

Г. С. ХРИПУНОВ, А. В. МЕРІУЦ, М. М. ХАРЧЕНКО, С. С. ГЕРАЩЕНКО, І. В. КОЛОДІЙ, О. О. ПУДОВ, Т. І. ХРАМОВА, Т. М. ШЕЛЕСТ, О. О. КУЗЯКІН

ВПЛИВ ІМПУЛЬСНОГО ОПРОМІНЕННЯ ВОДНЕВОЮ ТА ГЕЛІЄВОЮ ПЛАЗМОЮ НА ФОРМУВАННЯ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ У ТОНКОПІВКОВІЙ ГЕТЕРОСИСТЕМІ CdTe/CdS

Рентгендіфрактометричним методом проведено дослідження впливу опромінення імпульсами водневої та гелієвої плазми на характер міжфазової взаємодії пліткових шарів сульфиду та телуриду кадмію, які були отримані методом гарячої стінки на скляних підкладках з прозорим електродом FTO. Під час осадження шарів CdS товщиною 0,3–0,32 мкм температура зони випарника становила 590 °С, а температура підкладки – 395 °С. Шари CdTe товщиною 3,8–4,0 мкм наносилися при температурі зони випаровування 520 °С і температурі підкладки 497 °С. Після нанесення проводилася «хлоридна» обробка гетеросистеми. Для цього на поверхню плівки телуриду кадмію без нагрівання підкладки методом термічного випаровування наносився шар хлориду кадмію товщиною 0,7 мкм. Потім проводився відпал на повітрі при температурі 410–415 °С протягом 20 хв. Склад твердих розчинів визначався за періодом кристалічної решітки у відповідності до правила Vegarda. У вихідному стані разом з кубічною фазою телуриду кадмію спостерігається наявність твердих розчинів CdTe_{1-x}S_x з концентрацією сірки 3 % та 8,2 %. Після опромінення гетеросистеми CdS/CdTe імпульсами водневої плазми весь базовий шар перетворився на твердий розчин з концентрацією сірки 3 %. При цьому спостерігаються ще дві фази твердих розчинів CdTe_{1-x}S_x з концентрацією сірки 6 % та 11,5 %. Відносна концентрація фази телуриду кадмію у вихідному стані складала 84 %, після опромінення імпульсами водневої плазми – 82 %. В той час як фази твердих розчинів з концентрацією сірки 3 % та 8,2 % у вихідному стані були у відносній концентрації 7 % і 9 %, відповідно, після опромінення їх відносна концентрація стала 15 % і 3 %, відповідно. Після опромінення гетеросистеми CdS/CdTe імпульсами гелієвої плазми весь базовий шар перетворився на твердий розчин з концентрацією сірки 1,5 %. При цьому спостерігаються ще дві фази з концентрацією сірки 3,7 % та 7,9 %. Відносна концентрація фази телуриду кадмію після опромінення імпульсами водневої плазми зменшується до 79 %. В той час як відносна концентрація фази твердих розчинів з концентрацією сірки 3 % та 8,2 % після опромінення збільшується до 17 % і 12 %, відповідно. Різниця в еволюції фазового складу плівкової гетеросистеми CdS/CdTe під впливом опромінення імпульсами водневої та гелієвої плазми, яка спостерігається експериментально, може бути пов'язана з тим, що опромінення більш масивними атомами гелію призводить до більшого теплового впливу, що обумовлює плавлення.

Ключові слова: телурид кадмію, сульфід кадмію, тверді розчини, імпульсне опромінення, воднева та гелієва плазма.

G. S. KHRYPUNOV, A. V. MERIUTS, M. M. KHARCHENKO, S. S. HERASHCHENKO, I. V. KOLODIY, A. O. PUDOV, T. I. KHRAMOVA, T. M. SHELEST, O. O. KUZIAKIN

EFFECT OF PULSED HYDROGEN AND HELIUM PLASMA IRRADIATION ON THE FORMATION OF SOLID SOLUTIONS IN THE THIN-FILM CdTe/CdS HETEROSYSTEM

The interphase interaction of cadmium sulfide and cadmium telluride thin film layers under irradiation with pulses of hydrogen and helium plasma was investigated by the X-ray diffraction method. CdS/CdTe heterosystem samples were obtained by the hot wall method on glass substrates with a transparent FTO electrode. During deposition of CdS layers 0.3–0.32 μm thick, the temperature of the evaporator zone was 590 °C, and the substrate temperature was 395 °C. CdTe layers 3.8–4.0 μm thick were deposited at an evaporation zone temperature of 520 °C and a substrate temperature of 497 °C. After deposition, the “chloride” treatment of the heterosystem was carried out. The “chloride” treatment consisted in the deposition of a cadmium chloride film 0.7 μm thick on the surface of a CdTe by thermal vacuum evaporation without heating the substrate and by annealing the entire structure in air at a temperature of 410–415 °C for 20 min. The composition of the solid solutions was determined from the lattice period according to Vegard's rule. In the initial state, along with the cubic phase of cadmium telluride, the presence of CdTe_{1-x}S_x solid solutions with a sulfur concentration of 3 % and 8.2 % is observed. After irradiation of the CdS/CdTe heterosystems with hydrogen plasma pulses, the entire base layer turned into a solid solution with a sulfur concentration of 3 %. At the same time, two more phases of CdTe_{1-x}S_x solid solutions with sulfur concentrations of 6 % and 11.5 % were observed. The relative concentration of the cadmium telluride phase in the initial state was 84 %, after irradiation with hydrogen plasma pulses it was 82 %. In the initial state, the phases of solid solutions with sulfur content of 3 % and 8.2 % had relative concentrations of 7 % and 9 %, respectively; after irradiation, their relative concentrations became 15 % and 3 %, respectively. After irradiation of the CdS/CdTe heterosystem with helium plasma pulses, the entire base layer turned into a solid solution with a sulfur concentration of 1.5 %. In this case, two more phases with a sulfur concentration of 3.7 % and 7.9 % were observed. The relative concentration of cadmium phase telluride after irradiation with hydrogen plasma pulses decreases to 79 %. After irradiation, the relative concentration of the phase of solid solutions with sulfur contents of 3 % and 8.2 % increases to 17 % and 12 %, respectively. The experimentally observed difference in the evolution of the phase composition of the CdS/CdTe film heterosystem under irradiation with hydrogen and helium plasma pulses may be due to the fact that irradiation with more massive helium atoms leads to a greater thermal effect, which causes melting.

Keywords: cadmium telluride, cadmium sulfide, solid solutions, pulsed irradiation, hydrogen and helium plasma.

Вступ. Телурид кадмію впродовж десяти років залишається одним з найбільш популярних пліткових напівпровідникових матеріалів для створення економічних і ефективних пліткових сонячних елементів (СЕ) наземного застосування [1, 2]. Це обумовлено оптимальною для фотоелектричного перетворення в наземних умовах шириною забороненої зони, високим коефіцієнтом оптичного поглинання, який обумовлює можливість використання в якості абсорбера шар товщиною

кілька мікрометрів [3], і наявністю матеріало- та енергозберігаючих технологій отримання плівок CdTe [4]. Це дозволило фірмам США, Німеччини та Японії розгорнути промислове виробництво економічних пліткових сонячних модулів на основі телуриду та сульфиду кадмію. Світовим лідером промислового виробництва найбільш ефективних сонячних модулів CdS/CdTe є фірма First Solar (США) [5]. У 2020 році загальна електрична потужність вироблених First Solar сонячних модулів досягла 2.4 ГВт [6]. Очікується, що

© Г. С. Хрипун, А. В. Меріуц, М. М. Харченко, С. С. Геращенко, І. В. Колодій, О. О. Пудов, Т. І. Храмова, Т. М. Шелест, О. О. Кузякін, 2023

протягом наступних років на світовому ринку сегмент сонячних модулів на основі тонких плівок CdTe зросте на 18,7 % і досягне 8590 мільйонів доларів США у 2024 році. Комерційні перспективи інтенсифікували наукові дослідження в галузі розвитку фізико-технічних основ промислових технологій отримання плівкових SE на основі CdS/CdTe [7–11]. Оскільки плівкові сонячні елементи являють собою тонкоплівкову багатощарову систему, сформовану при високих температурах осадження, то дослідження міжфазової та дифузійної взаємодії шарів сульфїду та телуриду кадмію, яка призводить до формування твердих розчинів на міжфазовій границі та внаслідок чого впливає на ефективність фотоелектричних процесів в базовому шарі, є актуальною задачею плівкового матеріалознавства.

Аналіз стану питання. Утворення твердих розчинів в гетеросистемі CdTe/CdS відбувається в обмеженому діапазоні концентрацій телуру та сірки [12]. Відповідно до діаграми стану системи CdTe/CdS, яка була побудована при температурах понад 700 °C, максимальна розчинність сірки в шарах телуриду кадмію становить 20 % [13]. При цьому тверді розчини CdTe_{1-x}S_x (x < 0.2) мають структуру сфалериту. Максимальна розчинність телуру у шарах сульфїду кадмію становить 10 %. Тверді розчини CdS_{1-y}Te_y (y < 0.1) мають структуру вюрциту. Особливістю фазової діаграми цієї системи за більш низьких температур є зменшення максимальної розчинності сірки в CdTe [14, 15]. Авторами роботи [16] було показано, що при зменшенні температури до 370 °C розчинність сірки в телуриді кадмію зменшується до 3 %. У ряді робіт (див., наприклад, [17]) методами рентгендифрактометрії, електронної мікроскопії що просвічує, вторинної іонної маспектрометрії було показано, що в результаті міжфазової взаємодії в процесі формування плівкових SE на основі CdTe/CdS утворюються прошарки їхніх твердих розчинів. При цьому гранична розчинність компонентів залежить від температури та визначається наступними співвідношеннями [18]:

$$x = 4.717 \cdot 10^{-2} - 3.104 \cdot 10^{-4} \cdot T + 9.543 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 3.687 \cdot 10^{-10} \cdot T^3, \quad (1)$$

$$y = -0.1684 + 1.172 \cdot 10^{-3} \cdot T - 2.639 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 2.348 \cdot 10^{-10} \cdot T^3. \quad (3)$$

Такі тверді розчини нетрадиційним чином змінюють ширину забороненої зони системи CdTe/CdS. У [19, 20] було показано, що збільшення розчинності сірки в телуриді кадмію до 20 % призводить до зменшення ширини забороненої зони (E_g) до 1.35 eV, що нижче не тільки ширини забороненої зони CdS, але і E_g CdTe. У [21] показано, що в SE на основі CdTe/CdS, отриманих при температурах осадження 600 °C, формуються шари CdTe_{1-x}S_x (x = 0.07). Авторі цієї роботи вважають, що це гранична розчинність сірки в плівкових шарах телуриду кадмію в таких умовах. В роботі [22] була

визначена емпірична залежність ширини забороненої зони від складу твердих розчинів:

$$E_g(x) = E_0 + (E_1 - E_0 - b) x + bx^2, \quad (3)$$

де $E_0 = 1,54 \pm 0,01$ eV;
 $E_1 = 2,36 \pm 0,02$ eV;
 $b = 1,54 \pm 0,01$ eV.

Наявність варизонних прошарків істотно змінює енергетичну структуру гетеросистеми CdTe/CdS і, отже, впливає на ефективність фотоелектричних процесів у SE. Проте у роботах, присвячених проблемам створення високоефективних SE на основі CdTe (див., наприклад, [23, 24]), фізичні механізми впливу варизонних прошарків твердих розчинів CdTe_{1-x}S_x на фотоелектричні процеси в SE CdTe/CdS практично не аналізуються. Виняток становлять роботи [25, 26], де авторами вперше було показано, що використання варизонних прошарків розширює fotocутливість SE у короткохвильовій частині сонячного спектру. При цьому було розроблено теоретичну модель оптимального сепаруючого бар'єру в гетеросистемі CdTe/CdS, яка враховує можливість утворення варизонних прошарків твердих розчинів [27, 28].

Дослідження кристалічної структури плівкових шарів твердих розчинів CdTe_{1-x}S_x (0.1 < x < 0.9), отриманих при температурах осадження менше 200 °C, показало, що нагрівання до температур понад 300 °C призводить до розпаду твердих розчинів і утворення гетерогенної тонкоплівкової структури, двох розчинів: твердого розчину на основі телуриду кадмію та твердого розчину на основі сульфїду кадмію [29]. Дослідження періоду решітки твердих розчинів свідчать про те, що зміна періоду решітки (a) при зміні складу твердого розчину CdTe_{1-x}S_x кубічної модифікації та періодів решітки (a, c) твердого розчину CdS_{1-y}Te_y гексагональної модифікації в області обмеженої розчинності відповідає правилу Вегарда [30]. Дослідження процесів дифузії свідчать про те, що у тонкоплівковій композиції при формуванні SE CdTe/CdS спостерігається дифузія сірки в шар CdTe, дифузії телуру в шар CdS зафіксовано не було [31]. Експериментально було визначено, що коефіцієнт дифузії сірки при температурі 550 °C становить 10¹⁴ см³с⁻¹ [32]. Авторі [33] вважають, що при виготовленні високоефективних SE термообробка системи CdTe/CdS на повітрі обумовлює присутність на границях зерен базового шару атомів кисню у вузлах решітки на місці телуру. Це призводить до того, що швидкість зернограничної дифузії сірки в CdTe нижче, ніж швидкість дифузії в об'ємі зерна. Тому домінуючим механізмом дифузії сірки є дифузія в об'ємі зерен. Такий механізм дифузії сірки був експериментально підтверджений у роботі [34], де після термообробки системи CdTe/CdS наявність сірки було зафіксовано лише в об'ємі зерен телуриду кадмію.

Постановка задачі. Проведений аналіз літературних даних показав, що дослідження твердих

розчинів на міжфазовій границі плівкової гетеросистеми CdTe/CdS проводяться в основному з огляду формування твердих розчинів в процесі виробництва сонячних елементів на їх основі. При цьому дослідження еволюції таких твердих розчинів в процесі експлуатації сонячних елементів на основі CdS/CdTe не проводяться. Проте в останній час з'явилися публікації, в яких плівкові сонячні елементи на основі сульфїду та телуриду кадмію використовуються в якості радіаційних детекторів. Такі приладові структури працюють при високому тепловому та радіаційному навантаженні потоками водневої або гелієвої плазми. Тому дослідження впливу опромінення імпульсами водневої та гелієвої плазми на характер міжфазової взаємодії плівкових шарів сульфїду та телуриду кадмію має не тільки прикладне значення з точки зору розробки приладових структур радіаційних датчиків на основі CdS/CdTe, а і наукове значення з точки зору розвитку фізичних основ радіаційного плівкового матеріалознавства.

Мета статті. Дослідження впливу опромінення імпульсами водневої та гелієвої плазми на характер міжфазової взаємодії плівкових шарів сульфїду та телуриду кадмію.

Методи виготовлення та дослідження зразків. Тонкоплівкові гетеросистеми CdS/CdTe були сформовані методом гарячої стінки, на скляній підкладці з попередньо нанесеним прозорим і провідним шаром FTO, який виконує функції фронтального електрода в структурі приладу. Під час осадження шарів CdS температура зони випарника становила 590 °C, а температура підкладки – 395 °C, що відповідає квазірівноважним умовам конденсації. При тривалості процесу конденсації 15 хв були отримані плівки CdS товщиною 0,3–0,32 мкм. Шари CdTe наносилися при температурі зони випаровування 520 °C і температурі підкладки 497 °C. У такому температурному режимі при тривалості процесу конденсації 7 хв були отримані плівки CdTe товщиною 3,8–4,0 мкм і розмірами зерен на поверхні 3–5 мкм. Після нанесення гетеросистеми проводилася «хлоридна» обробка. Для цього на поверхню плівки телуриду кадмію без нагрівання підкладки методом термічного випаровування наносився шар хлориду кадмію товщиною 0,7 мкм. Потім відбувався відпал на повітрі при температурі 410–415 °C протягом 20 хв. Після відпалу поверхню травили в розчині бром у метанолі для видалення продуктів хімічної реакції. Тильний контакт утворювався шляхом осадження плівок міді та золота товщиною 11 нм та 50 нм, відповідно. Потім відбувався відпал на повітрі при температурі 230 °C протягом 20 хвилин.

Для дослідження впливу потоку водневої або гелієвої плазми на сонячні елементи на основі гетеросистеми CdS/CdTe їх піддали опроміненню шляхом генерації стиснутих плазмових потоків. Опромінення проводилося в імпульсному режимі, тривалість одного імпульсу дорівнювала 1 мкс. Густина потоку плазми на 1 імпульс становила

$\approx 2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$, при щільності енергії 0,1–0,2 МДж/м². Досліди проводилися із використанням чистого водню або гелію при початковому тиску 266,64 Па. Амплітуда струму розряду в прискорювальному каналі становила близько 500 кА. Температура всередині плазми була в інтервалі 60–120 eV (1 eV $\approx 1,16 \cdot 10^4$ K). Перед кожним імпульсом поверхня мала кімнатну температуру, під впливом плазми зразки розігрівалися. Довжина пауз між імпульсами була достатньою для охолодження зразків до кімнатної температури.

Методом рентгенівської дифракції досліджено фазовий склад і кристалічну структуру отриманих приладових структур. Дифрактограми реєстрували на дифрактометрі ДРОН-4-07 за схемою θ – 2θ сканування у випромінюванні Cu анода з використанням цифрової реєстрації. Обробку дифрактограм проводили за допомогою пакета програм New_Profile 3.5.

Прецизійне визначення періоду решітки базових шарів телуриду кадмію проводили за допомогою функції екстраполяції Нельсона–Райлі $f(\theta) = (\cos^2\theta/\sin\theta + \cos^2\theta/\theta)/2$.

Результати експериментальних досліджень. Було встановлено що після опромінення 4–5 імпульсами водневої або гелієвої плазми плівкова гетеросистема CdS/CdTe повністю втрачає фоточутливість. Тому методом рентгендифрактометрії були проведені дослідження кристалічної структури плівкових гетеросистем до та після опромінення 4–5 імпульсами водневої або гелієвої плазми. Результати аналітичної обробки дифракційних спектрів наведені в табл. 1.

При аналізі форми дифракційних піків, положення яких відповідає CdTe, було встановлено, що в вихідному стані та після опромінення як водневою так і гелієвою плазмою вони містять три компоненти. Так, наприклад, на рис. 1 представлений пік (333), з якого шляхом аналітичної обробки виділено три складові. У подальшому будемо позначати ці складові як фази F1, F2 і F3.

Аналіз дифракційного спектру виявлених фаз однозначно вказує на їх кубічну модифікацію (PCPDFWIW No 15-0770 card), про що однозначно свідчить наявність дифракційних відбиттів від кристалографічних площин (111), (220), (311), (400), (331), (422), (333), (440).

До проведення опромінення шляхом аналітичної обробки експериментальних рентгендифрактограм за допомогою функції екстраполяції Нельсона – Райлі були розраховані періоди кристалічної решітки для фаз F1, F2 і F3, які склали 6.483 Å, 6.472 Å і 6.458 Å, відповідно. Згідно довідкових даних (PCPDFWIW No 15-0770 card) період кристалічної решітки CdTe дорівнює 6,481 Å. Тому фаза F1 буда ідентифікована як фаза CdTe кубічної модифікації. У ряді робіт (див., наприклад, [35]) експериментально показано, що при формуванні плівкових гетеросистем CdTe-CdS вакуумними методами в процесі міжфазової взаємодії утворюються тверді розчини. У відповідності з цим ми вважаємо, що розділення дифракційних піків

досліджуваних зразків обумовлено утворенням твердих розчинів $CdTe_{1-x}S_x$, які згідно правила Вегарда ($a_{CdSxTe1-x} = x \cdot a_{CdS} + (1-x) \cdot a_{CdTe}$) мають меншу величину міжплосинних відстаней d (див. табл. 1). Тому дві інші фази були ідентифіковані як тверді розчини $CdTe_{1-x}S_x$ з концентрацією сірки 3,0 % для фази F2 і 8,2 % для фази F3.

Після опромінення гетеросистем CdS/CdTe 4-ма імпульсами водневої плазми період кристалічної решітки базового шару (фаза F1) зменшився з 6,483 Å до 6,472 Å. Період решітки твердих розчинів зменшився з 6,472 Å до 6,463 Å для фази F2 і з 6,458 Å до 6,449 Å для фази F3. Така зміна періоду решітки основної фази, у відповідності до правила Вегарда, може свідчити про те, що практично весь базовий шар CdTe перетворився на тверді розчини $CdTe_{1-x}S_x$ з концентрацією сірки близько 3 %. Для твердих розчинів $CdTe_{1-x}S_x$ фази F2, які спостерігалися в дослідженій гетеросистемі CdS/CdTe у вихідному стані і мали концентрацію сірки 3 %, вміст сірки збільшився до 6,3 %. Для твердих розчинів $CdTe_{1-x}S_x$ фази F3, які були в гетеросистемі CdS/CdTe у вихідному стані і мали концентрацію сірки 8,2 % вміст сірки збільшився до 11,5 %. Еволюція, яка спостерігається у складі твердих розчинів, зумовлена активізацією дифузії сірки з шару сульфиду кадмію в шар телуриду кадмію при багаторазовому нагріванні зразка до високих температур під дією потужних імпульсів водневого опромінення.

Таблиця 1 – Результати обробки дифрактограм приладової структури у вихідному стані та після опромінення водневою та гелієвою плазмою

hkl		d, Å			Інтегральна інтенсивність, I			Інтегральна ширина, B		
		До	Після H ₂ ⁺	Після He ⁺	До	Після H ₂ ⁺	Після He ⁺	До	Після H ₂ ⁺	Після He ⁺
(111)	F1	3,7416	3,7439	3,7439	122,1	138,9	77,6	0,140	0,149	0,150
	F2	3,7354	3,7380	3,7380	11,2	56,3	4,4	0,093	0,117	0,059
	F3	3,7277	3,7337	3,7337	5,6	5,5	4,7	0,144	0,066	0,059
(220)	F1	2,2914	2,2915	2,2915	165,0	364,2	94,7	0,149	0,211	0,164
	F2	2,2878	2,2884	2,2884	12,6	32,5	39,7	0,117	0,140	0,139
	F3	2,2828	2,2857	2,2857	18,0	4,5	26,6	0,143	0,212	0,167
(311)	F1	1,9548	1,9534	1,9534	85,8	146,5	44,5	0,163	0,236	0,221
	F2	1,9515	1,9513	1,9513	4,9	20,8	10,1	0,153	0,164	0,180
	F3	1,9472	1,9489	1,9489	9,9	9,1	4,8	0,162	0,196	0,214
(400)	F1	1,6211	1,6200	1,6200	29,8	40,5	18,3	0,198	0,285	0,271
	F2	1,6153	1,6174	1,6174	2,2	12,4	3,5	0,169	0,254	0,248
	F3	1,6122	1,6253	1,6253	4,8	3,7	2,2	0,219	0,265	0,319
(331)	F1	1,4870	1,4863	1,4863	32,5	59,2	19,4	0,167	0,257	0,234
	F2	1,4847	1,4839	1,4839	3,5	6,8	3,7	0,167	0,226	0,186
	F3	1,4814	1,4824	1,4824	5,2	3,8	3,3	0,184	0,340	0,352
(422)	F1	1,3232	1,3224	1,3224	29,1	43,9	15,4	0,188	0,301	0,321
	F2	1,3210	1,3204	1,3204	3,8	9,2	2,2	0,211	0,279	0,230
	F3	1,3182	1,3187	1,3187	5,0	3,7	2,1	0,226	0,292	0,382
(333)	F1	1,2476	1,2456		17,6	25,1		0,217	0,381	
	F2	1,2457	1,2437		1,8	7,3		0,190	0,367	
	F3	1,2426	1,2411		3,0	1,34		0,256	0,332	
(440)	F1	1,1459	1,1442		10,8	18,8		0,226	0,352	
	F2	1,1438	1,1426		0,61	3,0		0,219	0,347	
	F3	1,1415	1,1400		1,25	1,31		0,231	0,297	

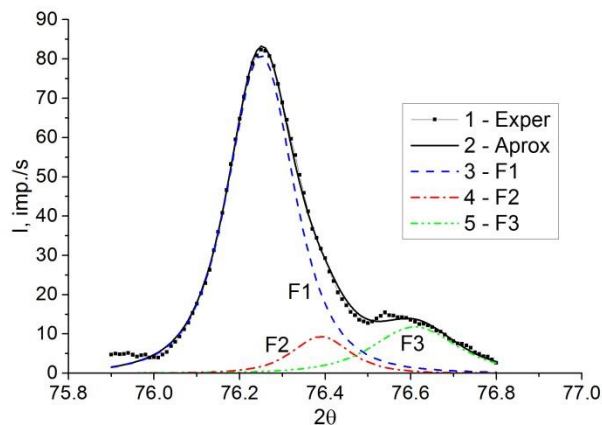


Рисунок 1 – Апроксимація піку [333] у вихідному стані

З аналізу даних табл. 1 випливає, що після опромінення 4-ма імпульсами водневої плазми, по всіх напрямках і для всіх виявлених фаз зросла інтегральна ширина піків, крім напрямку [111], в якому для фази F3 інтегральна ширина зменшилася. Це свідчить про зростання ступеню дефектності кристалічної структури, збільшення рівня мікрореформації та зменшення розмірів областей когерентного розсіювання, що обумовлено бомбардуванням поверхні телуриду кадмію високоенергетичними атомами водню.

Також було встановлено, що для фаз F1 і F2 інтегральна інтенсивність по всіх напрямках зросла, а для фази F3 інтегральна інтенсивність впала, окрім напрямку [440], в якому для фази F3 інтегральна інтенсивність зросла (табл. 1). Це свідчить про те, що після опромінення водневою плазмою змінюється кількісне співвідношення фаз. Кількість фази F1 залишається майже незмінною, близько 84 % у вихідному стані і 82 % після опромінення. В той час як фази F2 і F3 у вихідному стані були майже в рівній кількості 7 % і 9 %, а після опромінення їх кількість становила 15 % і 3 %, відповідно. Таким чином концентрація фази F3 в досліджених зразках після опромінення зменшилася.

Результати аналізу рентгендифрактограм плівок телуриду кадмію після опромінення 5-ма імпульсами гелієвої плазми наведені у табл. 1. Як і у вихідному стані, після опромінення дифракційні піки містять три складові F1, F2 і F3. Після опромінення гелієвою плазмою у зразках період решітки базового шару зменшився з 6,4830 Å до 6,4761 Å. Така зміна періоду решітки основної фази, згідно з правилом Вегарда, може свідчити, що практично весь базовий шар CdTe перетворився на тверді розчини $CdTe_{1-x}S_x$ з концентрацією сірки близько 1,5 % в результаті об'ємної дифузії сірки в шар телуриду кадмію. Для фази твердих розчинів $CdTe_{1-x}S_x$ фази F2, що знаходилися на межі CdS/CdTe у вихідному стані, період решітки зменшився з 6,4720 Å до 6,4669 Å, що відповідає збільшенню вмісту сірки з 3 % до 3,7 %.

Для твердих розчинів $CdTe_{1-x}S_x$ фази F3, які були на межі CdS/CdTe у вихідному стані, період решітки збільшився з 6,4579 Å до 6,4589 Å, що відповідає зменшенню вмісту сірки з 8,2 % до 7,9 %. Оскільки згідно з літературними даними [21] найбільша концентрація сірки у плівкових твердих розчинах $CdTe_{1-x}S_x$ становить 7 %, а для пересичених твердих розчинів експериментально спостерігається розпад твердих розчинів та утворення гетерогенної тонкоплівкової структури, що складається з двох розчинів: твердого розчину на основі телуриду кадмію і твердого розчину на основі сульфід кадмію [19], то можна припустити, що дифузія сірки в область твердих розчинів фази F3 з концентрацією сірки 8,2 % призводить до їх розпаду із виділенням фази $CdS_{1-y}Te_y$.

Аналіз даних табл. 1 показує, що для всіх виявлених фаз зросла інтегральна ширина піків, крім напрямку [111], в якому для фаз F2 і F3 інтегральна ширина зменшилася. Таким чином опромінення гелієвою плазмою, як і опромінення водневою плазмою, призводить до збільшення рівня мікроефекцій та зниження розмірів областей когерентного розсіювання. Аналіз інтегральної інтенсивності показує, що після опромінення гелієвою плазмою також змінюється кількісне співвідношення фаз. Кількість фази F1 зменшується з 84 % у

вихідному стані до 72 % після опромінення. В той час як фази F2 і F3 у вихідному стані були майже в рівній кількості 7 % і 9 %, після опромінення їх кількість збільшується до 17 % і 12 %.

Висновки. Зіставлення результатів впливу імпульсного опромінення водневою та гелієвою плазмою на кристалічну структуру плівкової гетеросистеми CdS/CdTe свідчить про наявність як тотожних, так і специфічних процесів. Тотожним для обох видів опромінення є збільшення рівня мікроефекцій та зменшення розмірів областей когерентного розсіювання, що зумовлено бомбардуванням поверхні телуриду кадмію високоенергетичними атомами водню та гелію. Імпульсне опромінення як водневою, так і гелієвою плазмою призводить до інтенсифікації міжфазової взаємодії внаслідок чого весь базовий шар телуриду кадмію перетворюється в шар твердих розчинів $CdTe_{1-x}S_x$, однак концентрація сірки в базовому шарі в два рази більше при опроміненні воднем.

У твердих розчинах $CdTe_{1-x}S_x$ з вихідною концентрацією сірки 3 %, які спостерігаються в гетеросистемі у вихідному стані, при імпульсному опроміненні воднем зростання концентрації сірки приблизно в два рази більше, ніж при опроміненні гелієм. Водночас при застосуванні обох видів опромінення відносна концентрація цієї фази збільшується у кілька разів. У твердих розчинів $CdTe_{1-x}S_x$ з вихідною концентрацією сірки 8,2 % при опроміненні водневою плазмою концентрація сірки зростає в 1,5 рази, а при опроміненні гелієвою плазмою спостерігається незначне зменшення. При цьому відносна концентрація цієї фази при опроміненні імпульсами водневої плазми зменшується у три рази, а при опроміненні гелієм спостерігається збільшення у півтора рази.

Різниця в еволюції фазового складу плівкової гетеросистеми CdS/CdTe під впливом опромінення імпульсами водневої та гелієвої плазми, яка спостерігається експериментально, може бути пов'язана з тим, що опромінення більш масивними атомами гелію призводить до більшого теплового впливу, що обумовлює плавлення на границі гетеросистеми. Таким чином, при опроміненні водневою плазмою дифузійні процеси відбуваються у твердому стані і мають меншу швидкість протікання. При цьому можуть спостерігатися термодинамічно нерівноважні стани. При опроміненні гелієм дифузійні процеси відбуваються в рідкій фазі, протікають з більшою швидкістю і мають більші межі розчинності компонентів. При наступній кристалізації області твердих розчинів з великою концентрацією сірки стають пересиченими і розпадаються на області твердих розчинів на основі телуриду кадмію та області твердих розчинів на основі сульфід кадмію.

Список літератури

- Bosio A., Pasini S., Romeo N. The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules. *Coatings*. 2020. Vol. 10, no. 4. 344. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10040344>.
- Munshi A., Kephart J., Abbas A., Shimpi T., Barth K., Walls J., Sampath W. Polycrystalline CdTe photovoltaics with efficiency over 18 % through improved absorber passivation and current collection. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2018. Vol. 176. P. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.031>.
- Chander S., Dhaka M.S. Thermal evolution of physical properties of vacuum evaporated polycrystalline CdTe thin films for solar cells. *Journal of Materials Science: Mater in Electronics*. 2016. Vol. 27. P. 11961–11973. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5343-2>.
- Bosio A., Rosa G. Past present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. *Solar Energy*. 2018. Vol. 175. P. 31–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.018>.
- Dunlop E. D., Levi D. H., Hohl-Ebinger J., Yoshit M., Ho-Baillie A. W. Solar cell efficiency tables (Version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2019. Vol. 27, no. 7. P. 565–575. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.3171>.
- Series 6 Datasheet. First Solar.com. URL: <http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/TechnicalDocuments/Series-6-Datasheets/Series-6-Datasheet.ashx> (дата звернення: 20.01.2020).
- Dharmadasa I. M., Alam A. E., Ojo A. A., Echendu O. K. Scientific complications and controversies noted in the field of CdS/CdTe thin film solar cells and the way forward for further development. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. Vol. 30. P. 20330–20344. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02422-6>.
- Zeng G., Liu X., Zhao Y., Shi Y., Li B., Zhang J., Feng L., Wang Q. Study on the stability of unpackaged CdS/CdTe Solar Cells with different structures. *International Journal of Photoenergy. Special Issue: Materials for Photoelectric and Electrooptical Conversion and Device Applications*. 2019. Vol. 2019. 3579587. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/3579587>.
- Kartopu G., Williams B. L., Zardetto V., Gürlek A. K., Clayton A. J., Jones S., Kessels W. M., Creatore M. M., Irvine S. J. C. Enhancement of the photocurrent and efficiency of CdTe solar cells suppressing the front contact reflection using a highly-resistive ZnO buffer layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019. Vol. 191. P. 78–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.11.002>.
- Rasha A., Deng A., Li B., Song Z., Bista S. S., Razooqi M. A., Grice C. R., Chen L., Liyanage G. K., Li C., Phillips A. B., Heben M. J. Influences of buffer material and fabrication atmosphere on the electrical properties of CdTe solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2019. Vol. 27, no. 12. P. 1115–1123. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.3192>.
- Niasse O. A., Diaw A., Niane M., Mbengue N., Tankhari M. A., Olivier P., Ba B. Comparative study of the influence of antireflective coatings and transparent oxides on a CdS/CdTe solar cell. *American Journal of Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 6, no. 2. P. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.12691/ajmse-6-2-4>.
- Томашин В. Н., Грыцев В. И. Диаграмма состояний систем на основе полупроводникових соединений А2В6. Київ: Наукова думка: 1982. 210 с.
- Nunoue S. Y., Hemmi T., Kata E. Mass spectrometric study of the phase boundaries of the CdS-CdTe system. *Journal Electrochemical Society*. 1990. Vol. 137, no. 4. P. 1248–1251. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2086641>.
- Ohata K., Saraie J., Tanaka T. Phase diagram of the CdS-CdTe pseudobinary system. *Japan Journal Applied Physics*. 1973. Vol. 12, no. 10. P. 1198–1204. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.12.1198>.
- Lane D. W., Rogers K. D., Painter J. D., Wood D. A. Structural dynamics in CdS-CdTe thin films. *Thin Solid Film*. 2000. Vol. 361–362. P. 1–8. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00827-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00827-5).
- McCandless B. E., Hanket G. M., Jensen D. G., Birkmire R. W. Phase behavior in the CdTe-CdS pseudobinary system. *Journal Vacuum Science Technology*. 2002. Vol. A20, no. 4. P. 1462–1467. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.1487872>.
- McCandless B. E., Birkmire R. W. CdTe- x Sx absorber layers for thin-film CdTe/CdS solar cells. *26th IEEE Photovoltaic Special Conference: Proceeding of the International Conference*, Anaheim, USA. 1997. P. 307–311.
- Hideo Z., Shimuchi N., Srigenori H. Optical properties of CdTe- x Sx systems. *physica status solidi (a)*. 1975. Vol. 3. P. K115–K119.
- Bonnet D. The CdTe thin film – an overview. *International Journal of Solar Energy*. 1992. Vol. 12, no. 1. P. 3–34.
- Ohata K., Saraie J., Tanaka T. Optical energy gap of the mixed crystal CdTe- x Sx. *Japanese Journal Applied Physics*. 1973. Vol. 12, no. 10. P. 1641–1647.
- Bonnet D. Status of CdTe solar cells. *14th European Photovoltaic Solar Energy Conference: Proceeding of the conference*. Barcelona. Spain. 1997. P. 2688–2693.
- Lane D. W., Conibeer G. J., Wood D. A., Rogers K. D., Capper P., Romani S. Sulfur diffusion in CdTe and phase diagram of the CdS-CdTe pseudo – binary alloy. *Journal of Crystal Growth*. 1999. Vol. 197. P. 743–748. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00813-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00813-6).
- Lane D. W. A revive of the optical band gap of thin film CdTe- x Sx. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2006. Vol. 90., no. 9. P. 1169–1175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.07.003>.
- Meyers P. V. Thin film CdTe cells. *First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC): Proceeding of the conference*. Hawaii. USA. 1994. P. 266–271.
- Бойко Б. Т., Юрченко В. Б., Копач Г. И., Опанасюк А. С., Хрипунов Г. С., Полоцкий В. А. Фотоэлектрические свойства пленочных гетеропереходов с варизонными прослойками на основе CdTe. *Bulgarian Journal of Physics*. 1987. Vol. 14, no. 2. P. 157–163.
- Бойко Б. Т., Гуревич Ю. Г., Копач Г. И., Хрипунов Г. С. Влияние структуры межфазных границ на фотоэлектрические свойства гетеропереходов pCdTe-nCdS. *Всесоюзная конференция «Структура и электронные свойства границ зерен в металлах и полупроводниках»: Тезисы докладов*. Воронеж. СССР. 1987. С. 34–35.
- Boiko B. T., Kopach G. I., Kopych V. R., Khrypunov G. S. Photovoltaic properties and structures of multilayers heterojunction systems based on cadmium telluride. *CA Selects: Solar Energy Issue*. 1991. no. 21. P. 123–126.
- Kopach G. I., Khrypunov G. S., Yurchenko V. B. Numerical modeling photoelectric properties in film heterosystems of p-CdTe/n-CdS with various interlayers. *Gelioteknika*. 1991. Vol. 27, no. 3. P. 24–27.
- Витюк В. Я., Санитаров В. А., Завленко Н. Н., Калинкин И. П. Процесс распада твердых растворов в пленках системы CdS-CdTe. *Известия академии наук СССР. Неорганические материалы*. 1982. Т. 18, № 9. С. 1514–1517.
- Melender-Lira O. M., Hernander-Calderon I. Study of CdS x Te- x solid solutions obtained by screen printing. *First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC): Proceeding of the conference*. Hawaii. USA. 1994. P. 369–372.
- McCandless B. E., Engelmann M. G., Birkmire R. W. Inter diffusion of CdS/CdTe thin films: modeling X-ray diffraction line profile. *Journal of Applied Physics*. 2001. Vol. 89. P. 988–994. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1330245>.
- Terheggen M., Heinrich H., Kistorz G., Romeo A., Tiwari A. N. Structural and chemical studies on CdTe/CdS thin film solar cells with analytical transmission electron microscopy. *17th European Photovoltaic Solar Energy Conference: Proceeding of the conference*. Munich. Germany. 2001. P. 1188–1191.
- Conibeer G. J., Wood D. A., Rogers K. D., Lane D. W. Investigation of the CdS/CdTe phase diagram and sulphur diffusion in CdTe for later application to thin film solar cells. *14th European Photovoltaic Solar Energy Conference: Proceeding of the conference*. Barcelona. Spain. 1997. P. 2075–2078.
- Terheggen M., Heinrich H., Kistorz G., Romeo A., Baetzner D., Tiwari A. N. Transmission electron microscopy of diffusion structural and chemical changes in CdTe solar cells. *E-MRS Spring Meeting*. Strasbourg. France. 18–21 June 2002. P. 345–349.

35 McCandless B. E., Birkmire R. W. Analysis of post deposition processing for CdTe/CdS thin film solar cells. *Solar Cells*. 1991. Vol. 31(6). P. 527–535. DOI: [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(91\)90095-7](https://doi.org/10.1016/0379-6787(91)90095-7).

References

- A. Bosio, S. Pasini, and N. Romeo, "The history of photovoltaics with emphasis on cdte solar cells and modules," *Coatings*, vol. 10, no. 4, Apr. 2020, Art. no. 344, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings10040344>.
- A. H. Munshi et al., "Polycrystalline CdTe photovoltaics with efficiency over 18% through improved absorber passivation and current collection," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 176, p. 9–18, Mar. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.031>.
- S. Chander and M. S. Dhaka, "Thermal evolution of physical properties of vacuum evaporated polycrystalline CdTe thin films for solar cells," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 27, no. 11, p. 11961–11973, Jul. 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5343-2>.
- A. Bosio, G. Rosa, and N. Romeo, "Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells," *Solar Energy*, vol. 175, p. 31–43, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.018>.
- M. A. Green, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, and A. W. Y. Ho-Baillie, "Solar cell efficiency tables (version 54)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 27, no. 7, p. 565–575, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/pip.3171>.
- "Series 6 Datasheet." First Solar.com. <http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/TechnicalDocuments/Series-6-Datasheets/Series-6-Datasheet.aspx> (accessed Jan. 20, 2020).
- I. M. Dharmadasa, A. E. Alam, A. A. Ojo, and O. K. Echendu, "Scientific complications and controversies noted in the field of CdS/CdTe thin film solar cells and the way forward for further development," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 30, no. 23, p. 20330–20344, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02422-6>.
- G. Zeng et al., "Study on the stability of unpackaged CdS/CdTe solar cells with different structures," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2019, p. 1–8, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/3579587>.
- G. Kartopu et al., "Enhancement of the photocurrent and efficiency of CdTe solar cells suppressing the front contact reflection using a highly-resistive ZnO buffer layer," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 191, p. 78–82, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.11.002>.
- R. A. Awani et al., "Influences of buffer material and fabrication atmosphere on the electrical properties of CdTe solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 27, no. 12, p. 1115–1123, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/pip.3192>.
- E. Niasse et al., "Comparative study of the influence of antireflective coatings and transparent oxides on a CdS/CdTe solar cell," *American Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 6, no. 2, p. 43–48, 2018, doi: <https://doi.org/10.12691/ajmse-6-2-4>.
- V. N. Tomashin and V. I. Grytsev, *Diadramma sostoyaniy sistem na osnove polyprovodnikovyykh soedineniei A2B6. [State diagram of systems based on semiconductor compounds]*. Kyiv: Naukova dumka, 1982. (in Russian).
- S. Y. Nunoue, T. Hemmi, and E. Kata, "Mass spectrometric study of the phase boundaries of the CdS-CdTe system," *Journal Electrochemical Society*, vol. 137, no. 4, p. 1248–1251, 1990.
- K. Ohata, J. Saraie, and T. Tanaka, "Phase diagram of the CdS-CdTe pseudobinary system," *Japan Journal Applied Physics*, vol. 12, no. 10, p. 1198–1204, 1973.
- D. W. Lane, K. D. Rogers, J. D. Painter, D. A. Wood, and M. E. Ozsan, "Structural dynamics in CdS–CdTe thin films," *Thin Solid Films*, vol. 361-362, p. 1–8, Feb. 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00827-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00827-5).
- B. E. McCandless, G. M. Harket, D. G. Jensen, and R. W. Birkmire, "Phase behavior in the CdTe–CdS pseudobinary system," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 20, no. 4, p. 1462–1467, Jul. 2002, doi: <https://doi.org/10.1116/1.1487872>.
- B. E. McCandless and R. W. Birkmire, "CdTe_{1-x}S_x absorber layers for thin-film CdTe/CdS solar cells," in *26th IEEE Photovoltaic Special Conference: Proceeding of the International Conference*, Anaheim, USA. 1997, p. 307–311.
- Z. Hideo, N. Shimuchi, and H. Srigenori, "Optical properties of CdTe 1-xSx systems," *physica status solidi (a)*, vol. 3, p. K115–K119, 1975.
- D. Bonnet, "The CdTe thin – film – an overview," *International Journal of Solar Energy*, vol. 12, no. 1, p. 3–34, 1992.
- K. Ohata, J. Saraie, and T. Tanaka, "Optical energy gap of the mixed crystal CdTe_{1-x}S_x," *Japanese Journal Applied Physics*, vol. 12, no. 10, p. 1641–1647, 1973.
- D. Bonnet, "Status of CdTe solar cells," in *14th European Photovoltaic Solar Energy Conference: Proceeding of the Conference*, Barcelona, Spain. 1997, p. 2688–2693.
- D. W. Lane et al., "Sulphur diffusion in CdTe and the phase diagram of the CdS–CdTe pseudo-binary alloy," *Journal of Crystal Growth*, vol. 197, no. 3, p. 743–748, Feb. 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00813-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00813-6).
- D. W. Lane, "A revive of the optical band gap of thin film CdTe_{1-x}S_x," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 90, no. 9, p. 1169–1175, 2006.
- P. V. Meyers, "Thin film CdTe cells," in *First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC): Proceeding of the Conference*, Hawaii, USA. 1994, p. 266–271.
- B. T. Boiko, V. B. Yurchenko, G. I. Kopach, A. S. Opanasuk, G. S. Khrypunov, and V. A. Polotskiy, "Photoelektricheskie svoystva plenochnikh geteroperehodov s vaizonnimi prosloikami na osnove CdTe. [Photoelectric properties of film heterojunctions with graded-gap interlayers based on CdTe]," *Bulgarian Journal of Physics*, vol. 14, no. 2, p. 157–163, 1987. (in Russian)
- B. T. Boiko, U. G. Gurevich, G. I. Kopach, and G. S. Khrypunov, "Vlyanie strukturi meghfaznikh granits na photoelektricheskie svoictva geteroperehodov pCdTe-nCdS. [Influence of the structure of interfacial boundaries on the photoelectric properties of pCdTe-nCdS heterojunctions]," in *All-Union Conference "Structure and Electronic Properties of Grain Boundaries in Metals and Semiconductors": Abstracts*, Voronezh, USSR. 1987, p. 34–35. (in Russian).
- B. T. Boiko, G. I. Kopach, V. R. Kopach, and G. S. Khrypunov, "Photovoltaic properties and structures of multilayers heterojunction systems based on cadmium telluride," *CA Selects: Solar Energy Issue*, no. 21, p. 123–126, 1991.
- G. I. Kopach, G. S. Khrypunov, and V. B. Yurchenko, "Numerical modeling photoelectric properties in film heterosystems of p-CdTe/n-CdS with various interlayers," *Gelioteknika*, vol. 27, no. 3, p. 24–27, 1991.
- V. Y. Vituk, V. A. Sanitarov, N. N. Zavlenko, and I. P. Kalinkin, "Process raspada tverdikh rastvorov v plenkach sistemie CdS-CdTe. [The process of decomposition of solid solutions in films of the CdS-CdTe system]," *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Inorganic Materials*, vol. 18, no. 9, p. 1514–1517, 1982. (in Russian).
- O. M. Melender-Lira and I. Hernander-Calderon, "Study of CdS_xTe_{1-x} solid solutions obtained by screen printing," in *First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)*, Hawaii, USA. 1994, p. 369–372.
- B. E. McCandless, M. G. Engelmann, and R. W. Birkmire, "Interdiffusion of CdS/CdTe thin films: Modeling x-ray diffraction line profiles," *Journal of Applied Physics*, vol. 89, no. 2, p. 988–994, Jan. 2001, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1330245>.
- M. Terheggen, H. Heinrich, G. Kostorz, A. Romeo, and A. N. Tiwari, "Structural and chemical studies on CdTe/CdS thin film solar cells with analytical transmission electron microscopy," in *17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Munich, Germany. 2001, p. 1188–1191.
- G. J. Conibeer, D. A. Woog, K. D. Rogers, and D. W. Lane, "Investigation of the CdS/CdTe phase diagram and sulphur diffusion

- in CdTe for later application to thin film solar cells,” in *14th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, 1997, p. 2075–2078.
34. M. Terheggen, H. Heinrich, G. Kostorz, A. Romeo, D. Baetzner, and A. N. Tiwari, “Transmission electron microscopy of diffusion structural and chemical changes in CdTe solar cells,” in *E-MRS Spring Meeting*, Strasbourg, France, Jun. 18–21, 2002. p. 345–349.
35. B. E. McCandless and R. W. Birkmire, “Analysis of post deposition processing for CdTe/CdS thin film solar cells,” *Solar Cells*, vol. 31, no. 6, p. 527–535, Dec. 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(91\)90095-7](https://doi.org/10.1016/0379-6787(91)90095-7).

Надійшла (received) 26.06.2023

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Хрипунов Геннадій Семенович (Gennadiy Khrypunov) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», проректор з науково-педагогічної роботи; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: gennadiy.khrypunov@khpі.edu.ua.

Меріуц Андрій Володимирович (Andrii Meriuts) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4176-2530>; e-mail: andrii.meriuts@khpі.edu.ua.

Харченко Микола Михайлович (Mykola Kharchenko) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; e-mail: hnm@ukr.net.

Герашенко Станіслав Сергійович (Stanislav Herashchenko) – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», молодший науковий співробітник лабораторії квазістаціонарних плазмових прискорювачів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1449-4884>; e-mail: GeraschenkoSS1991@nas.gov.ua.

Колодій Ігор Вікторович (Ihor Kolodiy) – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», молодший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії електрофізичних матеріалів і технічних надпровідників; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8598-9732>; e-mail: Kolody@nas.gov.ua.

Пудов Олексій Олегович (Aleksey Pudov) – кандидат фізико-математичних наук, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії нових технологічних розробок; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9499-379X>; e-mail: PudovOO1975@nas.gov.ua.

Храмова Тетяна Іванівна (Tetiana Khramova) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1148-0720>; e-mail: tetiana.khramova@khpі.edu.ua.

Шелест Тетяна Миколаївна (Tetiana Shelest) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-6189>; e-mail: tetiana.shelest@khpі.edu.ua.

Кузякін Олександр Олександрович (Oleksandr Kuziakin) – аспірант кафедри мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4687-158X>; e-mail: oleksandr.kuziakin@infiz.khpі.edu.ua.