

УДК 621:53.096

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225694

Розробка способу отримання модулю CdS/CdTe/Cu/Au на гнучкій підкладці, призначеного для резервного живлення систем попередження надзвичайних ситуацій

**Н. В. Дейнеко, С. А. Єременко, Г. В. Камишенцев, І. М. Кривулькін,
М. В. Матюшенко, О. М. Мирошник, А. В. Прусський, О. І. Сошинський,
В. М. Стрілець, Р. І. Шевченко**

Проведено дослідження методів отримання базових шарів телуриду кадмію для створення ефективних сонячних елементів на гнучкій підкладці, призначених для резервного електроживлення систем безпеки та контролю об'єктів. Враховуючи те, що поліамідна плівка стабільна до температури 450 °С, формування базових шарів сонячних елементів на основі телуриду кадмію на гнучких поліамідних підкладках здійснювалось методом магнетронного розпилення на постійному струмі. При використанні обраного методу були отримані експериментальні зразки мікромодулів на гнучкій підкладці з послідовно з'єднаними сонячними елементами на основі CdS/CdTe/Cu/Au. Для розуміння впливу на ефективність всього мікромодуля виходу з строю одного або декількох сонячних елементів в процесі експлуатації проведено аналіз вихідних параметрів і світлових діодних характеристик одиничних сонячних елементів мікромодулів. Конструкція мікромодулів, в якому сонячні елементи з'єднувалися послідовно, дозволяла окремо вимірювати їх вихідні параметри. Встановлено що створення тунельного тильного контакту Cu/Au дозволило отримати високі значення вихідних параметрів для окремих сонячних елементів, але у складі мікромодуля спостерігається обмеження зашунтованим сонячним елементом. Однак найбільшу роль у зниженні коефіцієнта корисної дії всього мікромодуля відіграє неефективне поглинання випромінювання при проходженні через поліамідну плівку, що призвело до зниження ефективності всього мікромодуля, в якому наявний зашунтований елемент до 3,9 %. Максимальна ефективність отриманих зразків мікромодулів становила 5,3 %.

Ключові слова: плівковий фотоелемент, гнучка підкладка, мікромодуль, сонячний елемент, телурид кадмію, вольт-амперна характеристика

1. Вступ

Аналіз надзвичайних ситуацій показує, що однією з проблем локалізації та ліквідації наслідків є відключення електроенергії через пошкодження ліній електропередач. Тому необхідно забезпечити аварійні джерела живлення або ж використовувати інструменти повинні працювати автономно.

Сучасні системи безпеки і контролю споживають лише невелику частину від загального споживання енергії об'єкта, їх безперебійну роботу забезпечує наявність електрики в мережі. Як правило, такі системи безпеки мають резервне дже-

рело живлення на випадок аварійного припинення електропостачання в мережі але, в більшості випадків, його заряду вистачає не більше, ніж на 24 години [1]. У такому випадку, стає актуальним використання сонячних елементів. Взагалі область застосування сонячних батарей поширюється з кожним днем. Часом найнесподіваніші галузі промисловості і народного господарства звертаються за допомогою до сонячних елементів. Сонячні елементи виявляються поза конкуренцією в таких місцях, де звичайної електромережі немає, а сонця достатньо, чи у разі тривалого пошкодження мережевого постачання електроенергії.

Фотоелектричні технології – один з найважливіших поновлюваних джерел енергії, для якого з моменту першого визнання в 1839 р. [2] було проведено безліч досліджень щодо підвищення їх ефективності. Але підвищення ефективності і зниження витрат на фотоелектричні технології як і раніше вимагають великих зусиль. Сонячні елементи на основі кристалічного кремнію (с-Si) відомі як матеріали в сонячних елементах першого покоління [3]. З точки зору вартості, продуктивності і технологічності, застосування нових передових матеріалів, таких як аморфний кремній (а-Si), телурид кадмію (CdTe) і діселенід міді, індію і галію (CIGS), досягається в другому і третьому поколіннях сонячних батарей. Типова ефективність перетворення технологій першого покоління в даний час складає від 15 % до 24 %, тоді як у технологій другого покоління в даний час складає від 7 % до 16 % [4, 5]. Унікальні фізичні характеристики CdTe дають змогу використовувати цей матеріал для створення низки приладів мікроелектроніки. Як базові шари різноманітних пристроїв, дедалі частіше застосовують плівки халькогеніду кадмію [5]. Головною метою багатьох наукових досліджень телуриду кадмію можна вважати розробку технології одержання тонких плівок сполуки з визначеними електрофізичними параметрами.

Тому актуальною тематикою є розробка підходів щодо використання фотоелектричних елементів на основі CdTe для резервування системи безпеки і контролю в разі тривалої відсутності подачі електрики від інженерних мереж. В такому випадку використання сонячних елементів як портативного генератора енергії вимагає переходу від каркасних панелей до гнучких сонячних елементів, які можна розмістити на будь-якій поверхні. Однак технологія створення гнучких ефективних сонячних елементів з точки зору промислового виробництва потребує подальших досліджень.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Тонкоплівкові сонячні елементи, як правило, можуть бути розроблені у двох структурах, відомі як «superstrate» та «substrate» залежно від напрямку надходження світла в об'єм приладової структури. У плівкових сонячних елементах типу «superstrate» світло потрапляє в клітину зі сторони підкладки, на яку нанесенні базові шари і далі проходить в об'єм приладової структури. Для плівкових сонячних елементів типу «substrate» світло поступає з протилежної відносно підкладки сторони. Таким чином, для СЕ типу «superstrate» підкладка повинна бути прозорою, щоб пропускати достатньо світла в об'єм приладової структури. Тому в більшості для створення ефективних сонячних елементів на основі CdTe використовують саме тип «superstrate» [6]. В той час коли металеві

підкладки можуть бути використані лише для структури «substrate», полімерні підкладки використовують в обох випадках, залежно від їх прозорості [7]. На даний час найбільша ефективність плівкових сонячних елементів на основі CdTe на гнучкій підкладці при реалізації типу «substrate» сягає 13,8 %. Для плівкових елементів типу «substrate» 7,3 % у випадку використання полімеру, та 7,8 % у випадку металевої фольги, в той час як прогнозований теоретичний максимум для СЕ на основі CdTe майже 30 % [8].

Вважається, що при конфігурації «superstrate», вдається отримати більш ефективні сонячні елементи. Це пов'язано з «хлоридною» обробкою, в результаті якої відбувається зниження питомого електроопору CdTe за рахунок генерації акцепторів $Cl_{Te} - V_{Cd}$. В роботах [9, 10] застосування «хлоридної» обробки дозволило отримати експериментальні зразки сонячних елементів з ефективність більше 10 %, але сонячні елементи виготовлялися на скляних підкладках. У випадку «substrate» «хлоридна» обробка може застосовуватися лише до шарів CdS [11, 12]. В такому випадку кристалічність CdTe не оптимізується. Для створення гнучких сонячних елементів в якості підкладки використовуються декілька матеріалів, кожен з яких має переваги та недоліки. Серед металів найбільшого розповсюдження отримали молібден, титан та нержавіюча сталь, а серед полімерів – поліамід, поліетелентерефталат та поліетиленнафталат. Автор роботи [13] в якості гнучкої підкладки використовували молібден. Однак ефективність отриманих зразків не перевищила 5%, що зумовлено складністю формування омичного контакту до таких приладових структур. В роботі [14] в якості гнучкої підкладки використовувалися молібден та нержавіюча сталь. Отримані приладові структури досліджувалися методом рентгенівської дифрактометрії, яка дозволила встановити, що стримуючим фактором, окрім складності формування тильного контакту, є наявність у базовому шарі дефектів у вигляді дислокацій. В роботі [15] в якості підкладки використовувалися поліімідні плівки Upilex, які можуть витримувати високі температури (450 °C). Отримані результати дослідження продемонстрували низькі значення ефективності, що на думку авторів, пов'язано з неефективним поглинанням випромінювання в поліамідній підкладці.

Таким чином, у випадку створення плівкових сонячних елементів на основі CdTe на гнучких підкладках обмеження ефективності приладових структур зумовлено двома групами факторів: по-перше – це складність у створенні якісного тильного контакту, по-друге – значне поглинання видимої частини спектру при проходженні через підкладку.

3. Мета і завдання дослідження

Метою даної роботи є розробка технології створення ефективного сонячного модулю на основі телуриду кадмію на гнучкій поліамідній підкладці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести дослідження вихідних параметрів та світлових діодних характеристик мікромодулів, що входять до складу модулю CdS/CdTe/Cu/Au на гнучкій поліамідній підкладці та окремо його складових елементів;

– провести дослідження впливу на ефективність мікромодулів на гнучкій поліамідній підкладці вихідних параметрів його складових елементів та умов отримання експериментальних зразків.

4. Матеріали та методи дослідження модулю ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au на поліамідній підкладці

4. 1. Отримання зразків модулю ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au на поліамідній підкладці

Досліджуваний сонячний модуль на основі CdS/CdTe складався з чотирьох мікромодулів, з'єднаних між собою паралельно. Кожен мікромодуль представляв собою п'ять послідовно з'єднаних сонячних елементів (рис.1). Для виготовлення модулю використовували набір металевих масок (рис.2). Цей спосіб більш економічний, ніж фотолітографія. Виготовлення модулю відбувалось на поліамідних підкладках, марки Kapton, виробництва DuPont, янтарного кольору, товщиною 50 мкм, методом магнетронного розпилення мішені. Мішень представляла собою спресовану механічну суміш In_2O_3 (90 ваг. %) та SnO_2 (10 ваг. %).

Плівки ІТО формувалися при температурі осадження 300 °С. Для нанесення плівок ІТО використовувалася маска без поділу на окремі електроди. Початковий парціальний тиск становив 10^{-4} Па. Питома потужність магнетрона становила 1,5 Вт/см², що відповідає діапазону значень, які звичайно застосовуються для отримання прозорих і електропровідних плівок ІТО [16]. Розпилення ІТО здійснювалося в аргонкислородній суміші при тиску $8 \cdot 10^{-1}$ Па. В таких умовах формувалися шари з поверхневим опором 10 Ом/□ середнім коефіцієнтом пропускання у видимому спектральному діапазоні близько 90 %, яка досягається за рахунок зменшення їх товщини до 0,1 мкм [16].

Для нанесення шару сульфиду і телуриду кадмію використовувалася одна і та ж маска. Осадження цих шарів здійснювалося в єдиному технологічному циклі методом термічного вакуумного осадження з графітових випарників при вихідному вакуумі на рівні 10^{-4} Па без його порушення.



Рис. 1. Зовнішній вигляд модуля сонячних елементів

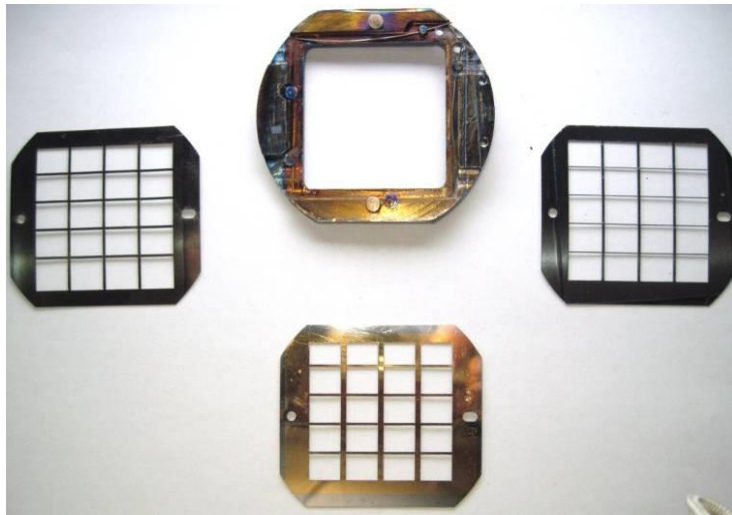


Рис. 2. Система масок для виготовлення модуля

Отримані приладові гетеросистеми піддавалися стандартній для цього типу СЕ «хлоридній» обробці. В даному випадку використовували менші розміри маски. Це обумовлені тим, що в якості діелектричних прошарків, які відділяли елементи один від одного, використовувалися шари телуриду кадмію, на які шар хлориду кадмію не впливає і які, отже, не піддавалися «хлоридної» обробки, при якій знижується послідовний опір. Для здійснення «хлоридної» обробки на поверхню шарів CdTe методом термічного випаровування без нагріву підкладки наносилися плівки CdCl₂. Загальновідомо, що «хлоридна» обробка [17] викликає зростання ККД в кілька разів. В результаті такої обробки відбувається зниження питомого електроопору CdTe за рахунок генерації акцепторів Cl_{Te} -V_{Cd} з концентрацією порядку 10¹⁴ см⁻³, що зменшує R_п. Крім того, при такій обробці спостерігається перекристалізація базового шару, при якому стовпчаста структура CdTe з маленьким розміром зерна трансформується в структуру вільної орієнтації з великими розмірами зерен. В результаті зменшується ймовірність часткового шунтування сепаруючого бар'єру зерномежевою поверхнею, що викликає зростання R_ш. Потім отримані багатошарові плівкові системи ITO/CdS/CdTe/CdCl₂ відпалювали на повітрі в закритому об'ємі при температурі 430 °С протягом 25 хв. Для видалення продуктів реакції відпалені зразки піддавалися травлінню в 5 % розчині броду в метанолі.

Для формування тильних електродів СЕ на протравлену поверхню телуриду кадмію у вакуумній установці термічним випаровуванням наносилися двошарові електричні контакти Cu/Au. Оскільки без прошарку міді не вдається отримати ефективних приладових структур, то на поверхню телуриду кадмію осаджувався нанорозмірний шар міді товщиною 2 нм. Мінімізація товщини шару міді була спрямована на збільшення деградаційної стійкості приладової структури.

4. 2. Методика вимірювання та аналітичне опрацювання світлових вольт-амперних характеристик модуля на гнучкій поліамідній підкладці

Вимірювання світлових вольт-амперних характеристик (далі – ВАХ) проводилося за методикою, яка описана в [18]. Імітація сонячного випромінюван-

ня, наближеного до стандартного режиму AM1,5, здійснювалась за допомогою системи світлодіодів.

Світлові ВАХ мікромодуля та окремо кожного із сонячних елементів, що входять до його складу вимірювались компенсаційним методом у стаціонарному режимі опромінення, наближеному до стандартного AM1,5. Визначення вихідних параметрів і світлових діодних характеристик здійснювалося за експериментальними світловими вольт-амперними характеристиками. Аналітична обробка світлових ВАХ досліджуваного модуля та окремо сонячних елементів, що входять до його складу проводилася за допомогою ПЕОМ.

Зв'язок ефективності ФЕП зі світловими діодними характеристиками в не-явному вигляді описується теоретичною світловою ВАХ ФЕП:

$$J_n = -J_\phi + J_0 \{ \exp[e(V_n - J_n R_n) / (AkT)] - 1 \} + (V_n - J_n R_n) / R_{ш}, \quad (1)$$

де J_n – щільність струму, що протікає через навантаження, e – заряд електрона; k – постійна Больцмана, T – температура сонячного елемента; V_n – падіння напруги на навантаженні.

Згідно з програмою чисельного моделювання [18] аналітичний вираз (1) для світлових ВАХ перетворюється в вираз, що має вигляд:

$$I_n = A_0 - A_1 V_n - A_2 \exp(A_3 V_n + A_4 I_n), \quad (2)$$

$$A_0 = (I_\phi + I_0) R_{ш} / (R_n + R_{ш}), \quad (3)$$

$$A_1 = 1 / (R_n + R_{ш}), \quad (4)$$

$$A_2 = I_0 R_{ш} / (R_n + R_{ш}), \quad (5)$$

$$A_3 = e / (AkT), \quad (6)$$

$$A_4 = e R_n / (AkT). \quad (7)$$

Використовуючи вираз (2) і експериментально отримані значення I_n і V_n , шляхом варіювання значень зазначених вище коефіцієнтів A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 досягаються найкращої апроксимації експериментальних даних $I_n = I_n(V_n)$ кривої, що описується перетвореним теоретичним виразом (2). Зазвичай при аналітичній обробці середньоквадратичне відхилення не перевищує 10^{-8} , що відповідає відносній похибці у визначенні вихідних параметрів і світлових діодних характеристик на рівні не більше 1%. Після знаходження зазначених коефіцієнтів, що забезпечують кращу апроксимацію, визначаються вихідні параметри ФЕП: $I_{кз}, V_{хх}, FF, P_{нм}, ККД$. Світлові діодні характеристики $R_n, R_{ш}, A$ і I_0 обчислюються за знайденими коефіцієнтами A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 , за допомогою співвідношень (3)–(7) [19]. Похибка у визначенні вихідних параметрів і світлових діодних характеристик визначається не тільки величиною середньоквадратичного відхилення, але і похибкою у вимірі світлової ВАХ.

5. Результати дослідження модулю ITO/CdS/CdTe/Cu/Au на поліамідній підкладці

5. 1. Результати дослідження світлових вольт-амперних характеристик мікромодулів CdS/CdTe/Cu/Au на гнучкій поліамідній підкладці

Шляхом аналітичної обробки світлових ВАХ були отримані вихідні параметри мікромодулів що входять до складу модуля ITO/CdS/CdTe/Cu/Au, з послідовним з'єднанням елементів (табл. 1).

Таблиця 1

Вихідні параметри мікромодулів ITO/CdS/CdTe/Cu/Au при послідовному з'єднанні сонячних елементів

Мікромодуль	V_{xx} , мВ	$J_{кз}$, мА/см ²	FF	КПД, %
M5_1	2449	2,8	0,59	4,0
M5_2	3489	2,7	0,39	3,7
M5_3	3572	2,8	0,54	5,3
M5_4	3052	2,1	0,56	3,5

Світлові ВАХ мікромодулів, виміряні при потужності світлового потоку 100 мВт/см² і при послідовному з'єднанні сонячних елементів, наведені на рис. 3, 4.

Як видно із табл. 1, при послідовному з'єднанні елементів у складі мікромодулю ефективність мікромодулів досягає максимального значення ККД на рівні 5,3 %.

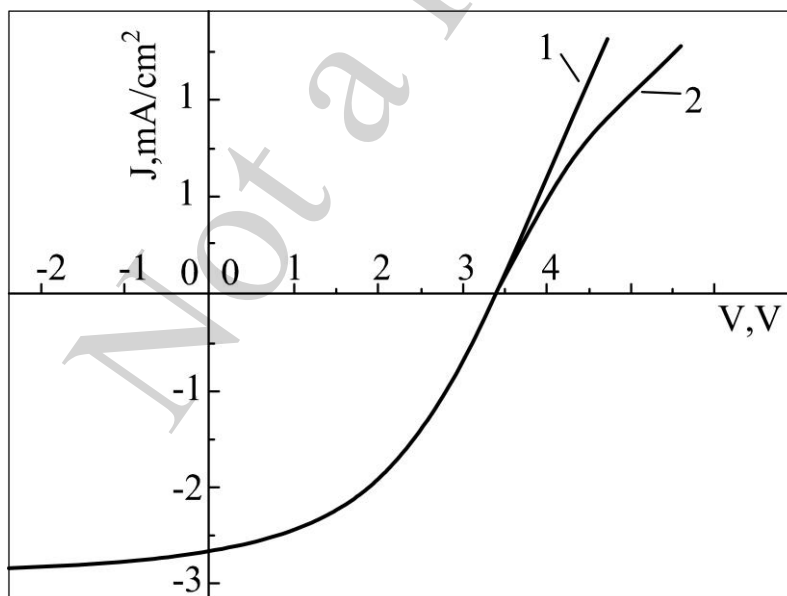


Рис. 3. Світлові ВАХ мікромодуля M5_1 при послідовному з'єднанні чотирьох (1) і п'яти (2) СЕ

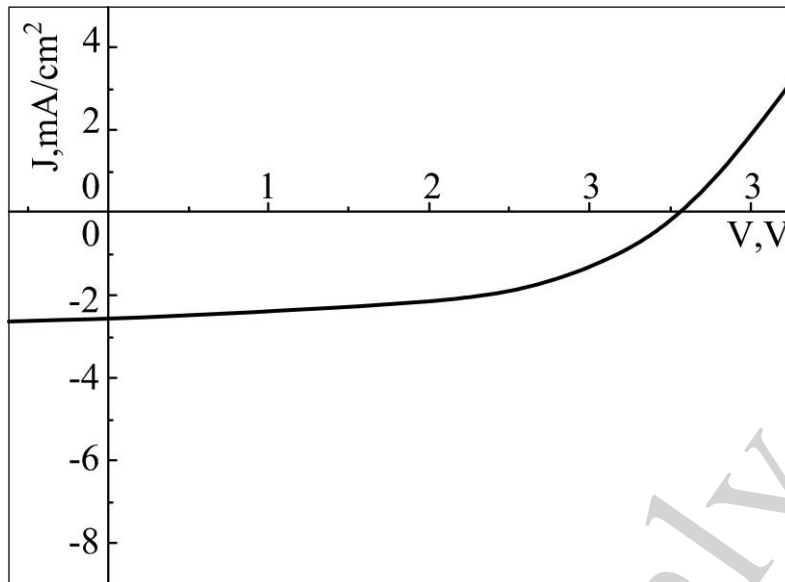


Рис. 4. Світлова ВАХ мікромодуля M5_3 при послідовному з'єднанні п'яти СЕ

5. 2. Результати дослідження впливу на ефективність мікромодулів на гнучкій поліамідній підкладці вихідних параметрів його складових елементів та умов отримання експериментальних зразків

Шляхом аналітичної обробки світлових ВАХ були отримані вихідні параметри і світлові діодні характеристики досліджених сонячних елементів окремо і при їх послідовному з'єднанні у складі мікромодулю

Отримані результати представлені в табл. 2, 3, де С – одиничний СЕ, С2-С5 – мікромодуль M5_1 при послідовному з'єднанні чотирьох СЕ, С1-С5 – мікромодуль при послідовному з'єднанні п'яти СЕ.

Як видно із табл. 2 та 3, найбільшу ефективність має сонячний елемент у складі мікромодулю M5_1 на рівні 8,4%. Однак максимальна ефективність всього мікромодуля обмежується значенням на рівні 4,9 %.

Таблиця 2

Вихідні параметри і світлові діодні характеристики СЕ мікромодуля M5_1

Зразок	С1	С2	С3	С4	С5	С2-С5	С1-С5
V_{xx} , мВ	97	748	755.5	133	752	2389	2486
$J_{кз}$, мА/см ²	10,6	16,6	18,2	12,6	16,2	3,4	2,7
FF, від. од.	0,27	0,61	0,61	0,26	0,59	0,59	0,58
ККД %	0,3	7,5	8,4	0,4	7,1	4,9	3,9
$R_{п}$, Ом·см ²	4,1	8,77	8,47	3,03	8,77	186	239
$R_{ш}$, Ом·см ²	9,4	498	673	808	623	$7 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^5$
J_0 , А/см ²	$9 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-14}$
A, від. од.	1,8	1,5	1,5	1,1	2,0	3,7	3,8
$J_{ф}$, мА/см ²	18,4	16,7	18,4	17,3	16,5	3,5	2,8

Таблиця 3

Вихідні параметри і світлові діодні характеристики СЕ мікромодуля М5_3

Зразок	C1	C2	C3	C4	C5	C1-C5
V_{xx} , мВ	752	762	552	758	741	3582
$J_{кз}$, мА/см ²	15.2	16.7	16.9	17.8	16.9	2,7
FF, від. од.	0.54	0.61	0.28	0.60	0.55	0.55
ККД%	6.2	7.7	2.6	8.1	6.8	5.3
$R_{п}$, Ом·см ²	5.6	5.7	12.8	6.3	10.1	243
$R_{ш}$, Ом·см ²	238	476	24	520	400	15630
J_0 , А/см ²	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-8}$
A, від. од.	2.8	2.3	2.0	2.2	2.0	2.8
$J_{ф}$, мА/см ²	15.6	16.9	25.9	18.0	17.3	2.8

6. Обговорення результатів дослідження модулю ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au на поліамідній підкладці

Дослідження вихідних параметрів мікромодулів у складі модуля на поліамідній підкладці показало, що максимальна ефективність (табл.1) спостерігається для мікромодуля М5_3 на рівні 5,3%. Послідовне з'єднання сонячних елементів в мікромодулі М5_1, дозволило отримати ККД 3,9 %. Таке низьке значення ефективності для мікромодуля М5_1 у порівнянні з мікромодулем пов'язано М5_3 з низьким значення V_{xx} . Імовірно, що низьке значення V_{xx} для мікромодуля М5_1 пов'язано з шунтуванням сонячних елементів в мікромодулі. Таке припущення підтвердилось шляхом проведення аналізу вихідних параметрів і світлових діодних характеристик одиничних сонячних елементів модулів М5_1 і М5_3. Аналіз вихідних параметрів і світлових діодних характеристик одиничних сонячних елементів модулів М5_1 і М5_3 показав, що у першому з мікромодулів (М5_1) було два практично зашунтованих сонячних елемента. Другий мікромодуль (М5_3) мав один сонячний елемент з істотно більш низьким ККД.

Аналіз табл. 2 показує, що для окремих сонячних елементів першого мікромодуля світлові діодні характеристики і вихідні параметри змінювалися в наступних інтервалах: $R_{п}=(3-9)$ Ом·см², $R_{ш}=(9-620)$ Ом·см², $J_0=(4 \cdot 10^{-11}-9 \cdot 10^{-4})$ А/см², $V_{xx}=(97-755)$ мВ, $J_{кз}=(10.6-18.2)$ мА/см², $FF=(0.26-0.61)$, $ККД=(0.3-8.4)$ %, для другого мікромодуля $R_{п}=(5,5-10)$ Ом·см², $R_{ш}=(24-520)$ Ом·см², $J_0=(7 \cdot 10^{-9}-3,0 \cdot 10^{-7})$ А/см², $V_{xx}=(550-760)$ мВ, $J_{кз}=(15-17,8)$ мА/см², $FF=(0,28-0.6)$, $ККД=(2,6-8,1)$ %.

Таким чином можна стверджувати, що низькі значення ККД мікромодулів у порівнянні з ККД одиничних сонячних елементів у складі мікромодуля обумовлено зниженням усіх вихідних параметрів. Створення тунельного тильного контакту Cu/Au дозволило отримати високі значення V_{xx} для окремих сонячних елементів, але у складі мікромодуля обмежується зашунтованим сонячним елементом. Найбільшу роль у зниженні ККД всього мікромодуля відіграє істотне зніження $J_{кз}$, як для першого, так і для другого мікромодулів. Ця обставина може бути пов'язана з неефективним поглинанням випромінювання

при проходженні через темно-жовту поліамідну плівку. Тому для проведення подальших дослідження необхідно зосередити увагу на зменшенні товщині поліамідної плівки.

7. Висновки

1. Методом магнетронного розпилення на постійному струмі були отримані експериментальні зразки модуля на основі телуриду кадмію на гнучкій поліамідній підкладці, який складається з чотирьох мікромодулів з послідовно з'єднаними сонячними елементами. Проведено дослідження вихідних параметрів та світлових діодних характеристик мікромодулів, що входять до складу модулю. Встановлено що максимальна ефективність мікромодуля у складі модуля досягла 5,3 %.

2. Встановлено що низькі значення ефективності мікромодулів зумовлено частковим шунтуванням сонячних елементів у складі мікромодулів та неефективним поглинанням видимої частини випромінювання при проходженні через поліамідну підкладку.

Література

1. Stallings, W. (2017). Physical Security Essentials. Computer and Information Security Handbook, 965–979. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803843-7.00069-7>
2. Yang, D., Yin, H. (2011). Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization. IEEE Transactions on Energy Conversion, 26 (2), 662–670. doi: <https://doi.org/10.1109/tec.2011.2112363>
3. Gaur, A., Tiwari, G. N. (2013). Performance of Photovoltaic Modules of Different Solar Cells. Journal of Solar Energy, 2013, 1–13. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/734581>
4. Van de Kaa, G., Rezaei, J., Kamp, L., de Winter, A. (2014). Photovoltaic technology selection: A fuzzy MCDM approach. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32, 662–670. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.044>
5. Khrypunov, G., Vambol, S., Deyneko, N., Sychikova, Y. (2016). Increasing the efficiency of film solar cells based on cadmium telluride. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (5 (84)), 12–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85617>
6. Leterrier, Y., Medico, L., Demarco, F., Manson, J.-A.E., Betz, U., Escola, M. F. et. al. (2004). Mechanical integrity of transparent conductive oxide films for flexible polymer-based displays. Thin Solid Films, 460 (1-2), 156–166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.01.052>
7. Leterrier, Y., Pinyol, A., Gilliéron, D., Manson, J.-A. E., Timmermans, P. H. M., Bouten, P. C. P., Templier, F. (2010). Mechanical failure analysis of thin film transistor devices on steel and polyimide substrates for flexible display applications. Engineering Fracture Mechanics, 77 (4), 660–670. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.12.016>

8. McCandless, B. E. (2001). Thermochemical and Kinetic Aspects of Cadmium Telluride Solar Cell Processing. *MRS Proceedings*, 668. doi: <https://doi.org/10.1557/proc-668-h1.6>
9. Deyneko, N., Semkiv, O., Khmyrov, I., Khryapynskyy, A. (2018). Investigation of the combination of ITO/CdS/CdTe/Cu/Au solar cells in microassembly for electrical supply of field cables. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (12 (91)), 18–23. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.124575>
10. Deyneko, N., Semkiv, O., Soshinsky, O., Streletc, V., Shevchenko, R. (2018). Results of studying the Cu/ITO transparent back contacts for solar cells SnO₂:F/CdS/CdTe/Cu/ITO. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (5 (94)), 29–34. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139867>
11. Krč, J., Zeman, M., Smole, F., Topič, M. (2002). Optical modeling of a-Si:H solar cells deposited on textured glass/SnO₂ substrates. *Journal of Applied Physics*, 92 (2), 749–755. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1487910>
12. Izu, M., Ellison, T. (2003). Roll-to-roll manufacturing of amorphous silicon alloy solar cells with in situ cell performance diagnostics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 78 (1-4), 613–626. doi: [https://doi.org/10.1016/s0927-0248\(02\)00454-3](https://doi.org/10.1016/s0927-0248(02)00454-3)
13. Campbell, P., Green, M. A. (1987). Light trapping properties of pyramidally textured surfaces. *Journal of Applied Physics*, 62 (1), 243–249. doi: <https://doi.org/10.1063/1.339189>
14. Söderström, K., Escarré, J., Cubero, O., Haug, F.-J., Perregaux, S., Ballif, C. (2010). UV-nano-imprint lithography technique for the replication of back reflectors for n-i-p thin film silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19 (2), 202–210. doi: <https://doi.org/10.1002/pip.1003>
15. Romeo, A., Khrypunov, G., Kurdesau, F., Arnold, M., Bätzner, D. L., Zogg, H., Tiwari, A. N. (2006). High-efficiency flexible CdTe solar cells on polymer substrates. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90 (18-19), 3407–3415. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.09.020>
16. Andorka, F. (2014). First Solar Sets World Record For CDTE Solar Cell Efficiency. URL: <https://www.solarpowerworldonline.com/2014/02/first-solar-sets-world-record-cdte-solar-cell-efficiency/>
17. Chu, T. L., Chu, S. S. (1992). High efficiency thin film CdS/CdTe solar cells. *International Journal of Solar Energy*, 12 (1-4), 121–132. doi: <https://doi.org/10.1080/01425919208909755>
18. Romeo, N., Bosio, A., Tedeschi, R., Romeo, A., Canevari, V. (1999). A highly efficient and stable CdTe/CdS thin film solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 58 (2), 209–218. doi: [https://doi.org/10.1016/s0927-0248\(98\)00204-9](https://doi.org/10.1016/s0927-0248(98)00204-9)
19. Britt, J., Ferekides, C. (1993). Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. *Applied Physics Letters*, 62 (22), 2851–2852. doi: <https://doi.org/10.1063/1.109629>