

Т.М. Мазур¹, В.В. Прокопів², М.П. Мазур¹, У.М. Писклинець³
Сонячні елементи на основі тонких плівок CdTe

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна,
tetiana.mazur@nung.edu.ua*

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна,
Івано-Франківський національний медичний університет, Івано-Франківськ, Україна*

Проведено аналіз застосування в енергетиці напівпровідникових сонячних елементів на основі тонкоплівкового телуриду кадмію (CdTe). Показано, що переваги тонкоплівкової технології й самого CdTe, як прямозонного напівпровідника, відкривають перспективу широкомасштабного виробництва конкурентоспроможних CdTe сонячних модулів. Обговорено фізико-технічні проблеми збільшення коефіцієнта корисної дії гетероструктурних сонячних елементів CdS/CdTe, який при масовому виробництві значно поступається теоретично можливому значенню. Розглядається стан тонкоплівкових сонячних елементів на основі CdTe, які роблять CdTe відповідним матеріалом для наземного фотоелектричного перетворення сонячної енергії, історичний розвиток сполуки CdTe, прикладне застосування тонких плівок CdTe, основні методи та стратегії виготовлення приладів, аналіз роботи приладів, а також фундаментальні технічні проблеми, пов'язані з майбутнім розвитком тонкоплівкових модулів на основі кадмій телуриду.

Ключові слова: тонкі плівки, сонячні елементи, CdTe, фотоелектричні елементи, модулі.

Подано до редакції 27.09.2021; прийнято до друку 29.12.2021.

Зміст

Вступ

1. Переваги CdTe для використання у сонячних фотоелектричних технологіях
2. Публікації, присвячені дослідженню властивостей CdTe
3. Історичний розвиток сполуки CdTe
4. Прикладне застосування тонких плівок CdTe
5. Модулі на основі CdTe
6. Промислові системи із застосуванням телурид кадмієвих модулів
7. Безпечна переробка відпрацьованих модулів
8. Майбутнє сонячних елементів на основі кадмій телуриду

Висновки

Вступ

Викопні види палива, такі як вугілля, нафта, природний газ, що досі покривали попит на енергію в усьому світі, через виснаження запасів використовуються все рідше. Крім того, їхнє видобування й споживання незворотно впливає на

екологічні умови, що веде до загрози катастрофічних змін клімату на Землі [1]. З кожним роком відновлювальні джерела енергії отримують все більшу підтримку на рівні держав, які різними методами намагаються стимулювати їх розвиток і, відповідно, прагнуть стати більш енергетично незалежними. Найбільш перспективним у цьому

напрямку є освоєння енергії Сонця, яке є невичерпним джерелом теплової та фотоелектричної енергії.

Розвиток відновлювальної енергетики та перехід на ефективні альтернативні джерела енергії продовжує стрімко розвиватися і є важливим пріоритетом для кожної держави, щоб запобігти виникненню енергетичної кризи. Найбільш поширеними стали фотоелектричні модулі, головною перевагою яких є використання необмеженого та екологічно чистого джерела сонячної енергії.

I. Переваги CdTe для використання у сонячних фотоелектричних технологіях

Фотоелектричне перетворення енергії відіграє важливу роль в просуванні енергетичних рішень [2]. Існує три основних покоління фотоелектричних елементів (ФЕ): кремнієві, тонкоплівкові та органічні сонячні елементи (рис.1) [3]. На даний час найбільш часто використовувані сонячні елементи (СЕ) це ФЕ на основі кремнієвих технологій.

Альтернативою цим технологіям є телурид кадмію (CdTe), який привертає окрему увагу у порівнянні з іншими матеріалами через його оптимальну ширину забороненої зони 1,5 eV при кімнатній температурі, високий коефіцієнт поглинання ($>10^5$ /см) у видимій області сонячного спектру і високу хімічну стабільність. CdTe має кубічну структуру цинкової обманки з періодом ґратки 6,481 Å [4]. Така ширина забороненої зони оптимально узгоджена зі спектром Сонця для перетворення енергії у фотоелектричних системах [5]. Крім того, CdTe також характеризується ще й високим коефіцієнтом оптичного поглинання; при активній товщині близько 2 мкм більше 99% падаючого сонячного світла поглинається. Тому тонкі плівки CdTe високої якості вважаються ідеальним оптичним матеріалом і широко використовуються в різних електронних та оптоелектронних пристроях великої площі, таких як СЕ, детектори Х- та γ -випромінювання,

фотодетектори, світлодіоди, лазери і т.д. [6,7]. В даний час інтерес до цього матеріалу відновився у зв'язку з пошуком більш дешевих технологій для виробництва сонячних батарей великих розмірів. Теоретичне значення ефективності СЕ на основі CdTe становить близько 33%, а практична ефективність близько 22% тонкоплівкових фотоелектричних матеріалів [8].

Прості способи виготовлення й формування бар'єрної структури, що не потребують складного й дорогого обладнання, – важлива перевага технології сонячних елементів на основі CdTe [2,9,10].

II. Публікації, присвячені дослідженню властивостей CdTe

Ще до 2010 року тонкоплівкові елементи на основі CdTe мали коефіцієнт корисної дії (ККД), що не перевищував 17%, а за попередні 7 років ефективність зросла до 22,5% [8]. Це пов'язано з тим, що провідні виробники сонячних батарей орієнтовані на зниження їх вартості. Вартість ~ 1 \$/Вт при 16,7% в 2001 році, знизилася до $\sim 0,75$ \$/Вт при 22,1% в 2016 році, а в 2019 році у First Solar Inc. становила $\sim 0,67$ \$/Вт при ефективності близько 25%. Прогнозується подальше зниження собівартості та зростання ефективності при збереженій структурі комірки [10].

Кількість публікацій, присвячених дослідженню властивостей CdTe та індексованих у міжнародній наукометричній базі Scopus складає 23428 документів і різко зростає в останні роки. Україна знаходиться в числі 10 країн, де найбільш інтенсивно досліджують властивості CdTe (2020) (рис.2, рис.3).

На рис. 4 показано 25-річний розвиток підвищення ефективності комірок і модулів з моменту публікації першої версії таблиць в 1993 році [12]. Від січня 1993 року журнал Progress in Photovoltaics публікує 6 щомісячних списків з найвищими підтвердженими показниками ефективності для ряду технологій фотоелектричних елементів і модулів.



Рис. 1. Класифікація сонячних фотоелектричних технологій з діапазоном досягнутої ефективності [3].

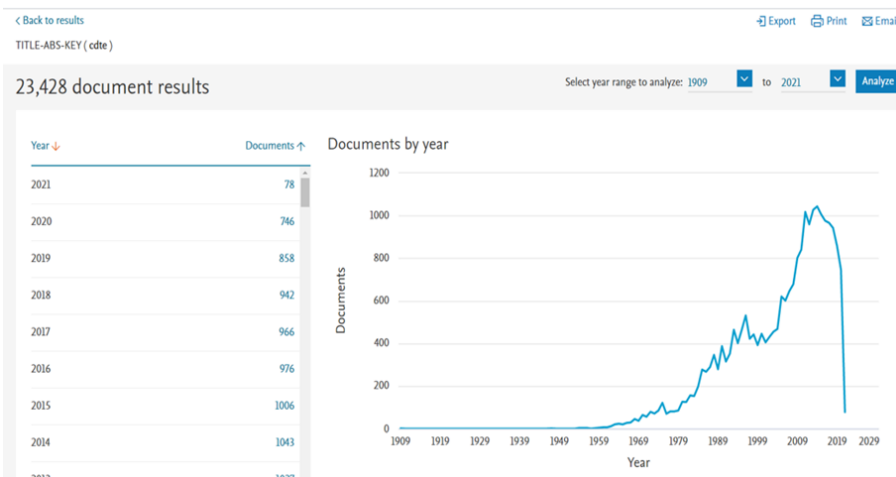


Рис. 2. Кількість публікацій із роками за ключовим тегом «CdTe», які опубліковані у журналах, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus [11].

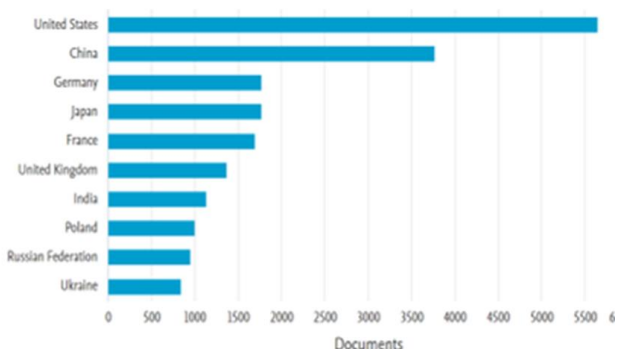


Рис. 3. Перелік країн, у яких найбільш інтенсивно досліджують властивості CdTe. Вибірка зроблена на основі аналітичних можливостей бази Scopus із врахуванням країн авторів публікацій, присвячених дослідженню CdTe [11].

Такі рекомендації не лише забезпечують авторитетний огляд сучасного стану, але й спонукають дослідників до пошуку нових результатів. Найбільш помітним в останні роки є прогрес в області досліджень комірок на основі CdTe, поряд із CIGS (діселенід міді-індію-галію) та mc-Si [12].

Значення квантової ефективності та вольт-амперні характеристики (ВАХ) таких комірок наведено на рис. 5. Згідно рис. 5 (а), найвищою ефективністю модуля на основі CdTe великої площі (2,4 м², виготовленого First Solar), є 19,0% [13].

Вища температурна і радіаційна стабільність CdTe, у порівнянні із Si і GaAs [14], дозволяє використовувати СЕ на основі телуриду кадмію при підвищених температурах і значному потоці йонізуючого випромінювання. Можливою альтернативою CdTe із аналогічною шириною забороненої зони є арсенід галію і його тверді розчини, однак, отримати їх значно складніше через малу кількість елемента Ga в природі [14].

Підсумовуючи, можна констатувати, що в останні роки все більш актуальними стають дослідження, присвячені переходу від застосування об'ємних фотоелектричних матеріалів (моно та полікристалічних) до тонкопліткових. Актуальними є дослідження технології тонкопліткових матеріалів на

основі CdTe, а саме розробка дешевих та надійних технологій, а також дослідження, присвячені вивченню оптичних та фотоелектричних властивостей багат шарових тонкопліткових структур на основі CdTe для опто- та фотоелектроніки [7,15].

III. Історичний розвиток сполуки CdTe

CdTe був вперше хімічно синтезований французьким хіміком Марготте в 1879 році [16], але з'явився в якості життєздатного електронного матеріалу в 1947 році, коли Фреріхс синтезував кристали CdTe реакцією парів Cd і Te в атмосфері водню і виміряв фотопровідність кристалу [17]. Першооснови для розуміння електронної природи CdTe виникли з досліджень монокристалів, отриманих з допомогою зонного очищення. У 1954 році Дженні і Бубі [18] вперше повідомили, що провідність р-типу і n-типу може бути отримана в CdTe шляхом легування сторонніми домішками. Незабаром після цього Крюгер і де Нобель [19] показали, що тип провідності також можна регулювати шляхом зміни стехіометрії Cd-Te. Надлишок Cd дає n-тип, а надлишок Te – р-тип провідності, аналогічний PbS, PbSe і PbTe. У 1959 р де Нобель [20] запропонував діаграму р-T-x системи Cd-Te і її зв'язок із внутрішньою та зовнішньою провідністю за допомогою включення стороннього атома. Згідно діаграми було припущено існування двох електронних рівнів, пов'язаних з вакансіями Cd, і одного з міжвузловим Cd для пояснення вимірюваних змін провідності за різних температур і парціальних тисків Cd. Крім того, були оцінені електронні рівні, пов'язані з In в якості легуючої домішки n-типу і Au в якості легуючої домішки р-типу [20].

Лоферскі вперше запропонував використовувати CdTe для фотоелектричного перетворення сонячної енергії в 1956 році [21]. Хоча методи контролю провідності n і р-типу в кристалах CdTe були встановлені до 1960 року, обмежені дослідження

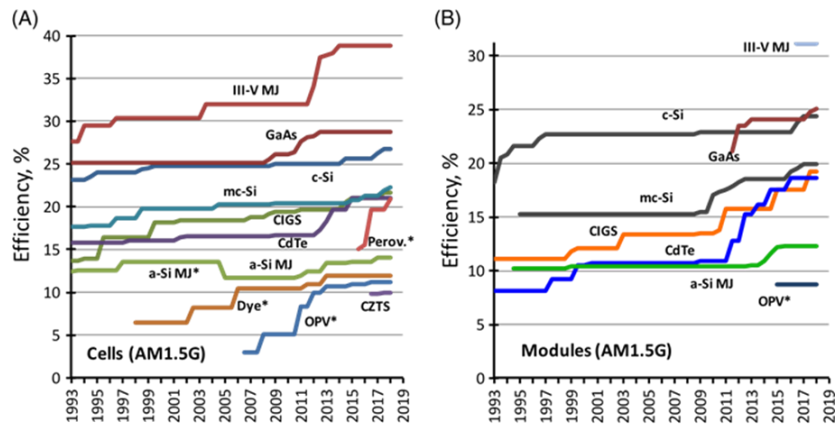


Рис. 4. Двадцять п'ять років прогресу: А – найвища підтверджена ефективність для комірок площею $\geq 1 \text{ cm}^2$, виготовлених з використанням сучасних технологій. В – найвищі підтверджені результати для модулів розміром $\geq 800 \text{ cm}^2$ [12].

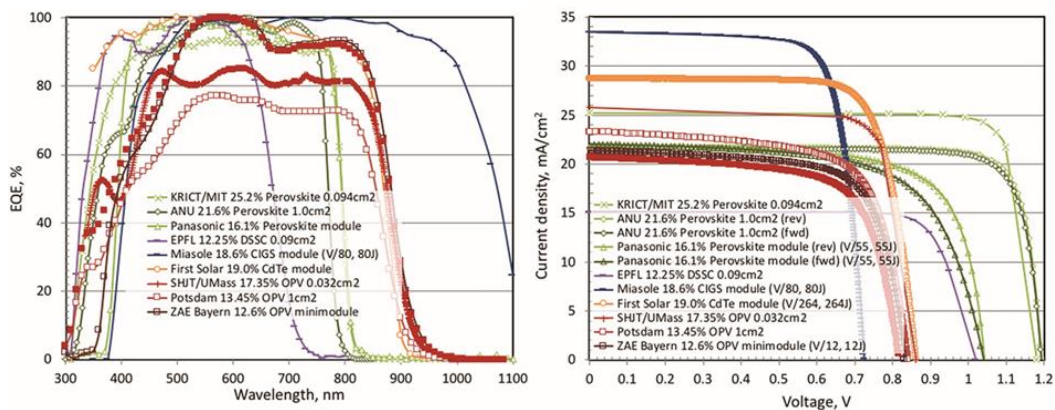


Рис. 5. Зовнішня квантова ефективність (EQE) тонкоплівкової комірки або модуля (а) та їх ВАХ (б) [13].

були спрямовані на розробку р/n-гомопереходів. У 1959 році Раппорт продемонстрував монокристалічні гомоперехідні комірки CdTe з ефективністю перетворення $\sim 2\%$, виготовлені дифузією In в кристали CdTe р-типу [22]. У 1979 році група вчених у Франції досягла $> 7\%$ ефективності перетворення для пристрою, виконаного методом паропроникаючого осадження з плівки CdTe р-типу, легovanого миш'яком, на кристали n-типу [23]. Пізніше вони повідомили про комірки з ефективністю $> 10,5\%$ [23].

На відміну від розвитку р/n-гомопереходу, СЕ з гетеропереходами CdTe широко досліджувалися з 1960 року. Дослідження проводилися у двох напрямках відповідно до типу провідності CdTe. Для монокристалів CdTe n-типу і полікристалічних плівок проводилися дослідження гетеропереходу з Cu_2Te р-типу [24]. До початку 1970-х років тонкоплівкові шари CdTe/ Cu_2Te досягли ефективності перетворення $> 7\%$ [25]. Цікаво, що в цих комірках використовувався шар CdS n-типу, який знаходився нижче товщиною 5 мкм для поліпшення адгезії і електричного контакту півки CdTe товщиною 20 мкм на молібденових підкладках. Труднощі в керуванні процесом утворення Cu_2Te , нестабільність в комірках CdTe/ Cu_2Te і відсутність прозорого провідника р-типу в кінцевому підсумку змістили акцент на дослідженнях гетероперехідних структур з використанням CdTe р-типу. В інших

роботах з CdTe n-типу використовувалися бар'єрні прилади Шотткі, утворені нагріванням решіток Pt або Au в контакт з монокристалами CdTe n-типу або електроосаджені тонкими півками CdTe, з ефективністю, що наближається до 9% [25].

Для СЕ з монокристалічним CdTe р-типу гетеропереходи з використанням стабільних оксидів, таких як $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO), ZnO, SnO_2 і CdO, були досліджені більш ширше. У цих приладах на короткохвильову спектральну характеристику впливає, в першу чергу, передача гетеропартнера та низькоомного контакту, які називаються віконним шаром. СЕ на основі монокристалів CdTe р-типу з випаровуваними електронним пучком віконними шарами оксиду індію та олова (ITO) з ККД = 10,5% були розроблені групою Стенфорда в 1977 р. [26]. У 1987 році комірки, отримані шляхом реактивного осадження оксиду індію In_2O_3 на монокристалах CdTe р-типу, дали загальну ефективність = 13,4% [27].

Комірки, отримані шляхом випаровування плівок CdS n-типу на монокристалічний CdTe р-типу, були вперше отримані Мюллером і співавт. в середині 1960-х років [28], ефективність перетворення складала менше 5%. У 1977 році Мітчелл і співавт. повідомили про ефективність перетворення 7,9% [29]. Найвища ефективність для комірки, виготовленої з тонкоплівкового CdS на монокристалі CdTe р-типу, була повідомлена Ямагучі і співавт. в 1977 р., де в їх

комірці використовувався CdS товщиною 0,5 мкм, отриманий методом хімічного осадження з парової фази на грань (111) монокристалу CdTe, легованого фосфором, з ефективністю 11,7% [30].

Тонкоплівкові СЕ з гетеропереходами CdTe/CdS на підкладках полікристалічного типу вперше були продемонстровані в 1969 році Адіровичем і співавт. з випареним CdTe на субстраті CdS/SnO₂/скло, вихід > 2% [31]. А в 1972 році Боннет і Рабенхорст на 9-й Європейській конференції фахівців з фотоелектричних технологій описали 5-6% ефективну конструкцію підкладки CdS/CdTe/Mo, виготовлену з хімічно осаджених парів CdTe і плівок CdS з вакуумним випаровуванням [32].

Розробка процесів виготовлення тонкоплівкових СЕ CdTe/CdS протягом 1980-х та 1990-х років, майже завжди в конфігурації з надвисокою швидкістю, була досягнута завдяки удосконаленню в конструкції приладу, обробці після осадження та формуванню контактів з низьким опором, а не завдяки уточненням в конкретних методах осадження. Це було пов'язано, перш за все, з відносно високою хімічною стабільністю CdTe у порівнянні з попередніми елементами та сполуками, використаними для його отримання. Таким чином, багаточисельні методи виготовлення плівок були використані для нанесення CdTe для сонячних батарей середньої та високої ефективності. Фотоелектрична характеристика СЕ CdTe/CdS, що мають ефективність перетворення від ~10 до ~16%, була в значній мірі незалежною від методу осадження CdTe [33].

Незважаючи на невибагливість до методу осадження, залишаються два загадкових аспекти обробки високопродуктивних тонкоплівкових СЕ CdTe/CdS, а саме використання конфігурації надзвукового пристрою з нанесенням CdTe на CdS та необхідність етапу (ів) обробки, який піддає плівки CdTe і CdS впливу Cl та O. Протягом 1980-х років був досягнутий значний виграш в продуктивності шляхом емпіричної оптимізації процесів виготовлення субстратів з урахуванням таких змінних обробки, як температура осадження CdTe, термічна обробка після осадження, хімічне середовище для вирощування або обробки та формування контакту CdTe. Наприклад, компанія Matsushita Battery Industrial Company повідомила, що для трафаретних/спечених комірок CdTe надзвичайно важливо контролювати концентрації CdCl₂, O і Si в структурі шляхом регулювання суспензій і температурно-часових послідовностей етапу спікання [34]. Процес моноіонного електроосадження був оптимізований до 10%-го рівня ефективності шляхом додавання Cl в гальванічну ванну CdTe і використання обробки після утворення осадження з «перетворенням типу» для електричної активації комірки [35]. Група в Kodak досягла рівня ефективності 10% завдяки суміші CdTe, яка осідає в сублімації, оптимізуючи температуру осадження CdTe та вміст кисню в середовищі осадження [33].

Переломним моментом у ефективності тонкоплівкових комірок CdTe з додатковою перевагою для технологічної стійкості стало

застосування повітряно-термічної обробки після осадження структур CdTe/CdS, покритих CdCl₂, групами в Ametek і в Інституті перетворення енергії [36]. Поєднання «обробки CdCl₂» з досягненнями в області формування контактів з низьким опором привело до досягнення групою в Університеті Південної Флориди в 1993 році з ефективністю > 15% комірки з CdTe, осадженої сублімацією в тісному просторі. Удосконалення в обробці віконного шару і використання обробки паром CdCl₂ привели до додаткових поліпшень [37]. Станом на 2001 рік рекордна ефективність була на рівні 16,5% [38]. Вольт-амперні характеристики і квантова ефективність цієї комірки показані на рис. 6.

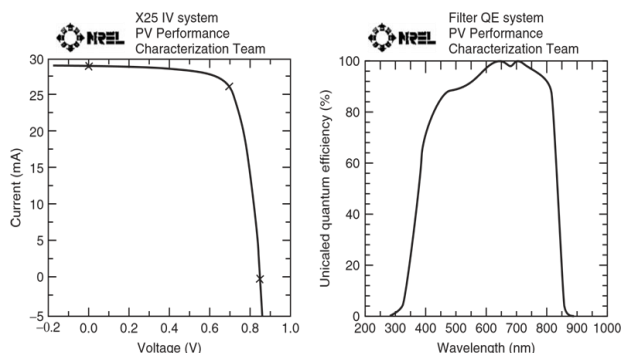


Рис. 6. Вольт-амперні та відносні квантові криві ефективності для тонкоплівкового сонячного елемента CdTe/CdS з ефективністю 16,4% [38].

З 2000 року розробка надшвидкісних полікристалічних СЕ CdTe/CdS стала джерелом дуже успішної фотоелектричної енергії. Комерційні модулі CdTe становили приблизно половину всього фотоелектричного продукту, виробленого в США в 2008 році [33].

На сьогодні значення ефективності фотоелектричної комірки на його основі складає вже 22,1% [34,35]. Зважаючи на особливості тонкоплівкових технологій щодо співмірності сталих ґратки, механічних та теплових характеристик окремих плівок (шарів), популярною є також гетероструктура n-CdS/p-CdTe [36].

IV. Прикладне застосування тонких плівок CdTe

Розрахунки залежності ефективності перетворення ідеального сонячного елемента від ширини енергії забороненої зони показують, що по спектру CdTe чудово збігається з нашим Сонцем, зіркою спектрального класу G2 з ефективною температурою поверхні фотосфери чорного тіла 5700 K і загальною світністю $3,9 \times 10^{33}$ ерг/с. CdTe – напівпровідникова сполука групи II-VI з прямою оптичною шириною забороненої зони, яка майже оптимально відповідає сонячному спектру для перетворення фотоелектричної енергії [33].

Товщина шару CdTe всього у кілька мікрон є достатньою для практично повного поглинання фотонів з енергією $h\nu > E_g$. Тому тонкі плівки кадмій

телуриду є переважаючими шарами у сонячних батареях і модулях при фотоелектричному перетворенні енергії [39].

Сонячні елементи на основі CdTe, вирощені на ультратонких скляних підкладках – легкі і гнучкі. Ці характеристики дозволяють створювати пристрої, що не вимагають високої питомої потужності, унікальних форм-факторів і мають низькі виробничі витрати. Ультратонке скло може знизити виробничі витрати і збільшити продуктивність за рахунок більш низької теплоємності, що може скоротити час нагрівання та охолодження при обробці. На цьому склі також можна виробляти сонячні елементи з CdTe в рулонному процесі. Гнучкі сонячні панелі з CdTe можуть бути встановлені як інтегровані в будівельну конструкцію фотоелектричні елементи, або в інших конфігураціях, які не підходять для жорстких плоских панелей. Легкі і гнучкі сонячні батареї мають значні переваги у порівнянні із традиційними технологіями для приладів, де важлива питома потужність, таких як побутова електроніка, транспорт, військові прилади тощо [33].

Пряма заборонена зона і високий коефіцієнт поглинання CdTe, який більший $5 \times 10^5 / \text{см}$, для фотонів з $E > E_g$ означає, що можна очікувати високого квантового виходу від ультрафіолетової області спектру до довжини хвилі забороненої зони CdTe, $\lambda \approx 825$ нм. Високий коефіцієнт поглинання CdTe для фотонів з $E > E_g$ призводить до 99%-го поглинання фотонів з енергією вище забороненої зони на глибині 2 мкм від поверхні CdTe. Теоретична ефективність СЕ, в залежності від забороненої зони і коефіцієнта оптичного поглинання, для CdTe та інших обраних фотоелектричних матеріалів порівнюються на рис. 7 [40].

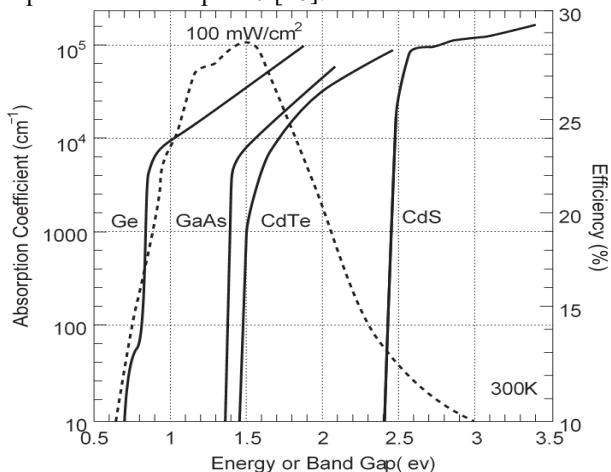


Рис. 7. Теоретична ефективність СЕ (пунктир) для спектрального випромінювання АМ1,5 залежно від ширини забороненої зони і коефіцієнта поглинання.

Також, CdTe демонструє стабільну і високоефективну люмінесценцію у видимому діапазоні (500~730 нм) [41]. Крім того, його високий коефіцієнт поглинання у видимій області (10^5 см^{-1}) і той факт, що його оптоелектронні властивості практично не залежать від методів синтезу, роблять CdTe потенційним матеріалом для використання як в біоідентифікаторах, так і в світловипромінювальних

приладах та фотоелементах [42].

Подальші успіхи у підвищенні ККД сонячних модулів на основі CdTe стримуються недостатчею фундаментальних знань про переважаючий вид і зарядовий стан власних точкових дефектів (ВТД) в тонких плівках кадмій телуриду, хоча дефектний стан в кристалах досліджено досить детально [15,40].

V. Модулі на основі CdTe

На початку XXI ст. вдалося досягти прийнятого для виробництва компромісу між двома головними для сонячного модуля критеріями – достатньою ефективністю фотоелектричного перетворення й дешевизною продукції [10,43]. Це стало можливим завдяки розробці цілої низки відносно простих і належно контрольованих методів нанесення тонких шарів CdTe і CdS значної площі, які нескладно запровадити в широкомасштабне виробництво: сублимацію в замкнутому об'ємі, хімічне осадження з парової фази, хімічне та електролітичне осадження. Утруднення, зумовлене розбіжністю параметрів кристалічних ґраток CdTe і CdS (~5%) значною мірою долається нескладною температурною обробкою вже виготовленої CdTe/CdS структури. Вважається, що при цьому відбувається взаємне заміщення атомів S і Te, утворюється перехідний шар CdTe_{1-x}S_x зі зменшеною густиною станів на межі поділу CdTe з CdS, які можуть негативно впливати на ефективність СЕ [1,9].

Фотоелектричний модуль на основі CdTe зазвичай складається із послідовно нанесених шарів напівпровідникових матеріалів та контактів на підкладку, яка одночасно відіграє роль механічної основи. Електричні характеристики модуля залежать від властивостей окремої комірки, схеми їх з'єднання, а також від можливих втрат через негенеруючі зони та резистивних втрат на контактах. Отримання високоефективної комірки залежить від багатьох факторів, у тому числі й від різних видів обробки певними речовинами, наприклад, CdCl₂, а також від мінімізації резистивних втрат, оптичних втрат через використання недорогого скла та локально дефектні ділянки. Фактично, метою кінцевого виробника є отримання послідовно з'єднаних діодів CdTe/CdS великої площі, які володіють просторово однорідними фізичними та електричними властивостями [37,43].

VI. Промислові системи із застосуванням телурид кадмієвих модулів

На відміну від комірок, побудованих на ланцюжках кристалічних комірок, тонкоплівкові СЕ CdTe можуть бути пов'язані монолітним об'єднанням, яке довело свою надійність і дає модулі, які менш чутливі до часткового затемнення. При монолітному об'єднанні комірки на одній підкладці або основі великої площі ізолюються і

з'єднуються між собою шляхом ретельної розмітки осаджених шарів на різних стадіях виготовлення. Скрайбування може бути досягнуто механічним способом або, як правило, лазерним скрайбуванням, в якому точка зупинки визначається шляхом зіставлення поглинаючих властивостей різних шарів з відповідною довжиною хвилі і густиною потужності [44]. Монолітно взаємопов'язаний модуль зображений на рис. 8. Зазвичай використовуються три види скрайбування: перший розділяє передній контакт ППО (прозорий провідний оксид) для визначення сусідніх комірок, другий через CdS і CdTe забезпечує електричний шлях від ППО до заднього контакту сусідньої комірки, а третій ізольовує зворотний контакт між комірками. В сукупності ці види скрайбування вводять мертву зону на модулі, яка повинна бути якомога меншою. Фотострум, що генерується кожною коміркою, перетікає з одного кінця модуля на інший.

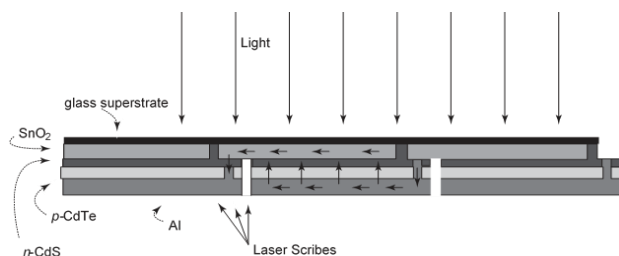


Рис. 8. Схема послідовно з'єданого вбудованого модуля CdTe з трьома лазерними скрай берами.

Напруга модуля - це просто сума напруг від послідовно з'єднаних окремих комірок. Ця монолітна структура і три її лазерних скрайбери дуже схожі на велику кількість осаджених на склі фотоелектричних модулів на основі аморфного кремнію і CIGS. Важливий проектний аналіз геометрії модуля і опорів бокових листів, щоб мінімізувати втрати опору і мертвої зони, був виконаний для фотоелектричних модулів на основі аморфного кремнію і застосований до фотоелектричних модулів CdTe [45].

Структура, показана на рис.8 використовує лист скла в якості опорного, що знаходиться зверху. Вибір скла базується на вартості за один ват, на оптичних втратах і термостійкості скла. Наприклад, генерований світлом струм в комірках CdTe, нанесених на боросилікатне скло, приблизно на 2 мА/см² вищий, ніж на натрієво-вапняне скло, через більш високе оптичне поглинання в натрієво-кальцієвому склі на довжинах хвиль понад 600 нм. Однак високопрозорі скла, такі як боросилікат, як плавлені кварц, вимагають більшого очищення і, як правило, значно дорожчі, ніж натрієво-вапняне скло, яке зазвичай використовується для комірок. Додаткова проблема з дешевим натрієво-кальцієвим склом полягає в тому, що воно має більш низьку температуру розм'якшення, що обмежує його сумісність з високотемпературною обробкою [45]. Компромісом є зменшення вмісту заліза в содово-вапняних склах для поліпшення їх прозорості на довжинах хвиль більше 600 нм та підвищення температури їх плавлення, але за меншою вартістю, ніж боросилікатні або інші високоочищені скла

[33,43].

Комерціалізація фотоелектричних модулів CdTe залежить від постійного постачання доступної сировини, особливо кадмію і телуру. Потреби в матеріалах для установки з виробничою потужністю 1 ГВт/год при 100% використанні Cd і Te для виготовлення поглинаючого шару завтовшки 2 мкм складають приблизно 40 метричних тонн кадмію і 60 метричних тонн телуру. Обидва елементи отримують в якості побічних продуктів при виплавці руд: кадмій отримують в результаті рафінування цинку, міді і свинцю, тоді як телур в основному отримують як продукт електролітичного рафінування міді та знежирення від виробництва свинцю [46]. Телур є більш рідкісним і дорогим компонентом, проте, за оцінками, наявність телуру становить близько 1600 метричних тонн в рік [47]. В даний час витрати на 95% чистого кадмію і телуру складають 12 дол. (24000 дол. США/т) і 20 дол. (40000 дол. США/т), відповідно. Таким чином, загальні річні витрати на кадмій і телур для електростанції потужністю 1 ГВт складуть 2,6 млн. дол. США, що становить менше 0,03 дол. США на ват. Це значно менше, ніж ціна суперстратного скла/ППО на 100 км², необхідна для потужності 1 ГВт, яка в даний час складає близько 5 доларів США/м² [48], або приблизно 0,50 долара США за ват.

Фотоелектричні модулі CdTe нинішнього покоління, як правило, мають площу 0,72 м² і мають ККД вище 10% при піковій потужності порядку 75 Вт. Великомасштабні комерційні модулі CdTe вироблялися компанією First Solar, LLC, в Толедо, штат Огайо, в Німеччині і в Малайзії (див. рис. 9), з річним обсягом виробництва понад 300 МВт [49]. Три інших виробники модулів CdTe виробляли модулі CdTe в менших масштабах: Matsushita Battery Company в Японії, BP Solar, в Ферфілді, Каліфорнія; і Antec Solar GmbH, в Німеччині. Ще три компанії, Abound Solar (раніше AVA), Calixo/Q-cells і PrimeStar Solar, активно нарощують свої потужності і очікують, що їх виробничі потужності зможуть скласти конкуренцію First Solar. Кілька компаній займаються розробкою альтернатив надзвуковому модулю, або займаються технологіями «відриву» і «передачі». Компанія Solexant Inc., в Сан-Хосе, штат Каліфорнія, розробляє технологію «Roll-to-Roll» [49].

Перший сонячний модуль використовував відкладення парів CdTe на рухомих підкладках для досягнення високої швидкості росту при збереженні високої температури підкладки. Повідомляється, що продуктивність виробничої лінії становить 2,9 м² в хвилину [50]. Успіх First Solar підтверджує концепцію високопродуктивного, великого за площею, надійного виробництва найдешевших модулів в даний час на ринку. Фотографія, що показує модуль First Solar і масив модулів, показана на рис.9.

Проблеми, з якими стикаються виробники тонкопліткових СЕ CdTe, включають перенесення ефективності малих площ у масштаб модуля, контроль однорідності CdTe під час росту, відтворюваність і сертифікацію продукції щодо очікуваного терміну служби. Прикладом ключового

компромісу є товщина плівки CdS; товсті плівки CdS покращують можливості обробки, але зменшують генерований світлом струм. З ультратонкими плівками CdS, що використовуються для отримання сучасних характеристик в комірках з малою площею, просторові зміни мікроструктури плівки CdTe можуть впливати на дифузію CdS в CdTe і результуючу структуру сполуки, підкреслюючи важливість площі контрольованої морфології плівки і процесу обробки CdCl₂. Для підвищення густини струму в модулях CdTe проводиться включення буферних шарів у віконний шар конструкції, удосконалення процедур після нанесення і розробка вбудованих діагностичних інструментів зондування [37].



Рис. 9. Модуль CdTe і масив модулів, зроблені First Solar.

VII. Безпечна переробка відпрацьованих модулів

Побоювання з приводу токсичності кадмію і потрапляння значної кількості кадмію в навколишнє середовище по суті є необґрунтованими. Було показано, що загальне виділення кадмію в життєвому циклі, нормоване на ГВт год виробленої електричної енергії, набагато менше, ніж при виробленні вугілля і дещо менше ніж при ядерній генерації або фотоелектричних панелях на основі кремнію [51]. Керування кадмієм в виробничих умовах залежить від поєднання та дотримання відповідних інженерних та хімічних правил гігієни [9].

Сполука CdTe – хімічно стійка, біологічно інертна і не являє загрози довкіллю й здоров'ю людини як за умов виробництва, так і експлуатації сонячних модулів [51]. Виділення Cd в атмосферу можливе, як тільки температура перевищить ~1050°C, наприклад, при пожежі. Однак у сонячному модулі CdTe знаходиться між двома скляними пластинами в герметизованому стані. При такій конструкції скло розплавиться при температурі, значно нижчій, ніж ~1050°C, CdTe опиниться в розплавленій масі, що й не допустить виділення Cd і Te в атмосферу [51].

Встановлені модулі добре захищені, що служить як для захисту комірок від впливу навколишнього середовища, так і для захисту напівпровідникових матеріалів від механічних пошкоджень. Шляхом вторинної переробки модулів в кінці терміну служби таким же чином, як і металевих виробів, майже весь кадмій в модулі може бути перероблений за ціною приблизно 5 центів/Вт [51]. В якості альтернативи,

встановлення модуля за договором оренди або використання модульних систем як промислових може сприяти повному контролю над встановленим розподілом кадмію.

Оскільки кількість кадмію, що використовується в тонкоплівкових модулях CdTe є досить мала, тому технологія тонкоплівкового CdTe є незначною проблемою для навколишнього середовища. Модуль CdTe площею 1 м², що виробляє потужність близько 100 Вт з використанням шару CdTe товщиною менше 2 мкм, містить менше 10 г кадмію, або приблизно стільки ж, скільки і одинарна нікель-кадмієва батарея ліхтарика [33].

VIII. Майбутнє сонячних елементів на основі кадмій телуриду

Індустрія тонких плівок CdTe в даний час добре зарекомендувала себе, але її майбутнє залежить від подальшого впровадження креативних ідей у вивчення властивостей матеріалів приладів CdTe, характеристик приладів лабораторного масштабу і вдосконалення фотоелектричних модулів. Однак для досягнення цих цілей потрібне більш глибоке розуміння взаємозв'язку між умовами обробки і критичними властивостями матеріалу, необхідними для забезпечення високої ефективності і довгострокової надійності [15].

Хоча фундаментальна природа полікристалічного CdTe не до кінця зрозуміла, існують надійні шляхи до створення високопродуктивних однопереїдних тонкоплівкових елементів, які демонструють практичну цінність емпіричного підходу. Крім того, деякі методи осадження плівки CdTe дають подібні робочі характеристики пристрою за рахунок відповідної комбінації обробки після осадження і утворення зворотного контакту [33]. Досягнення цільового показника ефективності в 20% і перетворення його в високу продуктивність модуля залежить від визначення і подолання механізмів, які обмежують напругу розімкнутого ланцюга і, в меншій мірі, коефіцієнта заповнення в комірках нинішнього покоління. Густина струму в найкращих тонкоплівкових елементах CdTe вже досягла 90% свого теоретичного максимуму для освітлення AM1,5 і в основному обмежена добре зрозумілими оптичними втратами в структурі скло/ППО/CdS [37,51].

Незважаючи на досягнення в розробці комерційних модулів, значення V_{oc} (напруги холостого ходу) ~850 мВ та КЗ (коефіцієнта заповнення) ~75% не змінювалися протягом декількох років і не відповідають очікуванням, заснованим на величині ширини забороненої зони. Збільшення напруги комірки CdTe до 200 мВ дуже наблизило б його до того, що досягається аналогічним GaAs із шириною забороненої зони і збільшило б ефективність до 20% [14]. Наразі є дві можливості збільшити напругу на цю величину [51]. Одна з них полягає в одночасному збільшенні густини носіїв CdTe на три порядки і часу їх життя в десять разів. Ця стратегія, однак, вимагає значного

покращення якості матеріалів, і спроби до теперішнього часу збільшити ці параметри не є успішними. Друга і, можливо, більш реалістична можливість полягає в тому, щоб створити повністю збуднену n-i-p – структуру з густиною і часом життя носіїв, порівняними з досягнутими в даний час, але додати шар зворотного електронного відбивача між поглиначем і зворотним контактом. Повинна бути достатньо широка заборонена зона з відповідного сплаву, такого як $Cd_{1-x}Zn_xTe$ або $Cd_{1-x}Mg_xTe$. Застереження полягає в тому, що його осадження має відбуватися безперервно з CdTe поглиначем і не викликати значних міжфазних станів [52].

Друга область, яка доступна для майбутніх досліджень CdTe-комірок, – це можливість створення набагато тонших абсорбуючих шарів. Були б очевидні переваги з точки зору використання матеріалу та часу осадження, але, можливо, також найбільш ефективного використання зворотного електронного відбивача. Робота в Університеті Толедо дозволила досягти 10% ефективності для поглинача CdTe товщиною 0,5 мкм [53]. Частково цей успіх був результатом коригування довжини обробки CdTe, щоб вона була пропорційною товщині шару CdTe.

Крім того, що CdTe є гарним претендентом для використання у одноперехідних фотоелектричних приладах, він може бути сплавлений з іншими сполуками II - VI, щоб змінити його ширину забороненої зони і забезпечити можливість виготовлення багатоперехідних тонкоплівкових елементів [54]. Структури багатоперехідних комірок, що використовують широкосмугові комірки на основі CdTe в монолітних структурах, повинні враховувати конструкцію комірок, а також температуру обробки та хімічну стабільність. Матеріали на основі сплавів між CdTe та іншими сполуками групи II-VI, в принципі, дозволяють проектувати широкий спектр оптоелектронних властивостей в приладах. Ці напівпровідникові сполуки забезпечують основу для розробки матеріалів, отриманих шляхом легування різних з'єднань в псевдобінарних конфігураціях. Для фотоелектричних гетероперехідних приладів напівпровідники, що використовують катіони Cd, Zn, Hg та аніони S, Se, Te, демонструють широкий діапазон оптичних заборонених зон, що дозволяє оцінити їх потенціал для використання в оптимізованих конструкціях приладів шляхом адаптації властивостей матеріалу (таблиця 1). Зазвичай високі коефіцієнти оптичного поглинання, $\sim 10^5$ см, і прямі оптичні заборонені зони багатьох напівпровідників II - VI роблять їх придатними для використання в тонкоплівкових фотоелектричних приладах. Для розвитку двоперехідних структур бажані верхні комірки з шириною забороненої зони поглинача близько 1,7 eV і нижні комірки близько 1,1 eV [55]. Іншою можливістю є зменшення товщини CdTe для досягнення узгодження по струму.

Тонкоплівкові фотоелектричні елементи на основі CdTe також підходять для приладів, які призначені для перетворення енергії поза межами земної атмосфери, включно з виробництвом енергії у

космосі, інфрачервоними детекторами та детекторами γ -випромінювання. Використовуючи вольт-амперні характеристики сучасних приладів, можна визначити роботу AM0 при 60°C, скоригувавши температурну залежність ширини забороненої зони та відмінності в спектрі освітлення. Сучасні комірки з ефективністю AM1,5 16,5% при 25°C відповідають ефективності AM0 13,9% при 60°C, а типові комірки з ефективністю AM1,5 12% при 25°C забезпечують ефективність AM0 10% при 60°C. Для комірок на полімідній підкладці товщиною 0,05 мм в умовах AM0 елементи з 12% CdTe повинні забезпечувати питому потужність 1500 Вт/кг [55]. Дослідження та виробництво приладів на основі CdTe для космічних програм, у яких потрібно співвідношення потужності AM0 до маси більше 1000 Вт/кг, проводяться трьома напрямками: 1) ефективність AM1,5 6–7% для осаджування тонких плівок у вигляді підкладки на легкі гнучкі підкладки [56]; 2) ефективність AM1,5 11% для переносу готових комірок з жорсткими підкладками на легкі гнучкі підкладки [57]; і 3) ефективність 11% для прямого осаджування підкладок на скляну фольгу товщиною 100 мкм [58]. Обнадійливі результати стабільності комірок CdTe/CdS були отримані при бомбардуванні електронами з енергією 1 MeV при потоці частинок 10^{14} - $10^{16}/\text{cm}^2$ [59].

Таблиця 1.
Властивості псевдобінарних сполук II – VI, придатних для поглинаючих шарів

Compound	Single crystal optical E_g range 300 K [eV]	Optical bowing parameter	Stable endpoint structure	Miscibility gap?
Cation substitution				
$Cd_{1-x}Zn_xTe$	1.49–2.25	0.20	ZB–ZB	N
$Cd_{1-x}Mg_xTe$	1.50–3.00	0	ZB–W	?
$Hg_{1-x}Cd_xTe$	0.15–1.49	?	ZB–ZB	N
$Hg_{1-x}Cd_xSe$	0.10–1.73	?	ZB–W	N
$Hg_{1-x}Zn_xTe$	0.15–2.25	0.10	ZB–ZB	N
Anion substitution				
$CdTe_{1-x}S_x$	1.49–2.42	1.70	ZB–W	Y
$CdTe_{1-x}Se_x$	1.49–1.73	0.85	ZB–W	?
$CdSe_{1-x}S_x$	1.73–2.42	0.31	W–W	N
$HgTe_{1-x}S_x$	0.15–2.00	?	ZB–ZB	?
$HgSe_{1-x}S_x$	0.10–2.00	?	ZB–ZB	?

Висновки

Сонячні елементи з тонкоплівкового телуриду кадмію (CdTe) є основою технології, яка швидко розвивається та здійснює великий комерційний вплив на виробництво сонячної енергії. Будучи провідною технологією для постачання тонкоплівкових модулів, тонкоплівкові модулі на основі CdTe демонструють довгострокову стабільність, конкурентоспроможність і продовжують залучати капіталовкладення в масштабах виробництва.

Дослідження на рівні комірок (модулів) за останні три десятиліття перетворилися у велику і вражаюче швидко зростаючу індустрію CdTe. Розумно очікувати, що швидке зростання продовжиться, а виробничі витрати будуть ще більш знижені. Однак, як і у всіх фотоелектричних технологіях, кінцевий успіх індустрії CdTe буде

залежати від подальших удосконалень тонких плівок, структур приладів та великомасштабних виробничих процесів.

Основними перевагами тонкоплівкових фотоелектричних перетворювачів на основі CdTe, у порівнянні з кремнієвими кристалічними фотоелектричними перетворювачами, є: їх значно нижча питома вартість; значно нижчий розхід матеріалів; використання меншої кількості технологічних операцій; можливість виробництва приладів великих площ; здатність приймати слабе і розсіяне сонячне світло.

Мазур Т.М. – доктор філософії, асистент кафедри загальної та прикладної фізики;

Прокопів В.В. – професор, кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри фізики та хімії твердого тіла;

Мазур М.П. - доцент, к.ф.-м.н., директор Інституту архітектури, будівництва та енергетики;

Писклинець У.М. - кандидат хімічних наук, доцент кафедри медичної інформатики, медичної і біологічної фізики.

- [1] L.A. Kosyachenko, & E.V. Grushko, Ukr. Phys. Journ., Rev., 7(1), 3-30, (2012); <http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/reviews/7/1/r070101pu.pdf>.
- [2] Amin, Nowshad, et al., Encyclopedia of sustainable technologies, 11 26 (2017); <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10092-2>.
- [3] S. Chander, & M.S. Dhaka, Materials Science in Semiconductor Processing, 40, 708-712, (2015); <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.063>.
- [4] X. Wu, Solar energy, 77(6), 803-814 (2004); <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.006>.
- [5] S.D Gunjal, Y.B. Kholam, S.R. Jadkar, T. Shripathi, V.G. Sathe, P.N. Shelke, & K.C. Mohite, Solar energy, 106, 56-62 (2014); <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.11.029>.
- [6] T.M. Mazur, V.P. Makhniy, V.V. Prokopiv, M.M. Slyotov, 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).
- [7] M. Gloeckler, In 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). 1292-1292, IEEE (2016); <https://doi.org/10.1109/PVSC.2016.7749823>.
- [8] L.A. Kosyachenko, Thin Film Photovoltaics as a Mainstream of Solar Power Engineering: Solar Cells-Thin-Film Technologies, Ed: Kosyachenko LA. InTech, Janeza Trdine, 9(51000), 1-38 (2011).
- [9] V.V. Prokopiv, L.I. Nykyruy, O.M. Voznyak, B.S. Dzundza, I.V. Horichok, Ya.S. Yavorskyi, O.M. Matkivskyi, T.M. Mazur, Physics and chemistry of solid state, 18(3), 372-376 (2017); <https://doi.org/10.15330/pcss.18.3.372-375>.
- [10] M.A. Green, Nature Energy, 1(1), 1-4 (2016); <https://doi.org/10.15330/pcss.18.3.372-375>.
- [11] www.scopus.com
- [12] M. A. Green, E.D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, & A.W. Ho-Baillie, Prog Photovolt Res Appl, 27, 565-575 (2019); <https://doi.org/10.1002/pip.3171>.
- [13] M.A. Green, E.D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, & A. W. Ho-Baillie, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28(1), 3-15 (2020); <https://doi.org/10.1002/pip.3228>.
- [14] T. Mazur, V. Prokopiv, L. Turovska Molecular Crystals and Liquid Crystals, 671(1), 85-89 (2018); <https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1542088>.
- [15] J. Margottet, Annals Scientifiques de l'Ecole Normale Superieure, 2nd edn, Vol 8, pp 247–298 (1879).
- [16] R. Frerichs, Phys. Rev. 72, 594–601 (1947); <https://doi.org/10.1103/PhysRev.72.594>.
- [17] D. Jenny, R. Bube, Phys. Rev. 96, 1190–1191 (1954); <https://doi.org/10.1103/PhysRev.96.1190>.
- [18] F. Kruger, de Nobel D, J. Electron. 1, 190–202 (1955).
- [19] D. de Nobel, Philips Res. Rpts 14, 361–399 and 430–492 (1959).
- [20] J. Loferski, J. Appl. Phys. 27, 777–784 (1956); <https://doi.org/10.1063/1.1722483>.
- [21] Rappaport P, RCA Rev. 20, 373–397 (1959); [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(59\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(59)90002-7).
- [22] J Mimilya-Arroyo, Y Marfaing, G Cohen-Solal, R Triboulet, Sol. Energy Mater. 1, 171 (1979).
- [23] A Fahrenbruch, R Bube, Fundamentals of Solar Cells, Academic Press, New York, 418–460 (1983).
- [24] E Justi, G Schneider, J Serebinski, J. Energy Conversion 13, 53–56 (1973); [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(73\)90101-0](https://doi.org/10.1016/0013-7480(73)90101-0).
- [25] K Mitchell, A Fahrenbruch, R Bube, J. Appl. Phys. 48, 829–830 (1977); <https://doi.org/10.1063/1.323429>.
- [26] T Nakazawa, K Takamizawa, K Ito, Appl. Phys. Lett. 50, 279–280 (1987); <https://doi.org/10.1063/1.98224>.
- [27] R Muller, R Zuleeg, J. Appl. Phys. 35, 1550–1556 (1964); <https://doi.org/10.1063/1.1713665>.
- [28] R Dutton, Phys. Rev. 112, 785–792 (1958); <https://doi.org/10.1103/PhysRev.112.785>.
- [29] K Yamaguchi, N Matsumoto, N Nakayama, S Ikegami, Jpn. J. Appl. Phys. 16, 1203–1211 (1977); <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.16.1203/meta>.
- [30] E Adirovich, Y Yuabov, D Yugadaev, Sov. Phys. Semicond. 3, 61–65 (1969).
- [31] D Bonnet, H Rabenhorst, Conf. Rec. 9th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., pp 129–132 (1972).
- [32] B. E McCandless, & J. R. Sites, (2011). Cadmium telluride solar cells. Handbook of photovoltaic science and engineering, 600-641.
- [33] X. Wu et al., Conf. Rec. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conversion, pp 995–1000 (2001).
- [34] B. Basol, Conf. Rec. 21st IEEE Photovoltaic Specialist Conf., pp 588–594 (1990).

- [35] P Meyers, C Liu, Frey T, U.S. Patent 4,710,589 (1987); <https://patents.google.com/patent/US4710589A> .
- [36] B McCandless, H Hichri, G Hanket, R Birkmire, Conf. Rec. 25th IEEE Photovoltaic Specialist Conf ., pp 781–785 (1996).
- [37] J Britt, C Ferekides, Appl. Phys. Lett. 62, 2851–2852 (1993); <https://doi.org/10.1063/1.109629> .
- [38] S Kasap., (2006). Springer handbook of electronic and photonic materials. Springer Science & Business Media; <https://www.twirpx.com/file/1896023/> .
- [39] A. Rothwarf, & K. W. Böer, (1975). Progress in Solid State Chemistry, 10, 71-102.
- [40] A.L. Rogach, T. Franzl, T.A. Klar, J. Feldmann, N. Gaponik, V. Lesnyak, & J.F. Donegan, (2007). The Journal of Physical Chemistry C, 111(40), 14628-14637; <https://doi.org/10.1021/jp072463y> .
- [41] J. Jasieniak, B.I. MacDonald, S.E. Watkins, & P. Mulvaney, (2011). Nano letters, 11(7), 2856-2864; <https://doi.org/10.1021/nl201282v> .
- [42] T. Markvart, & A. McEvoy, (Eds.). (2003). Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. Elsevier; <https://www.elsevier.com/books/practical-handbook-of-photovoltaics/mcevoy/978-1-85617-390-2> .
- [43] I Matulionis, S Nakada, A Compaan, Conf. Rec. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf ., pp 491–494 (1997).
- [44] Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd edn, Vol. 11, pp 807–880, John Wiley & Sons, Inc., New York (1980).
- [45] R Brown, U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, U.S.G.S., 67.1–67.4 (2000).
- [46] B Andersson, Prog. Photovolt. Res. Appl. 8, 61–76 (2000); [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-159X\(200001/02\)8:1%3C61::AID-PIP301%3E3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-159X(200001/02)8:1%3C61::AID-PIP301%3E3.0.CO;2-6) .
- [47] P Gerhardinger, R McCurdy, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 426, 399–410 (1996); <https://doi.org/10.1557/PROC-426-399> .
- [48] P Maycock (ed.), Photovoltaic News, 20 (Feb, 2001).
- [49] D Rose et al., Conf. Rec. 28th IEEE Photovoltaic Specialist Conf ., pp 428–431 (2000).
- [50] V Fthenakis, H Kim, E Alsema, Environ. Sci. Technol. 42, 2168–2174 (2008); <https://doi.org/10.1021/es071763q> .
- [51] J Sites, J Pan, Thin Solid Films 515, 6099–6102 (2007); <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.12.147> .
- [52] V Plotnikov, D Kwon, K Wieland, A Compaan, Conf. Rec. 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conf . pp 1435–1438 (Philadelphia, 2009).
- [53] T Coutts et al., Prog. Photovolt: Res. Appl. 11, 359–375 (2003); <https://doi.org/10.1002/pip.491> .
- [54] M Nell, A Barnett, IEEE Trans. Elec. Dev. ED-34, 257–265 (1987); <https://doi.org/10.1109/T-ED.1987.22916>
- [55] J McClure et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 55, 141–148 (1998); [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(98\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(98)00054-3) .
- [56] A Romeo, D Batzner, H Zogg, A Tiwari, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 668, H3.3.1–H3.3.6 (2001); <https://doi.org/10.1557/PROC-668-H3.3> .
- [57] T Takamoto, T Agui, H Kurita, M Ohmori, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 49, 219–225 (1997); [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00198-0](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00198-0) .
- [58] K Zweibel, Conf. Rec. IECEC (Denver, CO, 1988).

T.M. Mazur¹, V.V. Prokopiv², M.P. Mazur¹, U.M. Pysklynets³

Solar cells based on CdTe thin films

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas Ivano-Frankivsk, Ukraine, tetiana.mazur@nung.edu.ua

²Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine,

³Ivano-Frankivsk National Medical University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

An analysis of the use of semiconductor solar cells based on thin-film cadmium telluride (CdTe) in power engineering is carried out. It is shown that the advantages of thin-film technology and CdTe itself as a direct-gap semiconductor open up the prospect of large-scale production of competitive CdTe solar modules. The physical and technical problems of increasing the efficiency of CdS/CdTe heterostructure solar cells, which are significantly inferior to the theoretically possible value in mass production, are discussed. The state of CdTe thin-film solar cells, which make CdTe a suitable material for ground-based photoelectric conversion of solar energy, the historical development of the CdTe compound, the application of CdTe thin films, the main methods and strategies of device production, device analysis and fundamental problems related to the future development of thin-film modules based on cadmium telluride.

Keywords: thin films, solar cells, CdTe, photovoltaic cells, modules.