівки.

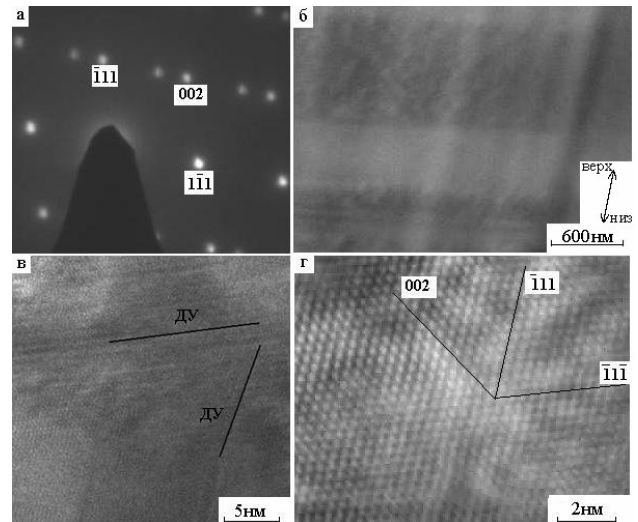


Рис. 2 – Електроннограмма (а) та електронно-мікроскопічні зображення профілю плівки CdTe (б-г)

Таким чином, фронтальне зростання плівки супроводжується розвитком двійкування у вихідних кристалітах паралельної орієнтації, що призводить до зміни орієнтації та формування шаруватої субструктури полікристалічної плівки з аксіальною текстурою. Пряма роздільна здатність кристалографічних площин (рис. 2г) ілюструє характерне для ГЦК ґратки чергування атомних шарів у напрямку [111], а також приклади порушення послідовності розташування шарів, що призводить до 60° симетрії та формування областей з ГПУ ґратками.

Таким чином двійники та дефекти упаковки, як основні дефекти кристалічної структури, супроводжують формування аксіальної текстури ГЦК та призводять до високої дефектності шарів телуриду кадмію.

Згідно з даними тунельної мікроскопії плівки (рис. 3) плівки телуриду кадмію мають розвинуту зернограничну поверхню.

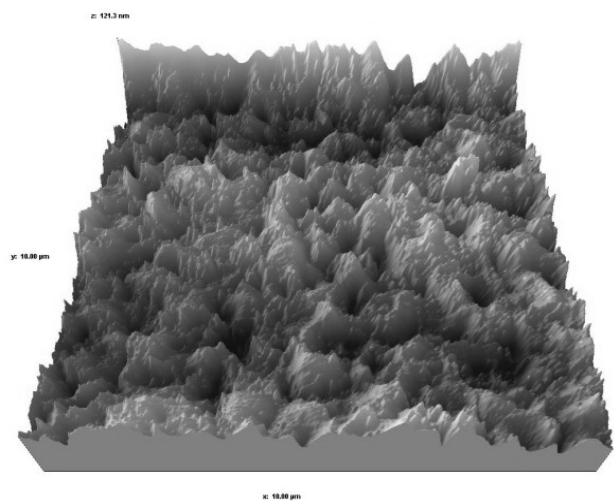


Рис. 3 – Результати дослідження поверхні плівки CdTe методом тунельної мікроскопії плівки

Поверхневий рельєф становить  $\approx 130$  нм, розмір зерен полікристалічної плівки не перевищує 1 мкм.

Дане комплексне дослідження структури, морфології та поверхні типових плівкових зразків телуриду кадмію, дають можливість стверджувати, що у вихідному стані, після реалізації методу вакуумного термічного випарювання, отримані структури мають високий рівень текстурованості, двійникування та дефектності в об'ємі плівки та на її поверхні, що безумовно впливає на електричні та електронні властивості.

Для дослідження електрофізичних та оптичних характеристик тонкоплівкових шарів телуриду кадмію, отриманих методом термічного вакуумного випарювання, був використаний метод спектральних залежностей малосигнальної поверхневої фотонапруги. Цей метод дозволяє отримувати важливу інформацію про властивості матеріалу. Використання даного методу дозволить визначити ширину забороненої зони плівок CdTe, довжину дифузії неосновних носіїв заряду, оцінити коефіцієнт пропускання даної плівки в області краю полоси пропускання по короткохвильовій частині спектру fotocутливості [13].

Малосигнальна поверхнева фотонапруга  $U_\phi$  характеризується тим, що її значення завжди задовольняє критерію  $U_\phi \ll kT/q$ . При температурі  $T=300$  К параметр  $kT/q$  має числове значення, що дорівнює 25,9 мВ.

Для визначення довжини дифузії неосновних носіїв заряду  $L$  побудовано залежність оберненої малосигнальної поверхневої фотонапруги  $1/U_\phi$  від оберненого коефіцієнта поглинання  $1/\alpha$ . (рис. 4) Величина відсічки на осі абсцис  $1/\alpha$  лінійної ділянки залежності  $1/U_\phi=f(1/\alpha)$  біля краю поглинання визначала довжину дифузії неосновних носіїв заряду в матеріалі.

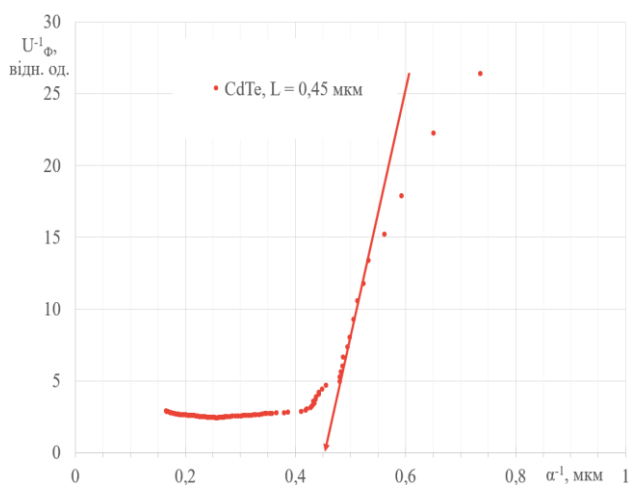


Рис. 4 – Залежність  $U_\phi^{-1}$  від  $\alpha^{-1}$  для зразку телуриду кадмію у вихідному стані

З аналізу видно, що визначене значення довжини дифузії неосновних носіїв заряду у телуриді кадмію, отриманого вакуумним термічним випарюванням, становить 0,45 мкм.

Після аналізу довгохвильової області спектрів фотонапруги було отримано методом зворотнього розрахунку спектр пропускання телуриду кадмію в області краю полоси поглинання у діапазоні 800-900 нм (рис. 6). Для даної залежності було розраховано значення оптичної ширини забороненої зони, що становить 1,4 еВ та відрізняється від значення ширини забороненої зони монокристалічного CdTe – 1,5 еВ [14]. Даний факт також підтверджує наявність великої кількості дефектних рівнів у енергетичній структурі телуриду кадмію, які знижують параметр довжини дифузії неосновних носіїв заряду телуриду кадмію, отриманого методом вакуумного термічного випарювання.

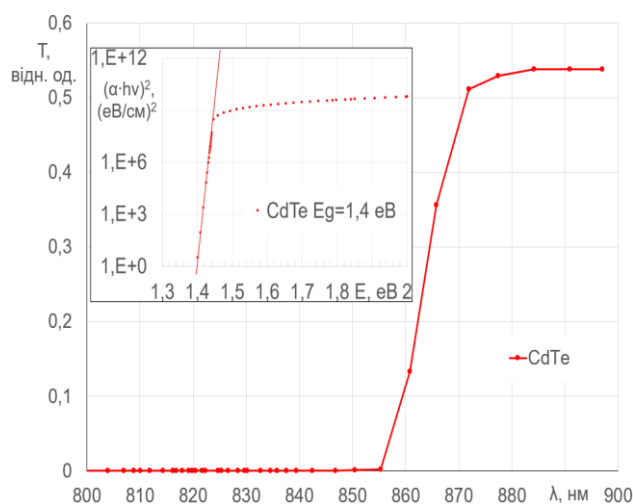


Рис. 6 – Залежність  $T(\lambda)$  та  $(\alpha \cdot hv)^2$  від  $hv$  (на вставці) для зразку телуриду кадмію у вихідному стані

### Висновки

Зразки тонкоплівкового телуриду кадмію були отримані методом термічного вакуумного випарювання. У вихідному стані було проведено рентгеноструктурні дослідження сконденсованого на скляну підкладку CdTe. Аналіз показав наявність двох віддзеркалень кратних кристалографічних площин (111) та (333). Розраховано розміри областей когерентного розсіяння та мікронапруження, які становлять 93 нм, 56 нм та  $11,6 \cdot 10^{-3}$ ,  $4,8 \cdot 10^{-3}$  відповідно для відповідних кристалографічних площин. Електроннографічні дослідження визначили вісь зони сформованих плівкових структур [110] та встановили факт двійникування та формування шаруватої субструктури в об'ємі тонких плівок телуриду кадмію. Мікроскопічні дослідження поверхні плівок дозволили визначити поверхневий рельєф, який становить  $\approx 130$  нм, та розмір кристалічного зерна полікристалу 1 мкм.

Для дослідження електрофізичних характеристик тонких плівок CdTe був використаний метод спектральних залежностей малосигнальної поверхневої фотонапруги. Було визначено величину довжини дифузії неосновних носіїв заряду у CdTe на рівні 0,45 мкм, що менше визначеного значення розміру кристалічного зерна у 2 рази. Також визначено залежність коефіцієнту пропускання CdTe в діапазоні довжин хвиль 800-900 нм та значення оптичної ширини забороненої зони 1,4 еВ, що менше значення для монокристалічного телуриду кадмію 1,5 еВ.

З викладеного, можна зробити висновок, що плівкові структури телуриду кадмію, отримані методом термічного вакуумного випарювання, у вихідному стані мають електрофізичні та електричні параметри, які менші за монокристалічний CdTe. З огляду на даний факт, можна стверджувати, що дані приладові структури з низьким значенням дифузійної довжини неосновних носіїв заряду, а отже малих часів затухання електричного сигналу, можна використовувати в девайсах, які вимагають тривалої стійкості параметрів під впливом часу, агресивних температур, полів та випромінювання [15].

#### Подяка

Робота виконана за фінансової підтримки Національного Фонду Досліджень України, проєкт з виконання наукового дослідження і розробки 2022.01/0014, «Розробка експериментального зразка плівкового елемента захисту електронної техніки від імпульсів електромагнітного випромінювання».

#### Список літератури

- Huang Y., Yang J., Liu Z., Liang F., Zhao D. Investigation of degradation mechanism in GaN-based blue and ultraviolet laser diodes. *J. Appl. Phys.* 2023. № 134. P. 095701. doi:10.1063/5.0160833.
- Peng P., Hailiang Z., Hailiang D., Jia D. Z. G., Xu B. Investigation of GaAs-Based Laser Diode Adopting an Al Composition Gradient Double Waveguide Structure and its Photoelectric Properties. *ECS Journal of Solid State Science and Technology.* 2024. № 13. P. 066002. doi: 10.1149/2162-8777/ad561c.
- Scarpulla M. A., McCandles B., Phillips A. B., Yan Y., Heben M. J., Wolden C., Xiong G., Metzger W. K., Mao D., Krasikov D., Sankin I., Grover S., Munshi A., Sampath W., Sites J. R., Bothwell A., Albin D., Reese M. O., Romeo A., Nardone M., Hayes S. M. CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2023. № 255. P. 112289. doi: 10.1016/j.solmat.2023.112289.
- Sharmin A., Mahmood S. S., Sultana M., Aziz S., Shaikh M. A. A., Bashar M. S. Effect of argon pressure on the physical characteristics of cadmium telluride (CdTe) thin films by close-spaced sublimation. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2023. № 34 (5). P. 334. doi: 10.1007/s10854-022-09603-w.
- Mazur T. M., Mazur M. P., Vakaliuk I. V. Solar cells based on CdTe thin films, *Physics And Chemistry Of Solid State.* 2023. № 24 (1). P. 134-145. doi:10.15330/pccs.24.1.134-145.
- Sharmin A., Mahmood S. S., Sultana M., Shaikh M. A. A., Bashar M. S. Property enhancement of a close-spaced sublimated CdTe thin film by a post-growth activation step with CdCl<sub>2</sub> and MgCl<sub>2</sub>. *Materials Advances.* 2024. № 5. P. 1205. doi: 10.1039/D3MA00734K.
- Harmon E. S., Melloch M. R., Woodall J. M., Nolte D. D., Otsuka N., Chang C. L. Carrier lifetime versus anneal in low temperature growth GaAs. *Appl. Phys. Lett.* 1993. № 63 (16). P. 2248–2250. doi: 10.1063/1.110542.
- Afalla J., Gonzales K. C., Prieto E. A., Catindig G., Vasquez J. D., Husay H. A., Tumanguil-Quitoras M. A., Muldera J., Kitahara H., Somintac A. Photoconductivity, carrier lifetime and mobility evaluation of GaAs films on Si (100) using optical pump terahertz probe measurements. *Semiconductor Science and Technology.* 2019. № 34. P. 035031. doi: 10.1088/1361-6641/ab0626.
- Gevorgyan V. A., Mangasaryan N. R., Gremenok V. F., Tivanov M. S., Thakur P., Thakur A., Trukhanov S. V., Zubar T. I., Sayyed M. I., Tishkevich D. I., Trukhanov A. V. Morphology and structure of CdCl<sub>2</sub>-Containing CdTe films deposited by discrete vacuum thermal evaporation. *Vacuum.* 2023. № 214. P. 112248. doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112248.
- Kumari S., Suthar D., Himanshu, Kumari N., Dhaka M. S. Understanding Grain Growth Mechanism in Vacuum Evaporated CdTe Thin Films by Different Halide Treatments: An Evolution of Ion Size Impact on Physical Properties for Solar Cell Applications. *Comments Inorg. Chem.* 2023. № 43 (6). P. 429–464. doi: 10.1080/02603594.2022.2142938.
- Melchor-Robles J. A., Nieto-Zepeda K. E., Vázquez-Barragán N. E., Arreguín-Campos M., Rodríguez-Rosales K., Cruz-Gómez J., Guillén-Cervantes A., Santos-Cruz J., Olvera L., Contreras-Puente G., Moure-Flores F. Characterization of CdS/CdTe Ultrathin-Film Solar Cells with Different CdS Thin-Film Thicknesses Obtained by RF Sputtering. *Coatings.* 2024. № 14(4). P. 452. doi: 10.3390/coatings14040452.
- Alshehri K. Investigation on copper doped CdTe thick films for optoelectronic applications: structural, optical and electrical characteristics. *Int. J. Thin. Fil. Sci. Tec.* 2024. № 13(3). P. 235–247. doi: 10.18576/ijtfst/130308.
- Kostlyov V. P., Sachenko A. V., Vlasiuk V. M., Sokolovskyi I. O., Kobylianska S. D., Torchyniuk P. V., V'yunov O. I., Belous A. G. Synthesis and investigation of the properties of organic-inorganic perovskite films with non-contact methods. *Ukr. J. Phys.* 2021. № 66(5). P. 429–438. doi: 10.15407/ujpe66.5.429.
- Kopach G. I., Mygushchenko R. P., Khrypunov G. S., Dobrozhan A. I., Harchenko M. M. Structure and Optical Properties CdS and CdTe Films on Flexible Substrate Obtained by DC Magnetron Sputtering for Solar Cells. *J. Nano- Electron. Phys.* 2017. № 9. P. 05035. doi: 10.21272/jnep.9(5).05035.
- Meriuts A. V., Kharchenko M. M., Khrypunov G. S., Pudov A. O., Makhlay V. A., Herashchenko S. S., Sokolov S. A., Rybka A. V., Kutny V. E., Kolodiy I. V., Dobrozhan A. I., Kosinov A. V., Khrypunov M. G. Radiation sensor based on thin-film CdTe/CdS device structure and its radiation resistance under high-intensity hydrogen plasma. *J. Appl. Phys.* 2022. № 132. P. 104501. doi: 10.1063/5.0098123.

## References (transliterated)

1. Huang Y., Yang J., Liu Z., Liang F., Zhao D. Investigation of degradation mechanism in GaN-based blue and ultraviolet laser diodes. *J. Appl. Phys.*, 2023, vol. 134, pp. 095701, doi:10.1063/5.0160833.
2. Peng P., Hailiang Z., Hailiang D., Jia D. Z. G., Xu B. Investigation of GaAs-Based Laser Diode Adopting an Al Composition Gradient Double Waveguide Structure and its Photoelectric Properties. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2024, vol. 13, pp. 066002, doi: 10.1149/2162-8777/ad561c.
3. Scarpulla M. A., McCandless B., Phillips A. B., Yan Y., Hebenc M. J., Wolden C., Xiong G., Metzger W. K., Mao D., Krasikov D., Sankin I., Grover S., Munshi A., Sampath W., Sites J. R., Bothwell A., Albin D., Reese M. O., Romeo A., Nardone M., Hayes S. M. CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, vol. 255, pp. 112289, doi: 10.1016/j.solmat.2023.112289.
4. Sharmin A., Mahmood S. S., Sultana M., Aziz S., Shaikh M. A. A., Bashar M. S. Effect of argon pressure on the physical characteristics of cadmium telluride (CdTe) thin films by close-spaced sublimation. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2023, vol. 34, no. 5, pp. 334, doi: 10.1007/s10854-022-09603-w.
5. Mazur T. M., Mazur M. P., Vakaliuk I. V. Solar cells based on CdTe thin films, *Physics And Chemistry Of Solid State*, 2023, vol. 24, no. 1, pp. 134-145, doi: 10.15330/pcss.24.1.134-145
6. Sharmin A., Mahmood S. S., Sultana M., Shaikh M. A. A., Bashar M. S. Property enhancement of a close-spaced sublimated CdTe thin film by a post-growth activation step with CdCl<sub>2</sub> and MgCl<sub>2</sub>. *Materials Advances*, 2024, vol. 5, pp. 1205, doi: 10.1039/D3MA00734K.
7. Harmon E. S., Melloch M. R., Woodall J. M., Nolte D. D., Otsuka N., Chang C. L. Carrier lifetime versus anneal in low temperature growth GaAs. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, vol. 63, no. 16, pp. 2248–2250, doi: 10.1063/1.110542.
8. Afalla J., Gonzales K. C., Prieto E. A., Catindig G., Vasquez J. D., Husay H. A., Tumanguil-Quitoras M. A., Muldera J., Kitahara H., Somintac A. Photoconductivity, carrier lifetime and mobility evaluation of GaAs films on Si (100) using optical pump terahertz probe measurements. *Semiconductor Science and Technology*, 2019, vol. 34, pp. 035031, doi: 10.1088/1361-6641/ab0626.
9. Gevorgyan V. A., Mangasaryan N. R., Gremenok V. F., Tivanov M. S., Thakur P., Thakur A., Trukhanov S. V., Zubar T. I., Sayyed M. I., Tishkevich D. I., Trukhanov A. V. Morphology and structure of CdCl<sub>2</sub>-Containing CdTe films deposited by discrete vacuum thermal evaporation. *Vacuum*, 2023, vol. 214, pp. 112248, doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112248.
10. Kumari S., Suthar D., Himanshu, Kumari N., Dhaka M. S. Understanding Grain Growth Mechanism in Vacuum Evaporated CdTe Thin Films by Different Halide Treatments: An Evolution of Ion Size Impact on Physical Properties for Solar Cell Applications. *Comments Inorg. Chem.*, 2023, vol. 43, no. 6, pp. 429–464, doi: 10.1080/02603594.2022.2142938.
11. Melchor-Robles J. A., Nieto-Zepeda K. E., Vázquez-Barragán N. E., Arreguín-Campos M., Rodríguez-Rosales K., Cruz-Gómez J., Guillén-Cervantes A., Santos-Cruz J., Olvera L., Contreras-Puente G., Moure-Flores F. Characterization of CdS/CdTe Ultrathin-Film Solar Cells with Different CdS Thin-Film Thicknesses Obtained by RF Sputtering. *Coatings*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 452, doi: 10.3390/coatings14040452.
12. Alshehri K. Investigation on copper doped CdTe thick films for optoelectronic applications: structural, optical and electrical characteristics. *Int. J. Thin. Fil. Sci. Tec.*, 2024, vol. 13, no. 3, pp. 235–247, doi: 10.18576/ijfst//130308.
13. Kostilyov V. P., Sachenko A. V., Vlasiuk V. M., Sokolovskiy I. O., Kobylinska S. D., Torchyniuk P. V., V'yunov O. I., Belous A. G. Synthesis and investigation of the properties of organic-inorganic perovskite films with non-contact methods. *Ukr. J. Phys.*, 2021, vol. 66, no. 5, pp. 429–438, doi: 10.15407/ujpe66.5.429.
14. Kopach G. I., Mygushchenko R. P., Khrypunov G. S., Dobrozhan A. I., Harchenko M. M. Structure and Optical Properties CdS and CdTe Films on Flexible Substrate Obtained by DC Magnetron Sputtering for Solar Cells. *J. Nano- Electron. Phys.*, 2017, vol. 9, pp. 05035, doi: 10.21272/jnep.9(5).05035.
15. Meriuts A. V., Kharchenko M. M., Khrypunov G. S., Pudov A. O., Makhlay V. A., Herashchenko S. S., Sokolov S. A., Rybka A. V., Kutny V. E., Kolodiy I. V., Dobrozhan A. I., Kosinov A. V., Khrypunov M. G. Radiation sensor based on thin-film CdTe/CdS device structure and its radiation resistance under high-intensity hydrogen plasma. *J. Appl. Phys.*, 2022, vol. 132, pp. 104501, doi: 10.1063/5.0098123.

## Відомості про авторів (About authors)

**Доброжан Андрій Ігорович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри мікро-та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8830-0942>; e-mail: [dojr.abs@gmail.com](mailto:dojr.abs@gmail.com).

**Dobrozhan Andrii** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Associate Professor of Micro- and Nanoelectronic Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8830-0942>; e-mail: [dojr.abs@gmail.com](mailto:dojr.abs@gmail.com).

**Хрипунов Геннадій Семенович** – доктор технічних наук, професор, проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: [khrip@ukr.net](mailto:khrip@ukr.net)

**Khrypunov Gennadiy** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: [khrip@ukr.net](mailto:khrip@ukr.net)

**Хрипунова Аліна Леонідівна** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри педагогіки та психології управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5920-8111>; e-mail: [khrip@ukr.net](mailto:khrip@ukr.net)

**Khrypunova Alina** – Candidate of Pedagogical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Associate Professor of Pedagogy and Psychology Department of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5920-8111>; e-mail: [khrp@ukr.net](mailto:khrp@ukr.net)

**Хрипунов Михайло Семенович** – аспірант кафедри мікро-та наноелектроітики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8623-5174>; e-mail: [mykhailo.khrypunov@infiz.khpi.edu.ua](mailto:mykhailo.khrypunov@infiz.khpi.edu.ua).

**Khrypunov Mykhailo** – postgraduate student of the Micro- and Nanoelectronics Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8623-5174>; e-mail: [mykhailo.khrypunov@infiz.khpi.edu.ua](mailto:mykhailo.khrypunov@infiz.khpi.edu.ua).

**Кіриченко Михайло Валерійович** – кандидат технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4847-506X; e-mail: [kirichenko.mv@gmail.com](mailto:kirichenko.mv@gmail.com).

**Kirichenko Mykhailo** – PhD of technical sciences, senior researcher, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4847-506X; email: [kirichenko.mv@gmail.com](mailto:kirichenko.mv@gmail.com)

**Зайцев Роман Валентинович** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри Мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2286-8452; email: [zaitsev.poman@gmail.com](mailto:zaitsev.poman@gmail.com).

**Zaitsev Roman** – D.Sc. of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2286-8452; e-mail: [zaitsev.poman@gmail.com](mailto:zaitsev.poman@gmail.com).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Доброжан А. І., Хрипунов Г. С., Хрипунова А. Л., Хрипунов М. С., Кириченко М. В., Зайцев Р. В. Дослідження дифузійної довжини нерівноважних носіїв заряду в базових шарах телуриду кадмію. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 4 (22). С. 3-9. doi:10.20998/2413-4295.2024.04.01.

*Please cite this article as:*

Dobrozhan A. I., Khrypunov G. S., Khrypunova A. L., Khrypunov M. S., Kirichenko M. V., Zaitsev R. V. Study of the Diffusion Length of Nonequilibrium Charge Carriers in Cadmium Telluride Base Layers. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 4(22), pp. 3–9, doi:10.20998/2413-4295.2024.04.01.

*Надійшла (received) 29.10.2024  
Прийнята (accepted) 10.12.2024*