

Р. В. ЗАЙЦЕВ

АНАЛІЗ ВИМОГ ТА РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНОГО РІШЕННЯ ГНУЧКИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У КОМБІНОВАНИХ PV/T СИСТЕМАХ

У статті визначено вимоги до фотоелектричних перетворювачів, призначених для роботи в якості інтегрованих джерел електроживлення комбінованих PV/T систем: ефективно генерувати електричну енергію при температурі 55 °С; забезпечувати коефіцієнт поглинання сонячної енергії на рівні не менш 90 % та мати коефіцієнт відбиття в інфрачервоній частині спектру не більше 10 %; разом із системою охолодження теплового колектора конструкція перетворювача має забезпечувати різницю між температурою перетворювача та температурою теплоносія не більше 5 °С. Проведено дослідження температурної залежності ефективності для плівкових фотоелектричних перетворювачів на основі сполук CdTe і CuInSe₂, аморфного кремнію та кристалічного GaAs, яке показало, що найменше зниження коефіцієнта корисної дії зі зростанням робочої температури мають приладові структури на основі базових шарів телуриду кадмію. При зміні температури на 50 °С коефіцієнт корисної дії таких приладів знижується усього на 1 %, а відносна швидкість зниження складає -0,14 відн. %/С, що суттєво менше за аналогічний показник для інших типів перетворювачів: GaAs -0,16 відн. %/С, аморфний кремній -0,21 відн. %/С, CuInSe₂ -0,36 відн. %/С. Аналітична обробка та аналіз впливу світлових діодних характеристик на коефіцієнт корисної дії перетворювачів на основі телуриду кадмію показали, що температура стабільність їх ефективності забезпечується густиною діодного струму насичення. При зростанні температури від 20 °С до 50 °С густина діодного струму насичення зростає на 50 % від $1,9 \cdot 10^{-9}$ А до $2,7 \cdot 10^{-9}$ А, що менше ніж для кремнієвих приладів, для яких діодний струм насичення зростає на 300 %. Дослідження показали, що коефіцієнт поглинання сонячної енергії гнучкого елемента на основі телуриду кадмію у видимому діапазоні складає 94–96 %, а коефіцієнт відбиття в інфрачервоній області спектра не перевищує 7–8%, що дозволяє в конструкції колектора відмовитися від використання абсорбера з селективним покриттям, оскільки його функцію буде виконувати плівковий фотоелектричний перетворювач. Запропоновано конструктивно-технологічне рішення фотоенергетичної системи з гнучкими фотоелектричними перетворювачами на основі телуриду кадмію.

Ключові слова: комбіновані PV/T системи, плівкові сонячні елементи, колектор, телурид кадмію, оптичні характеристики, електричні характеристики, ефективність, робоча температура.

Р. В. ЗАЙЦЕВ

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ГИБКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОМБИНИРОВАННЫХ PV/T СИСТЕМАХ

В статье определены требования к фотоэлектрическим преобразователям, предназначенным для работы в качестве интегрированных источников электропитания комбинированных PV/T систем: эффективно генерировать электрическую энергию при температуре 55 °С; обеспечивать коэффициент поглощения солнечной энергии на уровне не менее 90 % и иметь коэффициент отражения в инфракрасной области спектра не более 10 %; вместе с системой охлаждения теплового коллектора конструкция преобразователя должна обеспечивать разницу между температурой преобразователя и температурой теплоносителя не более 5 °С. Проведено исследование температурной зависимости эффективности для пленочных фотоэлектрических преобразователей на основе соединений CdTe и CuInSe₂, аморфного кремния и кристаллического GaAs, которое показало, что наименьшее снижение коэффициента полезного действия с ростом рабочей температуры имеют приборные структуры на основе базовых слоев телурида кадмия. При изменении температуры на 50 °С коэффициент полезного действия таких приборов снижается всего на 1 %, а относительная скорость снижения составляет -0,14 отн. %/С, что существенно меньше аналогичного показателя для других типов преобразователей: GaAs -0,16 отн. %/С, аморфный кремний -0,21 отн. %/С, CuInSe₂ -0,36 отн. %/С. Аналитическая обработка и анализ влияния световых диодных характеристик на коэффициент полезного действия преобразователей на основе телурида кадмия показали, что температурная стабильность их эффективности обеспечивается за счет диодного тока насыщения. При росте температуры от 20 °С до 50 °С плотность диодного тока насыщения растет на 50 % от $1,9 \cdot 10^{-9}$ А до $2,7 \cdot 10^{-9}$ А, что меньше чем для кремниевых приборов, для которых диодный ток насыщения растет на 300 %. Исследования показали, что коэффициент поглощения солнечной энергии гибкого элемента на основе телурида кадмия в видимом диапазоне составляет 94–96 %, а коэффициент отражения в инфракрасной области спектра не превышает 7–8 %, что позволяет в конструкции коллектора отказаться от использования абсорбера с селективным покрытием, поскольку его функцию будет выполнять пленочный фотоэлектрический преобразователь. Предложено конструктивно-технологическое решение фотоэнергетических системы с гибкими фотоэлектрическими преобразователями на основе телурида кадмия.

Ключевые слова: комбинированные PV/T системы, пленочные солнечные элементы, коллектор, телурид кадмия, оптические характеристики, электрические характеристики, эффективность, рабочая температура.

R. V. ZAITSEV

REQUIREMENTS ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF THE FLEXIBLE SOLAR CELLS OPTIMAL SOLUTION FOR USE IN COMBINED PV/T SYSTEMS

The article defines the requirements for photovoltaic converters designed to work as integrated power sources for combined PV/T systems: efficiently generate electricity at a temperature of 55 °С; provide the coefficient of absorption of solar energy at the level of not less than 90 % and to have the coefficient of reflection in the infrared part of the spectrum not more than 10 %; together with the cooling system cooling system, the design of the converter must provide a difference between the temperature of the converter and the temperature of the coolant not more than 5 °С. A study of the temperature dependence of efficiency for film photoelectric converters based on CdTe and CuInSe₂ compounds, amorphous silicon and crystalline GaAs, showed that structures based on cadmium telluride base layers have the smallest decrease in efficiency with increasing operating temperature. When the temperature changes by 50 °С, the efficiency of such devices decreases by only 1 %, and the relative rate of decrease is -0.14 rel. %/С, which is significantly less than the same parameter for other types of converters: GaAs -0.16 rel. %/С, amorphous silicon -0.21 rel. %/С, CuInSe₂ -0.36 rel. %/С. Analytical processing and analysis of the influence of light characteristics on the efficiency of cadmium-based transducers showed that the temperature stability of their efficiency is ensured by the density of the diode saturation current. With increasing temperature from 20 °С to 50 °С, the density of the diode saturation current increases by 50 % from $1.9 \cdot 10^{-9}$ А to $2.7 \cdot 10^{-9}$ А, which is less than for silicon devices, for which the diode saturation current increases by 300 %. Studies have shown that the absorption coefficient of solar energy of a flexible element based on cadmium

© О. В. Шутенко, С. Г. Пономаренко, 2020

telluride in the visible range is 94–96 %, and the reflection coefficient in the infrared region of the spectrum does not exceed 7–8 %, which allows the design of the collector to abandon the use of selective coating, since its function will be performed by a film photoelectric converter. A constructive-technological solution of a photovoltaic system with flexible photovoltaic converters based on cadmium telluride is proposed.

Keywords: combined PV/T systems, film solar cells, collector, cadmium telluride, optic characteristics, electrical characteristics, efficiency, operating temperature.

Вступ. На теперішній час для термічного перетворення сонячної енергії використовують сонячні колектори ККД яких досягає 70–80 % завдяки застосуванню селективних покриттів з коефіцієнтом поглинання в спектральному діапазоні сонячного опромінення до 95–98 % та коефіцієнтом відбиття у інфрачервоному діапазоні не більш 5–7 %. Сучасною тенденцією при розробці найбільш розповсюджених автоматизованих систем теплових колекторів з примусовою циркуляцією теплоносія є те, що електрична енергія для їх роботи генерується традиційними кремнієвими сонячними модулями [1]. Оскільки традиційно сонячні модулі розміщуються окремо від сонячних теплових колекторів, то це не призводить до збільшення ефективності використання сонячної енергії.

В останній час активно розпочалися розробки комбінованих фотоелектричних установок у яких при виробленні електричної енергії проводиться утилізація теплової енергії [2]. Для цього промислові зразки сонячних модулів розміщують на поверхні теплових колекторів, що суттєво збільшує собівартість таких установок. Дослідження комбінованих фотоелектричних установок із значними по площі концентраторами та зі спеціальними системами утилізації теплової енергії мають одиничний характер та запроваджуються до модельних лабораторних зразків. В таких структурах поряд з сонячними модулями на основі арсеніду галію використовують кремнієві фотоелектричні перетворювачі з вертикальними діодними комірками, які на відміну від традиційних приладових структур на основі кристалічного кремнію, можуть ефективно перетворювати енергію сонячного опромінення в умовах її високої концентрації.

Зменшення використання площі для розміщення таких систем можливо за рахунок суміщення фотоелектричних перетворювачів із системою теплового колектору. Зазначене реалізується за рахунок використання гнучких плівкових фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) [3], котрі можна розмістити на поверхні пластини колектору повторюючи особливості її мікрорельєфу із забезпеченням ефективного теплового контакту.

Однак використання сонячних елементів на поверхні колектора призводить до виникнення суттєвих перешкод, які при звичайному використанні не спостерігаються. А саме, зростання робочою температури, яке призводить до зниження ККД приладів, при цьому зазначений спад різниться для різних матеріалів сонячних елементів. Також суттєвим стає питання мінімізації коефіцієнту відбиття (сонячний елемент замінює собою селективне покриття) та максимальної прозорості сонячних елементів у інфрачервоному діапазоні спектру (для максимальної передачі теплової енергії до колектора).

Однак такі узагальнюючі пошукові дослідження за рідким виключенням не проводяться, а вибір сонячних елементів для таких PV/T систем носить несистемний характер.

Вибір плівкових фотоелектричних перетворювачів за їх температурною стабільністю.

Основною оптимізаційною задачею для розробки запропонованої системи є визначення рівня впливу робочою температури колектору на швидкість зниження ККД плівкових ФЕП.

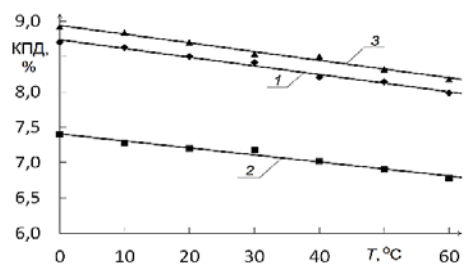
Для визначення величини впливу температури на параметри плівкових фотоелектричних перетворювачів, було проведено дослідження промислових зразків сонячних елементів на основі системи CdS/CdTe (серія СТ), на основі CuInSe₂ (серія CS) та аморфного кремнію (серія АС). Для всіх зразків при температурах від 0 °С до 60 °С були виміряні світлові ВАХ. В результаті подальшої аналітичної обробки експериментальних світлових ВАХ були визначені вихідні параметри і світлові характеристики ФЕП.

Досліджені плівкові ФЕП на основі системи CdS/CdTe серії СТ мали базові значення ККД на рівні 7-8 %. (табл. 1). Аналіз показує, що з ростом температури для всіх досліджених зразків, аналогічно до кремнієвих зразків [4], спостерігається практично лінійне зниження ККД (рис. 1 а).

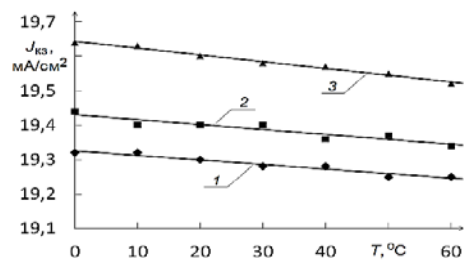
Таблиця 1 – Вихідні параметри і світлові діодні характеристики плівкових ФЕП серії СТ при температурі 25 °С

Вихідні параметри і світлові діодні характеристики	Зразок серії СТ		
	1	2	3
J_{K3} , мА/см ²	19,3	19,4	19,6
U_{XX} , мВ	733	756	762
FF , відн. од.	0,59	0,51	0,58
ККД, %	8,5	7,2	8,7
J_{ϕ} , мА/см ²	19,6	19,9	19,8
R_{II} , Ом·см ²	5,8	8,2	8,7
R_{III} , Ом·см ²	2300	1520	1890
A_i , відн. од.	2,2	1,8	1,9
J_0 , А/см ²	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$5,9 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$

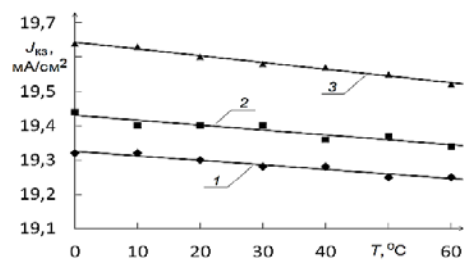
При цьому коефіцієнт зниження, який описує відносну зміну ККД при зміні температури на один градус, становить лише –0,14 відн. %/°С, що значно нижче за аналогічний параметр для кремнієвих зразків (–0,47 відн. %/°С) [4]. Для напруги холостого ходу і густини струму короткого замикання також спостерігається зниження їх величин при збільшенні робочою температури (рис. 1 б і в). Експериментально було встановлено, що фактор заповнення світлової ВАХ практично не змінюється з ростом температури (рис. 1 г).



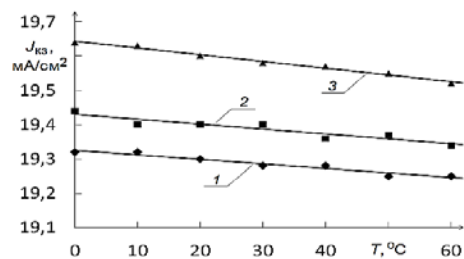
a



б



в



г

Рисунок 1 – Характер впливу робочої температури на коефіцієнт корисної дії (а), густину струму короткого замикання (б), напругу холостого ходу (в) і фактор заповнення світлової ВАХ (г) досліджених 1–3 плівкових ФЕП серії СТ

Аналіз світових діодних характеристик показує, що зафіксоване зниження ККД супроводжується збільшенням густини діодного струму насичення і зниженням шунтуючого опору. Було також зафіксовано зниження послідовного опору.

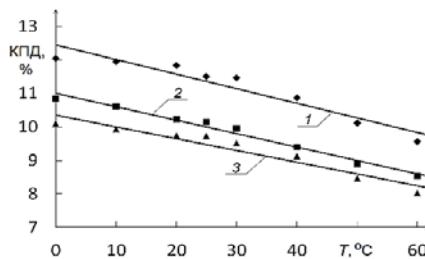
Поряд із зазначеними зразками, також було проведено аналогічне дослідження ФЕП на основі сполуки CuInSe_2 . Плівкові ФЕП серії CS мали базові значення ККД на рівні 8–10 %. (табл. 2). Аналіз наведених параметрів показує, що для таких зразків також спостерігається лінійне зниження ККД з ростом температури (рис. 2 а).

Відповідний коефіцієнт зниження для розглянутих зразків становить $-0,36$ відн. $\%/\text{°C}$, що значно також нижче за аналогічний параметр для

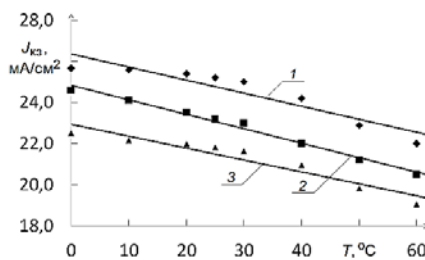
кремнієвих зразків, однак вище за коефіцієнт для ФЕП серії СТ. Спостерігається зниження напруги холостого ходу і густини струму короткого замикання при збільшенні робочої температури (рис. 2 б і в).

Таблиця 2 – Вихідні параметри плівкових ФЕП серії CS при температурі 25 °C

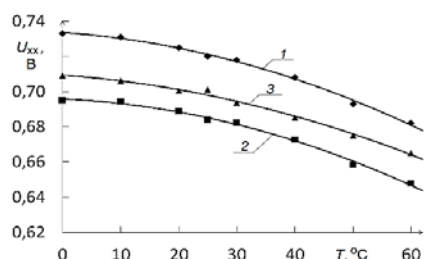
Вихідні параметри	Зразок серії CS		
	1	2	3
$J_{KЗ}$, mA/cm^2	25,2	23,2	21,8
$U_{ХХ}$, мВ	720	684	701
FF , відн. од.	0,72	0,73	0,72
ККД, %	11,5	10,2	9,7



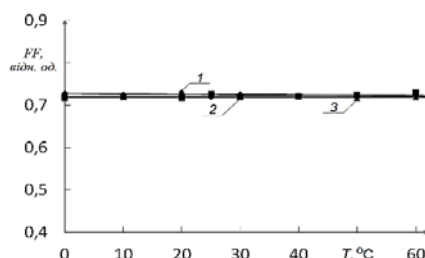
a



б



в



г

Рисунок 2 – Характер впливу робочої температури на коефіцієнт корисної дії (а), густину струму короткого замикання (б), напругу холостого ходу (в) і фактор заповнення світлової ВАХ (г) досліджених 1–3 плівкових ФЕП серії CS

Дослідження ФЕП на основі аморфного кремнію серії АС також показало зниження ККД ФЕП при зростанні робочої температури. Плівкові ФЕП серії АС мали базові значення ККД на рівні 8–10 % (табл. 3). Для зразків серії АС також спостерігається лінійне зниження ККД з ростом температури (рис. 3 а).

Коефіцієнт зниження ККД для розглянутих зразків становить $-0,21$ відн. $\%/^{\circ}\text{C}$. Спостерігаються аналогічні для всіх плівкових ФЕП ефекти зниження напруги холостого ходу і густини струму короткого замикання при збільшенні робочої температури (рис. 3 б і в).

Таблиця 3 – Вихідні параметри плівкових ФЕП серії АС при температурі 25°C

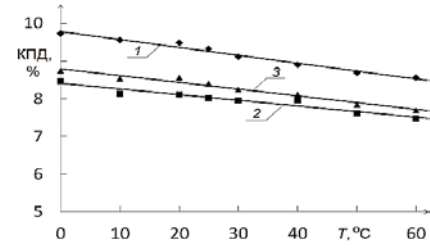
Вихідні параметри	Зразок серії АС		
	1	2	3
$J_{\text{КЗ}}$, mA/cm^2	23,1	21,3	22,2
$U_{\text{ХХ}}$, мВ	680	654	653
FF , відн. од.	0,73	0,71	0,71
ККД, %	9,32	8,02	8,40

Отримані експериментально значення температурного коефіцієнту ККД досить добре співпадають із літературними джерелами [5, 6], а їх значення для розглянутих одноперехідних плівкових ФЕП досить точно корелюють із шириною забороненої зони відповідного поглинаючого напівпровідникового матеріалу (табл. 4). Температурний коефіцієнт ККД пропорційно знижується із зростанням ширини забороненої зони базового напівпровідникового матеріалу.

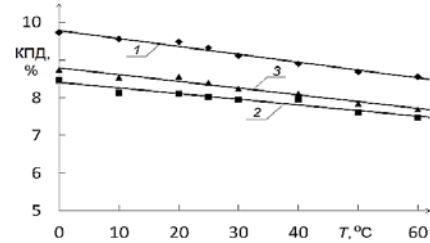
Серед плівкових ФЕП найбільш стабільними значеннями вихідних параметрів та ККД відзначаються ФЕП на основі сполук CdTe ($-0,14$ відн. $\%/^{\circ}\text{C}$) та GaAs ($-0,16$ відн. $\%/^{\circ}\text{C}$) [4]. Однак ФЕП на основі GaAs виробляються лише у кристалічному виконанні, та не можуть бути адаптовані для використання на поверхні пластини теплового колектора. Тому саме ФЕП на основі CdTe є оптимальним рішенням для створення комбінованої фотоенергетичної системи на основі теплового колектора.

Таблиця 4 – Отримані експериментально коефіцієнти зниження ККД плівкових ФЕП та їх ширина забороненої зони

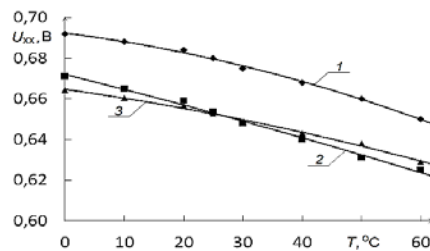
Серія	Температурний коефіцієнт ККД, відн. $\%/^{\circ}\text{C}$	Ширина забороненої зони напівпровідника, еВ
СТ (CdTe)	$-0,14$	1,44 [6]
GaAs	$-0,16$ [4]	1,43 [7]
АС (аморфн. Si)	$-0,21$	1,2–1,3 [5, 6]
CS (CuInSe_2)	$-0,36$	1,04–1,07 [6]



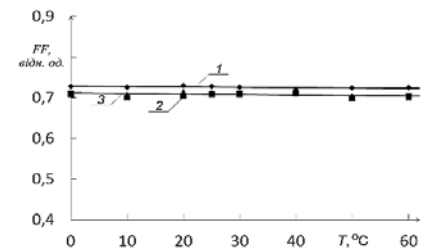
а



б



в



г

Рисунок 3 – Характер впливу робочої температури на коефіцієнт корисної дії (а), густину струму короткого замикання (б), напругу холостого ходу (в) і фактор заповнення світлової ВАХ (г) досліджених 1–3 плівкових ФЕП серії АС

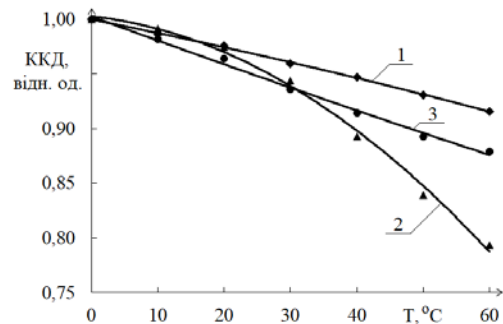


Рисунок 4 – Відносне зниження ККД плівкових ФЕП зі зростанням робочої температури:

1 – на основі CdTe (серія СТ); 2 – на основі CuInSe_2 (серія CS); 3 – на основі аморфного кремнію (серія АС)

Концепція фотоенергетичної системи на основі плівкових ФЕП на базі гетеросистеми CdS/CdTe. Основна ідея полягає в розробці конструктивного рішення гнучких тонкоплівкових ФЕП на основі системи CdS/CdTe адаптованих для монтажу сонячної батареї з таких ФЕП безпосередньо на пластину теплового колектору у складі PV/T системи на основі стандартних сонячних теплових колекторів. Основною складовою частиною установки є фотоенергетичний модуль, що являє собою стандартний сонячний тепловий колектор на фотоприймальній поверхні якого розміщено гнучку сонячну батарею на основі системи CdS/CdTe.

Як зазначалося у [5], ФЕП на основі монокристалічного кремнію внаслідок властивостей матеріалу мають інтенсивне поглинання ближньої довгохвильової компоненти сонячного випромінювання із довжиною хвилі більше 1000 нм. Таке поглинання є фотоелектрично неефективним і призводить до паразитного нагріву ФЕП та зниженню ефективності роботи теплової частини такої гібридної установки. Це викликає необхідність в організації ефективного тепловідведення від ФЕП до теплообмінника крізь проміжні термоінтерфейси, що призводить до ускладнення конструкції установки та збільшення її вартості. Через це, а також дороговизну власне ФЕП на основі монокристалічного кремнію гібридні термофотоелектричні модулі мають ціну на рівні 1200 дол./модуль. В той же час максимум поглинання гнучких тонкоплівкових ФЕП на основі системи CdS/CdTe зосереджений у діапазоні 400–800 нм, а для ближньої інфрачервоної компоненти вони є практично прозорими. Тому використання таких ФЕП у складі гібридних фотоенергетичних установок забезпечить вільне надходження до теплообміннику установки довгохвильової компоненти сонячного випромінювання, та ефективну генерацію теплової енергії.

Плівкові ФЕП на основі гетеросистеми сульфідів та телуриду кадмію являють собою альтернативу широко поширеним кремнієвим кристалічним ФЕП в якості автономних джерел електричної енергії наземного і заатмосферного застосування. Сучасні високоефективні плівкові ФЕП на основі CdS/CdTe виготовляються в тильній конфігурації на скляній підкладці крізь яку сонячне випромінювання надходить у базовий шар, що має найбільший теоретичний ККД 29 % і найбільшу радіаційну стійкість [8, 9]. Так в умовах промислового виробництва компанія First Solar (США), яка випускає ФЕП на основі CdS/CdTe, досягла ККД 11 %. Необхідно відзначити, що традиційні ФЕП на основі CdS/CdTe істотно поступаються ФЕП на основі кристалічного кремнію за масопотужністю характеристикою (величиною вироблюваної електричної потужності на одиницю ваги ФЕП). Це, в першу чергу, обумовлено тим, що ФЕП на основі гетеросистеми CdS/CdTe виготовляються на скляних підкладках, які складають 98 % ваги ФЕП [10]. Заміна скляної масивної підкладки на тонку прозору поліімідну плівку дозволяє в 50 разів зменшити вагу

ФЕП на основі CdS/CdTe і сформувати гнучкі приладові структури. Гнучкі ФЕП, які можна монтувати на поверхні будь-яких форм, перспективні для інтегрування у автономні системи теплозабезпечення на основі теплових колекторів.

На теперішній час фірми Apical, Kapton, Kartrex, Meldin, Vespel, Plavis та Upilex почали виробляти термостабільні прозорі поліімідні плівки. За поєднанням механічних характеристик, фізичних і оптичних властивостей вони можуть бути використані в якості підкладок гнучких ФЕП. Найбільш високу термостабільність до 450°C мають поліімідні плівки UPILEX-S. Середній коефіцієнт пропускання у видимій області, який досягає 80 %, робить ці плівки найбільш перспективними для створення високоефективних гнучких ФЕП на основі телуриду кадмію. Оскільки товщина плівок UPILEX-S складає 7 мкм, то заміна скляної підкладки на поліімідну плівку дозволяє створювати гнучкі ФЕП на основі сульфідів та телуриду кадмію з рекордною питомою потужністю на одиницю ваги – понад 2 кВт/кг, що забезпечує актуальність розв'язуваної науково-технічної задачі для розвитку промислового виробництва принципово нового виду ФЕП.

Враховуючи товщину технологічних шарів найбільший тепловий опір має плівка полііміду, котра має значення коефіцієнта теплопровідності $\kappa = 0,14\text{--}0,20$ Вт/(м·К). Зазначений коефіцієнт теплопровідності значно нижчий за аналогічний для плівки ПВХ, котра використовується при створенні модулів на основі кремнію, однак з урахування малої товщини поліімідної плівки, котра складає 7 мкм, це дозволить отримати перепад температури у тонкоплівковому ФЕП на рівні 0,6–0,9°C. Висока теплопровідність міді дозволяє забезпечити поперечний градієнт температури пластини колектора не більше 1,0–1,5°C і в результаті оптимізації теплового опору системи можна домогтися перевищення температури плівкового ФЕП над температурою теплоносія на рівні 2,5°C [11].

Однак, заміна скляної підкладки на гнучку поліімідну плівку з істотно відмінними теплофізичними і механічними властивостями, неминує призводить до необхідності оптимізації фотоелектричного перетворення в гнучких ФЕП на основі CdS/CdTe. Отримувати такі структури можна при осадженні фоточутливих плівок телуриду кадмію такими високотехнологічними і добре адаптованими до промислового виробництва методами, як конденсація в квазізамкненому об'ємі і неактивне магнетронне розпилення на постійному струмі [12]. Однак розробки гнучких ФЕП на основі сульфідів та телуриду кадмію цими методами, за рідкісним винятком, не проводяться й промислові технології одержання гнучких ФЕП на основі гетеросистеми CdS/CdTe відсутні. Економічно доцільно, щоб такі промислові установки могли бути інтегровані в існуючі промислові технологічні лінії, що випускають ФЕП на основі CdS/CdTe на скляних підкладках.

Розроблені на даний час гнучкі ФЕП на основі системи CdS/CdTe характеризуються рекордною

масопотужністною характеристикою 2,5 кВт/кг та ККД на рівні 10–11 %. Використання у електричній частині ФЕУ гнучких тонкоплівкових ФЕП на основі системи CdS/CdTe виготовлених на поліімідній підкладці дозволить монтувати такі ФЕП шляхом наклеювання безпосередньо на фотоприймальну поверхню стандартних сонячних теплових колекторів ціна яких не перевищує 130 дол./модуль. Типова PV/T система складається з 4–5 колекторів з площею фотоприймальної поверхні на рівні 2 м² кожен, забезпечує опалення приміщення площею до 200 м² та підігрів води на рівні 300 л/добу. Оснащення таких колекторів вказаних сонячною батареєю на основі гнучких тонкоплівкових ФЕП з вищевказаними вихідними параметрами забезпечить вироблення близько 200 Вт електричної потужності, що є цілком достатнім для забезпечення власних потреб ФЕУ.

Експериментальні зразки гнучких ФЕП на основі гетеросистеми CdS/CdTe. Для отримання експериментальних зразків гнучких ФЕП ITO/CdS/CdTe/Cu/Au спочатку на поліімідні плівки фірми Upilex (товщиною 12,5 мкм) методом магнетронного розпилення на постійному струмі осаджувались шари ITO. При розпиленні використовувалась мішень, яка містить спресовану механічну суміш порошків In₂O₃ (90 ваг. %) і SnO₂ (10 ваг.%) напівпровідникової чистоти. Формування шарів ITO товщиною 0,3 мкм здійснювалось в атмосфері аргону при тиску 0,8 Па. Електричні параметри плазмового розряду становили: напруга на магнетроні 500 В, густина струму розряду 12,6 мА/см². Температура підкладки $T_n = 300\text{--}350$ °С. Ці режими магнетронного розпилення дозволяють отримувати шари ITO на поліімідних підкладках з оптимальними електричними та оптичними властивостями [13]. Далі на шари ITO осаджувались плівки CdS при тиску аргону 0,8 Па та $T_n = 270\text{--}280$ °С (електричні параметри плазмового розряду становили: напруга на магнетроні 550–600 В, густина струму плазмового розряду 2,8 мА/см²). Досліджені ФЕП, в яких базові шари телуриду кадмію були отримані двома способами:

- шар CdTe відразу вирощувався на плівках CdS/ITO при $T_n = 280\text{--}320$ °С без проміжного охолодження підкладки та порушення вакууму;
- підкладка з шарами CdS/ITO охолоджувалась до кімнатної температури і виносилась на повітря. Після повернення до робочого об'єму вакуумної камери гетеросистеми CdS/ITO нагрівались до $T_n = 280\text{--}320$ °С, при яких формувався базовий шар CdTe.

Для отримання шарів телуриду кадмію методом магнетронного розпилення на постійному струмі використовувались наступні електричні параметри плазмового розряду: напруга на магнетроні 650–700 В, густина струму плазмового розряду 4,2 мА/см².

Отримані гетеросистеми ITO/CdS/CdTe (рис. 5) піддавались «хлоридній» обробці [14]. Для цього на шари CdTe без розігріву підкладки, термічним випарюванням при тиску $5,3 \cdot 10^{-3}$ Па наносились плівки CdCl₂.

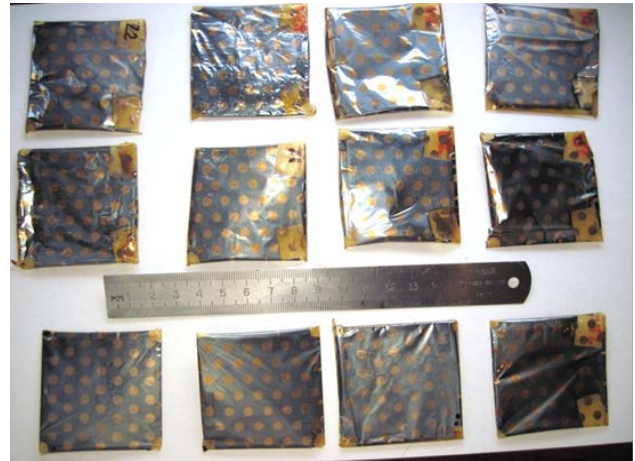


Рисунок 5 – Загальний вигляд тонкоплівкових зразків ФЕП на основі гетероструктури ITO/CdS/CdTe/Cu/Au

Отримані гетеросистеми ITO/CdS/CdTe/CdCl₂ відпалювались на повітрі в замкнутому об'ємі при температурі 430 °С протягом 25 хв. Після травлення відпалених гетеросистем у розчині бромметанолу на їх поверхні термічним випарюванням наносились двошарові електричні контакти Cu-Au. Потім проводився відпал сформованих ФЕП ITO/CdS/CdTe/Cu/Au на повітрі при температурі 200 °С протягом 20 хв.

Для дослідження впливу «хлоридної» обробки на структурні та оптичні характеристики базових шарів ФЕП методом магнетронного розпилення на постійному струмі при наведених вище фізико-технологічних режимах конденсації, були отримані гетеросистеми ITO/CdTe на поліімідних підкладках без шару «широкозонного вікна» CdS.

Дослідження параметрів гнучких ФЕП на основі гетеросистеми CdS/CdTe. Оптимізація шару телуриду кадмію для плівкових ФЕП ITO/CdS/CdTe/Cu/Au. При розробці гнучких ФЕП на основі CdS/CdTe тильної конфігурації режими термічного вакуумного осадження шарів CdS і CdTe, схема проведення «хлоридної» обробки і фізико-технологічні умови формування металевих тильних електродів були аналогічними тим, які були використані раніше для формування ФЕП тильної конфігурації на скляних підкладках. Було встановлено, що заміна скляної підкладки на гнучку поліімідну плівку приводить до зниження ваги приладової структури в 56 разів.

Згідно представленим раніше [14] дослідженням, для тонкоплівкових ФЕП ITO/CdS/CdTe/Cu/Au, оптимальна товщина базового шару складає 4 мкм. Тому при формуванні експериментальних зразків гнучких ФЕП ITO/CdS/CdTe/Cu/Au на поліімідних підкладках товщина плівок телуриду кадмію також складала 4 мкм.

Для ідентифікації оптимальних технологічних параметрів при формуванні гнучких ФЕП ITO/CdS/CdTe/Cu/Au варіювалась товщина плівок сульфиду кадмію і хлориду кадмію в діапазоні (0,3–0,7) мкм і (0,08–0,16) мкм, відповідно. При потужності світлового потоку 100 мВт/см² були

виміряні світлові ВАХ виготовлених гнучких ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au в конструкціях яких були використані сполучені шари різної товщини.

Шляхом аналітичної обробки експериментальних світлових ВАХ було визначено ефективність, вихідні параметри і світлові діодні характеристики виготовлених лабораторних зразків ФЕП. По характеру залежностей ефективності від світлових діодних характеристик можна виділити декілька характерних діапазонів товщин CdS. Ефективність, вихідні параметри і світлові діодні характеристики ФЕП, що відповідають цим діапазнам (зразки 1–3), приведені в таблиці 5. Варіювання товщини шарів сульфиду кадмію при виготовленні ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au на поліімідних плівках показало, що при незмінній товщині хлориду кадмію збільшення товщини шару сульфиду кадмію до 0,5 мкм приводить до збільшення ефективності ФЕП за рахунок збільшення напруги холостого ходу. При цьому фактор заповнення світлової ВАХ дещо зменшується, а густина струму короткого замикання практично не змінюється.

Таблиця 5 – Вихідні параметри і світлові діодні характеристики гнучких ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au

Зразок №	1	2	3	4	5
d_{CdCl_2} , мкм	0,08	0,08	0,08	0,11	0,16
d_{CdS} , мкм	0,30	0,55	0,70	0,50	0,50
$U_{ХХ}$, мВ	440	712	711	733	756
$J_{КЗ}$, мА/см ²	16,9	17,1	15,7	19,3	19,4
FF , відн. од.	0,57	0,51	0,49	0,59	0,49
η , %	4,2	6,3	5,8	8,5	7,2
$R_{П}$, Ом·см ²	2,2	5,9	7,2	5,8	12,1
$R_{Ш}$, Ом·см ²	180	218	328	2300	429
J_0 , А/см ²	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$5,9 \cdot 10^{-9}$
A , відн. од.	3,5	2,9	2,7	2,2	1,8
J_{ϕ} , мА/см ²	17,8	17,6	16,0	19,6	19,9

Проведене числове моделювання впливу зміни світлових діодних характеристик на зафіксовану експериментально зміну ККД ФЕП показало, що при збільшенні товщини CdS до 0,5 мкм визначальний вплив на зростання ефективності ФЕП здійснює зменшення густини діодного струму насичення. Спостережене експериментально зменшення фактора заповнення світлової ВАХ викликано ростом послідовного електроопору ФЕП. Зростання $R_{П}$ обумовлене збільшенням опору шару CdS при збільшенні його товщини. Збільшення товщини шару CdS понад 0,5 мкм приводить до зниження ефективності ФЕП за рахунок зменшення густини струму короткого замикання і зменшення фактора заповнення світлової ВАХ. При цьому $U_{ХХ}$ практично не змінюється.

Також числове моделювання впливу зміни світлових діодних характеристик на зміну ККД ФЕП показало, що при збільшенні товщини CdS від 0,50 мкм до 0,70 мкм зниження ефективності ФЕП обумовлено зменшенням фотоструму. Як і для приладових структур, сформованих на склі, зниження густини фотоструму в гнучких ФЕП обумовлено відповідним зниженням густини потоку фотонів, які поступають в базовий шар, що викликано закономірним зниженням середнього коефіцієнта пропускання шару CdS у видимому діапазоні по мірі зростання його товщини. По характеру залежності ефективності гнучких ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au від товщини шару хлориду кадмію при проведенні «хлоридної» обробки можна виділити декілька характерних діапазонів. Ефективність, вихідні параметри і світлові діодні характеристики зразків, що відповідають цим діапазнам, приведені в таблиці 5 (зразки 2, 4, 5). Варіювання товщини шару хлориду кадмію при виготовленні ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au на поліімідних плівках показало, що при незмінній оптимальній товщині шару сульфиду кадмію $d_{CdS} = 0,50$ мкм збільшення товщини шару CdCl₂ до $d_{CdCl_2} = 0,11$ мкм приводить до зростання ефективності за рахунок зростання: напруги холостого ходу, фактора заповнення світлової ВАХ і густини струму короткого замикання. Проведене числове моделювання впливу зміни світлових діодних характеристик на зміну ККД ФЕП показало, що при збільшенні товщини хлориду кадмію до $d_{CdCl_2} = 0,11$ мкм ріст ефективності ФЕП в рівній мірі обумовлено зменшенням густини діодного струму насичення і ростом шунтуючого електроопору. Проведене числове моделювання впливу зміни світлових діодних характеристик на зміну ефективності ФЕП показало, що при збільшенні товщини хлориду кадмію від 0,11 мкм зниження ККД ФЕП в рівній мірі обумовлено зростанням $R_{П}$ і зниженням $R_{Ш}$.

Співставляючи одержані результати з результатами дослідження впливу товщини шару хлориду і сульфиду кадмію на ефективність ФЕП тильної конфігурації на скляних підкладках, стає очевидним, що якісний вплив зміни світлових діодних характеристик при зміні товщини шару хлориду і сульфиду кадмію на зміну ефективності гнучких ФЕП і приладових структур, сформованих на скляних підкладках, однаковий. Тому і основні фізичні закономірності, які визначають спостережену зміну світлових діодних характеристик, також якісно співпадають. Тим не менш, виявляється ряд суттєвих відмінностей. Так, було показано, що оптимальна товщина шару CdS в конструкції ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au, сформованих на поліімідних підкладках більше ($d_{CdS} = 0,50$ мкм), ніж при використанні скляних підкладок ($d_{CdS} = 0,40$ мкм), а товщина шару CdCl₂ – менше (d_{CdCl_2} 0,11 мкм і 0,35 мкм, відповідно). При цьому ефективність гнучких ФЕП ($\eta = 8,5$ %) помітно поступається ККД ФЕП, сформованих на скляних підкладках ($\eta = 10,3$ %). Тим не менш, за рахунок суттєвого зниження ваги підкладки для гнучких ФЕП вдалось

досягти високих значень питомої потужності – 2,0 кВт/кг. Співставлення досягнутих питомих потужностей ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au, сформованих на поліімідній плівці і скляній підкладці, свідчить, що питома потужність гнучких приладових структур ФЕП вища в 47 разів. Згідно результатам моделювання, більша ефективність приладових структур, сформованих на скляних підкладках, обумовлена нижчою густиною діодного струму насичення. При цьому необхідно зазначити, що гнучкі ФЕП характеризуються більшими значеннями шунтуючого електроопору, що, з нашої точки зору, пов'язано з тем, що скляні підкладки містять натрій, дифузія якого в базову гетеросистему приводить до зниження шунтуючого опору. Цей висновок підтверджується результатами дослідження впливу прошарку хлориду кадмію на ефективність ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au фронтальної конфігурації. Таким чином, проведені дослідження свідчать, що для досягнення більших значень ефективності гнучких ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au тильної конфігурації в першу чергу необхідно покращити якість сепаруючого бар'єру для зниження світлового діодного струму насичення.

Оптичні властивості пліткових ФЕП ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au. Вимірювання коефіцієнта пропускання та відбиття ФЕП у видимому діапазоні випромінювання проводилося за допомогою спектрофотометра СФ-2000, підключеного до персонального комп'ютера. В основу роботи спектрофотометра покладений принцип вимірювання відношення двох світлових променів: променю, що пройшов крізь досліджуваний зразок та променю, що пройшов крізь контрольний зразок. Спектрофотометр СФ-2000 працює у діапазоні хвиль від 190 нм до 1100 нм. У якості джерел світла використовується дейтерієва лампа Hamamatsu при вимірюванні від 190 до 345 нм та галогенова лампа Philips – від 345 до 1100 нм.

В роботі вимірювання коефіцієнта пропускання у видимому діапазоні проводилось з кроком у 3 нм в діапазоні від 400 нм до 1100 нм. Вимірювання коефіцієнта відбиття шарів сульфиду кадмію проводилося за допомогою приставки СФО-2000, тим же методом що й коефіцієнт пропускання і в тому ж діапазоні довжин хвиль. На рисунку 6 наведено залежності коефіцієнта пропускання T та відбиття R плівкового ФЕП на основі телуриду кадмію від довжини хвилі випромінювання.

Розрахунок дозволяє отримати коефіцієнт поглинання сонячної енергії гнучкого ФЕП на основі телуриду кадмію у видимому діапазоні, котрий знаходиться на рівні 94–96 %.

Поряд з дослідженням коефіцієнту пропускання в діапазоні абсолютного поглинання 400–800 нм, котрий характерний для поглинання світла та генерації електричної енергії, також було необхідно провести дослідження пропускання та відбиття в діапазоні інфрачервоного випромінювання 1000–15000 нм. Такі дослідження проводилися за допомогою інфрачервоного спектрофотометру ІКС-

29, котрий працює у діапазоні довжин хвиль 2,5–25 мкм. Джерелом світла є силітовий стрижень (глобар), нагрітий до температури 1400 °С. Отримані за допомогою ІКС-29 та приставки для вимірювання коефіцієнту відбиття залежності наведено на рисунку 7, пунктиром зазначена екстраполяція.

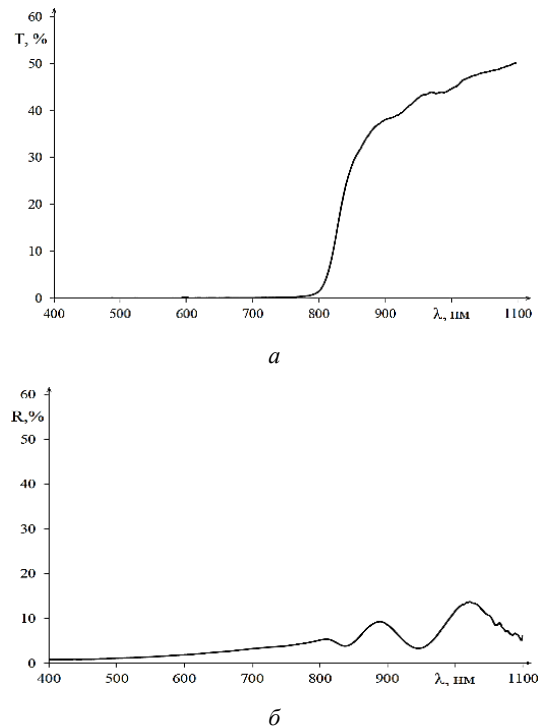


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнту пропускання (а) та відбиття (б) від довжини хвилі для ФЕП на основі телуриду кадмію в діапазоні довжин хвиль 400–1100 нм

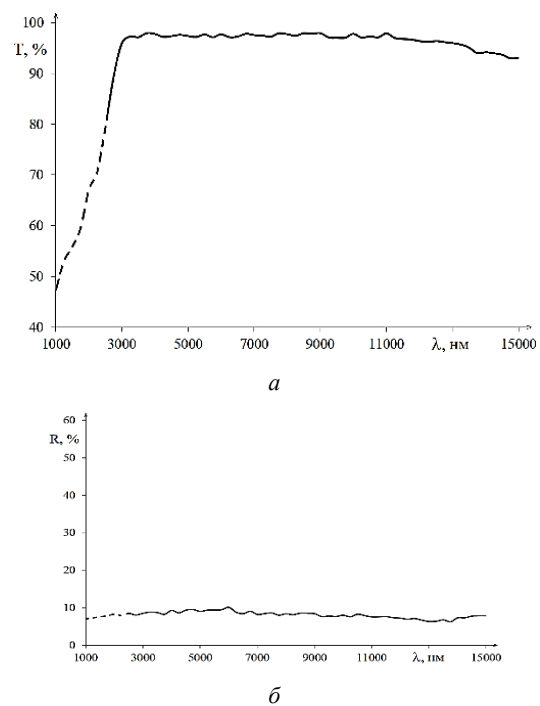


Рисунок 7 – Залежність коефіцієнту пропускання (а) та відбиття (б) від довжини хвилі для ФЕП на основі телуриду кадмію в діапазоні довжин хвиль 2,5–15 мкм

Для виготовлення мікромодулів була розроблена та виготовлена система масок, за допомогою якої були виготовлені пробні серії гнучких сонячних елементів з паралельним та послідовним з'єднанням ФЕП (рис. 8).



Рисунок 8 – Зовнішній вигляд гнучкого мікромодуля на основі гетероструктури CdTe/CdS (тильна сторона)

Виготовлення фотоенергетичного модуля на основі гнучких фотоелектричних перетворювачів. На підставі проведеного дослідження за описаною технологією може бути виготовлено тестові сонячні елементи на основі ФЕП з гетероструктурою ITO/CdS/CdTe/Cu/Au. Зазначені елементи можна за рахунок теплопровідного інтерфейсу змонтувати на пластину теплового колектору. В якості теплопровідного інтерфейсу використовується теплопровідний клей Stars 922, котрий має високу теплопровідність на рівні $1,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ та достатню міцність на розрив близько $15 \text{ кг}/\text{см}^2$. Схематичне зображення такої пластини наведено на рисунку 9.

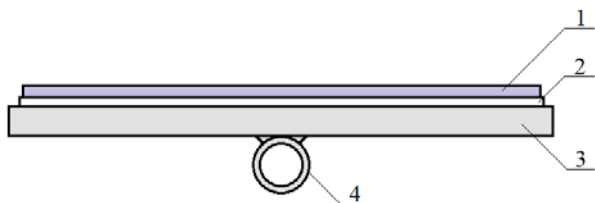


Рисунок 9 – ФЕП з гетероструктурою ITO/CdS/CdTe/Cu/Au;
2 – теплопровідний діелектричний клей;
3 – мідна пластина колектора;
4 – мідна трубка з теплоносієм

Висновки. Розроблено вимоги до ФЕП, призначених для роботи в якості інтегрованих джерел електроживлення систем сонячних колекторів:

- вони мають ефективно генерувати електричну енергію при температурі $55 \text{ }^\circ\text{C}$;
- вони мають забезпечувати коефіцієнт поглинання сонячної енергії на рівні не менш 90% та мати коефіцієнт відбиття в інфрачервоній частині спектру не більше 10% ;
- разом із системою охолодження теплового колектора конструкція ФЕП має забезпечувати різницю між температурою ФЕП та температурою теплоносія не більше $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Співставлення дослідження температурної залежності ефективності для плівкових ФЕП на основі сполук CdTe і CuInSe₂, які виготовляються у лабораторних умовах, аморфного кремнію та кристалічного GaAs, які виготовляються промислово, показали, що найменше зниження ККД зі зростанням робочої температури мають приладові структури на основі базових шарів телуриду кадмію. При зміні температури на $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ККД таких приладів знижується усього на 1% , а відносна швидкість зниження складає $-0,14$ відн. $\%/^\circ\text{C}$, що суттєво менше за аналогічний показник для інших типів ФЕП: GaAs $-0,16$ відн. $\%/^\circ\text{C}$, аморфний кремній $-0,21$ відн. $\%/^\circ\text{C}$, CuInSe₂ $-0,36$ відн. $\%/^\circ\text{C}$.

Дослідження показали, що коефіцієнт поглинання сонячної енергії гнучкого ФЕП на основі телуриду кадмію у видимому діапазоні складає $94\text{--}96 \%$, а коефіцієнт відбиття в інфрачервоній області спектра не перевищує $7\text{--}8 \%$, що дозволяє в конструкції колектора відмовитися від використання абсорбера з селективним покриттям, оскільки його функцію буде виконувати плівковий фотоелектричний перетворювач.

Запропоновано конструктивно-технологічне рішення фотоенергетичної системи з гнучкими фотоелектричними перетворювачами на основі телуриду кадмію.

Список літератури

1. Garg H. P., Agarwal R. K. Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells. *Energy Conversion and Management*. 1995. Vol. 36, No. 2. P. 8–99.
2. Zondag H. A., de Vries D. W., van Helden W. G. J., van Zolingen R. J. C., van Steenhoven A. A. The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*. 2003. Vol. 74, No. 3. P. 253–269.
3. Paudel N. R., Wieland K. A., Compaan A. D. Ultrathin CdS/CdTe solar cells by sputtering. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2012. Vol. 105. P. 109–112.
4. Zaitsev R. V., Kirichenko M. V., Khrypunov G. S., Radoguz S. A., Khrypunov M. G., Prokopenko D. S., Zaitseva L. V. Operating Temperature Effect on the Thin Film Solar Cell Efficiency. *Journal of nano- and electronic physics*. 2019. Vol. 11, No. 4. P. 04029–1–04029–6.
5. Virtuani A., Pavanello D., Friesen G. Overview of temperature coefficients of different thin film photovoltaic technologies. *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Spain, Valencia, 2010. P. 4248–4252.
6. Perraki V., Tsolkas G. Temperature dependence on the photovoltaic properties of selected thin-film modules. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2013. Vol. 2, No. 4. P. 140–146.

7. Singh P., Ravindra N. M. Temperature dependence of solar cell performance – an analysis. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2012. Vol. 101. P. 36–45.
8. 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, No. 21. P. 7156–7159.
9. Han J., Spanheimer C., Haindl G., Fu G., Krishnakumar V., Schaffner J., Fan C., Zhao K., Klein A., Jaegermann W. Optimized chemical bath deposited CdS layers for the improvement of CdTe solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011. Vol. 95, No. 3. P. 816–820.
10. Krishnakumar V., Barati A., Schimper H.-J., Klein A., Jaegermann W. A possible way to reduce absorber layer thickness in thin film CdTe solar cells. *Thin Solid Films*. 2013. Vol. 535. P. 233–236.
11. Зайцев Р. В. Моделирование вдосконаленого теплообмінного блоку з мікроканалами для комбінованої фотоенергетичної установки. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2017. № 3. С. 57–62. doi: 10.20998/2074-272X.2017.3.08
12. Salavei A., Rimmaudo I., Piccinelli F., Zabierowski P., Romeo A. Study of difluorochloromethane activation treatment on low substrate temperature deposited CdTe solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2013. Vol. 112. P. 190–195.
13. Sites J., Pan J. Strategies to increase CdTe solar-cell voltage. *Thin Solid Films*. 2007. Vol. 515, No. 15. P. 6099–6102.
14. Харченко Н. М., Хрипунов Г. С., Ли Т. А. Оптимизация технологии “хлоридной” обработки тонких пленок халькогенидов кадмия. *Физическая инженерия поверхности*. 2008. Т. 6, № 3-4. С. 128–133.
5. Virtuani A., Pavanello D., Friesen G. Overview of temperature coefficients of different thin film photovoltaic technologies. *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Spain, Valencia, 2010, pp. 4248–4252.
6. Perraki V., Tsolkas G. Temperature dependence on the photovoltaic properties of selected thin-film modules. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2013, vol. 2, no. 4, pp. 140–146.
7. Singh P., Ravindra N. M. Temperature dependence of solar cell performance – an analysis. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2012, vol. 101, pp. 36–45.
8. 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, no. 21, pp. 7156–7159.
9. Han J., Spanheimer C., Haindl G., Fu G., Krishnakumar V., Schaffner J., Fan C., Zhao K., Klein A., Jaegermann W. Optimized chemical bath deposited CdS layers for the improvement of CdTe solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011, vol. 95, no. 3, pp. 816–820.
10. Krishnakumar V., Barati A., Schimper H.-J., Klein A., Jaegermann W. A possible way to reduce absorber layer thickness in thin film CdTe solar cells. *Thin Solid Films*. 2013, vol. 535, pp. 233–236.
11. Zaitsev R. V. Modelyuvannya vdoskonalenooho teploobminnooho bloku z mikrokanalamy dlya kombinovanoyi fotoenerhetychnoyi ustanovky [Modeling of an advanced heat exchange unit with microchannels for a combined photoenergy system]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika* [Electrical engineering & electromechanics]. 2017, no. 3, pp. 57–62. doi: 10.20998/2074-272X.2017.3.08
12. Salavei A., Rimmaudo I., Piccinelli F., Zabierowski P., Romeo A. Study of difluorochloromethane activation treatment on low substrate temperature deposited CdTe solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2013, vol. 112, pp. 190–195.
13. Sites J., Pan J. Strategies to increase CdTe solar-cell voltage. *Thin Solid Films*. 2007, vol. 515, no. 15, pp. 6099–6102.
14. Kharchenko N.M., Khripunov G.S., Li T.A. Optimizatsiya tekhnologii “khloridnoy” obrabotki tonkikh plenok khal'kogenidov kadmiya [Technology optimization of the chloride treatment of cadmium chalcogenide thin films]. *Physical surface engineering*. 2008, vol. 6, no. 3-4, pp. 128–133.

References (transliterated)

Надійшла (received) 16.11.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Зайцев Роман Валентинович (Zaitsev Roman Valentinovich, Zaitsev Roman) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; e-mail: roman.zaitsev@kpi.edu.ua.