

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ
РОБОТИ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТУ НА ОСНОВІ CdS / CdTe**

Девіз «ТЕМПЕРАТУРА»

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	3
1. Сонячні елементи на основі CdS / CdTe	4
1.1. Фізичні властивості телуриду кадмію	4
1.2. Конструкції плівкових сонячних елементів на основі CdS/CdTe	6
2. Матеріали та методи дослідження залежності вихідних параметрів СЕ CdS/CdTe від зміни температури експлуатації	12
2.1. Матеріали та обладнання, що використовується для отримання фотоелектричних перетворювачів ІТО / CdS / CdTe / Cu / Au	12
2.2. Методика вимірювання та аналітичне опрацювання темної вольт- амперної характеристики	15
3. Результати дослідження темнових вольт-амперних характеристик при підвищених температурах і їх обговорення	17
Висновки	22
Література	23

ВСТУП

Техногенне навантаження території, значний моральний і фізичний знос основних виробничих фондів більшості підприємств, відсутність сучасних систем управління небезпечними процесами сприяють збільшенню кількості надзвичайних ситуацій, що відбуваються на території України. Наслідком великих надзвичайних ситуацій, як правило, є пожежі та вибухи. Незважаючи на вдосконалення технічних засобів, які є джерелом інформації про пожежу [1], фактори, що виникають при цьому, утворюють екстремальні умови для виживання в них як тих, яких рятують, так і особового складу рятувальників, які займаються ліквідацією наслідків.

Зменшити ступінь участі людини при проведенні робіт в небезпечних умовах можливо при використанні дистанційно керованого обладнання. У зв'язку з цим досить актуальним є створення автономних робототехнічних комплексів, призначених для проведення розвідувальних робіт, а саме виявлення небезпечних факторів пожежі, визначення його координат, площі, умов його локалізації та ліквідації.

Автоматизована система управління робототехнічного комплексу [1] включає в себе поновлювані джерела енергії [2]. Для створення конкурентноспроможних мобільних комплексів на сонячних батареях, необхідні сонячні елементи, які мають високі і стабільні значення ефективності в процесі експлуатації і при цьому мають обмежені значення маси. Тому як поновлюване джерело енергії розглядається плівковий фотоелектричний перетворювач на основі CdS / CdTe. Плівкові сонячні елементи на основі сульфїду та телуриду кадмію, як автономні джерела електричної енергії в наземних і космічних умовах, являють собою альтернативу найбільш широко поширеним кремнієвим кристалічним фотоелектричним перетворювачів.

Метою роботи є дослідження залежності ефективності СЕ на основі CdS/CdTe від впливу температури

1. СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ CdS / CdTe

1.1 Фізичні властивості телуриду кадмію

При оптимізації конструктивно-технологічних рішень плівкових сонячних елементів (далі – СЕ) на основі CdS / CdTe, в першу чергу, необхідно враховувати особливості фізичних властивостей базового матеріалу телуриду кадмію. Фазова діаграма системи CdTe [3] характеризується проміжною фазою α -CdTe, яка формується при 50 ат. % Te і володіє конгруентним плавленням. Ця фаза має структуру цинкової обманки (сфалерит). В монокристалах при підвищених тисках і в тонких плівках може існувати і метастабільна гексагональна фаза телуриду кадмію (вюртцит) [4, 5]. Область гомогенності телуриду кадмію вузька, її ширина при температурі 400 ° С становить 10-6 ат. %. Висока температура плавлення телуриду кадмію (1049 °С) обумовлена високою часткою іонної складової в зв'язку між телуром і кадмієм. Ці фізичні особливості роблять телурид кадмію відповідним стабільним матеріалом для високошвидкісних промислових технологій отримання тонких плівок.

Ширина забороненої зони телуриду кадмію, яка становить 1,46 eV [6], найкращим чином адаптована до перетворення сонячної енергії в наземних умовах [7]. Величина коефіцієнта поглинання світла цього прямо зонного напівпровідника, яка для видимого діапазону перевищує 105 см⁻¹ [8], забезпечує практично повне поглинання падаючого світлового потоку шаром CdTe товщиною кілька мікрометрів в спектральному діапазоні фоточутливості цього напівпровідникового матеріалу [9]. Це дозволяє створювати на основі CdTe плівкові СЕ, які характеризуються низькою матеріаломісткістю [10].

При створенні ефективних СЕ необхідно використовувати провідні базові шари. Зниження питомого електроопору шарів CdTe можна здійснювати шляхом легування [11], або шляхом еволюції електрично

активних власних точкових дефектів [12, 13]. У загальному випадку, в CdTe можуть існувати такі типи дефектів: вакансії в підгратках кадмію і телуру - V_{Cd} , V_{Te} ; міжвузольні атоми кадмію (Cd_i) і телуру (Te_i); пари, що складаються з міжвузольного атому кадмію і вакансії телуру (Cd_i-V_{Cd}) у підгратках кадмію і міжвузольного атому телуру і вакансії телуру в підгратках телуру (Te_i-V_{Te}); антиструктурні дефекти CdTe і TeCd, при формуванні яких атом кадмію займає вузол телуру і навпаки; асоціації дефектів, що представляють собою сукупність простих дефектів. Згідно [14], енергія утворення вакансії кадмію становить 2,67 еВ, вакансії телуру – 3,24 еВ, CdTe – 3,92 еВ, TeCd – 3,70 еВ.

Таким чином, через високі енергії утворення, формування антиструктурних дефектів і вакансій телуру малоймовірні. Було показано [15], що асоціації дефектів енергетично більш вигідні, ніж ізольовані точкові дефекти. Точкові дефекти в CdTe можуть мати різні зарядові стани [16]. При видаленні з CdTe атома Te утворюється вакансія телуру, яка може одноразово або дворазово іонізуватися. Вакансія кадмію створює нейтральний дефект, який може захопити один або два електрони і придбати негативний ефективний заряд, утворюючи одну або дві вільні дірки. Таким чином, вакансія кадмію володіє акцепторними властивостями. Межвузольний атом кадмію є донором, а межвузольний атом Te - акцептором через більшу, в порівнянні з металом, електронегативність. Регулюючи концентрацію власних точкових дефектів, можна в широкому інтервалі варіювати концентрацію вільних носіїв заряду. Серед всіх інших власних дефектів одноразово заряджена вакансія кадмію є найбільш ефективним акцептором, глибина її залягання щодо стелі валентної зони становить 0,13 еВ [17].

При вирощуванні плівок CdTe шари, що містять надлишок кадмію, мають власну електропровідність або електропровідність n-типу, оскільки рівень Фермі фіксується поблизу середини забороненої зони донорним дефектом Cd_i^{+2} (двічі заряджений іон кадмію в межвузлі). Шари CdTe, отримані при надлишку Te, мають власну електропровідність або слабо

виражену електропровідність р-типу. Було експериментально доведено, що змінювати електроопір тонких плівок CdTe, шляхом введення легуючої домішки в процесі їх росту вкрай складно. Обмеження легування шару для отримання n-типу електропровідності пов'язано з самокомпенсацією домішків власними акцепторами, як вакансії кадмію. Отримання шарів телуриду кадмію р-типу електропровідності обмежена через брак доступних легандів з високою розчинністю в CdTe, які здатні утворювати дрібні акцепторні рівні [18]. Крім того, легуючі домішки володіють високою рухливістю в тонких полікристалічних шарах телуриду кадмію і, тому, мають тенденцію сегрегованого на зерномежевій поверхні, що призводить до шунтування приладової структури [19]. Типова концентрація акцепторних рівнів в шарах CdTe високоефективних СЕ становить 10^{15} см^{-3} . Недостатньо висока концентрація носіїв заряду лімітує висоту потенційного бар'єру і обмежує напруга холостого ходу в таких приладових структурах.

1.2 Конструкції плівкових сонячних елементів на основі CdS / CdTe

Вперше телурид кадмію був застосований для перетворення сонячної енергії в 1956 році [20]. В даний час існує три основних конструкції СЕ на основі CdTe: тильної конфігурації, фронтальної конфігурації і нанотекстуровані. Необхідно відзначити, що тільки СЕ CdS / CdTe тильної конфігурації в даний час випускаються в промислових масштабах [21, 22]. В ході численних досліджень було показано, що на відміну від кадмію, стабільне з'єднання телуриду кадмію з періодом напіврозпаду більше 50 років не робить негативного впливу на здоров'я людини [23]. Низька матеріало- і енергоємність виробництва ФЕП зумовили зростання сегмента ринку їх продажу [24, 25].

Плівкові СЕ на основі телуриду кадмію тильної конфігурації формуються на скляних підкладках товщиною 2 мм (рисунок 1.1). На

підкладках методами магнетронного розпилення осідають шари прозорого електрода, що проводить струм (TCO).



Рис. 1.1 - Конструкція плівкових ФЕП на основі телуриду кадмію тильної конфігурації [22]

В якості фронтальних електродів в конструкції сучасних плівкових ФЕП на основі CdS / CdTe зазвичай використовуються шари вироджених напівпровідників. На фронтальний електрод наноситься шар сульфїду кадмію [26, 27], на який осаджують базовий шар телуриду кадмію. Після «хлоридної» обробки формуються тильні контакти.

Новим напрямком у вдосконаленні СЕ тильної конфігурації є застосування в якості підкладки тонкої прозорої плівки поліїмїду товщиною до 10 мкм [28]. Спочатку, на скляну підкладку наноситься шар хлориду натрію, який грає в конструкції роль буфера (рис. 1.2). Потім, на обертову підкладку наноситься тонкий шар рідкого поліїмїду. Після затвердіння поліїмїду на ньому формується СЕ тильної конфігурації. Потім, у воді здійснюють розчинення NaCl, і приладова структура відділяється від скляної підкладки. Ефективність таких ФЕП обмежується на рівні 8,6 %, що було обумовлено негативним впливом натрію, що дефундує в базовий шар, який в

забороненій зоні CdTe утворює центр рекомбінації, генерованих під дією світла, нерівноважних носіїв заряду.



Рис. 1.2 - Конструкція гнучких ФЕП тильній конфігурації [25]

Плівкові ФЕП на основі CdTe фронтальної конфігурації можуть формуватися на молибденовій фользі [29], або на склі, на поверхні якого нанесені шари міді і молибдену [30] (рис. 1,3).



Рис. 1.3 – Конструкція плівкових ФЕП на основі телуриду кадмію фронтальної конфігурації [31]

Для отримання фронтальних СЕ базові шари телуриду кадмію осаджували на поверхні тильного металевого контакту в дві стадії. Спочатку, методом термічного вакуумного випаровування осаджувався тонкий шар телуриду кадмію, товщиною 0.2 – 0.5 мкм. Потім, високотемпературним методом парового транспорту формувався шар телуриду кадмію товщиною 10 – 20 мкм. Метод найшвидшого широкозонного «вікна» $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ осаджувався при спільному випаровуванні сульфїду і телуриду кадмію. На поверхні цього шару формувався шар сульфїду кадмію, і, потім, облягали гребінчастий індїєвий фронтальний електрод, з боку якого здійснювалося опромінювання СЕ.

До недолїків фронтальної конфїгурації СЕ на основі телуриду кадмію відносять труднощі легування базових шарів, оскільки оптимальну «хлоридну» обробку при зазначеній конструкції провести неможливо, і великий перехідний опір тильного контакту CdTe-Mo . Ефективність таких СЕ досягла 7 – 8 % [31]. Перевагою таких ФЕП є можливість зниження їх ваги, за рахунок використання в якості підкладки молібденової фольги [32].

Останнім часом з'явилися нові підходи до формування СЕ на основі фронтальної конфїгурації. Спочатку, на скляній підкладці з підшаром хлориду натрію формується приладова структура в тильній конфїгурації (рис. 1.4 а). Потім, на тильний контакт наноситься поліамїдна плівка, яка в майбутньому буде виступати в якості підкладки (рис. 1.4 б). Після розчинення хлориду натрію у воді приладова структура відділяється від підкладки і набуває фронтальну конфїгурацію [33] (рис. 1.4. в).

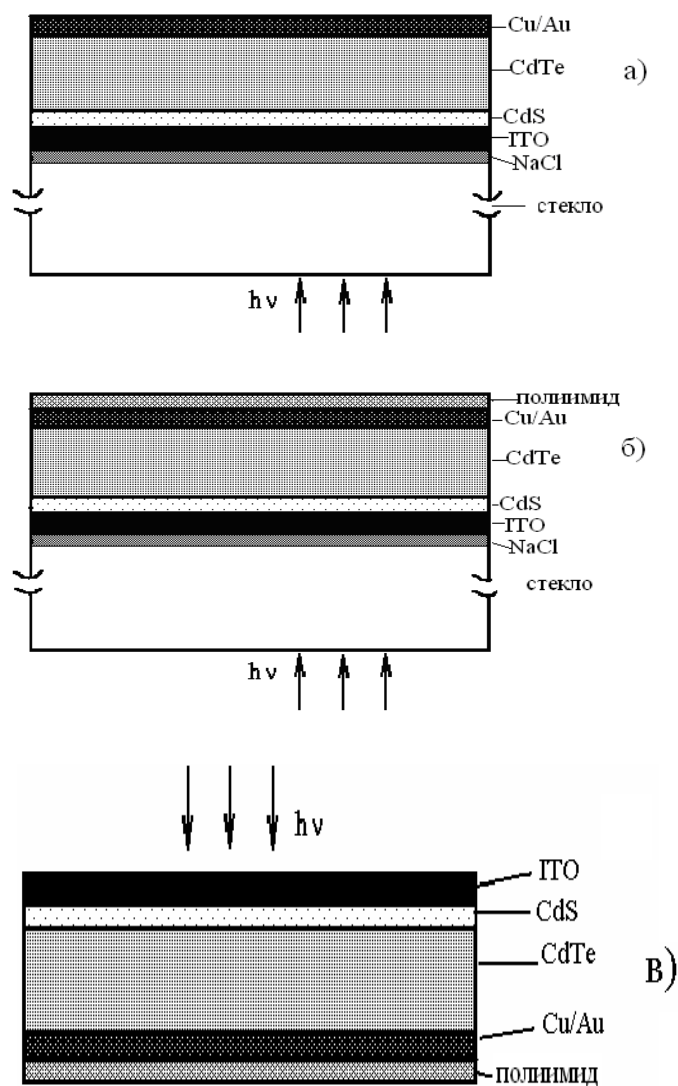


Рис. 1.4. – Етапи виготовлення гнучкого СЕ фронтальної конфігурації [33]

Створення нанотекстурованих η -СЕ [34 - 35] дозволяє зменшити товщину базових шарів телуриду кадмію і, при цьому, вирішити проблему недостатнього поглинання світла в надтонких базових шарах. При формуванні таких ФЕП на склі з прошарком прозорого фронтального електрода, в якості якого зазвичай використовуються шари оксиду індію та олова (ІТО), хімічними методами золь-гелю, пульверизацією або електрохімічними методами осаджують нанопористі плівки або віскерси напівпровідника n -типу провідності, наприклад, оксид титану TiO_2 [34, 35, 36] або оксиду цинку ZnO [36]. Такі нанопористі плівки з товщиною кілька мікрометрів повинні бути наскрізь пронизані порами, діаметр кожної з яких становить від 10 до 100 нм. Віскерси представляють собою окремі

стовпчасті структури з діаметром від 100 до 200 нм і товщиною кілька мікрметрів, які між собою не стикаються (рис. 1.5).

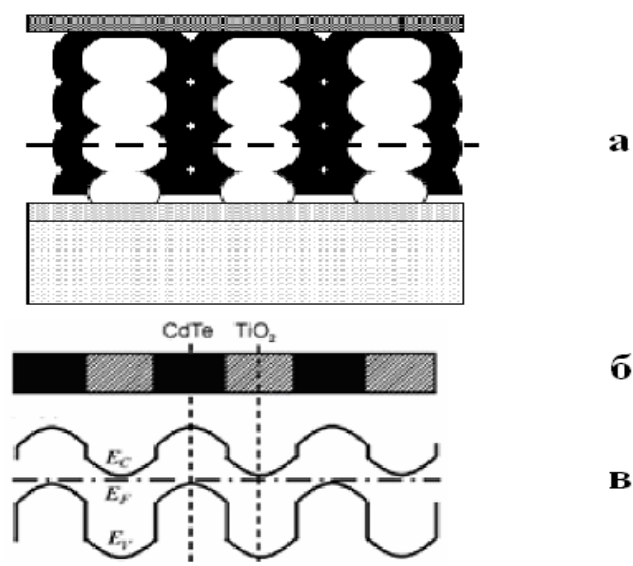


Рис. 1.5. – Типова конструкція η-СЕ на основі телуриду кадмію (а), схематичне чергування шарів напівпровідників (б); зонная модель ФЕП (в) [37]

Оксиди титану та цинку є прозорими для сонячна світла. Потім, на поверхні віскерсів або в пори осаджують шар телуриду кадмію р-типу провідності товщина 40 – 75 нм. На шар CdTe наносять металевий контакт товщина в кілька мікрметрів. Завдяки дуже малій товщині базових шарів телуриду кадмію, яка набагато менше довжина вільного пробігу електронів и дірок, забезпечується зниження рекомбінаційних втрат, генерованих під дією світла, нерівноважних носіїв заряду. Повне поглинання сонячна світла, в описаному вище, надтонкому базовому шарі досягається, за рахунок багаторазове проходження світлом плівок CdTe. Для цього шари телуриду кадмію повинні повністю покривати поверхню віскерсів або пір. Таким чином, метод нанесення CdTe повинен забезпечувати рівномірне покриття ім всієї поверхні напівпровідника n-типу.

Зараз для виготовлення η-СЕ осадженим CdTe в лабораторних умовах зазвичай здійснюють дорогим методом парофазної епітаксії [36] при робочій температурі 750 °С.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕ CdS/CdTe ВІД ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1. Матеріали та обладнання, що використовується для отримання фотоелектричних перетворювачів ITO / CdS / CdTe / Cu / Au

В якості сонячних елементів використовувалися фотоелектричні перетворювачі ITO / CdS / CdTe / Cu / Au. Отримання сонячних елементів на основі CdS/CdTe здійснювалося методом термічного вакуумного випаровування при використанні вакуумних установок УВН71-ПЗ і УВН67 з модифікованим внутрішнім оснащенням. Установа УВН67 використовувалася для нанесення плівкових шарів сульфідів і телуриду кадмію в єдиному технологічному циклі без порушення вакууму. Конструкція установок даного типу з об'ємом робочої зони 0,12 м³ включає два резистивних випарника потужністю до 2 кВт і дозволяє в одному циклі наносити кілька плівкових шарів на підкладці розміром до 10 × 10 см шляхом використання вузлів переміщення підкладок в процесі осадження. Вид внутрішнього устрою установки показаний на рис. 2.1.

Установа УВН71-ПЗ використовувалася для нанесення тильних контактів, що представляють собою плівкову гетероструктуру Cu / Au нанорозмірною товщини. Загальний вигляд установки представлений на рис. 2.2.

Нанесення плівок ІТО (оксидів індію та олова) здійснювалося методом нереактивного магнетронного розпилення на постійному струмі в вакуумній установці ВУП-5М (рис. 2.3). Необхідно відзначити, що магнетронне розпилення є одним з найбільш перспективних методів отримання всіх прозорих електродів (див., наприклад, [38, 39]). Це обумовлено високим ступенем точності перенесення складу мішені на підкладку, відтворюваністю і керованістю процесу магнетронного розпилення [40, 41].



Рис. 2.1. – Внутрішній устрій установки для напылення CdS і CdTe: 1, 2 – екрани 3 – випарник порошкового телуриду кадмію; 4 – випарник порошкового сульфіді кадмію; 5 – карусель, 6 – нагрівач підкладки, 7 – утримувач підкладки

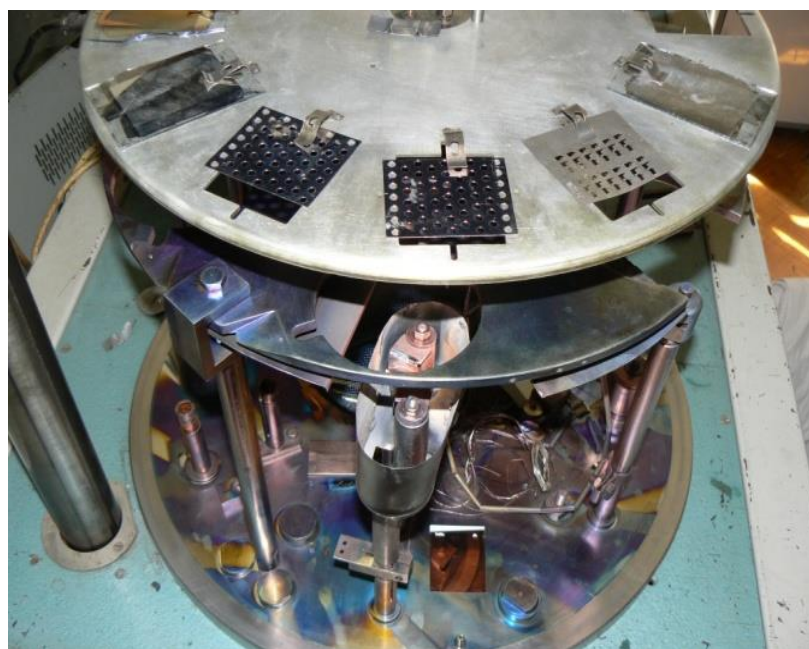
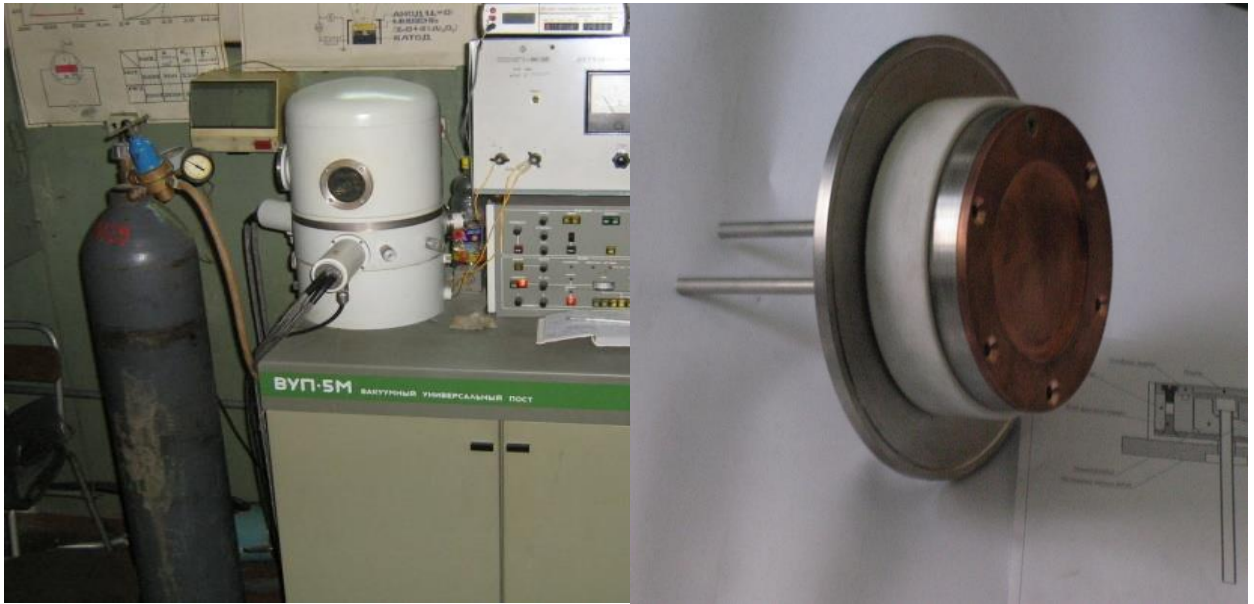


Рис. 2.2. – Загальний вигляд внутрішнього оснащення установки УВН71-ПЗ для термічного осадження плівок міді і золота



а)

б)

Рис. 2.3.– Фотографія вакуумної установки ВУП-5М (а) і матеріалосберігаючого магнітрону (б)

Завершальною процедурою підготовки ФЕП для проведення досліджень був відпалу при температурі 200 °С протягом 30 хвилин. Встановлено, що тільки відпал в СЕ з тильним контактом Cu / Au призводить до формування ефективного тунельного контакту. Згідно з літературними даними [42] це обумовлено міжфазною взаємодією плівки міді і приповерхневого шару телуру, що призводить до формування виродженого напівпровідника Cu_{2-x}Te . Без прошарку виродженого напівпровідника в приладових структурах з тильним контактом Cu / Au, як і для СЕ з тильним контактом Au реалізується режим наскрізного діоду [43], що обмежує величину напруги холостого ходу.

2.2. Методика вимірювання та аналітичне опрацювання темної вольт-амперної характеристики

Дослідження темної вольт-амперних характеристик (далі - ВАХ) СЕ зводиться до аналізу традиційних діодних ВАХ в прямому і зворотному включеннях. Аналіз прямих гілок темної ВАХ СЕ є ефективним експресним методом їх первинної атестації, який дозволяє визначити значення діодних параметрів приладової структури, спрогнозувати поведінку вихідних параметрів сонячного елемента і, отже, зміну ефективності при заданих умовах.

Для дослідження темної ВАХ сонячних елементів застосовували метод амперметра-вольтметра на постійному струмі і характеріограф на змінному. Використання характеріограф дозволяє візуалізувати ВАХ на екрані осцилографа, що входить в його склад, що підвищує експресність досліджень і забезпечує їх наочність. Характеріограф в загальному випадку являє собою комплект з джерела регульованого по амплітуді змінної напруги, трансформатора, магазину опорів і осцилографа (рис. 2.4.).

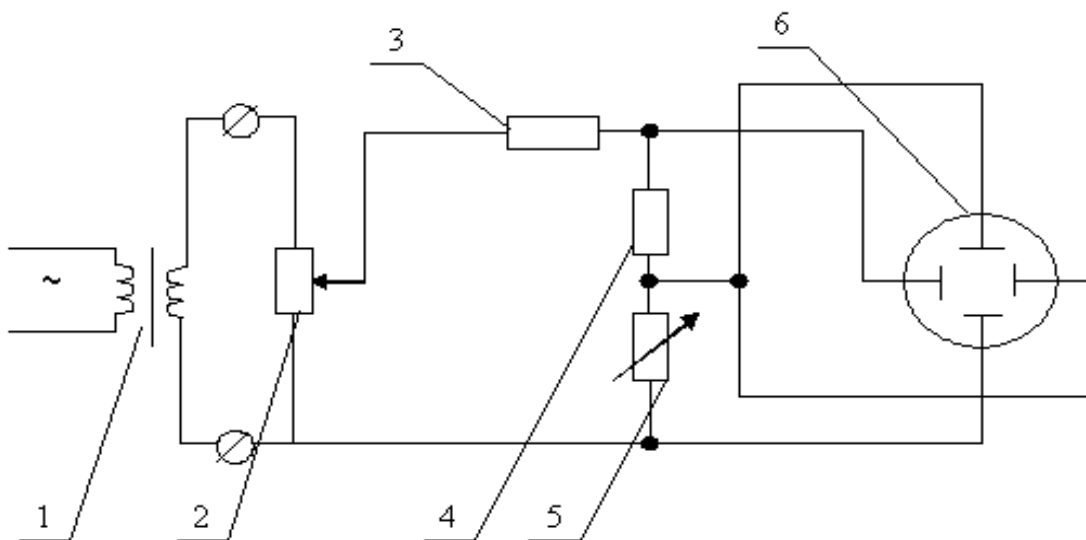


Рис. 2. 4. – Спрощена електрична схема характерографу EMG - 1579 - 102 TR «Orion, EMG»: 1 - трансформатор; 2 - дільник напруги; 3 баластний опір; 4 - досліджуваний зразок, 5 - струмовий резистор, 6 – осцилограф

Аналітична обробка експериментальних темнових ВАХ проводилася за допомогою ПЕОМ з використанням теоретичного вираження, що описує темнову ВАХ сонячного елемента:

$$I = V / R_{\text{ш}} + I_0 \{ \exp[(e V / (AkT)) - (eIR_{\text{п}}/AkT)] - 1 \}, \quad (1)$$

де I – струм, що протікає через затемнений сонячний елемент, V – падіння напруги на СЕ.

Цей вираз легко претвориться до виду

$$I = A_1 \cdot V + A_2 \{ \exp(A_3 \cdot V - A_4 \cdot I) - 1 \}, \quad (2)$$

де

$$A_1 = 1/R_{\text{ш}}, \quad (3)$$

$$A_2 = I_0, \quad (4)$$

$$A_3 = e/(AkT), \quad (5)$$

$$A_4 = eR_{\text{п}}/(AkT) \quad (5)$$

Варіючи коефіцієнти $A_1 - A_4$, намагаються знайти найкращу апроксимацію експериментальної ВАХ теоретичною залежністю, що описується співвідношенням (2). Після визначення коефіцієнтів $A_1 - A_4$, що забезпечують зазначену апроксимацію, темнові діодні параметри I_0 , A , $R_{\text{п}}$ і $R_{\text{ш}}$ розраховуються ПЕОМ на підставі співвідношення (3 – 5).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМНОВИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Рівняння, обговорювані в даному розділі, добре відомі в літературі. Однак їх приведення необхідно для повноти аналізу, отриманих результатів.

Ефективність будь-якого СЕ розраховується відповідно до формули [44]:

$$\eta = (P_{nm}/P_n) \cdot 100 \% = [P_{nm}/(P_n \cdot S_{ce})] \cdot 100 \%, \quad (6)$$

де P_n – питомий коефіцієнт поглинання на фотоприймальній поверхні СЕ;
 S_{ce} – площа фотоприймальної поверхні СЕ. Так як

$$P_{nm} = J_{kz} V_{xx} FF, \quad (7)$$

де J_{kz} – щільність струму короткого замикання, V_{xx} – напруга холостого ходу, FF – фактор заповнення ВАХ.

Поряд із співвідношенням (6) використовується наступний вираз

$$\eta = [J_{kz} V_{xx} FF / (P_n \cdot S_{ce})] \cdot 100 \%, \quad (7)$$

Як видно з (7) ефективність СЕ зростає зі збільшенням кожного з трьох ключових вихідних параметрів СЕ – J_{kz} , V_{xx} и FF

У свою чергу вираз для визначення вхідного в формулу для обчислення ефективності V_{xx} має наступний вигляд:

$$V_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{kz}}{J_0} + 1 \right), \quad (8)$$

де $J_{кз}$ – щільність струму короткого замикання, J_0 – щільність діодного струму насичення, q – заряд електрона; k – постійна Больцмана, T – температура сонячного елемента.

Як видно з (8) напруга холостого ходу залежить від $J_{кз}$ і J_0 . Тому для високого значення V_{xx} необхідні низькі значення J_0 .

Щільність діодного струму насичення J_0 , є мірою витоку (або рекомбінації) неосновних носіїв через р-п-перехід в зворотному зміщенні. Цей витік є результатом рекомбінації носіїв в нейтральних областях по обидві сторони від з'єднання, і тому J_0 , в основному, визначає значення V_{xx} в сонячних елементах.

Концентрація рівноважних носіїв заряду, з ростом температури збільшується за рахунок їх термічної генерації:

$$n = n_0 \exp(-E_g/kT) \quad (9)$$

де E_g – ширина забороненої зони напівпровідника, k – постійна Больцмана, T – температура, n_0 – початкова концентрації носіїв заряду.

Отже величина діодного струму насичення істотно залежить від температури і описується співвідношенням:

$$J_0 = J_{00} \exp(-E_g/kT) \quad (10)$$

Відповідно зростання величини щільності діодного струму насичення J_0 зростає і коефіцієнт ідеальності діода A (від 1 до 2,2), величина якого визначається співвідношенням генераційної і рекомбинаційної складовими механізму переносу заряду. При відсутності рекомбінації коефіцієнт ідеальності діода $A = 1$, а при чистому рекомбінаційному механізмі $A = 2$. Внесок рекомбинаційної складової закономірним чином збільшується зі зростанням температури в міру збільшення щільності діодного струму

насичення. Фактор заповнення ВАХ (FF) визначається наступним співвідношенням:

$$FF = \frac{P_{HM}}{J_{K3} V_{XX}} \quad (10)$$

За відсутності послідовного опору і шунтуючої провідності вираз для FF може бути представлено як

$$FF = \frac{v_{XX} - \ln(v_{XX} + 0.72)}{v_{XX} + 1}, \quad (11)$$

где

$$v_{XX} = \frac{qV_{XX}}{AkT}. \quad (12)$$

Таким чином, залежність FF від температури експлуатації сонячного елемента очевидна.

Експериментальні темнові вольт-амперні характеристики досліджуваного ФЕП на основі CdS / CdTe при різних температурах наведені на рис 3.1.

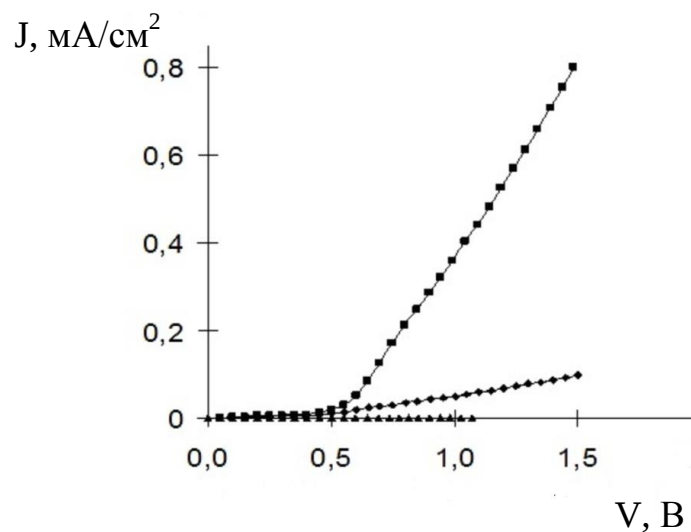


Рис. 3.1. – Експериментальні темнові ВАХ сонячних елементів на основі CdS / CdTe при різних температурах (▲ – 0 °C, ♦ – 27 °C, ■ – 76 °C)

На темновій вольт-амперній характеристиці СЕ можна виділити дві характерних ділянки, що відповідають різним механізмам зарядопереносу. Перша ділянка – експоненційний. Він спостерігається при подачі прямого зміщення від 0 В до (0,6-0,7) В. На цій ділянці ВАХ може бути апроксимована теоретичною вольт-амперною характеристикою сонячного елемента, для якої наявність потенційного бар'єру впливає на механізм зарядопереносу. На другій ділянці ВАХ лінійна. Це свідчить про те, що зарядоперенос описується законом Ома, коли визначальну роль на вигляд вольт-амперної характеристики надає послідовний електроопір приладової структури.

При зростанні прямого зміщення перехід від експоненціального ділянки ВАХ СЕ на омичний є цілком закономірним. Це обумовлено тим, що при прикладанні зовнішнього прямого зміщення величина потенційного бар'єру р-п переходу зменшується. Коли зовнішнє електричне поле стає рівним внутрішньому вбудованому полю, потенційний бар'єр зникає і настає омичний ділянку.

Аналіз показав, зі збільшенням температури напруга, при якому спостерігається перехід на омичний ділянку, збільшується, що пов'язано зі зниженням послідовного опору приладової структури. Дійсно аналітична обробка темної ВАХ показує, що при збільшенні температури експлуатації від 0 °С до 76°С відбувається зниження величини послідовного електроопору СЕ на чотири порядки (табл. 1).

Особливу зацікавленість викликає температурна залежність темного шунтуючого опору. Від 0 °С до 30 °С шунтуючий опір практично не змінюється, а потім спостерігається його різке зниження на два порядки. У загальному випадку в еквівалентну схему сонячного елемента шунтуючий електроопір вводиться для того, щоб врахувати наявність локальних місць підвищеної провідності, наприклад, межі зерен, вторинні фази, що викликають часткове шунтування приладової структури.

Таблиця 1

Вплив температури на темнові діодні характеристики СЕ ІТО / CdS / CdTe / Cu / Au

$T, ^\circ\text{C}$	$J_0, \text{A}/\text{cm}^2$	A, відн. од	$R_{\text{п}}, \text{Ом} \times \text{cm}^2$	$R_{\text{ш}}, \text{Ом} \times \text{cm}^2$
0	$2,3 \cdot 10^{-12}$	1,0	$6,5 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^4$
6	$1,2 \cdot 10^{-12}$	1,0	$4,8 \cdot 10^4$	$5,4 \cdot 10^4$
12	$1,2 \cdot 10^{-10}$	1,7	$2,0 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^4$
20	$4,5 \cdot 10^{-10}$	1,8	$1,2 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^4$
27	$8,2 \cdot 10^{-10}$	1,8	$6,6 \cdot 10^3$	$4,7 \cdot 10^4$
47	$1,5 \cdot 10^{-8}$	2,0	$1,2 \cdot 10^2$	$7,0 \cdot 10^3$
53	$5,4 \cdot 10^{-8}$	2,1	5,5	$1,9 \cdot 10^3$
76	$7,4 \cdot 10^{-8}$	2,2	4,4	$6,5 \cdot 10^2$

Зрозуміло, що з ростом концентрації основних носіїв заряду, викликаним їх термічної активацією, провідність кордонів зерен може збільшуватися, що призводить до зниження величини шунтуючого електроопору на два порядки при зростанні температури до 76°C .

ВИСНОВКИ

Важливою проблемою при експлуатації сонячних елементів є працездатність таких приладових структур при температурах, які перевищують значення їх стандартних умов експлуатації.

Проведений теоретичний аналіз показав, що зниження ефективності сонячного елемента під впливом підвищених температур експлуатації, пов'язане зі зниженням величини V_{xx} , яке обумовлено зростанням діодного струму насичення внаслідок збільшення швидкості рекомбінації в об'ємі ФЕР.

Дослідження отриманих темнових діодних характеристик показує, що СЕ на основі телуриду кадмію з тильним контактом Cu / Au можливо експлуатувати без зниження ефективності до температури $45^{\circ}C$. При більш високих температурах спостерігається погіршення діодних характеристик сонячного елемента: зниження величини темнового шунтуючого електроопору і зростання величини темної щільності діодного струму насичення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жумабаева А. С., Ергалиев Д. С. Разработка интеллектуального уровня управления робототехническим комплексом //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2015. – Т. 1.
2. Meriuts A. V. et al. Features of the light current-voltage characteristics of bifacial solar cells based on thin CdTe layers //Semiconductors. – 2010. – Т. 44. – №. 6. – С. 801-804.
3. Bonnet D., Meyers P. Cadmium-telluride – material for thin film solar cells // Journal of Materials Research. – 1998. – Vol. 13. – № 10. – P. 2740-2753.
4. Hegedus S.S., McCandless B.E. Contacts for CdTe/CdS solar cells: effect of Cu thickness, surface preparation and resonating on device performance and stability // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2005. – Vol. 88. – № 1. – P. 75-95.
5. Spinulescu-Carnaru I. Growth of hexagonal crystallites in CdTe thin film // Physic Status Solidi. – 1966. – Vol. 15. – № 2. – P. 761-765.
6. Sites J.R. Separation of voltage loss mechanisms in polycrystalline solar cells // IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – 1988. – Vol. 2. – P. 1604-1607.
7. Bonnet D. The CdTe thin film solar cell – an overview // International Journal of Solar Energy. – 1992. – Vol. 12. – P. 245-276.
8. Mitchell K., Fahrenbruch A.I., Bube R.H. Photovoltaic determination of optical-absorption coefficient in CdTe // Journal Applied Physics. – 1977. – Vol. 48. – № 2. – P. 829-830.
9. Chu T.L., Chu S.S. Recent progress in thin-film cadmium telluride solar cells // Progress in Photovoltaic: Researches and Application. – 2003. – Vol. 1. – № 1. – P. 31-42.
10. Bonnet D., Harr M. Manufacturing of CdTe solar cell // Proc. of 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion. – 1998. – P. 397-402.

11. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. – М: Высшая школа, 1984. – 351 с.
12. Крeгeр Ф. Физика несовершенных кристаллов. – М: Мир, 1979. – 654с.
13. Jahn U. Doping and intermixing in CdS/CdTe solar cells fabcicated under different conditions // Journal Applied Physics. – 2001. – Vol. 90. – № 5. – P. 2553-2558.
14. Wei S.Y., Zngang S.B. First-principles study of doping limits of CdTe // Physics Status Solidi (b). – 2002. – Vol. 229. – № 1. – P. 305-310.
15. Takebe T., Saraci J., Maturami H. Detailed characterization of deep centers in CdTe: photo ionization and thermal ionization properties // Journal Applied Physics. – 1982. – Vol. 53. – № 1. – P. 456-461.
16. Potlog T., Ghimpu L., Gashin P., Pudov A., Nagle T., Sites J. Influence of annealing in different chlorides on photovoltaic parameters of CdS/CdTe solar cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2003. – Vol. 80. – № 5. – P. 327-334.
17. Wei S.H. Zhang Z.B., Zunger A. First-principles calculation of band offsets, optical bowing and defects in CdS, CdSe, CdTe and their alloys // Journal of Applied Physics. – 2000. – Vol. 87. – P. 1304-1311.
18. Lofersky J. Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion // Applied Physics. – 1956. – Vol. 27. – P. 777-784.
19. Siepchen B., Drosr C., Spath B., Krishnakumar V., Richter H., Harr M., Bossert S., Grimm M., Hafner K., Modes T., Zywitzki O., Morgen H. Thin film solar cells by close spaced sublimation: recent result from pilot line // Thin Solid Film. – 2013. – Vol. 535. – № 21. – P. 224-228.
20. Bosio A., Menossi D., Mazzamuto S., Romeo N. Manufacturing of CdTe thin film photovoltaic modules // Thin Solid Film. – 2011. – Vol. 519. – P. 7522-7525.

21. Alharbi F., Bass J.D., Salhi A., Alyamani A., Kim H.-C., Miller R.D. Abundant non-toxic materials for thin film solar cells: Alternative to conventional materials // *Renewable Energy*. – 2011. – Vol. 36. – № 10. – P. 2753-2758.
22. Razykov T.M., Ferekides C.S., Morel D., Stefanakos E., Ullad H.S., Upadhyaya H.M. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects // *Solar Energy*. – 2011. – Vol. 85. – № 8. – P. 1580-1608.
23. Todorov T., Gunawan O., Chey S.J. Goislard de Monsabert T., Prabhakar A., Mitzi D.B. Progress towards marketable earth-abundant chalcogenide solar cells // *Thin Solid Films*. – 2011. – Vol. 519. – P. 7378-7381.
24. Corwine C.R. Role of the Cu-O defect in CdTe solar cells. – Colorado State University. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. – Fort Collins. – 2006.
25. Dobson K.D., Visoly-Fisher I., Hodes G., Cahen D. Stability of CdTe/CdS thin-film solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2000. – Vol. 62. – № 3. – P. 295-325.
26. Albin D., Rose D., Dhere R., Levi R., Woods L., Swartlander A., Sheldon P. Comparison study of close-sublimated and chemical bath deposited CdS films: effects on CdTe solar cells // *Proc. of 26th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*. – 1997. – New York (USA). – P.367-370.
27. Tiwari A.N., Romeo A., Baetzner D., Zogg H. Flexible CdTe solar cells on polymer films // *Progress in photovoltaic: Research and Application*. – 2001. – Vol. 9. – № 3. – P. 211-215.
28. Wang W., Wang X., Thompson G., McClure J.C., Singh V.P. An investigation ZnO-CdS-CdTe solar cells on molybdenum foil substrate // *Proc. of 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*. – 1998. – Vienna (Austria). – P.1055-1057.
29. Romeo N., Bosio A., Canevary V. New method to prepare efficient CdS/CdTe thin film solar cells // *Proc. of 11th European Photovoltaic Solar energy Conference and Exhibition*. – 1992. – Montreux (France). – P.972-973.

30. Bonnet D., Rabenhorst Y. Substrate configuration CdTe solar cells // IEEE Photovoltaic Specialist conference. – 1977. – P.129-132.
31. Seth A., Lush G.B., Singh V.P. Growth and characterization of CdTe by close sublimation on metal substrates // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1999. – Vol. 86. – № 1. – P. 35-49.
32. Хрипунов Г.С. Плівкові сонячні елементи NaCl/ITO/CdTe/Cu/Au // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – Vol. 6. – № 1. – P. 153-156.
33. Siebentritt S., Ernst K., Fischer Ch.-H. CdTe and CdS as extremely thin absorber materials in an η solar cell (ETA) // Proc. of 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference. – 1997. – Barcelona (Spain). – P.1823-1826.
34. Möller J., Fisher Ch.-H., Siebentritt S. CuInS₂ as an extremely thin absorber in an ETA solar cell // Proc. of 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. – 1998. – Vienna (Austria). – P.209-211.
35. Lévy-Clément C., Katty A., Bastide S. A promising ZnO/CdTe columnar film for the development of inorganic *eta*-solar cells // Proc. of 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. – 2001. – Munich (Germany). – P.107-110.
36. Hädrich M., Heisler C., Reislöhner U., Kraft C., Metzner H. Back contact formation in thin cadmium telluride solar cells // Thin Solid Films. – 2011. – Vol. 519. – № 21. – P. 7156-7159.
37. Khrypunov G. et al. Increasing the efficiency of film solar cells based on cadmium telluride // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – T. 6. – №. 5 (84). – C. 12-18.
38. Sites J.R. Separation of voltage loss mechanisms in polycrystalline solar cells // IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – 1988. – Vol. 2. – P. 1604-1607.
39. Bonnet D. The CdTe thin film solar cell – an overview // International Journal of Solar Energy. – 1992. – Vol. 12. – P. 245-276.

40. Mitchell K., Fahrenbruch A.I., Bube R.H. Photovoltaic determination of optical-absorption coefficient in CdTe // Journal Applied Physics. – 1977. – Vol. 48. – № 2. – P. 829-830.
41. Chu T.L., Chu S.S. Recent progress in thin-film cadmium telluride solar cells // Progress in Photovoltaic: Researches and Application. – 2003. – Vol. 1. – № 1. – P. 31-42.
42. Bonnet D., Harr M. Manufacturing of CdTe solar cell // Proc. of 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion. – 1998. – P. 397-402.
43. Romeo N. An innovative process suitable to produce high efficiency CdTe/CdS thin film modules [Text] / N. Romeo, A. Bosio, A. Romeo // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2010. – V. 94. – Issue 1. – P. 2-7.
44. Саченко А. В. и др. Исследование влияния температуры на характеристики гетеропереходных солнечных элементов на основе кристаллического кремния // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42. – №. 6.
45. Enzenroth R.A. Correlation of stability to varied CdCl₂ treatment and related defects in CdS/CdTe PV devices as measured by thermal admittance spectroscopy / R.A. Enzenroth, K.L. Barth, W.S. Sampath // Journal of Physics and Chemistry of Solid. – 2005. – V. 66. – P.1883-1886.