

Т.М. Мазур<sup>1</sup>, М.П. Мазур<sup>1</sup>, І.В. Вакалюк<sup>2</sup>

## Сонячні елементи на основі тонких плівок CdTe (II частина)

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна,  
[tetiana.mazur@nung.edu.ua](mailto:tetiana.mazur@nung.edu.ua);

<sup>2</sup>Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна

У роботі проведено дослідження щодо використання напівпровідникових сонячних елементів (СЕ) на основі тонкоплівкового телуриду кадмію (CdTe) в сучасній енергетиці. Проаналізовано переваги та недоліки використання СЕ на основі тонких плівок CdTe, а також приведено аргументи на користь впровадження технологій масового виробництва CdTe сонячних модулів, які можуть конкурувати з кремнієвими аналогами за компромісних значень ефективності та вартості. Описано фізико-хімічні властивості бінарної системи Cd-Te та вказано зв'язок між фізичними, хімічними, електричними та оптичними властивостями CdTe, що робить його привабливим для використання у тонкоплівкових СЕ. Особлива увага приділяється дослідженню фоточутливості, яка є важливим параметром у визначенні фотопровідності, та обговорюються переваги і недоліки фоточутливості плівок CdTe. Розглянуто тонкоплівкові гетероструктури (ГС) CdTe, які є важливими компонентами сучасних сонячних батарей, та описуються їх основні переваги та недоліки. Аргументується, що прості способи виготовлення та формування ГС, які не потребують складного та дорогого обладнання, є важливою перевагою технології СЕ на основі CdTe.

**Ключові слова:** сонячні елементи, тонкі плівки, CdTe, фоточутливість, гетероструктури.

Подано до редакції 14.06.2022; прийнято до друку 9.03.2023.

### Зміст

#### Вступ

1. Вимоги до застосування CdTe у якості тонкоплівкових сонячних елементів
2. Фізико-хімічні властивості бінарної системи Cd-Te
3. Електричні та оптичні характеристики CdTe
4. Фоточутливість плівок CdTe
5. Тонкоплівкові гетероструктури CdTe в сонячній енергетиці

#### Висновки

#### Вступ

Сонячні елементи (СЕ) на основі тонких плівок CdTe – це тип фотоелектричних сонячних панелей, в яких активним матеріалом для перетворення сонячної енергії в електричну є кадмій-телурова тонка плівка. CdTe має високу ефективність перетворення сонячної енергії та низьку вартість виробництва. Він також має добру стійкість до корозії та деградації, що дозволяє

використовувати його в різних кліматичних умовах. CdTe – це напівпровідник з енергетичною шириною забороненої зони близької до оптимальної для поглинання сонячного світла та гарною електропровідністю. Саме тому CdTe вважається одним з найбільш перспективних напівпровідників для тонкоплівкової сонячної енергетики.

Технологія виготовлення тонкоплівкових СЕ на основі CdTe має багато переваг порівняно з

традиційними кремнієвими пластинами, так як CdTe є напівпровідником, що ефективно поглинає оптичне випромінювання з оптимальними параметрами для СЕ. Виготовлення тонкоплівкового CdTe не потребує складної мікроелектронної технології, що робить її більш продуктивною та менш вартісною. Це пояснюється не тільки мікронною товщиною поглинаючого шару, але й низькою вартістю основи, на яку наноситься матеріал, яка зазвичай є склом, полімерною плівкою або металеву фольгою. Крім того, тонкоплівковий ГС на основі CdTe є перспективною технологією для виготовлення СЕ.

У польових випробуваннях СЕ на основі CdTe продемонстрували продуктивність 17%, що можна порівняти з кремнієвими панелями. За заявою компанії First Solar, вони зможуть досягти ефективності 24% за два роки та 19% в реальних умовах за три роки [1]. Крім того, завдяки технології осадження з парової фази, тонкі панелі First Solar виготовляються простіше – весь процес, від прозорого скла до кінцевого продукту, займає всього 3,5 години, тоді як на виготовлення кремнієвого елемента йде два дні [1].

## I. Вимоги до застосування CdTe у якості тонкоплівкових сонячних елементів

СЕ на основі тонких плівок CdTe мають кілька переваг порівняно з традиційними кристалічними сонячними панелями [2]. Зокрема, вони мають вищу ефективність перетворення енергії: СЕ на основі CdTe можуть мати ефективність до 22%, що є значно вищою за ефективність традиційних кристалічних сонячних панелей [2, 3]. Також для них характерна більша стійкість до високих температур: тонкі плівки CdTe можуть працювати при високих температурах без значного падіння ефективності. А краща робота при незначному освітленні забезпечує СЕ на основі тонких плівок CdTe здатністю генерувати електричний струм при низькому рівні освітлення, що робить їх ефективними при похмурій погоді, або в затінених місцях [4].

Однак, СЕ на основі тонких плівок CdTe мають і деякі недоліки, такі як високі витрати на виробництво та меншу стійкість до ультрафіолетового випромінювання порівняно з кристалічними сонячними панелями [2,5].

Проте CdTe залишається одним з матеріалів, які використовуються для виготовлення тонкоплівкових сонячних елементів. Для того, щоб CdTe можна було використовувати у якості СЕ, необхідно виконувати певні вимоги. Однією з умов є чистота матеріалу, тобто для отримання високоефективних СЕ необхідно використовувати високочистий CdTe з мінімальною кількістю домішок. Важливою умовою є товщина плівки CdTe, яка має бути оптимальною для досягнення максимальної ефективності елемента. Зазвичай використовують плівки товщиною від 1 до 2 мкм. Для отримання напруги необхідно використовувати гетероперехід між CdTe та іншим

матеріалом, наприклад, міддю (Cu), забезпечуючи високу якість межі переходу. Важливо врахувати електричні властивості, зокрема оптимальну концентрацію електронів і дірок у CdTe, щоб забезпечити максимальну ефективність СЕ [6, 7]. Крім того, CdTe має бути стійким до дії вологості, температурних змін, ультрафіолетового випромінювання та механічних пошкоджень [6]. З точки зору виробництва СЕ, використання CdTe має бути економічно вигідним.

Дотримання цих вимог допомагає досягти максимальної ефективності СЕ на основі CdTe та знижує вартість їх виробництва.

## II. Фізико-хімічні властивості бінарної системи Cd-Te

CdTe є унікальною серед сполук II–VI, таких як CdSe, ZnS і HgTe, тим, що має найбільший середній атомний номер, найнижчу температуру плавлення, найменшу негативну ентальпію утворення, найбільший параметр ґратки і найвищу йонність. В електронному вигляді кадмій телурид демонструє амфотерні напівпровідникові властивості, що робить можливим легування CdTe *n* і *p*-типу [8]. Всі ці фактори доповнюють його майже ідеальну оптичну ширину забороненої зони і коефіцієнт поглинання для наземних фотоелектричних пристроїв, що робить його достатньо легким для осадження та контролю у вигляді тонкої плівки. Основні фізико-хімічні властивості CdTe представлені у таблиці 1.1.

Кристалізація кадмію телуриду відбувається у структурі цинкової обманки. Область його існування є асиметричною. Стехіометричний CdTe має точку плавлення трохи нижчу за  $T_m$ . Для температур, менших за 1000 К, більша частина області гомогенності сполуки знаходиться на боці надлишку Cd, а для температур вище 1000 К – зміщується в бік Te [12]. Максимальна температура плавлення сполуки становить  $T_m=1365$  К і відповідає нестехіометричному складу з надлишком телуру [10, 12].

Синтезу сполук II –VI сприяють великі негативні ентальпії утворення ( $\Delta H_f$ ) і, відповідно, низькі тиски парів ( $p_{sat}$ ) з'єднань в порівнянні з їх складовими елементами: для CdTe  $\Delta H_f = -22,4$  ккал / моль і  $p_{sat}$  (400 °C) =  $10^{-5}$  Торр [13, 14].

Рівноважна реакція для твердого CdTe і парів Cd і Te<sub>2</sub> має вигляд



Як результат, осадження сполуки CdTe можливе за допомогою спільного випаровування з джерел елементів, прямої сублімації з джерела CdTe або перенесення пари з використанням газу-носія для захоплення та доставки парів Cd і Te<sub>2</sub> з елементарних або CdTe джерел. Конгруентна сублімація сполуки CdTe фіксує склад газової фази для осадження з джерела CdTe, а низький тиск пари CdTe полегшує відкладення однофазних твердих плівок в широкому діапазоні температур підкладки [12].

Парціальні тиски компонентів Cd і Te<sub>2</sub> пов'язані

між собою константою рівноваги реакції [15]:

$$K_p = P_{Cd}^2 P_{Te} \text{ or } K_p = P_{Cd} P_{Te}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Температурні залежності констант рівноваги  $K_p$  за даними різних авторів дещо відрізняються [12, 15].

Згідно [16] зображено фазову діаграму системи Cd-Te при атмосферному тиску, яка відображає індивідуальні рівноваги пара-тверде тіло для окремих компонентів CdTe, Cd та Te у діапазоні температур від 100 до 600°C, який зазвичай використовується для виготовлення СЕ. Конгруентне випаровування CdTe спрощує методи осадження з парової фази, а порівняно високі тиски сублімації Cd і Te забезпечують однофазний склад при осадженні в вакуумі при температурах вище приблизно 300°C. Крім того, CdTe є стабільним продуктом катодного відновлення з розчинів, які містять іони Cd і Te, завдяки схожим потенціалам відновлення для Cd і Te та низькій розчинності CdTe [16, 17].

Фазова рівновага  $T$ - $x$  системи CdTe при атмосферному тиску визначається кінцевими точками, що складаються з Cd ( $x = 0$ ), Te ( $x = 1$ ) і CdTe [16]. Температура плавлення CdTe є значно вищою, ніж для Cd ( $T_m = 321^\circ\text{C}$ ) або Te ( $T_m = 450^\circ\text{C}$ ), становлячи  $T_m = 1092^\circ\text{C}$  [8,9]. Проекції  $T$ - $x$ , які оточують стехіометричний склад CdTe, показують дуже вузьку симетричну область існування при  $T < 500^\circ\text{C}$ , що складає близько  $\sim 10^{-6}$  ат.%. При більш високих температурах, область існування розширюється і стає асиметричною на стороні, збагаченою Cd, аж до  $700^\circ\text{C}$ , стаючи збагаченою Te

при більш високих температурах. Область існування та дефектна структура пов'язані з умовами приготування об'ємного матеріалу і були предметом багатьох досліджень [8, 18]. Нещодавні теоретичні дослідження щодо рівнів дефектів в CdTe розширили цю основу [8, 18]. На сьогодні передача об'ємних властивостей тонкій плівці CdTe залишається важливою темою досліджень.

Твердотільні властивості CdTe зумовлені його іонним зв'язком. За шкалою іонності Філіпса, CdTe має найбільше значення 0,717 серед сполук II-VI, що менше порогового значення Філіпса 0,785 для октаедричної координації [8]. Геометричні обчислення показують, що тетраедрична координація переважає в іонних бінарних сполуках, які мають відношення радіусів катіонів / аніонів між 0,225 і 0,732, тоді як октаедрична координація є кращою для відношення більше 0,732 [8, 15]. Відношення радіусів катіонів / аніонів в CdTe становить  $r(\text{Cd}^{2+})/r(\text{Te}^{2-}) = 0,444$ , що сприяє тетраедричній координації.

У твердих одноатомних речовинах тетраедрична координація атомів з чотирма найближчими сусідами і дванадцятьма наступними сусідами призводить до структури алмазу. У подвійних твердих речовинах ця координація відповідає структурам цинкової обманки і вюрцита. Твердий CdTe при атмосферному тиску має гранецентровану кубічну структуру цинкової обманки, де розмір елементарної комірки становить  $6,481 \text{ \AA}$ , а довжина зв'язку CdTe –  $2,806 \text{ \AA}$  [9].

Телурид кадмію має дві можливі структури: сфалерит (S кубічна структура В3) та в'юрцит (W

Таблиця 1.1.

Основні фізико-хімічні властивості CdTe [9,10]

Найменування параметра, символ, розмірність	Числове значення
1	2
Тип ґратки	сфалерит
Просторова група	$T_d^2 - F\bar{4}3m$
Стала ґратки, $a$ , $10^{-10}$ м	6,481 6,478
Cd-Te довжина зв'язку, $\text{Å}$	2,806
Густина, $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	$5,86 \cdot 10^3$
Температура плавлення, $T_m$ , К	1365
Коефіцієнт термічного розширення, $\alpha$ , (300К)	$5,9 \times 10^{-6}/\text{K}$
Питома теплоємність, $C_{p,298,15}^0$ , Дж/моль·К	50,2
Теплота утворення, $\Delta H_{f,298,15}^0$ , $10^3$ Дж/моль	100,5
Теплота плавлення, $\Delta H_{пл}$ , $10^3$ Дж/моль	44,4
Теплота сублімації, $\Delta H$ , $10^3$ Дж/моль	181,95
Реакція сублімації	$\text{CdTe} \rightarrow \text{Cd} + 1/2\text{Te}_2$
Тиск сублімації $p_{sat}$	$\log(P/\text{бар}) = -10650/T(\text{K})$ $2,56 \log(T) + 15,80$
Стандартна ентропія, $S_{298,15}^0$ , $10^3$ Дж/моль·К	98,61
Ентропія утворення, $\Delta S_f^0$ , Дж/моль·К	361,74 ( $T = 874 \text{ K}$ )
Зміна ентропії при плавленні, $\Delta S_{пл}$ , Дж/моль·К	32,53
Верхня межа енергії дисоціації, $E$ , $10^3$ Дж/моль	129,8
Теплопровідність, $\chi$ , Вт/см·К	0,075
Коефіцієнт самодифузії атомів Cd, $D_{самод.}^{Cd}$	$2 \cdot 10^{-8}$ ( $T = 1273 \text{ K}$ )
Коефіцієнт самодифузії атомів Te, $D_{самод.}^{Te}$	$8,2 \cdot 10^{-11}$ ( $T = 1073 \text{ K}$ )
Температура Дебая, $T_\theta$ , К	200 ( $T = 80 \text{ K}$ )

гексагональна структура B4), з однаковою кількістю атомів у першій та другій координаційній сферах [8]. При кімнатній температурі та тиску 3,3-3,6 ГПа відбувається фазовий перехід у телурид кадмію зі структури сфалериту або в'юриту до структури типу NaCl, який супроводжується раптовим зменшенням електропровідності [9].

Ширина забороненої зони CdTe зростає зі зменшенням температури ( $E_g=1,5976-6,09 \cdot 10^{-4}T^2/(T+255)$  – [19],  $E_g=1,622-3,5 \cdot 10^{-4}T-1,1 \cdot 10^{-7}T^2$  – [15],  $E_g=1,65-5,35 \cdot 10^{-4}T$  – [8]). Величина спин-орбітального розщеплення валентної зони становить 0,9 eV [10], 0,93 eV [19].

Бінарна рівновага між Cd і Te виявляє лише один склад CdTe, який утворюється у співвідношенні Cd:Te = 50:50% і має евтектичний розчин біля рідкого Te [4]. При дослідженні фазового стану CdTe при високих температурах було виявлено асиметричне розширення однофазної області на боці Te за умови  $T > 600^\circ\text{C}$ . При  $750^\circ\text{C}$  відсутність Cd у сплаві становить  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , що відповідає дефіциту. Відстань між найближчими сусідами у структурі CdTe знаходиться на рівні 0,28 нм при 300 К. Холлівська рухливість електронів при 300 К складає до  $n \leq 1050 \text{ см}^2/\text{Вс}$ , а холлівська рухливість дірок при 300 К складає до  $p \leq 100 \text{ см}^2/\text{Вс}$ . Енергія зв'язку екситонів складає 12 меВ, середня енергія фотона – 5,8 меВ [8, 20].

### III. Електричні та оптичні характеристики CdTe

Об'ємні оптичні та електричні властивості CdTe залежать від структури електронних зон біля

максимуму валентної зони (МВЗ) та мінімуму зони провідності (МЗП). Для CdTe МВЗ та МЗП розташовані в одній точці Г в першій зоні Брілюена, що призводить до забороненої прямої зони ширини 1,5 eV при 300К. Температурний коефіцієнт ширини забороненої зони для CdTe становить близько  $-0,4 \text{ меВ/К}$ , що призводить до мінімальної зміни при звичайних температурах СЕ. Форма зони навколо екстремумів визначає ефективну масу електронів у МЗП та дірок у МВЗ, а також контролює властивості перенесення носіїв заряду та міжзонну густину станів [21]. В таблиці 1.2 представлені основні оптичні та електричні властивості CdTe.

В порівнянні з іншими напівпровідниками, такими як кремній, CdTe має більшу діелектричну проникність в області інфрачервоного та видимого світла, що дозволяє йому пропускати більшу кількість світла та забезпечувати більш високу ефективність фотовольтаїчних панелей [2]. CdTe має добру абсорбцію в області інфрачервоного та видимого світла. Відбивання світла на поверхні CdTe залежить від його структури та довжини хвилі світла. Розсіювання світла в CdTe залежить від його дефектів та домішок і через їх наявність може бути великим, що знижує ефективність СЕ, виготовлених на основі CdTe [22]. Фотолюмінесценція CdTe відбувається, коли матеріал поглинає фотони та випромінює світло відповідної довжини хвилі.

Рухливість та концентрація носіїв заряду [23, 24], провідність матеріалу, енергія випромінювальних переходів [25] та інші електричні та оптичні властивості CdTe сильно залежать від його хімічного складу та дефектної структури кристала [26]. Цю структуру можна ефективно контролювати під час післяростової високотемпературної обробки.

Таблиця 1.2.

Оптичні та електричні характеристики CdTe [7,20,22]

Параметр	Значення	
Оптичний діапазон CdTe $E_g$ (300K)	1,50eV $\pm$ 0,01eV	
Оптичний діапазон. Сплав CdTe <sub>0.95</sub> S <sub>0.05</sub>	1,47eV $\pm$ 0,01eV	
Температурна залежність $dE_g/dT$	-0,4меВ/К	
Електронна спорідненість	4,28eV	
Коефіцієнт поглинання (600 нм)	$>5 \times 10^5/\text{см}$	
Показник заломлення (600 нм)	$\sim 3$	
Високочастотна діелектрична постійна $\epsilon(\infty)$	7,1	
Низькочастотна (статична) діелектрична проникність $\epsilon_s$	9,65	
	10,9	
	11,0	
Ширина забороненої зони, $E_g$ , eV	1,606 ( $T = 4,2 \text{ К}$ ), 1,5 ( $T = 300 \text{ К}$ )	
$m_e$	0,096 $m_0$	
$m_h$	0,35 $m_0$	
$\mu_e$	500–1000 $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	
$\mu_h$	50–80 $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	
Власна концентрація вільних носіїв заряду, $n$ , $\text{см}^{-3}$	$2,0 \cdot 10^6 - 1,5 \cdot 10^{14}$ ( $T = 300 - 700 \text{ К}$ )	
Холлівська рухливість	електронів $\mu_n$ , $10^{-3} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	105
	дірок $\mu_p$ , $10^{-3} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	7

Встановлено, що при кімнатній та нижчій температурі переважним механізмом розсіювання є розсіювання на йонізованих центрах, а при вищих температурах - на оптичних фонах [27].

Зонну структуру CdTe можна зрозуміти, оглядаючи його відносно високу йонність, яка пояснюється тим, що частини Блохівських функцій, що мають періодичність, яка ідентична з решіткою, пов'язані з атомними орбіталями Cd і Te. Зона провідності виникає через перший незайнятий рівень катіону, а саме 5s-рівень Cd. Найвища валентна зона складається з найвищого зайнятого рівня аніону, а саме 5p-рівня Te.

У CdTe наявність дефектів порушує його періодичну структуру, що призводить до появи локалізованих електричних станів всередині забороненої зони і зміни електричних та оптичних властивостей [28, 29]. Такі дефекти можуть бути різних типів, включаючи власні дефекти, хімічні домішки та їх комплекси, що можуть виникати як замісні так і міжвузлові. Наприклад, вакансія кадмію ( $V_{Cd}$ ) призводить до дрібних акцепторних станів, а заміщення кадмію на позиції телуру ( $Cd_{Te}$ ) - до дрібних акцепторних станів. Міжвузловий кадмій ( $Cd_i$ ) призводить до відносно дрібного донорного стану, а міжвузловий телур ( $Te_i$ ) - до глибоких станів. Хоча неглибокі стани можуть легко створювати акцептори та донори [18], загальний ефект легування залежить від ймовірності формування та ступеня іонізації, які визначають ступінь компенсації бажаного акцепторного стану.

Однією з найважливіших проблем обробки сонячних елементів CdTe є отримання високих концентрацій акцепторів, що перевищують  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Під час термічної обробки напівпровідникової системи відбувається наближення до рівноваги, і дослідження засновані на перших принципах показали, що легування р-типу призводить до механізму самокомпенсації [29]. При зміщенні рівня Фермі в бік максимуму валентної зони хімічний потенціал для формування донорів збільшується, що компенсує подальше утворення акцепторів і значно обмежує максимальну концентрацію акцепторів. З іншого боку, глибокі стани можуть діяти як пастки, зменшуючи час життя носіїв, що призводить до збільшення рекомбінації носіїв. У роботі [29] розглянуто зведення глибоких електронних станів, виміряних у CdTe та CdZnTe. У статті [4] показано групу дрібних і глибоких дефектів, які включають власні, домішкові та складні рівні у CdTe. Для досягнення бажаних електричних властивостей використовують активаційні обробки, які включають певні домішки в шари CdTe та CdS. Після осадження можуть застосовувати  $CdCl_2$ ,  $O_2$  і Cu, які в свою чергу активують чи пасивують власні дефекти [4].

Однак, електричні характеристики полікристалічного CdTe, які використовуються в сучасних сонячних батареях [30], можуть відрізнитися від властивостей монокристалічного CdTe з кількох важливих причин. Зокрема, дефекти між зернами матимуть різні енергії в забороненій зоні та будуть мати різну енергію утворення. Це припущення ґрунтується на тому, що різні методи після-

осадження, які використовуються для поліпшення ефективності сонячних батарей, переважно впливають на граничні стани зерна, а не на об'ємні стани CdTe. Наприклад, в експерименті [31] було створено пристрої з електроосадженими плівками CdTe, які мали волокнисті зерна довжиною 2 мкм і шириною 0,15 мкм. Обидва зразки отримали однакову обробку  $CdCl_2$ , але один зразок пройшов коротку окислювальну обробку перед обробкою  $CdCl_2$ . Коміркі продукували схожі напруги холостого ходу  $V_{oc}$ , але різні фотоструми. Плівка CdTe в комірці з етапом окислення зберегла структуру осадженого зерна та товщину плівки CdS. Дана комірка продемонструвала відмінну продуктивність, внутрішню квантову ефективність (ВКЕ)  $> 90\%$ , що свідчить про покращену тривалість експлуатації фотогенерованих носіїв порівняно зі зразком без етапу окислення, який показав злипання зерен, втрату плівки CdS та ВКЕ  $< 60\%$  [8].

Цей результат підтверджує зв'язок між фізичними, хімічними та електронними властивостями тонкоплівкового SE CdTe/CdS. Оскільки виготовлення комірок проводиться в полікристалічному середовищі, постає кілька критичних питань, які впливають на розвиток тонкоплівкових фотоелектричних елементів. Першим є розділення внутрішньозеренних ефектів від зернограничних. Другим - виявлення впливу меж зерен на роботу пристрою. Третім - управління властивостями плівки на великій площі з більш як  $10^{12}$  зерен на квадратний метр в модулі CdTe, де зерна мають ширину 1 мкм. Проте, під час розробки SE CdTe ці проблеми були успішно вирішені за допомогою удосконалених методів визначення характеристик, емпіричної оптимізації осадження плівки та обробки після осадження. На сьогоднішній день існує кілька потужних методів для кількісної оцінки властивостей плівки, зокрема для SE CdTe/CdS, які обговорюються у посиланнях [6, 32-34]. Деякі з цих методів можуть також знайти застосування як діагностичні датчики для вбудованого зворотного зв'язку управління технологічним процесом під час виготовлення модуля CdTe/CdS.

#### IV. Фоточутливість плівок CdTe

Плівки CdTe є відомим фоточутливим матеріалом, що здатний перетворювати енергію світла в електричний струм. Це дозволяє їх використовувати в сонячних батареях та інших фотоелектричних пристроях, таких як рентгенівські детектори, а також у наукових дослідженнях.

До основних властивостей фоточутливості плівок CdTe відносяться спектральна чутливість, коефіцієнт поглинання, ефективність перетворення, час відгуку та стійкість. Плівки CdTe мають високу спектральну чутливість в інфрачервоному та видимому діапазонах. Їхній спектральний діапазон залежить від товщини плівки та домішок, присутніх у матеріалі. Вони мають високий коефіцієнт поглинання світла в порівнянні з іншими напівпровідниковими матеріалами, такими як

кремній. Це означає, що вони можуть перетворювати більшу кількість енергії світла на електричний струм. Плівки CdTe мають високу ефективність перетворення енергії світла на електричний струм [22, 33]. Це свідчить про те, що вони можуть забезпечувати високу електричну потужність при низьких рівнях освітлення. Також плівки CdTe мають швидкий час реагування на світло, що дозволяє використовувати їх в пристроях, які потребують швидкої реакції на світло. І, що не менш важливо, плівки CdTe мають добру стійкість до впливу середовища та інших факторів, таких як температура та вологість.

Фоточутливість плівок CdTe визначається енергетичним розміщенням заборонених зон та дефектами в кристалічній структурі. Оскільки у CdTe заборонена зона має ширину близько 1,5 eV, що відповідає спектральній області близько 800 нм. Тому плівки CdTe мають найбільшу фоточутливість в області ближньої інфрачервоної та видимої області спектру.

Крім того, фоточутливість плівок CdTe залежить від їх товщини. Товщина плівки повинна бути достатньою для поглинання достатньої кількості фотонів, але не повинна бути занадто великою, оскільки це може зменшити ефективність збору зарядів. Зазвичай оптимальна товщина плівки CdTe складає від 1 до 2 мкм.

Важливим чинником, що впливає на фоточутливість плівок CdTe, є якість самого матеріалу та технології його виготовлення. Наприклад, для забезпечення високої ефективності плівки CdTe повинні мати високу чистоту та однорідність. Технологія виготовлення плівок CdTe також впливає на їх фоточутливість: наприклад, при використанні методу хімічного осадження з розчинів можливо отримати плівки з більшою фоточутливістю, ніж при використанні методу фізичного осадження з парів [30].

Для забезпечення високої ефективності плівки CdTe також повинні мати гарну провідність та властивості електронного перенесення зарядів. Для цього часто використовують додаткові шари, наприклад, шари надшвидкої дифузії, що зменшують час життя зарядів, або інші матеріали, такі як шари ZnO, що забезпечують ефективне збирання зарядів.

Плівки CdTe, що були нанесені при температурі  $T_H = 473$  K, проявляють фоточутливість. Товщина плівок встановлена на рівні 400 нм, оскільки коефіцієнт поглинання світла практично зворотно пропорційний товщині плівки, і це забезпечує краще поглинання падаючого світла на плівки. Вимірювання вольт-амперних характеристик плівок CdTe при різних температурах навколишнього середовища показало, що вони мають омичні властивості як в темряві, так і під час освітлення. Темнова провідність вирощених плівок CdTe, виміряна при кімнатній температурі, становить  $10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ . Зауважено, що темнова провідність та фоточутливість плівок CdTe зростають зі збільшенням температури  $T_H$  під час їх вирощування в діапазоні від 303 до 573 K [35].

Ефективність фотопровідності плівки значною мірою залежить від природних та зовнішніх

недосконалостей, які можуть діяти як центри захоплення чи рекомбінації. У полікристалічних плівках між зернами виникає багато дефектів та обірваних атомних зв'язків, що створюють додаткові енергетичні стани. Ці стани ефективно захоплюють носії заряду, створюючи потенціальний бар'єр на межі зерен. З огляду на рівномірну структуру міжзеренної межі з середньою висотою бар'єру  $E_{bt}$ , темнова провідність плівки визначається за формулою [36]

$$\sigma_D = N_C e \mu_0 e^{-(\Delta E + E_{bt})/kT} = N_C e \mu_0 e^{-\Delta E_D/kT} \quad (3)$$

де  $N_C$  – густина станів у зоні провідності,  $\mu_0$  – рухливість носіїв в зерні.

При освітленні плівки її провідність може зростати через збільшення кількості вільних носіїв заряду, а також зменшення висоти бар'єру на межі зерен, що залежить від енергії світла. Дослідження [36] показали, що зміна провідності внаслідок генерації носіїв заряду під час освітлення є незначною порівняно зі зміною провідності, яка виникає внаслідок термічної генерації носіїв заряду. Основним чинником зростання провідності при освітленні є підвищення рухливості носіїв на межах зерен, що відбувається через бар'єрну модуляцію. Загальна фотопровідність плівок при освітленні може бути виражена за формулою, наведеною в роботі [36]:

$$\sigma_L = N_C e \mu_0 e^{-(\Delta E + E_{bt})/kT} = N_C e \mu_0 e^{-\Delta E_L/kT} \quad (4)$$

$$\Delta E_L = (\Delta E + E_{bt}) \quad (5)$$

Тут  $\Delta E_L$  – енергія фотоактивації,  $E_{bt}$  – висота бар'єру під освітленням.

Зменшення висоти бар'єру (енергія активації рухливості) може бути виражена як:

$$\Delta E_\mu = (\Delta E_D - \Delta E_L) \quad (6)$$

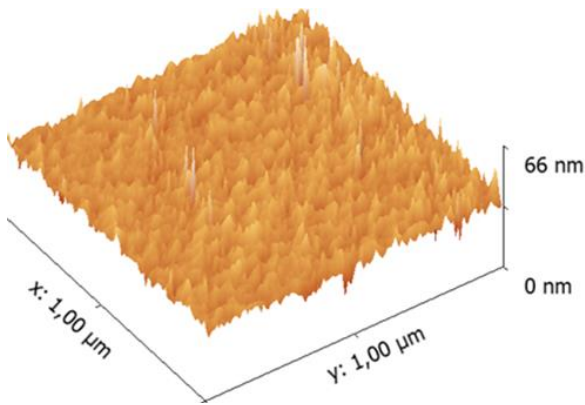
Енергія, необхідна для активації рухливості носіїв заряду  $\Delta E_\mu$ , залежить від температури та інтенсивності світла, а також від часу життя цих носіїв. Залежність між фотопровідністю та енергією активації рухливості може бути записана з використанням відповідних рівнянь (3) і (4), як

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_D} = e^{\Delta E_\mu/kT} \quad (7)$$

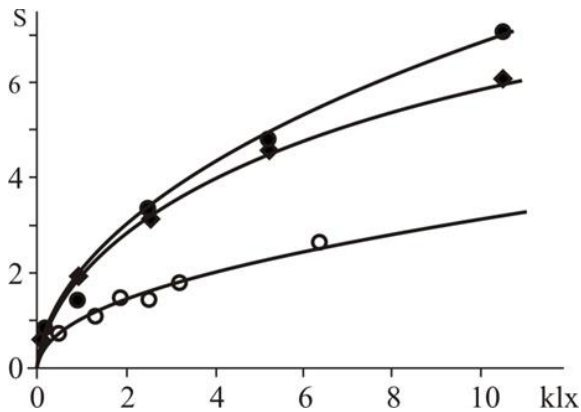
Фоточутливість  $S$  визначається формулою

$$S = (\sigma_L - \sigma_D)/\sigma_D \quad (8)$$

Варто зазначити, що ефективність фоточутливості значно залежить від дефектів у структурі, які можуть виступати як центри захоплення або рекомбінації носіїв заряду. У плівках CdTe з полікристалічною структурою фотопровідність визначається переважно процесами, що відбуваються на межах зерен. За допомогою атомно-силової мікроскопії (АСМ) (рис. 1) було визначено середній розмір кристалітів, а ефективність фоточутливості плівок різної товщини та якості структури представлена на рис. 2 [20].



**Рис. 1.** АСМ-зображення поверхні плівки CdTe товщиною 300 нм на полірованій скляній підкладці.



**Рис. 2.** Залежність фоточутливості від освітленості для тонких плівок CdTe різної товщини:  
 ● – товщина 200 нм, підкладка – поліроване скло;  
 ◆ – товщина 320 нм, підкладка – поліроване скло;  
 ○ – товщина 540 нм, підкладка – слюда;  
 середній розмір зерна становить 25 нм (●), 30 нм (◆), 90 нм (○).

За результатами досліджень видно, що фоточутливість плівок, отриманих на полірованих скляних підкладках, є значно вищою, ніж для плівок, отриманих на свіжих сколах слюди (111), і зростає зі зменшенням товщини плівки. Це пояснюється тим, що питомий внесок міжзеренних областей зростає зі зменшенням розміру кристалітів [20, 22]. Енергії фотоактивації зменшуються в темряві при збільшенні інтенсивності білого світла. Зниження енергії фотоактивації при більш високому рівні освітлення, перш за все, пояснюється зменшенням межі міжзеренного граничного потенціалу висоти бар'єру. Очікується, що потенціальний бар'єр сильно впливає на рухливість носіїв, і тим самим контролює фоточутливість.

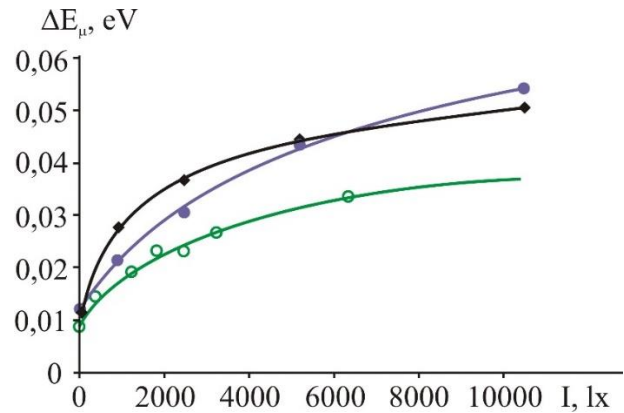
Використовуючи (7) і (8), фоточутливість можна виразити як функцію енергії активації рухливості:

$$S = e^{\Delta E_{\mu}/kT} - 1 \quad (9)$$

На рис. 3 наведено залежності розрахованих енергій активації рухливості від освітленості [20].

Ефект меж зерен пояснює зменшення енергії фотоактивації в темряві, оскільки струм, що втрачається до рекомбінації на межах зерен, негативно впливає на фоточутливість плівок.

Зниження температури призводить до зменшення процесу фотозбудження і, відповідно, до зниження фоточутливості. Виявлено, що час життя неосновних носіїв змінюється обернено пропорційно з інтенсивністю світла, що підтверджує керовану дефектами фотопровідність тонких плівок CdTe.



**Рис. 3.** Залежності розрахованих енергій активації рухливості від освітленості для тонких плівок CdTe різної товщини:  
 ● – товщина 200 нм, підкладка – слюда;  
 ◆ – товщина 320 нм, підкладка – поліроване скло;  
 ○ – товщина 540 нм, підкладка – слюда.

Варто звернути увагу, що отримані енергії активації для плівок, отриманих на полірованому склі, близькі між собою та знаходяться в діапазоні 0,012–0,05 eV. У той же час, для плівок, отриманих на свіжих сколах слюди, отримано значно менші значення енергій активації рухливості, які становлять 0,009–0,03 eV [20, 24].

Незважаючи на те, що плівки CdTe мають високу фоточутливість, вони також мають деякі недоліки. Наприклад, CdTe є токсичним матеріалом, тому необхідні особливі заходи безпеки при його виробництві та застосуванні. Крім того, плівки CdTe можуть бути чутливими до радіації, що може привести до деградації їх ефективності [2, 3]. Однак, великі досягнення в технології виготовлення плівок CdTe в останні роки дозволяють зменшити ці недоліки.

Також варто зазначити, що плівки CdTe мають високу ефективність в збиранні світла з малими зонами збору, тобто вони можуть бути використані для створення тонких фотоелементів. Це дає можливість створювати більш компактні сонячні панелі з високою ефективністю.

Узагальнюючи можемо сказати, фоточутливість плівок CdTe залежить від спектральної області, товщини та якості матеріалу, а також від технології їх виготовлення.

## V. Тонкоплівкові гетероструктури CdTe в сонячній енергетиці

Тонкоплівкові ГС CdTe є важливими компонентами сучасних сонячних батарей, які виробляють електроенергію з сонячного світла. Вони складаються з декількох шарів різних

напівпровідників, які з'єднані між собою. Зазвичай складаються із шару CdS і CdTe. Це дозволяє досягти високого коефіцієнта конверсії енергії (ККЕ) – ефективності перетворення сонячної енергії на електричну енергію.

Тонкоплівкові ГС мають декілька переваг у порівнянні з іншими технологіями СЕ. Вони мають високу ККЕ, добре переносять вплив високих температур і високих рівнів освітленості, а також мають низьку вартість виробництва.

Одним з головних виробників тонкоплівкових ГС на основі CdTe є компанія First Solar. Вона використовує процес виробництва на основі тонкої плівки, який дозволяє виготовляти елементи з низькою вартістю та високим ККЕ. За даними компанії, її СЕ мають ККЕ більше 18%, що робить їх одними з найбільш ефективних вироблених елементів [2].

Основними перевагами використання тонкоплівкових ГС CdTe в сонячній енергетиці є їх висока ефективність, низька вартість, простота виробництва, висока стійкість та гнучкість. ГС CdTe мають високу ефективність перетворення сонячної енергії в електричний струм, що дозволяє отримувати більше електричної потужності за ті самі розміри батареї порівняно з іншими матеріалами. Крім того, CdTe є дешевим напівпровідником, що знижує вартість виробництва сонячних батарей, зокрема тонкоплівкових ГС на основі CdTe. ГС CdTe можна виробляти за допомогою процесів нанесення тонких плівок, таких як хімічне осадження з розчину та фізичне осадження з парів, що дозволяє отримувати високоякісні плівки за низьких температур [29, 37]. Тонкоплівкові ГС CdTe мають добру стійкість до впливу навколишнього середовища та термічного стресу, що забезпечує довговічність сонячних батарей [38]. ГС CdTe можна використовувати в гнучких сонячних батареях, що дозволяє створювати СЕ з високою ефективністю, які можна застосовувати в різних галузях, таких як транспорт, аерокосмічна техніка, медицина та інші.

Незважаючи на багато переваг, тонкоплівкові ГС CdTe мають певні недоліки. Наприклад, низька або незадовільна стійкість ГС до впливу вологи, кислот, що може спричинити погіршення ефективності сонячних батарей. Іншим важливим аспектом використання тонкоплівкових ГС CdTe є проблема токсичності кадмію, який є одним з компонентів гетероструктури. Крім того, використання кадмію може спричинити екологічні проблеми під час знешкодження відходів від сонячних батарей [3]. Незважаючи на це, проблеми з токсичністю кадмію та стійкістю ГС до впливу зовнішніх факторів потребують додаткових досліджень та розробки ефективних заходів з мінімізації негативних впливів.

Крім того, існують альтернативні матеріали для створення сонячних батарей, наприклад, перовскітні матеріали [39]. Ці матеріали мають високу ефективність конвертації сонячної енергії в електричну, а також є менш токсичними, ніж кадмій. Однак, перовскіти мають свої власні недоліки, такі як недостатня стійкість до впливу вологи, кислот та інших факторів.

Одним з головних викликів тонкоплівкових ГС CdTe є відносна низька стійкість до дії ультрафіолетового випромінювання та високих температур. Це може призвести до зниження ККЕ та скорочення терміну експлуатації СЕ. Для зменшення цього ефекту, можуть бути використані різні методи захисту, такі як застосування захисних покриттів або використання стабілізаторів [37, 38]. Також існує певна обмеженість у товщині плівок CdTe, що може обмежити ефективну товщину елемента і, отже, його ККЕ. Для вирішення цього питання можна використовувати різні технології зміцнення плівок або використовувати тонкі ГС з іншими напівпровідниками, такими як CuInGaSe<sub>2</sub> (CIGS) [40].

Напівпровідники на основі CdTe мають перевагу перед Si у тому, що вони більш ефективно поглинають оптичне випромінювання, що дозволяє виготовляти дешевші тонкоплівкові СЕ. Зокрема, середня ефективність ГС n-CdS/p-CdTe становить приблизно 16% при умовах освітлення AM1,5 і температурі 300 К, що майже вдвічі менше теоретичного значення [2].

Вважається, що однією з причин низької ефективності СЕ на основі CdTe є короткий час життя неосновних носіїв  $\tau_s$ , який призводить до високої швидкості рекомбінації  $\nu_s$  на межах розділу компонентів ГС та зерен полікристалічної плівки CdTe. Зменшення швидкості рекомбінації  $\nu_s$  повинно призвести до поліпшення основних параметрів сонячних елементів, таких як струм короткого замикання  $J_{sc}$  та напруга холостого ходу  $V_{oc}$ . Це підтверджується результатами експериментів, які показали збільшення напруги холостого ходу  $V_{oc}$  з 0,84 до 0,93 В при заміні полікристалічної плівки CdTe на монокристалічну підкладку в гетероструктурних сонячних елементах n-CdS / p-CdTe [41]. Низькі значення струму короткого замикання та коефіцієнта корисної дії  $\eta$  цих зразків пов'язані з високим опором базових підкладок p-CdTe, концентрація вільних дірок в яких при 300 К не перевищує  $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Покращення структурної досконалості фотоактивного шару p-CdTe в тонкоплівкових СЕ n-CdS / p-CdTe дозволило підняти  $\eta$  до  $\sim 21\%$ , при цьому  $V_{oc}$  зросла всього на 0,03 В [42, 43].

У цьому випадку підвищення ефективності пов'язане зі збільшенням струму короткого замикання ( $J_{sc}$ ), яке спричинене значним зменшенням послідовного опору ГС через тонкий шар p-CdTe. Залежність струму короткого замикання від рівня освітленості ( $L$ ) є лінійною і змінюється на більше ніж чотири порядки. Напруга холостого ходу ( $V_{oc}$ ) залежить від  $lg L$  при низьких рівнях освітленості, а при великих рівнях насичується, як показано на рис. 4.

Мале збільшення напруги холостого ходу  $V_{oc}$  свідчить про те, що головним фактором, що впливає на час життя неосновних носіїв  $\tau_s$ , є швидкість рекомбінації на межі розділу компонентів ГС. Щоб зменшити цю швидкість рекомбінації  $\nu_s$  на 1-2 порядки, можна застосовувати різні методи пасивації поверхні монокристалів і крупнозернистих напівкристалічних плівок [38,44].



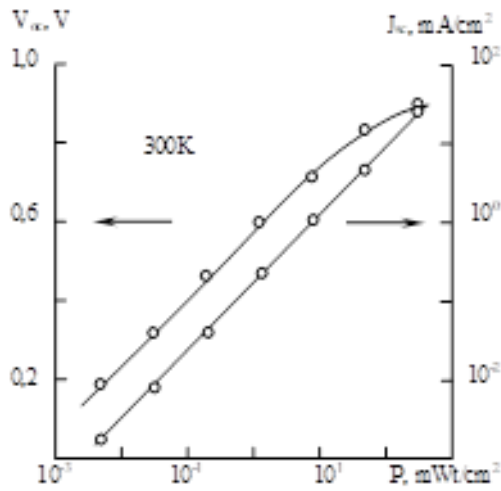


Рис. 4. Залежності  $J_{sc}$  та  $V_{oc}$  для поверхнево-бар'єрних діодів на CdTe:O субстраті від густини потоку випромінювання сонячної енергії.

Внутрішня квантова ефективність гетероструктури CdS/CdTe значно зростає зі збільшенням часу життя носіїв заряду та питомого опору шару CdTe, але залишається на рівні 17-18,5% при значеннях часу життя в межах  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  с. Щоб підвищити ефективність до теоретичної межі (28-30%), необхідно збільшити час життя носіїв заряду в шарі CdTe до близько  $10^{-6}$  с та збільшити його товщину до кількох десятків мікрометрів. Однак це не економічно обгрунтовано [45].

Аналіз оптичних втрат у тонкоплівкових СЕ CdS/CdTe з провідним прозорим шаром ITO або SnO<sub>2</sub> показав, що навіть при 100% ефективності фотоелектричного перетворення в CdTe з мінімальною товщиною шарів CdS та ITO густина струму короткого замикання  $J_{sc}$  не може перевищувати більше, ніж 60% від максимального можливого значення [46]. Якщо потоншувати шари CdS і ITO нижче 30-50 нм, то оптичні втрати знизити неможливо, більший ефект можна досягти покращуючи прозорість фронтального електрода, використовуючи для цього інші матеріали, наприклад, Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>, Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>, ZnO. Навіть при повній відсутності поглинання в CdTe оптичні втрати при товщині CdS 50 нм понижують струм короткого замикання на приблизно 35%. Головною причиною такого пониження є фундаментальне поглинання в CdS (при  $\lambda < 500$  нм), яке не може бути усунено без заміни CdS напівпровідником з ширшою забороненою зоною [3, 47].

Можна впевнено стверджувати, що дослідження тонкоплівкових ГС CdTe та інших матеріалів для створення сонячних батарей є важливим напрямком науки та технології, оскільки вони можуть допомогти зменшити залежність від викопних видів палива та зменшити викиди вуглецю в атмосферу. Крім того, розвиток сонячної енергетики може створити нові робочі місця та допомогти розвивати економіку. А для досягнення високого ККЕ та ефективності СЕ на основі CdTe, можна використовувати різні методи оптимізації, такі як оптимізація товщини та складу шарів ГС, оптимізація геометрії елемента,

використання різних методів контролю якості та розвиток нових методів виробництва. Також, важливо забезпечувати ефективну рециклізацію СЕ на основі CdTe, що допоможе зменшити вплив на довкілля та сприятиме створенню стійкого та екологічно чистого сонячного енергетичного сектору.

## Висновок

Матеріал CdTe має потрібні властивості для створення тонкоплівкових сонячних елементів: висока ефективність перетворення енергії, довговічність, економічність та легкість у виготовленні. Це робить його привабливим матеріалом для виробництва СЕ. Коефіцієнт провідності, рухливість електронів, коефіцієнт конверсії енергії, прозорість, абсорбція світла, коефіцієнт розсіювання, електрична провідність, висока поглинальна здатність в області близької інфрачервоної та видимої областей спектру, добра хімічна та механічна стійкість та інші властивості CdTe відіграють важливу роль у виробництві тонкоплівкових СЕ на його основі.

Фоточутливість плівок CdTe залежить від кількох чинників, серед яких важливими є метод вирощування плівок, чистота матеріалу та його структура. Ці плівки мають високу чутливість до світла та високоенергетичного випромінювання, що дозволяє їх використовувати в різних пристроях, зокрема в сонячних батареях. Однак, фоточутливість плівок CdTe також залежить від наявності дефектів та рівня домішок у матеріалі, тому її можна поліпшити за допомогою відповідних методів обробки та оптимізації.

Незважаючи на те, що ефективність тонкоплівкових сонячних модулів з CdTe при широкомасштабному виробництві становить всього 10–11%, що значно менше, ніж ефективність модулів на кремнієвих пластинах (13–17%), все ж таки існує можливість значного покращення ефективності CdTe СЕ за певних комбінацій параметрів. Товщина поглинаючого шару, час життя неосновних носіїв заряду, питомий опір та концентрація некомпенсованих акцепторів в CdTe є ключовими факторами, які можуть значно впливати на покращення ефективності [48].

Однак, щоб досягти найвищої ефективності та забезпечити стійкість до шкідливих факторів, необхідно продовжувати розробку технологій виробництва тонкоплівкових ГС на основі CdTe. Це включає розробку нових методів захисту від ультрафіолетового випромінювання та високих температур, покращення механічної стійкості плівок, зменшення використання кадмію та забезпечення стійкості до шкідливих впливів довготривалої експлуатації.

Дослідження та розробки, проведені протягом останніх десяти років, дозволили створити технологію масового виробництва сонячних модулів на основі CdTe, що можуть конкурувати з кремнієвими модулями за компромісної ефективності та вартості. Це сприяє будівництву потужних сонячних

електростанцій, також прогнозується швидкий розвиток цієї галузі промисловості і надалі.

**Мазур Т.М.** – доктор філософії, асистент кафедри загальної та прикладної фізики;  
**Мазур М.П.** – доцент, к.ф.-м.н., директор Інституту архітектури, будівництва та енергетики;  
**Вакалюк І.В.** – аспірантка кафедри фізики і хімії твердого тіла.

- [1] M.A. Green, E.D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, & A.W. Ho-Baillie, *Solar cell efficiency tables (Version 55)*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28(1), 3 (2020); <https://doi.org/10.1002/pip.3228>.
- [2] T.M. Mazur, V.V. Prokopiv, M.P. Mazur, U.M. Pysklynets, *Solar cells based on CdTe thin films*, Physics and chemistry of solid state, 22(4), 817 (2021); <https://doi.org/10.15330/pcss.22.4.817-827>.
- [3] L.A. Kosyachenko, & E.V. Grushko, *Prospects for the Use of Thin-Film Cadmium Telluride in Solar Energetics*, Ukr. Phys. Journ., Rev., 7(1), 3 (2012); <http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/reviews/7/1/r070101pu.pdf>.
- [4] B.E. McCandless, *CdTe solar cells: Processing limits and defect chemistry effects on open circuit voltage*, MRS Online Proceedings Library, 1538(1), 249 (2013); <https://doi.org/10.1557/opl.2013.1017>.
- [5] M.A. Green, E.D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, & A. W. Ho-Baillie, *Solar cell efficiency tables (Version 55)*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28(1), 3 (2020); <https://doi.org/10.1002/pip.3228>.
- [6] M.A. Green, E.D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, & H. Xiaojing, *Solar cell efficiency tables (Version 59)*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 30(1), 1062 (2021); <https://doi.org/10.1002/pip.3506>.
- [7] V.P. Makhniy, M.M. Berezovskiy, O.V. Kinzerska, M.P. Mazur, T.M. Mazur, V.V. Prokopiv, *Prospects of using surface and barrier CdTe-diodes in solar energy*, Sensor Electronics and Microsystem Technologies, 16(2), 42 (2019); <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2019.2.171227>.
- [8] B. E McCandless, & J. R. Sites, *Cadmium telluride solar cells*, Handbook of photovoltaic science and engineering, 600 (2011); <https://kashanu.ac.ir/Files/Content/Handbook.pdf>.
- [9] D.V. Korbutyuk, S.V. Melnichuk, E.V. Korbut, & M.M. Borisyuk, (2000). Cadmium telluride: impurity-defect states and detector properties. (Ivan Fedorov: Kyiv, 198 (2000)).
- [10] D.V. Korbutiak, O.V. Kovalenko, S.I. Budzuliak, S.M. Kalytchuk, I.M. Kupchak, *Light-rectifying properties of quantum dots of semiconductor compounds A<sub>2</sub>B<sub>6</sub>*, Ukrainian Physical Journal, 7(1), 95 (2012); <http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/reviews/7/1/r070103pu.pdf>.
- [11] R. Grill, & A. Zappettini, *Point defects and diffusion in cadmium telluride*. Progress in crystal growth and characterization of materials, 48, 209 (2004); <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2005.06.001>
- [12] V.V. Prokopiv, I.V. Horichok, V.V. Prokopiv, & L.V. Turovska. Point defects of Cadmium, Tin and Lead Tellurides. Ivano-Frankivsk, 248 p. (2016); <http://hdl.handle.net/123456789/2541>.
- [13] J. H. Greenberg, *P–T–X phase equilibrium and vapor pressure scanning of non-stoichiometry in the Cd–Zn–Te system*, Progress in crystal growth and characterization of materials, 47(2-3), 196 (2003); <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2005.02.001>.
- [14] R. Fang, & R.F. Brebrick, *CdTe I: Solidus curve and composition-temperature-tellurium partial pressure data for Te-rich CdTe (s) from optical density measurements*, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 57(4), 443 (1996); [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(95\)00251-0](https://doi.org/10.1016/0022-3697(95)00251-0).
- [15] D.Y. Goswami, S. Vijayaraghavan, S. Lu, & G. Tamm, *New and emerging developments in solar energy*, Solar energy, 76(1-3), 33 (2004); [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00103-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00103-8).
- [16] H. Okamoto, & H. Okamoto, *Phase diagrams for binary alloys*, 314, Materials Park, OH: ASM international, (2000); [https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/57751G\\_Frontmatter.pdf](https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/57751G_Frontmatter.pdf).
- [17] O. Knacke, & K. Hesselmann, *Thermochemical properties of inorganic substances*, Springer, (1991); <https://worldcat.org/en/title/644053530>.
- [18] T. Mazur, V. Prokopiv, L. Turovska, *Quasi-chemistry of intrinsic point defects in cadmium telluride thin films*, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 671(1), 85 (2018); <https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1542088>.
- [19] L. Tsakalakos, J. Balch, J. Fronheiser, B.A. Korevaar, O. Sulima, & J. Rand, *Silicon nanowire solar cells*, Applied physics letters, 91(23), 233117 (2007); <https://doi.org/10.1063/1.2821113>.
- [20] V.V. Prokopiv, O.B. Kostyuk, B.S. Dzundza T.M. Mazur, L.V. Turovska, O.M. Matkivskyi, M.V. Deychakivskyi, *Electrical properties of CdTe<Ca> thin layers*, Physics and chemistry of solid state, 20(4), 372 (2019); <https://doi.org/10.15330/pcss.20.4.372-375>.
- [21] O. Madelung, (Ed.), *Semiconductors: group IV elements and III-V compounds*, Springer Science & Business Media, (2012); <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45681-7>.
- [22] V. Prokopiv, I. Horichok, T. Mazur, O. Matkivsky, L. Turovska, *Thermoelectric materials based on samples of microdispersed PbTe and CdTe*, Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference "Nanomaterials: Applications and Properties", NAP 2018, (2018); <https://doi.org/10.1109/NAP.2018.8915357>.

- [23] B. Naidych, T. Parashchuk, I. Yaremiy, M. Moyseyenko, O. Kostyuk, O. Voznyak, ... & L. Nykyruy, *Structural and thermodynamic properties of Pb-Cd-Te thin films: Experimental study and DFT analysis*, Journal of Electronic Materials, 50, 580-591 (2021); <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08561-5>.
- [24] T. Mazur, M. Mazur, *Thickness Dependence of the Kinetic Parameters in CdTe and PbTe Thin Films*, Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference "Nanomaterials: Applications and Properties", NAP 2022, (2022); <https://doi.org/10.1109/NAP55339.2022.9934352>.
- [25] T. Mazur, M. Slyotov, M. Mazur, O. Slyotov, *Heterolayers of Hexagonal  $\alpha$ -CdTe*, Journal of Nano- and Electronic Physics, 14(5), 05029 (2022); [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(5\).05029](https://doi.org/10.21272/jnep.14(5).05029).
- [26] R. Grill, J. Franc, P. Hoschl, I. Turkevych, E. Belas, P. Moravec, ... & K.W. Benz, *High-temperature defect structure of Cd- and Te-rich CdTe*, IEEE Transactions on Nuclear Science, 49(3), 1270 (2002); <https://doi.org/10.1109/TNS.2002.1039650>.
- [27] D.M. Freik, V.M. Chobanyuk, O.S. Krynytskyi, & I.V. Horichok, *Photovoltaic transformers of solar irradiation based on cadmium telluride. Part II. Achievements and State of Art. (Review)*. Physics and Chemistry of Solid State, 13(3), 744 (2012); <http://page.if.ua/uploads/pcss/vol13/!1303-29.pdf>.
- [28] T.M. Mazur, V.P. Makhniy, V.V. Prokopiv, M.M. Slyotov, *Thermal annealing effect on optical properties of the cadmium telluride films*, Journal of Nano- and Electronic Physics. 9(5), 05047 (2017); [http://doi.org/10.21272/jnep.9\(5\).05047](http://doi.org/10.21272/jnep.9(5).05047).
- [29] S. H. Wei, S. B. Zhang, & A. Zunger, *First-principles calculation of band offsets, optical bowings, and defects in CdS, CdSe, CdTe, and their alloys*, Journal of applied Physics, 87(3), 1304 (2000); <https://doi.org/10.1063/1.372014>.
- [30] B. Dzundza, O. Kostyuk, & T. Mazur, *Software and Hardware Complex for Study of Photoelectric Properties of Semiconductor Structures*, IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 635 (2019); <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783544>.
- [31] H.S. Patel, J.R. Rathod, K.D. Patel, V.M. Pathak, *Structural and surface studies of vacuum evaporated Cadmium Telluride thin films*, American J Mater Sci & Tech, 1, 11 (2012); <https://doi.org/10.7726/ajmst.2012.1002>.
- [32] M.A. Green, K. Emery, D.L. King, S. Igari, & W. Warta, *Solar cell efficiency tables (version 20)*, Progress in photovoltaics, 10(5), 355 (2002); <https://doi.org/10.1002/pip.453>.
- [33] L. Nykyruy, Y. Saliy, R. Yavorskyi, Y. Yavorskyi, V. Schenderovsky, G. Wisz, & S. Górný, *CdTe vapor phase condensates on (100) Si and glass for solar cells*. In 2017 IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP), 01PCSI26-1, IEEE (2017); <https://doi.org/10.1109/NAP.2017.8190161>.
- [34] T. Mazur, M. Slyotov, M. Mazur, V. Prokopiv, O. Kinzerska, O. Slyotov, *Features of the cadmium chalcogenide substrates with surface nanostructure*, Materials Today: Proceedings, (2021); <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.112>.
- [35] S. Chander and M.S. Dhaka, *Effect of thickness on physical properties of electron beam vacuum evaporated CdZnTe thin films for tandem solar cells*, Physica E, 84, 112 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.05.045>.
- [36] P.K. Kalita, *Temperature dependence of dc photoconductivity in CdTe thin films*, Pramana, 60(6), 1247 (2003); <https://www.ias.ac.in/public/Volumes/pram/060/06/1247-1257.pdf>.
- [37] P.M. Gorley, V.P. Makhniy, P.P. Horley, Yu.V. Vorobiev and J. González-Hernández, *Surface-Barrier Solar Cells Based On Monocrystalline Cadmium Telluride with the Modified Boundary*, Solar Energy [Internet], (2010, Feb 1); <http://dx.doi.org/10.5772/8061>.
- [38] Mykhailo Slyotov, Tetiana Mazur, Volodymyr Prokopiv, Oleksii Slyotov, Myroslav Mazur, *Sources of optical radiation based on ZnTe/ZnSe/ZnS heterostructures*, Materials Today: Proceedings (2022); <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.476>.
- [39] M.I. Elsmami, N. Fatima, M.P.A. Jallorina, S. Sepeai, M.S. Su'ait, N. Ahmad Ludin, M.A. Mat Teridi, K. Sopian, M.A. Ibrahim, *Recent Issues and Configuration Factors in Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells towards Large Scaling Production*, Nanomaterials, 11, 3186 (2021); <https://doi.org/10.3390/nano11123186>.
- [40] V.K. Kamble, & V.B. Pujari, *Electrical and micro-structural properties of cadmium chalcogenides: A comparative study*, Int. J. Emerg. Technol. Appl. Eng., 5, 172 (2015); <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16313665>.
- [41] J.N. Duenow, J.M. Burst, D.S. Albin, D. Kuciauskas, S.W. Johnston, R.C. Reedy, & W.K. Metzger, *Single-crystal CdTe solar cells with Voc greater than 900 mV*, Applied Physics Letters, 105(5), 053903 (2014); <https://doi.org/10.1063/1.4892401>.
- [42] M.O. Reese, C.L. Perkins, J.M. Burst, S. Farrell, T.M. Barnes, S.W. Johnston, & W. K. Metzger, *Intrinsic surface passivation of CdTe*, Journal of Applied Physics, 118(15), 155305 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4933186>.
- [43] T.M. Mazur, M.M. Slyotov, V.V. Prokopiv, O.M. Slyotov, M.P. Mazur, *Light emitters based on II-VI chalcogenides with nanostructured surface*, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 752, 95 (2022); <https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2091276>.
- [44] V.P. Makhniy, *Influence of thermal annealing on physical properties of surface layers of monocrystalline cadmium telluride*, Surface, X-rays, synchrotron and neutron investigation, 2, 108 (2007); <https://naukarus.com/vliyanie-termicheskogo-otzhiga-na-fizicheskie-svoystva-poverhnostnyh-sloev-monokristallicheskogo-tellurida-kadmiya>.

- [45] X. Mathew, L.A. Kosyachenko, V.V. Motushchuk, O.F. Sklyarchuk, *Requirements imposed on the electrical properties of the absorbed layer in CdTe-based solar cells*, J. Materials Science: Materials in Electronics, 18, 1099 (2007); <https://doi.org/10.1007/s10854-007-9317-2>.
- [46] Nowshad Amin, et al., *Encyclopedia of sustainable technologies*, 11, (2017); <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10092-2>.
- [47] L. Kosyachenko, *Solar Energy*, edited by R.D. Rugescu, Intech, Croatia, 105 (2010); [https://cdn.intechopen.com/pdfs/8547/InTech-Chapter\\_download.pdf](https://cdn.intechopen.com/pdfs/8547/InTech-Chapter_download.pdf).
- [48] M. A.Green, E. D.Dunlop, J.Hohl-Ebinger, M.Yoshita, N.Kopidakis, & A. W.Ho-Baillie, *Solar cell efficiency tables (Version 55)*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28(1), 3 (2021); <https://doi.org/10.1002/pip.3228>.

T.M. Mazur<sup>1</sup>, M.P. Mazur<sup>1</sup>, I.V. Vakaliuk<sup>2</sup>

## Solar cells based on CdTe thin films (II Part)

<sup>1</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas Ivano-Frankivsk, Ukraine, [tetiana.mazur@nung.edu.ua](mailto:tetiana.mazur@nung.edu.ua);

<sup>2</sup>Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

This paper discusses the use of semiconductor solar cells based on thin-film cadmium telluride (CdTe) in modern energy production. The advantages and disadvantages of using CdTe thin-film solar cells are analyzed, and arguments are presented in favor of the implementation of mass production technologies for CdTe solar modules, which can compete with silicon analogs in terms of compromise between efficiency and cost. The physical and chemical properties of the binary Cd-Te system are described, and the relationship between the physical, chemical, electrical, and optical properties of CdTe is analyzed, making it attractive for use in thin-film solar cells. Special attention is given to the investigation of photovoltaic properties, which are important parameters for determining photoconductivity, and the advantages and disadvantages of CdTe film photovoltaic properties are discussed. CdTe thin-film heterostructures (HSs), which are important components of modern solar cells, are considered, and their main advantages and disadvantages are described. It is argued that simple methods of manufacturing and forming HSs, which do not require complex and expensive equipment, are an important advantage of CdTe-based solar cell technology.

**Keywords:** solar elements, thin films, CdTe, photosensitivity, heterostructures.