

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-25>

УДК 539.23, 621.315.592

**ВАЩИНСЬКИЙ Віталій**

Національний університет "Львівська політехніка"  
<https://orcid.org/0000-0002-6587-6957>  
e-mail: [v.vashchynskyi@gmail.com](mailto:v.vashchynskyi@gmail.com)

**СЕМКІВ Ігор**

Національний університет "Львівська політехніка"  
<https://orcid.org/0000-0003-3432-8779>  
e-mail: [igor.v.semkiw@lpnu.ua](mailto:igor.v.semkiw@lpnu.ua)

**СОЛОВЙОВ Микола**

Національний університет "Львівська політехніка"  
<https://orcid.org/0000-0001-7678-4049>  
e-mail: [mykola.v.soloviov@lpnu.ua](mailto:mykola.v.soloviov@lpnu.ua)

**КАРКУЛЬОВСЬКА Маряна**

Національний університет "Львівська політехніка"  
<https://orcid.org/0000-0002-1348-6148>  
e-mail: [mariana.s.karkulovska@lpnu.ua](mailto:mariana.s.karkulovska@lpnu.ua)

**ІЛЬЧУК Григорій**

Національний університет "Львівська політехніка"  
<https://orcid.org/0000-0002-6647-4343>  
e-mail: [hryhorii.a.ilchuk@lpnu.ua](mailto:hryhorii.a.ilchuk@lpnu.ua)

## ВПЛИВ ТИПУ ПІДКЛАДКИ НА СТРУКТУРНО-ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ $CdTe_{1-x}Se_x$

В даній роботі наведено результати досліджень структурно-оптичних властивостей твердих розчинів  $CdTe_{1-x}Se_x$  підкладках з кремнію та ІТО/скло. Наведено методику синтезу багат шарових плівкових структур методом високочастотного магнетронного осадження. За даними рентгенівської дифракції проведено фазовий аналіз та уточнення кристалічної структури. Дослідження морфології та структури отриманих твердих розчинів проведено з використанням скануючої електронної мікроскопії. Досліджено спектральну залежність оптичного пропускання отриманих зразків у видимій області при кімнатній температурі. Для твердих розчинів  $CdTe_{1-x}Se_x$  на підкладці ІТО/скло визначено оптичну ширину забороненої зони, яка становить 1,62eV. Для досліджуваних плівок на різних підкладках оцінено коефіцієнти відбивання.

Ключові слова: твердий розчин, підкладка, пропускання, відбивання, оптична ширина забороненої зони

VASHCHYNSKYI Vitalii, SEMKIV Ihor, SOLOVYOV Mykola,  
KARKULOVSKA Maryana, ILCHUK Hryhorii  
Lviv Polytechnic National University

## INFLUENCE OF SUBSTRATE TYPE ON STRUCTURAL-OPTICAL PROPERTIES OF $CdTe_{1-x}Se_x$ SOLID SOLUTIONS

Today dictates the fashion for determining strategic goals and directions for effective implementation of innovative directions and technologies. The technogenic burden of the territory, significant moral and physical wear and tear of the main production energy complexes of most enterprises and the exhaustion of the state's natural resources contribute to the development of alternative ecological clean energy. A prominent place in the cohort of renewable energy sources belongs to solar batteries, which have high and stable values of efficiency during operation and at the same time are an environmentally friendly and financially profitable product. At the same time, it is important to choose the method and conditions of obtaining the material for the converters of solar energy into electricity. Of particular interest are solar cells (SE) based on AIBVI compounds, manufactured by thin-film technology.

This study presents the results of investigations into the structural and optical properties of solid solutions of  $CdTe_{1-x}Se_x$  on silicon and ITO/glass substrates. The methodology for synthesizing multilayer thin-film structures using the high-frequency magnetron sputtering method is provided. Phase analysis and refinement of the crystal structure are performed based on X-ray diffraction data. The morphology and structure of the obtained solid solutions are examined using scanning electron microscopy. The spectral dependence of optical transmittance for the samples is investigated in the visible range at room temperature. For  $CdTe_{1-x}Se_x$  solid solutions on ITO/glass substrates, the optical bandgap is determined to be 1.62 eV. The reflectance coefficients for the films on various substrates are also assessed.

Keywords: solid solution, substrate, transmittance, reflectance, bandgap width

### Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сьогодні диктує моду для визначення стратегічних цілей і напрямів ефективного впровадження інноваційних напрямів та технологій. Техногенне навантаження території, значний моральний і фізичний знос основних виробничих енергокомплексів більшості підприємств та виснаженість природних ресурсів

держави сприяють розвитку альтернативної екологічної чистої енергетики. Чільне місце в когорті поновлюваних джерел енергії належить сонячним батареям, які мають високі і стабільні значення ефективності в процесі експлуатації і при цьому є екологічно чистим та фінансово вигідним продуктом. При цьому важливим є вибір способу та умов отримання матеріалу для перетворювачів сонячної енергії в електричну. Особливий інтерес викликають сонячні елементи (СЕ) на основі сполук  $A^{IV}B^{VI}$ , виготовлені тонкоплівковою технологією. Такі сполуки як CdTe, CdSe характеризуються високим коефіцієнтом поглинання та є перспективними для створення на їх основі активних елементів мікро- і оптоелектроніки: детекторів і джерел інфрачервоного випромінювання оптичного спектру [1], термоелектричних перетворювачів енергії [2]. При оптимізації конструктивно-технологічних рішень плівок СЕ на основі CdSe/CdTe, в першу чергу, необхідно враховувати фізичні та електричні властивості базового матеріалу телуриду кадмію. Доказано, що ширина забороненої зони телуриду кадмію, яка становить  $\sim 1,46$  eV [3], найкращим чином адаптована до перетворення сонячної енергії в наземних умовах [4], а величина коефіцієнта поглинання світла цього прямозонного напівпровідника, яка для видимого діапазону перевищує  $10^5$   $\text{cm}^{-1}$  [5], забезпечує практично повне поглинання падаючого світлового потоку шаром CdTe товщиною кілька мікрометрів в спектральному діапазоні фоточутливості цього напівпровідникового матеріалу [6]. Дані сполуки характеризуються високою температурою плавлення ( $1049$  °C) та стабільною гексагональною структурою (сфалерит), що дозволяє створювати на основі CdTe плівкові СЕ як альтернативу найбільш широко поширеним кремнієвим кристалічним фотоелектричним перетворювачам.

Властивості тонких полікристалічних плівок у значній мірі залежать від морфології поверхні, електронних процесів, що відбуваються на міжфазних межах. Зокрема, необхідно враховувати розсіювання на межах фаз і зерен, а також інших дефектах росту [7, 8]. Окрім того, ще до тепер залишається не до кінця вирішеною проблема стабільності у часі електричних параметрів. Тому одним із підходів збільшення ефективності сонячних комірок є впровадження твердого розчину CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> шляхом включення селену (Se) до матеріалів поглинаючого шару CdTe. Отримані таким чином гетероструктури CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> характеризується меншою забороненою зоною та впливає на збільшення часу життя носіїв.

Варто зазначити, що такий параметр осадження як тип підкладки впливатиме на властивості отриманих плівок, тому метою роботи є дослідження морфологічних змін у твердих розчинах CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> отриманих методом високочастотного (ВЧ) магнетронного осадження та встановлення впливу типу підкладки на оптичні властивості тонких плівок халькогенідів кадмію.

### Експериментальна частина

Для отримання твердого розчину CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> використано метод ВЧ магнетронного осадження ( $\sim 13,6$  МГц) на підкладки з використанням вакуумної станції ВУП-5М (Selmi, Україна). В якості підкладок було використано скло, кремній та ІТО/скло. Розмір підкладок становив  $5 \times 7$  мм. Відстань мішень-підкладка становила 70 мм. Перед процесом напилення камеру вакуумували. Тиск газу всередині камери становив  $5 \times 10^{-4}$  Па. Напилення проводили за тиску аргону (Ar) в діапазоні 1,0-1,3 Па. Потужність ВЧ магнетрона підтримували на рівні 50 Вт, а температуру підкладки 489 К. Температуру контролювали за допомогою PID-регулятора для керування швидкостями нагрівання та охолодження, а також для забезпечення температурних умов осадження.

Фазовий аналіз та встановлення кристалічної структури отриманих тонких плівок досліджено на дифрактометрі ДРОН-3М з використанням випромінювання  $\text{CuK}_\alpha$  ( $\lambda = 1,54060$  Å) за кімнатної температури в режимі відбивання. За допомогою растрового електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЕММА-102-02 (СЕЛМІ, м.Суми) а режимі вторинних електронів досліджено морфологію поверхні зразків.

Спектральна залежність оптичного пропускання та відбивання отриманих зразків у видимій області досліджувалась при кімнатній температурі за допомогою спектрофотометра AvaSpec-2048 Avantes Fiber Optic Spectrometer.

### Результати та їх обговорення

Рентгенограма тонких плівок CdX (X = Se і Te) отриманих пошаровим напиленням бінарних сполук CdSe (6 хв) та CdTe (40 хв) на підкладку ІТО/скло подана на рис. 1 та дала підтвердження наявності двох фаз в структурі плівки. Піки виявлені при  $2\theta$  значеннях  $23,75^\circ$ ,  $25,50^\circ$ ,  $27,17^\circ$ ,  $35,12^\circ$ ,  $42,67^\circ$ ,  $45,94^\circ$  та  $49,85^\circ$  (рис. 1А), які відповідають площинам (100), (002), (101), (102), (103), (200) та (112) кристалічної решітки CdSe, а також  $39,5^\circ$ , що відповідає площині (100) і можуть бути індексовані як гексагональна решітка CdTe [9]. Отже, тонкі плівки CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> отримані на підкладці ІТО/скло належать до гексагонального типу структури, просторова група  $R\bar{3}m$  (№ 186), з параметрами ґратки  $a = 4,266$  Å та  $c = 6,929$  Å, ( $V = 109,21$  (6) Å<sup>3</sup>).

Рефлекси Бреґга, що відповідають індексам hkl (100), (002), (103), (200) та характерні для обох бінарних сполук свідчать про формування твердого розчину CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> ще на етапі магнетронного осадження за рахунок дифундування шарів халькогену.

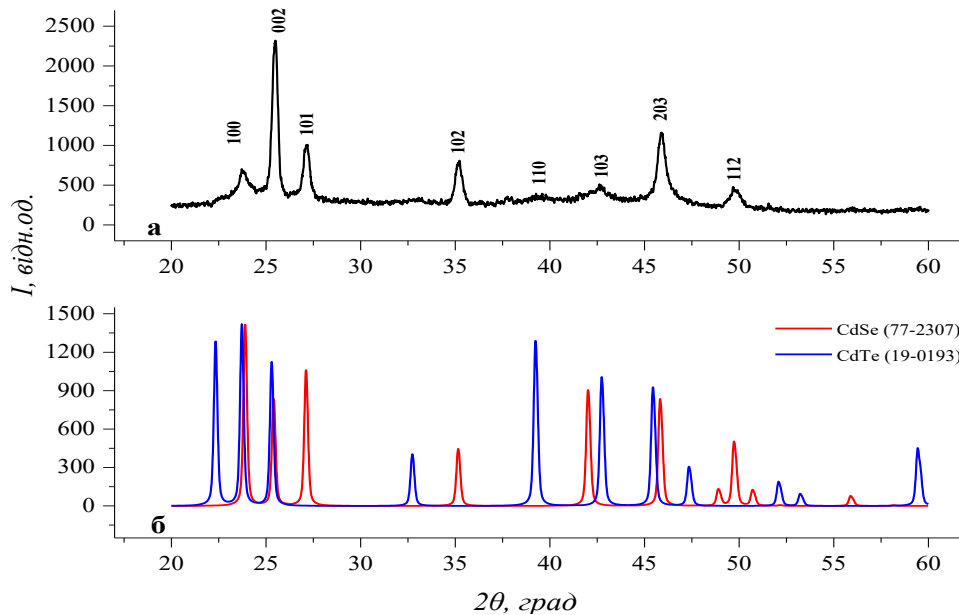


Рис. 1 Рентгенограми халькогенідів кадмію: (А) експериментальна крива твердих розчинів  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  та (Б) теоретичні криві  $\text{CdSe}$  та  $\text{CdTe}$ . Індекси Міллера використані з [9] (PDF № 77-2307), (PDF № 19-0193)

Рентгенограма твердих розчинів  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  отриманих магнетронним осадженням на підкладку  $\text{Si}$  подана на рис. 2. Отримані тонкі плівки характеризуються гексагональною структурою (просторова група  $R\bar{3}m$  (№ 186)). Бреґівські відбиття спостерігаються під кутами  $2\theta$  23,80°, 25,51°, 27,22°, 35,28°, 39,28°, 42,70°, 45,93° та 49,63° та узгоджуються із рентгено-грамою, отриманою на підкладці ІТО/скло та літературними даними [10, 11]. Наявність широкого гало на рентгенограмі в межах  $2\theta = 27 - 47^\circ$  (рис. 2А) вказує на, в цілому, аморфну структуру підкладки. Проте цікавим є рефлекс, що спостерігається під кутом 33,12° (рис. 2В). Цей пік відповідає індексу (102) для  $\text{CdTe}$  (карта № 77-2307, рис. 2Б) та індексу (211) для кремнієвої підкладки (карта № 17-901, рис. 2Г). Згідно даних JCPDS підкладка  $\text{Si}$  має кубічну структуру (просторова група  $Fm\bar{3}m$ , № 186), а сам матеріал кремнію піддавався механічному впливу під дією високих тисків. З цим, ймовірно, і пов'язані провідні властивості однієї із сторін підкладки, які простежувались в процесі осадження.

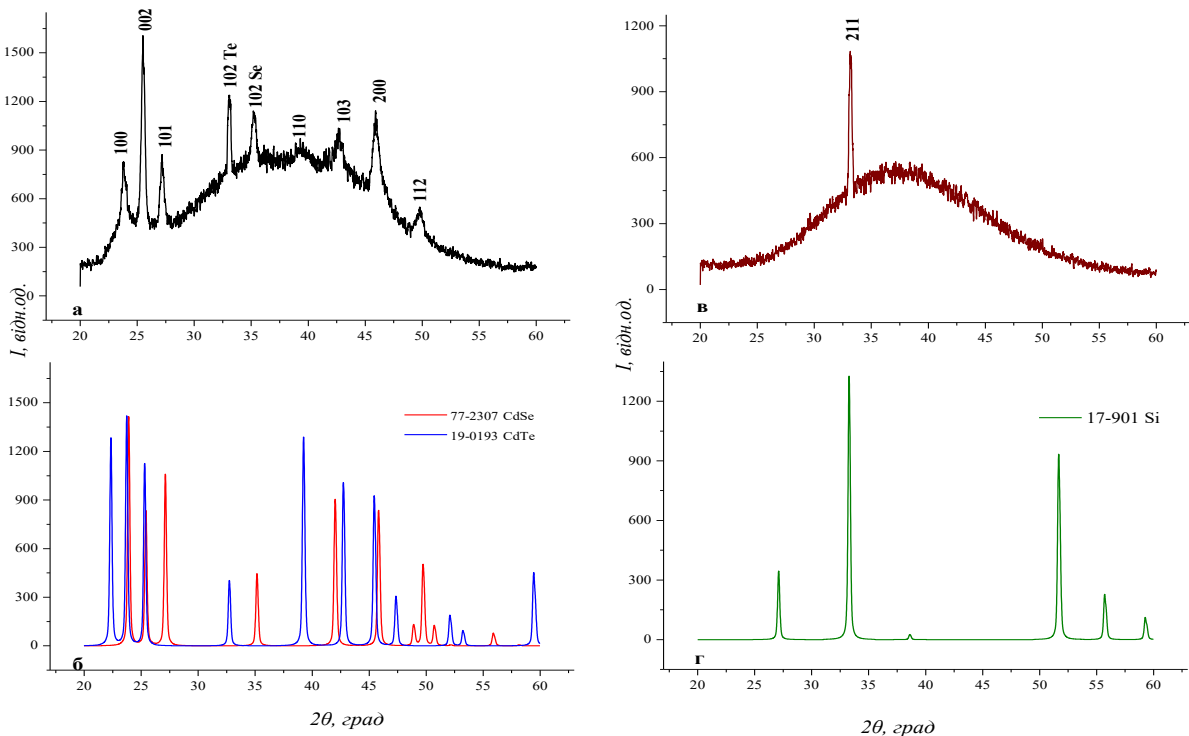


Рис. 2 Рентгенограми халькогенідів кадмію: (А),(Б) - експериментальні криві  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  та підкладки  $\text{Si}$ ; (Б), (Г) - теоретичні криві  $\text{CdSe}$ - $\text{CdTe}$  та  $\text{Si}$ . Індекси Міллера використані з [9] (PDF № 77-2307), (PDF № 19-0193), (PDF № 17-901).

Морфологія поверхні плівок, нанесених на різні підкладки, показана на рис. 3. Як видно з мікрофотографій для скляних підкладок, покритих ІТО (рис. 3А) зерна дуже нерівномірні, а розмір зерен неоднаковий. Тоді в міжкристалітній області виникають межі зерен і порожнини [12]. Спостерігається розташування зерен осадженої плівки в так званих «стілниках» кремнієвої підкладки (рис. 3Б), для підкладки ІТО/скло таких текстурних особливостей не спостерігається. Така особливість пов'язана зі збільшенням зв'язності з поверхнею кремнію, а також сферичною формою зерен осаджених частинок. На основі енергодисперсійного мікроаналізу встановлено, що середній розмір зерен становив  $\sim 2$  мкм.

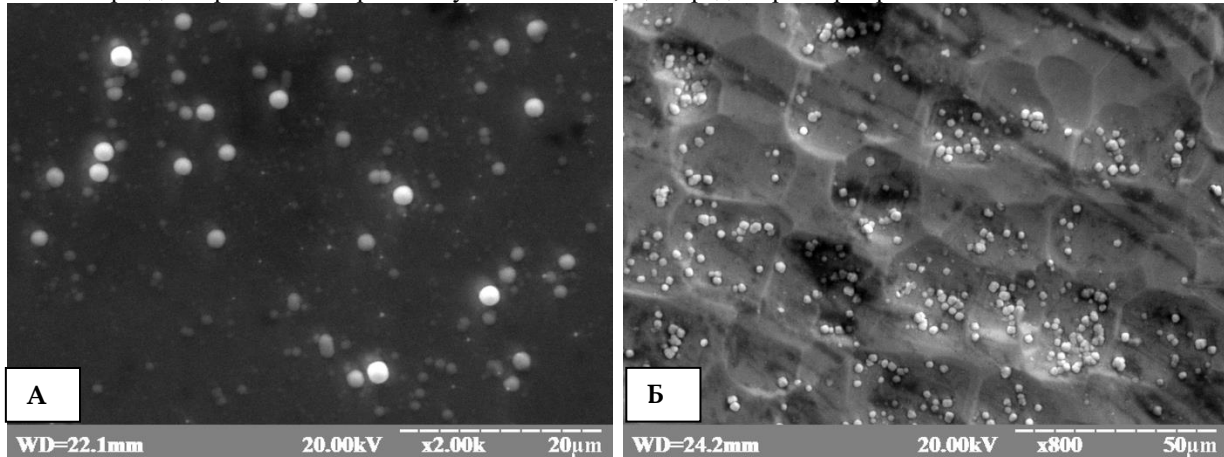


Рис. 3 Мікрофотографії поверхні CdTe1-xSx на різного роду підкладках: (А) ІТО/скло, (Б) кремній.

Спектральні залежності коефіцієнтів пропускання та поглинання тонких плівок халькогеніду кадмію, зняті в діапазоні довжин хвиль  $\lambda = (400-1000)$  нм зображено на рис. 4.

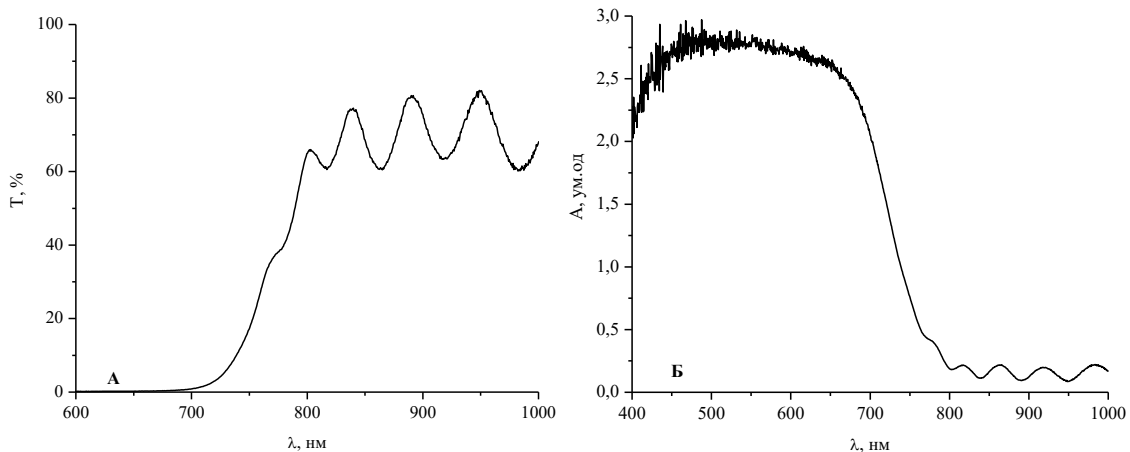


Рис. 5 Спектри пропускання (А) та поглинання (Б) твердих розчинів CdTe1-xSx /ІТО

Спектр пропускання демонструє періодичні максимуми і мінімуми інтенсивності на залежностях коефіцієнта пропускання  $T(\lambda)$ , які пов'язані з інтерференцією, що вказує на високу структурну досконалість тонких плівок. Автори [12] відзначають, що тонкі плівки CdX мають високий коефіцієнт пропускання світла  $T$  у діапазоні довжин хвиль, більших 430 нм, зі значеннями від 60% до 80%. Такі плівки характеризуються низькими значеннями коефіцієнтів поглинання світла, що робить їх оптимальними кандидатами для застосування в сонячних елементах.

Характерною особливістю полікристалічних плівок є наявність міжзернових меж, які являють собою лінійні дефекти кристалічної будови і сильно впливають на оптичні властивості плівок. Пасивація міжзернових меж плівок зазвичай приводить до підвищення ефективності пристроїв на їх основі. З цією метою проведено термічну активацію при 773 К протягом 40 хв у атмосферах  $Ar_2$  та  $CdCl_2$  згідно методики, описаної в [13]. Для визначення оптичної ширини забороненої зони одержаних сполук до та після темного відпаду використано координати Тауца. Побудувавши залежність  $(\alpha \cdot hv)^2$  від  $hv$  можна отримати величину прямої оптичної ширини забороненої зони, з використанням екстраполяції лінійної частини ділянки до енергетичної осі (рис. 6). В результаті проведених оптичних досліджень було виявлено, що до відпаду на графіку залежності  $(\alpha \cdot hv)^2 - hv$  ширина забороненої зони  $E_{g1} = 1,69$  еВ, а після термічного відпаду для

твердих розчинів  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x/\text{ITO}$  становить  $E_{g2} = 1,62$  еВ. Незначне зуження ширини забороненої зони, ймовірно, пов'язане із морфологічними особливостями структури, а саме зміною щільності кристалітів досліджуваних тонких плівок, що підтверджується результатами СЕМ-досліджень. Дані результати добре узгоджуються із результатами інших авторів [14,15]. Відомо, що ширина забороненої зони чистого  $\text{CdSe}$  становить 1,74 еВ [16] і незначно залежить від фази [17]. На основі отриманих результатів та літературних даних [14] можна припустити, що значення  $E_{g2} = 1,62$  еВ характерне для твердих розчинів  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  при  $x = 0,9$ . Ці результати задовільно узгоджуються із даними рентгеноструктурного аналізу.

На рис. 6 наведені типові спектри відбиття досліджених плівок халькогенідів кадмію. Встановлено, що тип підкладки впливає на оптичні властивості досліджуваних зразків та зсуває залежність  $R(\lambda)$  в область довгохвильового спектру. Така особливість дозволяє отримувати тонкі плівки з наперед заданими оптичними характеристиками та використовувати тверді розчини  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  в якості антивідбивного покриття для сонячних елементів, що підтверджується підтверджується їх низьким  $R$ . Максимуми інтерференції розташовані симетрично, на однакових відстанях один від одного, що ймовірно, свідчить про те, що розмір кристалітів не змінюється.

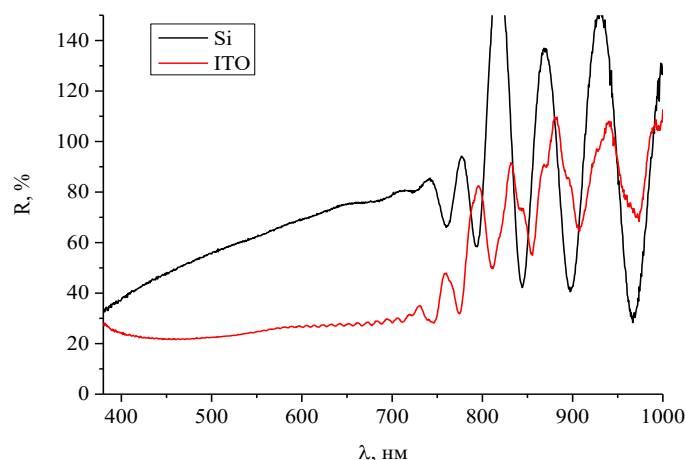


Рис. 6 Спектри відбивання твердих розчинів  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  на різних підкладках

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Тверді розчини  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  отримані методом ВЧ магнетронного осадження на два типи підкладок: ITO/скло та кремній. Рентгеноструктурний аналіз дозволив встановити що полікристалічність тонких плівок та співіснування двох гексагональних фаз у структурі  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  з  $x > 0,9$ . Зміщення піків на експериментальних рентгенограмах із зміною типу підкладки не спостерігається, що підтверджує однакову кристалічну будову досліджуваних плівок. Встановлено, що підкладка з кремнію може впливати на інтенсивність піків рентгенограм, що підтверджується відбиттям від площини (211) під кутом 33,12. Основний пік для обох підкладок спостерігається при  $2\theta = 25,50^\circ$ . Аналіз мікрофотографій продемонстрував зернистість поверхні досліджуваних зразків. На основі спектрів пропускання розраховано оптичну ширину забороненої зони та встановлено, що термічний відпал  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x/\text{ITO}$  дозволяє отримати мінімум  $E_g = 1,62$  еВ. На основі аналізу спектрів відбивання встановлено, що оптимальний вибір технологічних режимів осадження та типу підкладки дозволяє отримувати ефективні матеріали з високими поглинаючими властивостями. Ці результати показують, що  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$  можна використовувати для виготовлення сонячних елементів із підвищеними значеннями фотоструму.

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2022.01/0163).

#### Література

1. Кожем'яко, В.П., Домбровський, В.Г., Жердецький, В.Ф., Маліновський, В.І., Прутуляк, Г.В. (2011). Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики.
2. Meriuts, A.V., Khrypunov, G.S., Shelest, T.N., Deyneko, N.V. (2010). Features of the light current-voltage characteristics of bifacial solar cells based on thin CdTe layers. *Semiconductors*, 44, 801-804.
3. Sites, J.R. "Separation of voltage loss mechanisms in polycrystalline solar cells." *Conference Record of the Twentieth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. IEEE, 1996.
4. Bonnet, D. (1992). The CdTe thin film solar cell-an overview. *International Journal of Solar Energy*, 12(1-4), 1-14.
5. Mitchell, K., Fahrenbruch, A.L., Bube, R.H. (1977). Photovoltaic determination of optical-absorption coefficient in CdTe. *Journal of Applied Physics*, 48(2), 829-830.

6. Chu T.L., Chu S.S. (2003). Resent progress in thin-film cadmium telluride solar cells. *Progress in Photovoltaic: Researches and Application*, 1(1), 31-42.
7. Bonnet, D., Meyers, P. (1998). Cadmium-telluride—Material for thin film solar cells. *Journal of Materials Research*, 13, 2740-2753.
8. Hegedus, S. S., McCandless, B. E. (2005). CdTe contacts for CdTe/CdS solar cells: effect of Cu thickness, surface preparation and recontacting on device performance and stability. *Solar energy materials and solar cells*, 88(1), 75-95.
9. File, P.D. (1967). Joint committee on powder diffraction standards. *ASTM, Philadelphia, Pa*, 9-185.
10. Li, C., Wang, A., Wu, L., He, X., Zhang, J., Hao, X., Feng, L. (2019). Investigations of the structural, optical properties, and electronic structure of CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> films fabricated by RF magnetron sputtering. *Materials Research Express*, 6(6), 066415.
11. Padiyan, D.P., Marikani, A., Murali, K. R. (2003). Influence of thickness and substrate temperature on electrical and photoelectrical properties of vacuum-deposited CdSe thin films. *Materials Chemistry and Physics*, 78(1), 51-58.
12. Ding, C., Ming, Z., Li, B., Feng, L., Wu, J. (2013). Preparation and characterization of pulsed laser deposited CdTe thin films at higher FTO substrate temperature and in Ar+ O<sub>2</sub> atmosphere. *Materials Science and Engineering: B*, 178(11), 801-806.
13. Ivashchenko, M. M., Opanasyuk, A. S., Opanasyuk, N. M., Danilchenko, S. M., & Starikov, V. V. (2011). Structural and optical characteristics of ZnSe and CdSe films condensed on non-oriented substrates. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*.
14. Ilchuk H.A., Kashuba A.I., Petrus R.Y., Semkiv I.V., and Haiduchok V.G., "Optical properties of CdSe thin films annealed in the CdCl<sub>2</sub> atmosphere", *J. Phys. Stud.*, vol. 24, no. 3, p. 3705, 2020.
15. Lingg, M., Spescha, A., Haass, S.G., Carron, R., Buecheler, S., Tiwari, A.N. (2018). Structural and electronic properties of CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> films and their application in solar cells. *Science and technology of advanced materials*, 19(1), 683-692.
16. Yang, J., & Wei, S. H. (2019). First-principles study of the band gap tuning and doping control in CdSexTe1-x alloy for high efficiency solar cell: *Chinese Physics B*, 28(8), 086106.
17. Lide DR, Haynes WM. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 90th Edition ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor and Francis; 2009.
18. Ninomiya S, Adachi S. Optical properties of cubic and hexagonal CdSe. *J Appl Phys*. 1995; 78 (7):4681–4689

### References

1. Kozhemiaki, V.P., Dombrovskiy, V.H., Zherdetskiy, V.F., Malinovskiy, V.I., Prytuliak, H.V. (2011). Analitichnyi ohliad suchasnykh tekhnolohii fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv dlia soniachnoi enerhetyky.
2. Meriuts, A.V., Khrypunov, G.S., Shelest, T.N., Deyneko, N.V. (2010). Features of the light current-voltage characteristics of bifacial solar cells based on thin CdTe layers. *Semiconductors*, 44, 801-804.
3. Sites, J.R. "Separation of voltage loss mechanisms in polycrystalline solar cells." Conference Record of the Twentieth IEEE Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, 1996.
4. Bonnet, D. (1992). The CdTe thin film solar cell-an overview. *International Journal of Solar Energy*, 12(1-4), 1-14.
5. Mitchell, K., Fahrenbruch, A.L., Bube, R.H. (1977). Photovoltaic determination of optical-absorption coefficient in CdTe. *Journal of Applied Physics*, 48(2), 829-830.
6. Chu T.L., Chu S.S. (2003). Resent progress in thin-film cadmium telluride solar cells. *Progress in Photovoltaic: Researches and Application*, 1(1), 31-42.
7. Bonnet, D., Meyers, P. (1998). Cadmium-telluride—Material for thin film solar cells. *Journal of Materials Research*, 13, 2740-2753.
8. Hegedus, S. S., McCandless, B. E. (2005). CdTe contacts for CdTe/CdS solar cells: effect of Cu thickness, surface preparation and recontacting on device performance and stability. *Solar energy materials and solar cells*, 88(1), 75-95.
9. File, P.D. (1967). Joint committee on powder diffraction standards. *ASTM, Philadelphia, Pa*, 9-185.
10. Li, C., Wang, A., Wu, L., He, X., Zhang, J., Hao, X., Feng, L. (2019). Investigations of the structural, optical properties, and electronic structure of CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> films fabricated by RF magnetron sputtering. *Materials Research Express*, 6(6), 066415.
11. Padiyan, D.P., Marikani, A., Murali, K. R. (2003). Influence of thickness and substrate temperature on electrical and photoelectrical properties of vacuum-deposited CdSe thin films. *Materials Chemistry and Physics*, 78(1), 51-58.
12. Ding, C., Ming, Z., Li, B., Feng, L., Wu, J. (2013). Preparation and characterization of pulsed laser deposited CdTe thin films at higher FTO substrate temperature and in Ar+ O<sub>2</sub> atmosphere. *Materials Science and Engineering: B*, 178(11), 801-806.
13. Ivashchenko, M. M., Opanasyuk, A. S., Opanasyuk, N. M., Danilchenko, S. M., & Starikov, V. V. (2011). Structural and optical characteristics of ZnSe and CdSe films condensed on non-oriented substrates. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*.
14. Ilchuk H.A., Kashuba A.I., Petrus R.Y., Semkiv I.V., and Haiduchok V.G., "Optical properties of CdSe thin films annealed in the CdCl<sub>2</sub> atmosphere", *J. Phys. Stud.*, vol. 24, no. 3, p. 3705, 2020.
15. Lingg, M., Spescha, A., Haass, S.G., Carron, R., Buecheler, S., Tiwari, A.N. (2018). Structural and electronic properties of CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> films and their application in solar cells. *Science and technology of advanced materials*, 19(1), 683-692.
16. Yang, J., & Wei, S. H. (2019). First-principles study of the band gap tuning and doping control in CdSexTe1-x alloy for high efficiency solar cell: *Chinese Physics B*, 28(8), 086106.
17. Lide DR, Haynes WM. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 90th Edition ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor and Francis; 2009.
18. Ninomiya S, Adachi S. Optical properties of cubic and hexagonal CdSe. *J Appl Phys*. 1995; 78 (7):4681–4689