

Л.І. Никируй¹, О.В. Яремійчук^{1,2}, Ж.Р. Запыхляк^{1,2}, Р.С. Яворський^{1,2},
П. Потера², І.В. Малярська¹, О.Я. Федорик¹

Оптичні властивості гетеропереходу CdS/CdTe, отримані методом фізичного осадження з парової фази

¹ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,
вул. Шевченка, 57, 76018, м. Івано-Франківськ, Україна, E-mail: roctyslaw@gmail.com
²Жешувський університет, вул. Рейтана 16С, 35-959 Жешув, Польща

У статті наведено дослідження оптичних властивостей тонкого шару сульфід кадмію на плівках телуриду кадмію. Тонкі плівки CdTe були отримані методом відкритого випаровування у вакуумі, використовуючи різні технологічні фактори, зокрема, різну товщину (різний час осадження τ) на скляних підкладах. Після осадження оптичні властивості аналізували методом Swanepoel, використовуючи спектри пропускання. Наступний тонкий шар CdS осаджувався методом термічного випаровування на тонких плівках CdTe. Досліджено зміну оптичних властивостей гетероструктури CdS/CdTe у порівнянні з тонкими плівками CdTe. Використовуючи метод Swanepoel, розраховано основні оптичні константи, такі як показник заломлення, коефіцієнт поглинання та оптична провідність. За допомогою цього методу отримано товщину тонкої плівки та порівняно її з експериментальними значеннями, отриманих за допомогою профілометра.

Ключові слова: гетероперехід тонких плівок, метод термічного випаровування, оптичні властивості.

Стаття поступила до редакції 28.08.2018; прийнята до друку 15.09.2018.

Вступ

Тонкоплівкові фотовольтаїчні сонячні елементи вважаються одними з перспективних сонячних елементів завдяки високій ефективності перетворення енергії, низькій вартості та зручності для широкомасштабного виробництва. Найбільш перспективними тонкоплівковими сонячними елементами є телурид кадмію (CdTe), селенід галію індію міді (CIGS) та аморфний кремній (α -Si) з ефективністю 18,3 %, 20 % та 12,3 відповідно [1]. Як правило, ефективність тонкоплівкових сонячних елементів нижча в порівнянні з кремнієвими (на основі вафлі) сонячними елементами, однак виробничі витрати також нижчі. Як повідомлялося, [2] технологія CdTe коштує приблизно на 30 % менше, ніж технологія CIGS і на 40 % менше, ніж технологія α -Si.

Передбачається, що теоретична ефективність сонячних елементів CdS/CdTe зростає до 28 – 30 % [3,4]. Проте реальна ефективність фотоелектричних сонячних елементів на основі гетеропереходу n-CdS/p-CdTe в шаруватій структурі становить 20,4 % [5], а ефективність сонячних модулів площею $> 1 \text{ см}^2$

становить 16,5 % [6, 7]. Основні фактори впливу на цю різницю обумовлені оптичними втратами, поверхневою рекомбінацією, рекомбінацією в області простору заряду та тильним контактним ефектом.

Найкращі тонкоплівкові елементи малих площ на основі CdTe показують ефективність перетворення більшу 15 % [8]. Також були продемонстровані модулі великої площі з ефективністю апертури понад 10 % [9]. First Solar (найбільший виробник CdTe) повідомив, що середні показники ефективності швидко збільшилися з 12,9 % у 2012 році до 16,6 % у 2016 році для модулів CdTe (First Solar, 2017). Показник ефективності модуля на основі CdTe на даний момент становить 18,6 %. Найкращі показники ефективності CIGS до теперішнього часу становили 17,5 % для модулів [10]. Існує також значне промислове виробництво, засноване на матеріалах CdTe/CdS, представлене в значній мірі американською корпорацією First Solar, яка є постачальником фотоелектричних модулів, що використовуються на сьогодні найбільшою сонячною електростанцією Agua Caliente у Арізоні [11]. Слід зазначити, що технологія тонких плівок на основі CdTe - це перша технологія, яка дозволила

знизити виробничі витрати на сонячну енергію до 0,57 \$/Вт [12]. Незважаючи на 10% різницю в константах решітки CdS та CdTe, вони утворюють електрично відмінний гетероперехід, як показують його високі фактори заповнення, до $FF = 0,75$ у виконаних пристроях.

Тонкі плівки гнучких сонячних батарей з використанням напівпровідникових сполук CdS/CdTe на сьогодні активно досліджують і в галузі інтересів декількох дослідницьких центрів у світі. Це пов'язано з тим, що гнучкі фотоелектричні елементи мають рекордну потужність на одиницю ваги - більше 2 кВт/кг [13]. Такі характеристики досягаються завдяки конструкції гнучкої сонячної панелі, де скляна підкладка замінюється поліамідною плівкою. В останні роки також з'явилися повідомлення про перші спроби виготовлення цього типу конструкцій на гнучких підкладках, включаючи обидві конфігурації: «superstrate» [14-15] і «substrate» [16].

В даний час розроблено багато методів для виробництва тонких плівок CdTe. У даній роботі представлений метод термічного випаровування [17]. Показник заломлення з даних оптичного пропускання може бути визначений генеруванням навколо максимумів та мінімумів пропускання так званого "розмиття" інтерференційної картини. [18]. Отже, інтерференційна картина вільного спектру поглинання осаджених плівок може бути використана для розрахунку показника заломлення за допомогою методу Swanepoel [19].

Це прямий метод, запропонований Swanepoel [20], який базується на використанні екстремумів інтерференційної картини тільки трансмісійного спектру, використовується для виведення реальної та уявної частин комплексного показника, а також для товщини напівпровідникової плівки. Завдяки використанню матеріалів з більш високим коефіцієнтом оптичного поглинання можна зменшити товщину активних фотоелектричних шарів [21], що впливає не тільки на зниження виробничих витрат, але й можливе зменшення ваги фотоелектричних приладів в залежності від того, яка підкладка використовується.

Багато теоретичних робіт зосереджені на детальному дослідженні залежності ефективності тонкоплівкових сонячних елементів CdS/CdTe від деяких властивостей [22-26]. Однак результатів комплексних експериментальних досліджень спектральних залежностей основних оптичних констант було мало. Тому наші дослідження мають велике значення для подальшого розвитку високоефективних пристроїв на основі гетеропереходів для електроніки та сонячної енергії.

Методологія експерименту

Спочатку тонкі плівки CdTe осаджували на очищених скляних підкладках методом термічного випаровування. У використовуваній установці можна одержувати серії (5-15 плівок) в одному циклі для різних технологічних параметрів: різної товщини $d =$

Таблиця 1
Технологічні параметри тонких плівок CdTe і CdS/CdTe

Номер зразка	Температура підкладки T_s , К	Температура випаровування T_E , К	Час осадження τ , sec
<i>CdTe/скло</i>			
21	470	820	180
24	470	845	160
<i>CdS/CdTe/скло</i>			
21	470	1150	45
24	470	1150	30

(0,01 - 12) мкм при постійній температурі осадження $T_s = (300 - 570)$ К ; однакової товщини d з різними T_s ; різної температури випаровування T_E (600 - 1070) К з постійною товщиною d або температурою осадження T_s .

Тонкі плівки CdTe, для дослідження, були отримані з різною товщиною (різний час осадження τ) при постійних T_s та T_E (Таблиця 1). Температура осадження T_s становила 470 К, температура випаровування попередньо синтезованих сполук CdTe становила $T_E = 870$ К. Товщини тонких плівок визначалися часом осадження $\tau = (60 - 180)$ сек.

Наступним кроком було осадження шару CdS на тонких плівках CdTe методом термічного випаровування. Технологічні параметри показані в Таблиці 1.

Товщину зразків аналізували з використанням профілометра Bruker Dektak XT. Спектри оптичного пропускання досліджувались шляхом вимірювання трансмісії, T при нормальних умовах і кімнатній температурі. Вимірювання проводили в діапазоні довжин хвиль 190 – 3300 нм з кроком 1 нм за допомогою спектрометра UV-Vis-NIR з серії Cary Agilent Technologies.

Результати та обговорення

Оптична характеристика тонких плівок дає інформацію про інші фізичні властивості, такі як, ширина забороненої зони, зонна структура та оптично активні дефекти [27]. Вивчено вплив товщини та властивостей гетеропереходу на оптичне пропускання плівок CdTe та CdS/CdTe. Область основного поглинання спостерігалася в спектрах пропускання. Спектри пропускання тонких плівок CdTe та CdS/CdTe, отримані на скляних підкладках різної товщини, вимірювали в діапазоні довжин хвиль від 180 до 3300 нм і показані на рис.1-2. Можна помітити, що плівки дуже прозорі у ближній інфрачервоній області. Край поглинання становить близько 800 нм для всіх зразків, що цілком

відповідає ширині забороненої зони тонких плівок CdTe [28]. Крім того, спостережувані інтерференційні картини у спектрах оптичного пропускання є показником однорідності товщини осаджених плівок [29].

На рис. 1-2 можна побачити, що для вирощених плівок CdTe значення трансмісії досягають до 90 %, що також свідчить про високу прозорість плівок. Для товстої плівки CdTe No21 (Рис. 1) спостерігається

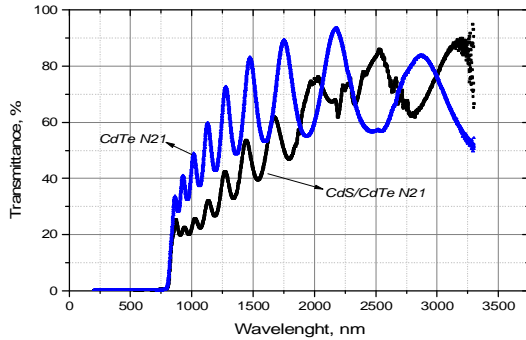


Рис. 1. Оптичний спектр пропускання тонких плівок CdTe та гетероструктури CdS/CdTe (зразок 21).

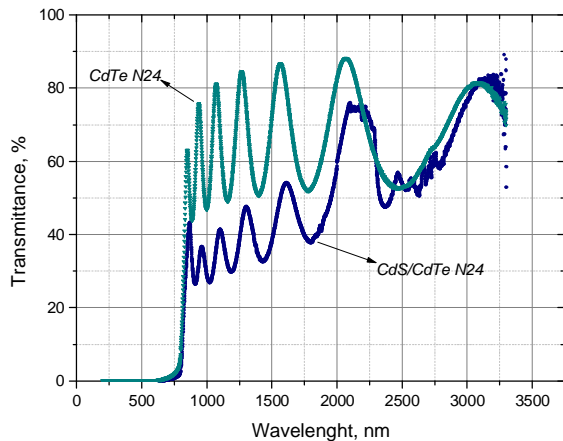


Рис. 2. Оптичний спектр пропускання тонких плівок CdTe та гетероструктури CdS/CdTe (зразок 24).

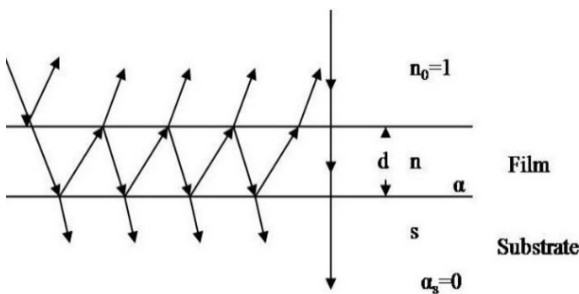


Рис. 3. Схематичне зображення тонкої плівки на підкладці. Стрілки вказують на передачу та відображення на різних поверхнях поділу.

більш плавне зростання трансмісії з довжиною хвилі в порівнянні зі зразком CdTe No24 (Рис. 2). Тут варто зазначити, що кількість "максимумів перешкод" також залежить від товщини плівки. Це можна пояснити тим, що існує різниця між показниками заломлення плівки та підкладки, а також через інтерференцію декількох світлових відбивань (Рис. 3) [30].

Значення трансмісії для гетеропереходу CdS/CdTe трохи нижче, ніж для чистих плівок CdTe, що може свідчити про більше відбивання або розсіювання в товщині плівки.

Одним з найпопулярніших методів, який використовує ці інтерференційні смуги для визначення оптичних властивостей матеріалу, є метод Swanepoel [31].

Тонка плівка на прозорій підкладці виглядає так, як на Рис.3. На цьому малюнку n , α , d та T позначають показник заломлення, коефіцієнт поглинання, товщина та трансмісія плівки відповідно.

Прозора підкладка товщиною на кілька порядків більша з показником заломлення та коефіцієнтом поглинання $\alpha_s = 0$ і пропусканням T_s . Показник заломлення для повітря $n_0 = 1$. Якщо товщина d є рівномірною, то інтерференційні ефекти утворюють спектр. Інтерференційні смуги можуть бути використані для обчислення оптичних констант плівки, таких як показник заломлення, товщина плівки, коефіцієнт поглинання та оптична провідність.

Трансмісія T для нормального падіння, обумовлена інтерференцією хвилі, переданої з трьох інтерфейсів, може бути розрахована як [32]:

$$T = T(n, x) = \frac{Ax}{B - Cx \cos(\varphi) + Dx^2} \quad (1)$$

де

$$A = 16n^2s \quad (2)$$

$$B = (n + 1)^2(n + s^2) \quad (3)$$

$$C = 2(n^2 - 1)(n^2 - s^2) \quad (4)$$

$$D = (n - 1)^2(n - s^2) \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{4\pi n d}{\lambda} \quad (6)$$

$$x = e^{-\alpha d} \quad (7)$$

Максимуми та мінімуми інтерференційних смуг визначаються з наступних рівнянь:

$$T_M = \frac{Ax}{B - Cx + Dx^2} \quad (8)$$

$$T_m = \frac{Ax}{B + Cx + Dx^2} \quad (9)$$

Індекс заломлення підкладки визначається з наступного виразу ($T_s = \max$):

$$s = \frac{1}{T_s} + \left(\frac{1}{T_s^2} - 1\right)^{1/2} \quad (10)$$

З вище вказаних рівнянь визначається показник заломлення:

$$n = (N + (N^2 - s^2)^{1/2})^{1/2} \quad (11)$$

де

$$N = \frac{2s(T_M - T_m)}{T_M T_m} + \frac{s^2 + 1}{2} \quad (12)$$

Таблиця II

Оптичні властивості обчислені методом Swanepoel для гетероструктури CdS /CdTe (№ 21)

λ , nm	T_M	T_m	n	d_1 , nm	m	α , cm ⁻¹	σ_{opt} , 10 ¹¹
2000	0,7562	0,5164	2,237				
1790	0,6739	0,4688	2,275				
1672	0,6184	0,4275	2,353	1729,00	3	2700,72	15,0
1543	0,5754	0,3953	2,425	1663,77	4	3069,41	17,5
1443	0,5359	0,3553	2,578	1318,88	4,5	4879,36	29,6
1339	0,4787	0,3286	2,583	1397,76	5	4053,22	24,6
1271	0,4252	0,2922	2,690	1514,54	5,5	5032,84	31,9
1188	0,3661	0,2666	2,644	1687,91	6	4306,65	26,8
1134	0,321	0,2386	2,695	1923,22	6,5	4872,13	30,9
1069	0,2902	0,224	2,643	2025,55	7,5	4553,93	28,3
1027	0,2572	0,2065	2,584		8		
976	0,2436	0,2003	2,520		8,5		
			<i>(d)</i> 1657,58 exp 1689 nm				

Таблиця III

Оптичні властивості обчислені методом Swanepoel для тонкої плівки CdTe (№ 21)

λ , nm	T_M	T_m	n	d_1 , nm	m	α , cm ⁻¹	σ_{opt} , 10 ¹¹
1	2	3	4	5	6	7	8
2498	0,9441	0,5529	2,382				
2181	0,9362	0,5474	2,391				
1935	0,914	0,5506	2,353	1403,159	3	64,44	2,85
1752	0,8929	0,5377	2,372	1442,819	4	511,03	2,53
1596	0,8624	0,5302	2,358	1414,053	4,5	455,21	6,75
1474	0,8305	0,5024	2,420	1437,777	5	1185,00	5,06
1363	0,7756	0,4869	2,397	1316,820	5,5	896,46	11,6
1277	0,726	0,4498	2,479	1467,810	6	1981,87	9,55
1192	0,66	0,4287	2,451	1481,673	6,5	1656,57	106
1129	0,5966	0,3158	3,043		7,5	1480,10	5,8
1	2	3	4	5	6	7	8
1064	0,541	0,3742	2,457	1473,072	8	1005,82	15
1016	0,4881	0,3383	2,539	1547,714	8,5	2523,31	18
965	0,4509	0,3252	2,490	1444,584	9,5	3076,79	22,6
928	0,4095	0,2977	2,548	1422,981	10,5	3766,45	19,7
889	0,3759	0,2835	2,500	1403,159	11,5	3346,23	
			<i>(d)</i> 1441,13 exp 1485 nm				

Таблиця IV

Оптичні властивості обчислені методом Swanepoel для гетероструктури CdS/CdTe (№ 24)

λ , nm	T_M	T_m	n	d_1 , nm	m	α , cm^{-1}	σ_{opt} , 10^{11}
1804	0,3662	0,2589	2,745				
1611	0,3907	0,2698	2,758				
1434	0,4132	0,2783	2,781	1196,811	3,5	5683,348	37,2
1304	0,4402	0,2983	2,699	1396,410	4	3771,711	24
1188	0,4758	0,3073	2,763	1293,906	4,5	4733,311	30,8
1102	0,5022	0,3264	2,692	1341,083	5	3214,134	20,4
1023	0,5409	0,3457	2,666	1781,445	6	2375,072	14,9
961	0,6244	0,3783	2,665	1516,782	6,5	2219,331	13,9
			<i>(d) 1421,071</i> <i>exp 1490 nm</i>				

Таблиця V

Оптичні властивості обчислені методом Swanepoel для тонкої плівки CdTe (№ 24)

λ , nm	T_M	T_m	n	d_1 , nm	m	α , cm^{-1}	σ_{opt} , 10^{11}
2477	0,885	0,5265	2,402				
2066	0,8812	0,5172	2,432				
1782	0,8764	0,5191	2,419	1290,680	2,5	571,4192	3,25
1566	0,8664	0,5077	2,449	1293,241	3	1040,131	5,99
1397	0,8549	0,5069	2,436	1292,578	3,5	724,5566	4,15
1268	0,8444	0,4914	2,484	1265,469	4	1369,256	8
1159	0,826	0,4907	2,461	1319,135	4,5	808,1503	4,68
1073	0,8111	0,4724	2,516	1294,507	5,5	1637,885	9,7
998	0,7767	0,4691	2,478	1391,304	6	972,2801	5,67
939	0,7573	0,4466	2,550	1350,514	7	2085,314	12,5E
888	0,6826	0,4379	2,452	1792,857	8	947,8748	5,47
850	0,6309	0,4286	2,380		9		
			<i>(d) 1365,59</i> <i>exp 1215 nm</i>				

Використовуючи рівняння (11) та (12) та з урахуванням $s = 0,92$, можна отримати показник заломлення зразків CdTe та CdS/CdTe. Розрахункові значення показника заломлення (n) представлені в таблицях II-V для тонких плівок CdTe та гетероструктури CdS / CdTe. Показник заломлення - це діапазон частот, в яких плівки слабо поглинають. На Рис.4-5 показано зміну показника заломлення плівок CdTe, а середнє значення - приблизно 2,48 для зразка №21 і 2,45 для зразка №24. Ці значення цілком відповідають літературним, які мають відношення до тонких плівок CdTe до 2,5 [33]. Для гетероструктури CdS/CdTe ці значення приблизно 2,52 для зразка №21 і 2,72 для №24. Ці дані відповідають літературним [34].

Товщина плівки розраховується з рівняння:

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (13)$$

за умови, що n_1 та n_2 є показниками заломлення хвиль λ_1 і λ_2 , розраховані для двох сусідніх максимумів або мінімумів. Для зразків CdS/CdTe No21 та CdTe No21 товщини плівок представлені у таблиці II та таблиці III, відповідно, як d_1 . Порівнюючи експериментальні та розрахункові значення товщини, можна відзначити, що невелика різниця в значенні пов'язана з похибкою експериментальних досліджень.

Порядок інтерференції m на максимумах спектрів пропускання для довжини хвилі λ_1 становить:

$$m = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) \quad (14)$$

де λ_1 та λ_2 - довжини хвилі двох сусідніх максимумів пропускання ($\lambda_1 > \lambda_2$).

Для області, де відбувається сильне поглинання світла, показник заломлення визначається наступним чином:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{(n-1)^2(n-s^2)}{E_m - (E_m^2 - (n^2-1)^2(n^2-s^2))^2} \quad (15)$$

де

$$E_m = \left(\frac{8n^2s}{r_m} \right) - (n^2 - 1)(n^2 - s^2) \quad (16)$$

Для гетеропереходу CdS / CdTe відбувається значне збільшення коефіцієнта поглинання світла в кілька разів, перш за все, в короткохвильовій області спектра (Рис.6-7). Це пов'язано з тим, що тонкий шар CdS, завдяки великій забороненій зоні (2,42 еВ),

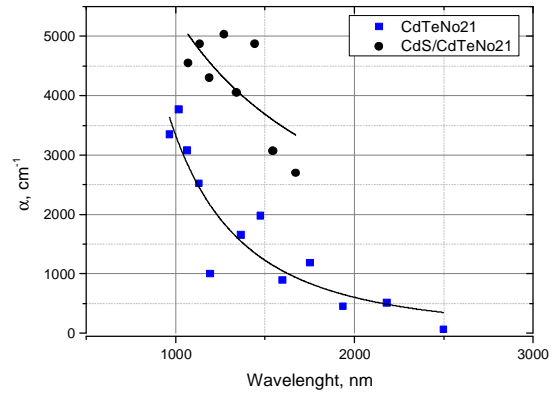


Рис. 6. Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі для тонкої плівки CdTe та гетероструктури CdS/CdTe (№ 21).

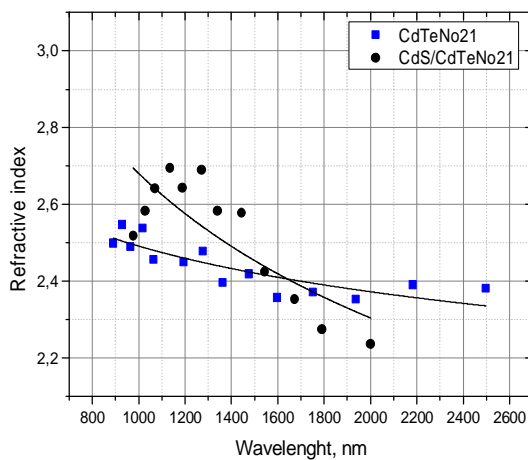


Рис. 4. Залежність показника заломлення від довжини хвилі тонкої плівки CdTe та гетероструктури CdS/CdTe (№ 21).

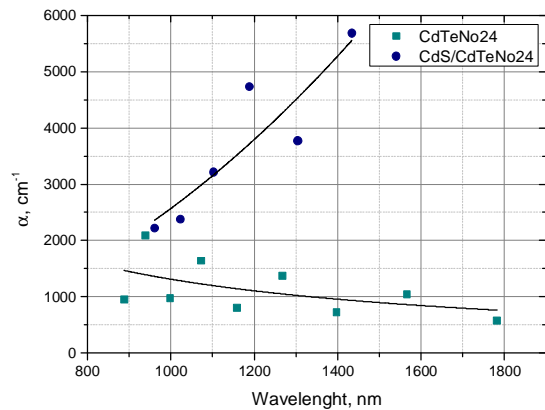


Рис. 7. Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі для тонкої плівки CdTe та гетероструктури CdS/CdTe (№ 24).

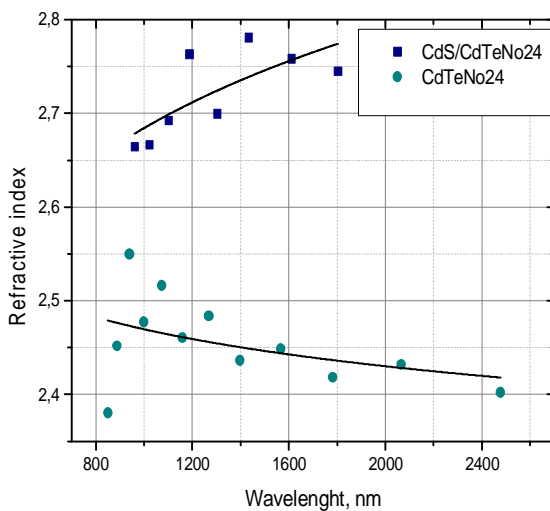


Рис. 5. Залежність показника заломлення від довжини хвилі тонкої плівки CdTe та гетероструктури CdS/CdTe (№ 24).

відіграє роль «вікна поглинання» для поглинання світла.

Фотони, поглинені в шарі «вікон», не сприяють фотоструму, оскільки дуже ймовірно, що відбувається рекомбінація, що приводить до розсіювання світла. Тому поглинання в шарі CdS є джерелом значних втрат.

Для зразків 21 та 24 значна різниця коефіцієнтів поглинання спостерігається для відповідних довжин хвиль. Можна відзначити, що коефіцієнт поглинання для тонких плівок CdTe набуває більших значень, ніж для гетеропереходу CdS / CdTe на відповідних довжинах хвиль для обох зразків.

Висновки

1. Гетероструктури CdS/CdTe на скляних підкладках осаджено методом відкритого випаровування у вакуумі за різних технологічних факторів, зокрема різної товщини.

2. Проведено аналіз оптичних властивостей тонких плівок CdTe а також досліджено їх зміну

після додавання «абсорбційного вікна» CdS.

3. Встановлено, що тонких шар CdS істотно підвищує абсорбційні властивості плівки.

4. Теоретично обраховано товщину плівки і отримані результати збігаються із експериментальними дослідженнями профілометра.

5. Показано, що гетероструктури CdS/CdTe завдяки високій поглинальній здатності мають перспективу використання як фотоелектричні перетворювачі світла.

Никируй Л.І. – кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри фізики і хімії твердого
Яремійчук О.В. - магістрантка кафедри фізики і хімії твердого тіла і Жешувського університету
Занухляк Ж.Р. - аспірантка кафедри фізики та хімії твердого тіла
Яворський Р. - аспірант кафедри фізики та хімії твердого тіла і Жешувського університету
Потера П. – доктор фізичних наук лабораторії матеріалознавства для промисловості,
Малярська І.В. - магістрантка кафедри фізики і хімії твердого тіла.
Федорик О.Я. - студентка III курсу.

- [1]. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, Solar cell efficiency tables (version 41), Prog. Photovolt. Res. Appl. 21 (2013) 1.
- [2]. R. Swami, Solar cell, Int. J. Sci. Res. Publ. 2 (2012) 1.
- [3]. L. Kosyachenko, T. Toyama, Current–voltage characteristics and quantum efficiency spectra of efficient thin-film CdS/CdTe solar cells, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 120 (2014) 512.
- [4]. L. Zhi, F. Lianghuan, Z. Guanggen, L. Wei, Z. Jingquan, W. Lili, W. Wenwu, Influence of CuxS back contact on CdTe thin film solar cells, J. Semicond. 34 (2013) 014008.
- [5]. H. Kim, K. Cha, V.M. Fthenakis, P. Sinha, T. Hur, Sol. Energy 103, 78 (2014).
- [6]. L. Kranz, S. Buecheler, A.N. Tiwari, Sol. Energ. Mat. Sol. C. 119, 278 (2013).
- [7]. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, Progr. Photovolt.: Res. Appl. 21, 827 (2013).
- [8]. Britt and Ferekides, 1993; Ohyama et al., 1997
- [9]. Ullal et al., 2000.
- [10]. Green et al., 2017.
- [11]. <http://www.firstsolar.com/>, dost. z dn. 17/06/2013.
- [12]. S. Girish Kumar, K.S.R. Koteswara Rao, Energ. Environ. Sci. 7, 45 (2014).
- [13]. A.Romeo, M. Arnold, D.L. Batzner, H. Zogg, A.N. Tiwari, Proc. Conf. “ PV in Europe from PV Technology to Energy Solutions”. Rome, 377 (2002).
- [14]. V.Valdna , J. Hiie, Pros. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich, 1233 (2001).
- [15]. J. Perrenoud, S. Buecheler, A. N. Tiwari, „Flexible CdTe solar cells with high photovoltaic conversion efficiency”, 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC, Philadelphia, PA, USA, 695-699, (2009).
- [16]. W. L. Rance, J. M. Burst, M. O. Reese, D. M. Meysing, C. A. Wolden, T. A. Gessert, S. Garner, X. Li, P. Cimo, C. Kosik-Williams, T. M. Barne, „Flexible CdTe superstrate solar cells on flexible glass”, IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference, Tampa, FL, USA, (2013).
- [17]. R.S. Yavorskyi, Z.R. Zapukhlyak, Ya.S. Yavorskyi, L.I. Nykyruy. Vapor Phase Condensation for Photovoltaic CdTe Films. Physics and Chemistry of Solid State V. 18, № 4 (2017) P. 410-416. DOI: 10.15330/pcss.18.4.416.
- [18]. J. C. Manificier, J. Gasiot, and J. P. Fillard, J. Phys. E: Sci. Instrum. 9, 1002 (1976).
- [19]. R. Swanepoel, J. Phys. E, Sci. Instrum. 16, 1214 (1983).
- [20]. R. Swanepoel, J. Phys. E, Sci. Instrum. 17, 896 (1984)
- [21]. F. Alvarez, N. Lalla, A. Lamagana, „Thin film CdS/CdTe solar cells prepared by electrodeposition using low cost material”, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 459-462, (1997).
- [22]. L.A. Kosyachenko, A.I. Savchuk, E.V. Grushko, Dependence of efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cell on parameters of absorber layer and barrier structure, Thin Solid Films 517 (2009) 2386.
- [23]. H.A. Mohamed, Influence of the optical and recombination losses on the efficiency of CdS/CdTe solar cell at ultrathin absorber layer, Can. J. Phys. 92 (2014) 1350.
- [24]. L.A. Kosyachenko, E.V. Grushko, V.V. Motushchuk, Recombination losses in thin-film CdS/CdTe photovoltaic devices, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 90 (2006) 2201.
- [25]. V.V. Brus, On quantum efficiency of nonideal solar cells, Sol. Energy 86 (2012) 786.
- [26]. H.A. Mohamed, Dependence of efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cell on optical and recombination losses, J. Appl. Phys. 113 (2013) 093105.
- [27]. G.Wisz, I.Virt, P.Sagan, P.Potera, R.Yavorskyi. Structural, optical and electrical properties of Zinc Oxide layers produced by pulsed laser deposition method // Nanoscale Research Letters. – 2017. - 12: 253. DOI: 10.1186/s11671-017-2033-9
- [28]. Punitha K. et al 2014.
- [29]. Yavorskyi, R., Nykyruy, L., Wisz, G. et al. Appl Nanosci (2018). <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0872-z>.
- [30]. Moshfegh A et al 2005; Punitha K et al 2014.
- [31]. Swanepoel R 1983; Shaaban E 2012.

- [32]. Swanepoel R: Determination of the Thickness and Optical Constants of Amorphous Silicon. J. Phys. E 1983, 16: 1214–1224. 10.1088/0022-3735/16/12/023.
- [33]. R. E. Treharne, A. Seymour-Pierce, K. Durose, K. Hutchings, S. Roncallo, D. Lane, Optical design and fabrication of fully sputtered CdTe/CdS solar cells, J. Phys: Conf. Ser. 286, 012038, (2011).
- [34]. Lisco, F., Kaminski, P. M., Abbas, A., Bowers, J. W., Claudio, G., Losurdo, M., & Walls, J. M. (2015). High rate deposition of thin film cadmium sulphide by pulsed direct current magnetron sputtering. Thin Solid Films, 574, 43-51.

L.I. Nykyruy¹, O.V. Yaremiichuk^{1,2}, Z.R. Zapukhlyak^{1,2}, R.S. Yavorskyi^{1,2}, P. Potera²,
I.V. Malyarska¹, O.Ya. Fedoryk¹

Optical Properties of CdS/CdTe Heterojunction Prepared by Physical Vapor Deposition Technique

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, T. Shevchenko, 57, 76-018, Ukraine,
e-mail: roctyslaw@gmail.com

²Rzeszow University, Rejtana 16C, 35-959 Rzeszow, Poland

The paper presents the study of the optical properties of a thin layer of Cadmium Sulphide deposited on Cadmium Telluride films. CdTe thin films were obtained by vapor phase condensation method using different technological factors, in particular, different thickness (different time of deposition τ) on glass substrates. After deposition the optical properties were analysed by Swanepoel method, using transmission spectra. The upper thin layer of CdS was deposited by thermal evaporation method on CdTe thin films. The change in optical properties of CdS/CdTe heterojunction in comparison with CdTe thin films was investigated. Using a Swanepoel method were calculated the main optical constants, such as refractive index, absorption coefficient and optical conductivity. By this method the thickness of the thin film was determined and compared with the experimental values obtained by the profilometer.

Keywords: thin films heterojunction, thermal evaporation method, optical properties.