

УДК 621:53.096

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139867

## Результати дослідження прозорих тильних контактів Cu/ІТО для сонячних елементів SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/ІТО

Н. В. Дейнеко, О. М. Семків, О. І. Сошинський, В. М. Стрілець,  
Р. І. Шевченко

*Проведено дослідження прозорих тильних контактів Cu/ІТО для сонячних елементів на основі CdTe, призначених для використання в тандемних і двосторонньо чутливих приладових структурах. Створення омичного контакту до базових шарів p-CdTe в умовах промислового виробництва не є економічним, оскільки тільки платина має необхідну для формування омичного переходу роботу виходу електронів. Тому традиційно формують тунельні контакти, використовуючи при цьому тонкі плівки, що містять мідь або халькогенід міді. Однак дифузія міді в базовий шар призводить до деградації вихідних параметрів плівкових сонячних елементів на основі CdS/CdTe. Тому умови створення прозорих тильних контактів при використанні прошарку міді потребують дослідження. Встановлено, що попереднє нанесення нанорозмірного шару міді на поверхню CdTe для формування тильного електрода дозволяє сформувати якісний тунельний контакт. Показано, що отримані приладові структури мають високу деградаційну стійкість. Після 8 років експлуатації величина ККД досліджуваних ФЕП практично збігається з початковим. Дослідження світлових вольт-амперних характеристик сонячних елементів SnO<sub>2</sub>:F/CdS /CdTe /Cu /ІТО при освітленні з обох сторін дозволило встановити суттєві відмінності у вихідних параметрах і світлових діодних характеристиках при освітленні з боку скляної підкладки і з боку прозорого тильного електрода. Встановлені відмінності обумовлені впливом тильного діода на ефективність фотоелектричних процесів в базовому шарі. В досліджуваній структурі реалізується режим зворотного діода, коли тильний контакт являє собою діод, включений послідовно по відношенню до основного діода, що призводить до низьких значень ефективності при освітленні зі сторони тильного електрода. Отримані результати демонструють необхідність у зменшенні товщини базового шару для створення ефективних двосторонньо чутливих елементів*

*Ключові слова: телурид кадмію, прозорий тильний контакт, тандемна структура, двосторонньо чутливий фотоперетворювач*

### 1. Вступ

Одним з перспективних напрямків підвищення ефективності фотоелектричного перетворення сонячної енергії і здатності стабільно працювати протягом тривалого періоду часу є розробка тандемних і двосторонньо чутливих фотоелектричних перетворювачів (далі – ФЕП). Розробка багат шарових тандемних структур має на увазі використання декількох базових шарів з різною шириною забороненої зони. Це дозволяє ефективно перетворювати сонячне

випромінювання в широкому спектральному діапазоні. Так, фотони, які мають велику енергію, поглинаються в першому базовому шарі, решта випромінювання надходить в розташований нижче ФЕП з базовим шаром, який має меншу ширину забороненої зони. Основними вимогами при створенні тандемних структур є мала товщина і прозорий тильний контакт ФЕП з широкозонним базовим шаром [1]. Це необхідно для проходження довгохвильової частини спектра крізь базовий шар з мінімальними втратами. Для двосторонньо чутливих фотоелектричних перетворювачів основною вимогою є ефективне перетворення сонячного випромінювання при висвітленні з обох сторін. З огляду на високу радіаційну стійкість телуриду кадмію, двосторонньо чутливі сонячні елементи на його основі перспективно застосовувати для енергозабезпечення космічних апаратів. Оскільки тильна частина сонячної батареї космічного корабля виявляється освітлена сонячним випромінюванням, відбитим від корпусу. Тому необхідне проведення досліджень щодо умов створення прозорих тильних електродів для фотоелектричних перетворювачів на основі CdTe, призначених для використання як в тандемних, так і двосторонньо чутливих приладових структурах.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Перспективним для створення тандемних структур є використання плівкових ФЕП з базовими шарами CdTe і CuInSe<sub>2</sub> [2]. Відомо, що ширина забороненої зони CdTe становить 1,46 eV [3], а ширина забороненої зони CuInSe<sub>2</sub> – 1,10 eV [4]. Поєднання енергетичної структури таких ФЕП здатне забезпечити ефективне перетворення сонячного випромінювання, як в наземних, так і в заатмосферних умовах. Однак використання ФЕП на основі CdTe, в тандемних структурах, стримується складністю створення тильних контактів придатних для промислового виробництва. Це пов'язано з тим, що тільки платина має необхідну для формування омічного переходу роботу виходу електронів. Інші метали із телуридом кадмію утворюють бар'єр Шоттки, що впливає на ефективність фотоелектричних процесів в сонячних елементах на його основі [5]. Тому основним підходом для створення низькоомних електродів є формування тунельних електродів, що містять мідь. Однак дифузія міді в базовий шар призводить до деградації вихідних параметрів плівкових сонячних елементів на основі CdS/CdTe. Авторами роботи [6] запропоновано створення тильного контакту без використання міді. Однак ефективність досліджуваних зразків не перевищила 6,2 %, а їх деградаційна стійкість досліджувалася лише протягом одного року, що не є достатнім для експлуатації в наземних та заатмосферних умовах. В роботі [7] представлено дослідження, присвячені створенню омічних тильних контактів при використанні органічного шару провідного полімеру PEDOT-PSS, що також не містить міді. Однак ефективність отриманих зразків не перевищила 2 %. Як було показано авторами, низька ефективність експериментальних зразків обумовлена роботою приладової структури в режимі наскрізного діоду. Авторами роботи [8] досліджено декілька типів оксидів металів в якості буферного шару для створення якісного тильного контакту для со-

нячних елементів на основі CdTe. Але такий підхід ускладнює адаптацію до масового промислового виробництва.

Таким чином, на даний час проблема створення ефективних та прозорих тильних контактів до сонячних елементів на основі CdTe без використання міді залишається невирішеною. Тому необхідне проведення досліджень, направлених на оптимізацію конструктивно-технологічного рішення створення прозорих тильних електродів з використанням міді.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою даної роботи є дослідження прозорих тильних електродів Cu /ITO для фотоелектричних перетворювачів SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/ITO.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз деградаційної стійкості фотоелектричних перетворювачів на основі CdTe з прозорим тильним контактом Cu/ITO;
- провести аналіз вихідних і світлових діодних характеристик фотоелектричних перетворювачів на основі CdTe з прозорими контактами Cu/ITO при освітленні з фронтальної і тильної сторін.

### **4. Матеріали та методи дослідження вихідних параметрів фотоелектричних перетворювачів на основі CdTe**

#### **4. 1. Матеріали та обладнання, що використовується для отримання фотоелектричних перетворювачів SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/ITO**

Досліджувані приладові структури з площею фотоприймальної поверхні до 2 см<sup>2</sup>, були отримані методом термічного вакуумного випаровування при використанні вакуумної установки УВН67 з модифікованим внутрішнім оснащенням. Товщина базового шару CdTe становила 2,5 мкм. Вид внутрішнього обладнання установки показаний на рис. 1.

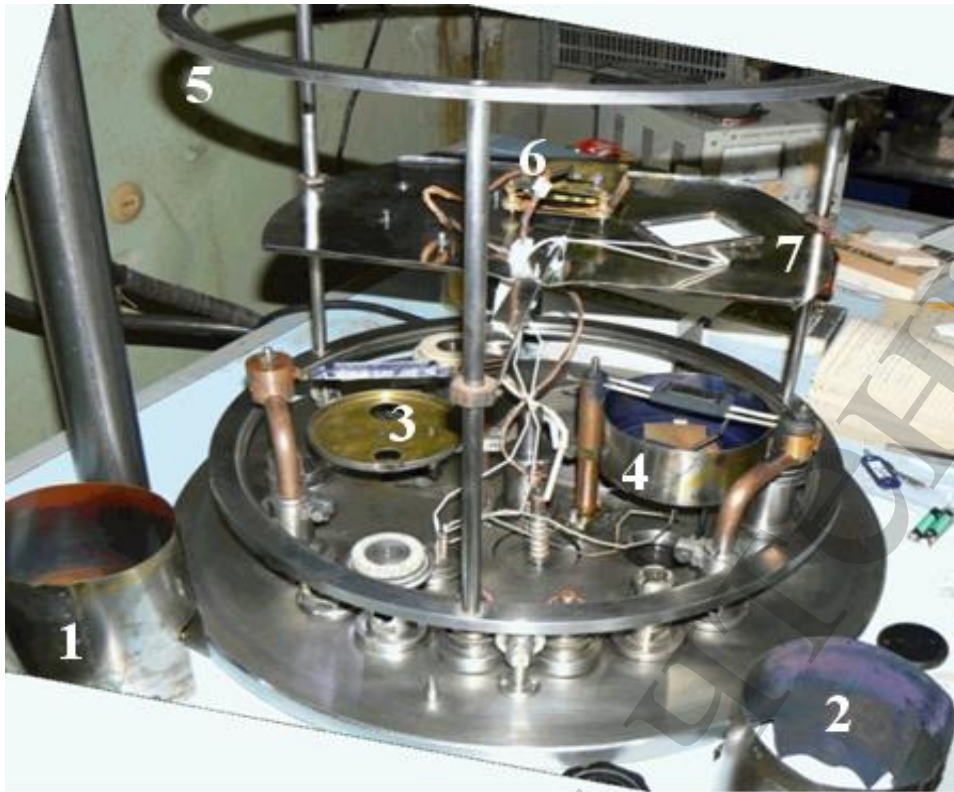


Рис. 1. Внутрішній устрій установки для напилення CdS і CdTe:  
1, 2 – екрани, 3 – випарник порошкового телуриду кадмію;  
4 – випарник порошкового сульфїду кадмію; 5 – карусель,  
6 – нагрівач підкладки, 7 – тримач підкладки

Нанесення плівок ІТО (оксидів індію та олова) здійснювалося методом неактивного магнітронного розпилення на постійному струмі в вакуумній установці ВУП-5М (рис. 2). Необхідно відзначити, що магнітронне розпилення є одним з найбільш перспективних методів отримання всіх прозорих електродів [9, 10]. Це обумовлено високим ступенем точності перенесення складу мішені на підкладку, відтворюваністю і керованістю процесу магнітронного розпилення [11, 12].

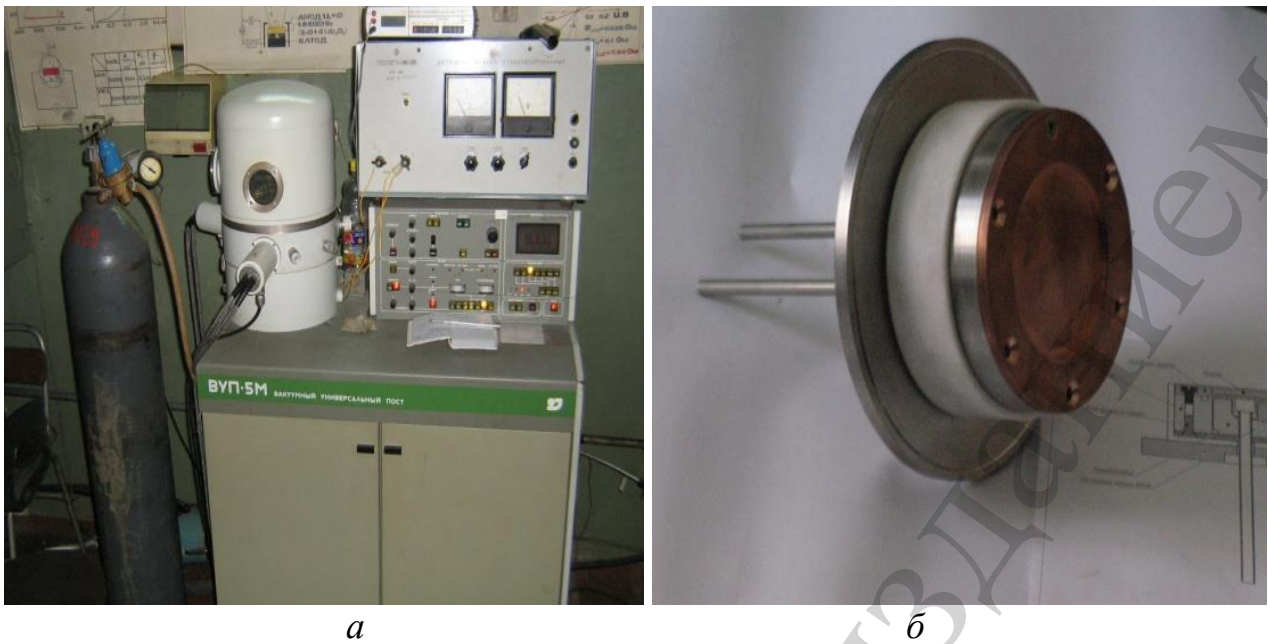


Рис. 2. Вакуумна установка ВУП-5М: *а* – фотографія вакуумної установки, *б* – фотографія матеріалосберігаючого магнітрону

Оскільки без прошарку міді не вдається отримати ефективних приладових структур, то перед нанесенням ІТО на поверхню телуриду кадмію осаджувався нанорозмірний шар міді товщиною 2 нм. Мінімізація товщини шару міді була спрямована на збільшення деградаційної стійкості приладової структури.

Згідно [13], технологія формування тунельних електродів передбачає перед нанесенням електрода проведення хімічного травлення, при якому формується прошарок Те, а завершальною стадією є відпал, що призводить до формування фази  $Cu_{2-x}Te$ , яка є виродженим провідником.

#### 4. 2. Методика вимірювання та аналітичне опрацювання світлових вольт-амперних характеристик

Вимірювання світлових вольт-амперних характеристик (далі – ВАХ) проводилося за методикою, яка описана в [14]. Імітація сонячного випромінювання, наближеного до стандартного режиму AM1,5, здійснювалась за допомогою системи світлодіодів.

Для вимірювання компенсаційним методом у стаціонарному режимі опромінення, наближеному до стандартного AM1,5, світлових ВАХ зразків СЕ, визначення вихідних параметрів і світлових діодних характеристик фотоелектричних перетворювачів на основі CdTe здійснювалось за експериментальними світловими вольт-амперними характеристиками. Аналітична обробка світлових ВАХ досліджуваних ФЕП проводилася за допомогою ПЕОМ.

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

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

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 [15] 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  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  домагаються 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) [16–18]. 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 світлових вольт-амперних характеристик фотоелектричних перетворювачів $\text{SnO}_2\text{:F/CdS /CdTe/Cu/ITO}$

Шляхом аналітичної обробки світлових ВАХ (рис. 3) були проаналізовані вихідні і світлові діодні характеристики виготовлених ФЕП.



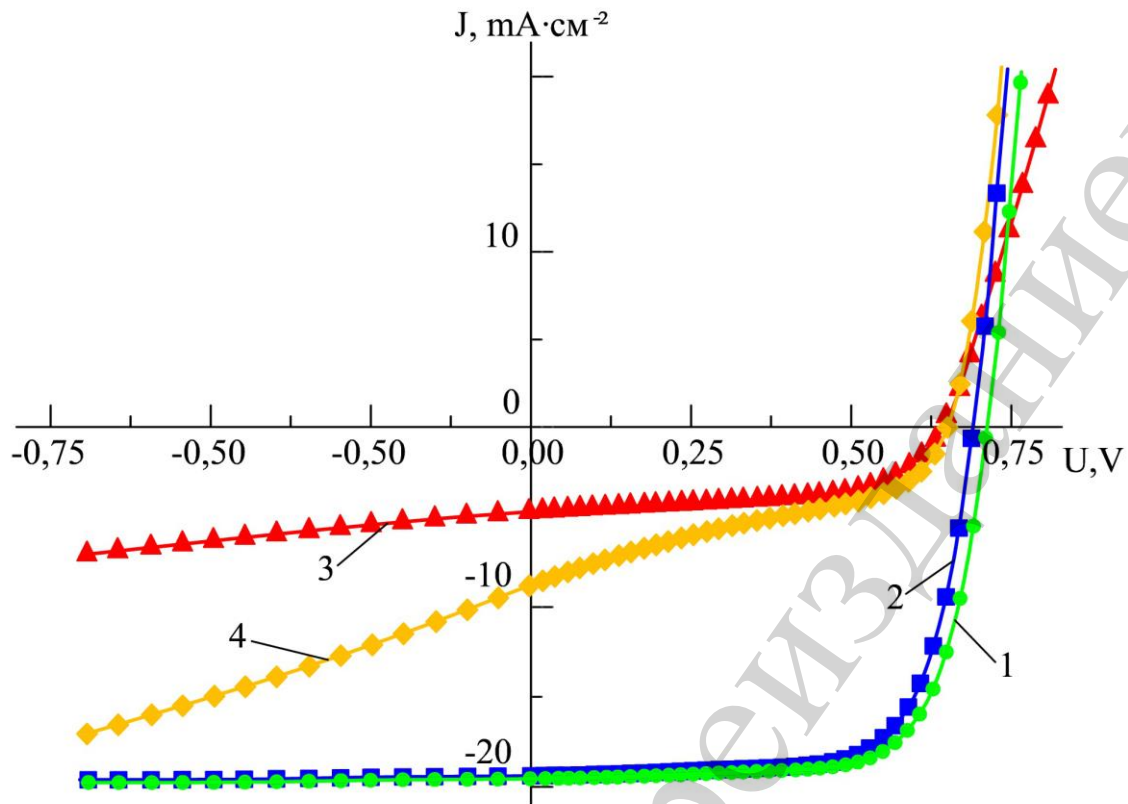


Рис. 3. Світлові ВАХ ФЕП SnO<sub>2</sub>:F/CdS/ CdTe /Cu /ITO: 1 – в початковому стані, 2 – 8 років при освітленні з фронтальної сторони, 3 – в початковому стані, 4 – ~8 років при освітленні з тильного боку

Після зняття вихідних світлових ВАХ при освітленні з фронтальної і тильної сторін зразки витримувалися при постійному світловому потоці в спеціальній камері в режимі холостого ходу. Освітлення здійснювалося лампою розжарювання потужністю 500 Вт, температура зразка становила 80 °С. В [19] було показано, що такі режими освітлення збільшують швидкість деградації в 100 разів. Через певні проміжки часу, які умовно відповідали: 0; 0,5; 1,4; 3,6; 4,2; 5,4; 6,02 і 8 років проводилися повторні вимірювання світлових ВАХ. Результати аналітичної обробки світлових ВАХ при освітленні з фронтальної сторони представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні параметри і світлові діодні характеристики ФЕП ITO/CdS/CdTe/Cu/ITO при освітленні з фронтальної сторони

$t$ , год	0	0,5	1,4	3,6	4,2	5,4	6,02	8
$J_{кз}$ , мА/см <sup>2</sup>	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,4	19,4	19,4
$V_{хх}$ , мВ	740	720	710	710	710	710	710	700
$FF$	0,68	0,73	0,75	0,74	0,73	0,73	0,73	0,71
ККД, %	9,8	10,2	10,3	10,1	10,2	10,1	10,0	9,7
$J_{ф}$ , мА/см <sup>2</sup>	19,5	19,0	19,5	19,4	19,5	19,4	19,4	19,4
$R_{п}$ , Ом·см <sup>2</sup>	1,6	1,2	0,5	0,3	0,7	0,4	0,3	0,6

$R_{ш}, \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	1031	911	882	965	821	922	965	951
A	2,28	1,68	1,65	1,77	1,76	1,91	1,94	2,02
$J_0, \text{ А/см}^2$	$6,2\cdot 10^{-8}$	$110^{-9}$	$9,7\cdot 10^{-10}$	$3,3\cdot 10^{-9}$	$2,5\cdot 10^{-9}$	$9\cdot 10^{-9}$	$1,2\cdot 10^{-8}$	$2,5\cdot 10^{-8}$

В табл. 1 наведено, що на початку експлуатації ФЕП і до 1,4 років відбувається збільшення ККД з 9,9 % до 10,3 %, що обумовлено зростанням фактора заповнення світлової ВАХ від  $FF=0,68$  до  $FF=0,75$  на тлі незначного зниження напруги холостого ходу від  $V_{xx}=740$  В до  $V_{xx}=710$  В і щільності струму короткого замикання від  $J_{кз}=19,5$  мА /  $\text{см}^2$  до  $J_{кз}=19,4$  мА /  $\text{см}^2$ . При подальшому збільшенні часу експлуатації до 6 років ККД повільно знижується до 10 %. Потім зниження ККД відбувається швидше і при збільшенні часу експлуатації до 8 років спостерігається зниження ефективності до 9,7 %. Зниження ККД відбувається в результаті зменшення фактора заповнення світлової ВАХ від  $FF=0,75$  до  $FF=0,71$ , також продовжує незначно знижуватися напруга холостого ходу до 700 мВ. Щільність струму короткого замикання практично не змінюється. Необхідно відзначити, що після 8 років експлуатації величина ККД ФЕП  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Cu}/\text{ITO}$  практично збігається з вихідним значенням, що свідчить про високу деградаційну стійкість отриманих гетеросистем.

Аналіз світових діодних характеристик ФЕП  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Cu}/\text{ITO}$  показує, що спочатку з ростом часу експлуатації до 1 року щільність діодного струму насичення зменшується від  $J_0=1,6\cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> до  $J_0=9,7\cdot 10^{-10}$  А/см<sup>2</sup>, При цьому зниження і коефіцієнта ідеальності діоду. При подальшому збільшенні часу експлуатації до 7,5 років щільність діодного струму насичення збільшується майже на два порядки до  $J_0=2,4\cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>, коефіцієнт ідеальності також зростає. Це може бути обумовлено тим, що атоми міді, диффундуючи в базовий шар на межі зерен, досягають області р-п переходу і частково шунтують його. При цьому послідовний опір протягом майже всього часу експлуатації знижується від  $R_{п}=2,2$  Ом·см<sup>2</sup> до  $R_{п}=0,3$  Ом см<sup>2</sup>, і тільки після 7 років експлуатації спостерігається зворотне збільшення його до  $R_{п}=0,6$  Ом·см<sup>2</sup>. Шунтуючий опір спочатку зростає від  $R_{ш}=850$  Ом·см<sup>2</sup> до  $R_{ш}=960$  Ом·см<sup>2</sup>, а після чотирьох років відбувається його зменшення до  $R_{ш}=880$  Ом·см<sup>2</sup> з подальшим поверненням на рівень  $R_{ш}=960$  Ом·см<sup>2</sup>.

Світлові діодні характеристики ФЕП  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Cu}/\text{ITO}$  спочатку експлуатації поліпшуються, а після 7–8 років погіршуються і повертаються майже до своїх значень в початковому стані. Така поведінка діодних характеристик і обумовлює спостережувану високу деградаційну стійкість.

Таким чином, використання прошарку міді товщини 2 нм дозволяє створити тунельний тильний контакт  $\text{Cu}/\text{ITO}$  без зниження деградаційної стійкості приладової структури. Оскільки для тонкоплівкових ФЕП традиційно гарантується стабільність ККД протягом 5 років, то стає очевидним перспективність використання запропонованих прозорих тильних електродів в умовах промислового виробництва плівкових ФЕП на основі телуриду кадмію.

Результати аналітичної обробки експериментальних ВАХ при освітленні з тильного боку представлені в табл. 2



Таблиця 2

Вихідні параметри і світлові діодні характеристики ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/ІТО при освітленні з тильного боку

$t$ , год	0	1,4	3,6	5,4	6,0	8
$J_{кз}$ , мА/см <sup>2</sup>	4,7	7,5	6,7	6,7	6,9	7,0
$V_{xx}$ , мВ	650	660	660	650	650	630
$FF$	0,55	0,42	0,39	0,39	0,36	0,32
ККД, %	1,7	2,1	1,8	1,7	1,6	1,4
$J_{ф}$ , мА/см <sup>2</sup>	4,7	7,7	6,9	6,8	7,1	7,2
$R_{п}$ , Ом·см <sup>2</sup>	3,2	4,3	4,6	1,5	3,8	3,1
$R_{ш}$ , Ом·см <sup>2</sup>	438	146	155	150	132	112
A	1,9	1,2	1,3	1,3	1,1	1,1
$J_0$ , А/см <sup>2</sup>	$6,9 \cdot 10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-13}$	$3,8 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$3,6 \cdot 10^{-13}$	$3,6 \cdot 10^{-13}$

Як видно із табл. 2, ефективність ФЕП при освітленні з тильного боку істотно менше, ніж при освітленні з фронтальної сторони. Співвідношення між ККД протягом усього часу експлуатації залишається в межах від 5 до 7, досягаючи мінімальної різниці тоді, коли ККД при освітленні з фронтальної і тильної сторін досягають максимальних значень. Причому, відносне збільшення ККД на початку експлуатації при освітленні з тильного боку більше (23 % в порівнянні з вихідним значенням), ніж при освітленні з фронтальної сторони (4 % в порівнянні з вихідним значенням). Менші значення ККД в першу чергу обумовлені меншими значеннями фактора заповнення світлової ВАХ і меншою щільністю струму короткого замикання. При освітленні з тильного боку в початковому стані фактор заповнення світлової ВАХ становить  $FF=0,56$ , а через 7,5 років знижується до  $FF=0,32$ . Необхідно відзначити, що при освітленні з фронтальної сторони фактор заповнення зменшується незначно. Щільність струму короткого замикання в початковому стані при освітленні з тильного боку в 4 рази менше, ніж при освітленні з фронтальної сторони. Через рік експлуатації співвідношення цих струмів стає рівним приблизно 2,6 і зберігається далі незмінним. Напруга холостого ходу, як і при освітленні з фронтальної сторони, так і при освітленні з тильного боку, змінюється незначно і відрізняється від значення при фронтальному освітленні на величину (0,05–0,1) В.

#### 6. Обговорення результатів дослідження світлових вольт-амперних характеристик фотоелектричних перетворювачів SnO<sub>2</sub>:F/CdS /CdTe/Cu/ІТО

Дослідження світлових вольт-амперних характеристик ФЕП SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/ІТО показало що зменшення товщини шару міді, що наноситься на поверхню CdTe до  $\square 2$  нм дозволило створити деградаційно стійкі сонячні елементи з прозорим тильним контактом.

Зафіксована еволюція вихідних параметрів при зміні напрямку освітлення обумовлена зміною світлових діодних характеристик. Зниження щільності струму короткого замикання обумовлено відповідним зниженням щільності

фотоструму. Зафіксовані зниження  $J_{\phi}$  при зміні напрямку освітлення пов'язані з тим, що при освітленні з фронтального боку активна генерація нерівноважних носіїв заряду відбувається поблизу р–п переходу або всередині його області збіднення. В результаті велика частина генерується під дією світла нерівноважних носіїв заряду і потрапляє в область вбудованого електричного поля р–п переходу, де після їх поділу відбувається формування фотоструму. При освітленні приладової структури з тильного боку область генерації нерівноважних носіїв відділена від області р–п переходу. Тому значна частина згенерованих нерівноважних носіїв зарядів в результаті об'ємної і поверхневої рекомбінації не вносять вклад у створення фотоструму.

При освітленні з тильного боку послідовний опір в кілька разів вище, ніж при освітленні з фронтальної сторони, і не зменшується при збільшенні часу експлуатації. Щільність діодного струму насичення при освітленні з тильного боку зменшується майже на три порядки і при збільшенні часу експлуатації практично не змінюється. При зміні напрямку освітлення з фронтального на тильний в кілька разів знижується шунтуючий опір. Крім того, з ростом часу експлуатації спостерігається зниження шунтуючого опору. Так, в початковому стані співвідношення шунтуючого опору при фронтальному освітленні до шунтуючого опору при тильному освітленні склало 2 рази, а до кінця експлуатації воно швидко збільшилося до 8 разів.

При аналізі світових діодних характеристик необхідно враховувати можливість реалізації в досліджуваній структурі режиму зверненого діоду представленого в роботі [7], коли тильний контакт являє собою діод, включений послідовно по відношенню до основного діоду. На енергетичну структуру діодів впливає напрямок освітлення, що викликає зміну послідовного і шунтуючого опору, а також зміну щільності діодного струму насичення. Якщо основний внесок у величину  $J_0$  вносить енергетична структура основного сепаруючого бар'єру, то зниження  $J_0$  при зміні напрямку освітлення з фронтального на тильне обумовлено експоненційним зменшенням інтенсивності його освітлення.

Це, в свою чергу, знижує концентрацію нерівноважних носіїв заряду поблизу р–п переходу. Якщо основний внесок в шунтуючий опір вносять бар'єрні властивості тильного контакту, то стає очевидним зниження цієї діодної характеристики при зміні напрямку освітлення з фронтального на тильне. При освітленні тильного бар'єру в області просторового заряду збільшується концентрація нерівноважних носіїв заряду, що призводить до зниження шунтуючого опору в результаті зниження товщини шару збіднення. Послідовний опір вище при освітленні з тильного боку, оскільки в цьому випадку поблизу основного р–п переходу не генерується значна кількість нерівноважних носіїв заряду і область збіднення збільшується, що призводить до збільшення послідовного опору.

Еволюція світових діодних характеристик з ростом часу експлуатації обумовлена дифузією міді з нанорозмірного прошарку в обсяг базового шару, яка може відбуватися по зернограничному і об'ємному механізмам.

Так як мідь є акцепторною домішкою для телуриду кадмію, то її дифузія в обсязі базового шару телуриду кадмію призводить до зменшення питомого опору базового шару і, відповідно, до зниження послідовного опору ФЕП [20].

Дифузія акцептора у зернограничну поверхню призводить до формування р-р + переходу між границею і обсягом зерна. Такі потенційні бар'єри виштовхують своїм вбудованим електричним полем нерівноважні електрони в обсяг зерна, які генеруються під дією світла, що знижує негативний вплив зернограничної поверхні, як області з високою концентрацією рекомбінаційних центрів. Такий підхід дозволяє розширити спектр матеріалів для створення тильного контакту до сонячних елементів на основі CdTe.

Отримані низькі значення ефективності ФЕП SnO<sub>2</sub>:F/CdS /CdTe/Cu/ITO при освітленні зі сторони прозорого тильного контакту потребують більш детального аналізу та проведення подальших досліджень, направлених на оптимізацію товщини базового шару.

## 6. Висновки

1. Після 8 років експлуатації величина ККД ФЕП SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/ITO практично збігається з вихідним значенням, що свідчить про високу деградаційну стійкість отриманих гетеросистем. Використання прошарку міді товщиною 2 нм дозволяє створити тунельний тильний контакт Cu/ITO без зниження деградаційної стійкості приладової структури.

2. Встановлено, що зміна напрямку освітлення ФЕП SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/ITO призводить до істотного зниження ефективності приладової структури. Відмінності у вихідних параметрах і світлових діодних характеристиках ФЕП SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/ITO обумовлені впливом тильного діода на ефективність фотоелектричних процесів в базовому шарі

## Література

1. Mitchell K., Fahrenbruch A. L., Bube R. H. Photovoltaic determination of optical-absorption coefficient in CdTe // *Journal of Applied Physics*. 1977. Vol. 48, Issue 2. P. 829–830. doi: <https://doi.org/10.1063/1.323636>
2. Преобразование солнечной энергии с использованием комбинации фотоэлектрических преобразователей с базовыми слоями CdTe и CuInSe<sub>2</sub> / Хрипунов Г. С., Сокол Е. И., Якименко Ю. И., Мериуц А. В., Иващук А. В., Шелест Т. Н. // *Физика и техника полупроводников*. 2014. Т. 48, Вып. 12. С. 1671–1675.
3. Bandgap effects in thin-film heterojunction solar cells / De Vos A., Parrott J., Varuch P., Landsberg P. // *Proceeding 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Amsterdam, 1994. P. 1315–1319.
4. New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells beyond 20 % / Jackson P., Hariskos D., Lotter E., Paetel S., Wuerz R., Menner R. et. al. // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2011. Vol. 19, Issue 7. P. 894–897. doi: <https://doi.org/10.1002/pip.1078>
5. Increasing the efficiency of film solar cells based on cadmium telluride / Khrypunov G., Vambol S., Deyneko N., Sychikova Y. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, Issue 5 (84). P. 12–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85617>

6. Quantum dot-induced improved performance of cadmium telluride (CdTe) solar cells without a Cu buffer layer / Li J., Zhang Y., Gao T., Hu C., Yao T., Yuan Q. et. al. // *Journal of Materials Chemistry A*. 2017. Vol. 5, Issue 10. P. 4904–4911. doi: <https://doi.org/10.1039/c6ta10441j>
7. Deyneko N., Khrypunov G., Semkiv O. Photoelectric Processes in Thin-film Solar Cells Based on CdS/CdTe with Organic Back Contact // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2018. Vol. 10, Issue 2. P. 02029-1–02029-4. doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(2\).02029](https://doi.org/10.21272/jnep.10(2).02029)
8. Assembly and organization of poly(3-hexylthiophene) brushes and their potential use as novel anode buffer layers for organic photovoltaics / Alonzo J., Kochemba W. M., Pickel D. L., Ramanathan M., Sun Z., Li D. et. al. // *Nanoscale*. 2013. Vol. 5, Issue 19. P. 9357. doi: <https://doi.org/10.1039/c3nr02226a>
9. Thin films of CdIn/sub 2/O/sub 4/ as transparent conducting oxides / Mamazza R., Balasubramanian U., More D. L., Ferekides C. S. // *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002. 2002. doi: <https://doi.org/10.1109/pvsc.2002.1190640>
10. Highly transparent and conductive ZnO-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films prepared by d.c. magnetron sputtering / Minami T., Kakumu T., Takeda Y., Takata S. // *Thin Solid Films*. 1996. Vol. 290-291. P. 1–5. doi: [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(96\)09094-3](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(96)09094-3)
11. Venkatesan M., McGee S., Mitra U. Indium tin oxide thin films for metallization in microelectronic devices // *Thin Solid Films*. 1989. Vol. 170, Issue 2. P. 151–162. doi: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(89\)90719-0](https://doi.org/10.1016/0040-6090(89)90719-0)
12. Jeong W.-J., Park G.-C. Electrical and optical properties of ZnO thin film as a function of deposition parameters // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2001. Vol. 65, Issue 1-4. P. 37–45. doi: [https://doi.org/10.1016/s0927-0248\(00\)00075-1](https://doi.org/10.1016/s0927-0248(00)00075-1)
13. Features of the light current-voltage characteristics of bifacial solar cells based on thin CdTe layers / Meriuts A. V., Khrypunov G. S., Shelest T. N., Deyneko N. V. // *Semiconductors*. 2010. Vol. 44, Issue 6. P. 801–804. doi: <https://doi.org/10.1134/s1063782610060187>
14. Investigation of the combination of ITO/CdS/CdTe/Cu/Au solar cells in microassembly for electrical supply of field cables / Deyneko N., Semkiv O., Khmyrov I., Khrypynskyy A. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, Issue 12 (91). P. 18–23. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.124575>
15. Гибкие солнечные модули на основе сульфида и теллурида кадмия / Хрипунов Г. С., Черных Е. П., Ковтун Н. А., Белоногов Е. К. // *Физика и техника полупроводников*. 2009. Т. 43, № 8. С. 1084–1089.
16. Черных Е. П., Хрипунов Г. С., Бойко Б. Т. Оценка стехиометрии абсорберных слоев CuGaSe<sub>2</sub> и CuIn<sub>0,7</sub>Ga<sub>0,3</sub>Se<sub>2</sub> пленочных фотоэлектрических преобразователей // *Вісник Сумського державного університету*. 2002. № 13 (46). С. 133–140.
17. Examination of thermal stability of ZnO:Al films obtained by RF-magnetron sputtering without preheating of substrate / Boyko B., Khrypunov G.,

Kharchenko M., Chernikov A. // Proceeding of 17th European Photovoltaic Solar Energy Conversion and Exhibition. Munich(Germany). 2001. P. 1128–1130.

18. Плівкові фотоелектричні перетворювачі на основі CuGaSe<sub>2</sub> / Бойко Б. Т., Черних О. П., Хрипунов Г. С., Копач Г. И. // Фізика і хімія твердого тіла. 2001. Т. 2, № 4. С. 549–558.

19. Influence of proton irradiation and development of flexible CdTe solar cells on polyimide / Romeo A., Bätzner D. L., Zogg H., Tiwari A. N. // MRS Proceedings. 2001. Vol. 668. doi: <https://doi.org/10.1557/proc-668-h3.3>

20. Effect of back contact metallization on the stability of CdTe/CdS solar cells / Bätzner D. L., Romeo A., Zogg H., Tiwari A. N., Wendt R. // 16 European Photovoltaic Solar Energy Conference: Proceeding of the conference. Glasgow, 2003. P. 353–356.

Не являється перевідом