

УДК 620.91

ВПЛИВ «ХЛОРИДНИХ» ОБРОБОК НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ ПЛІВОК ТЕЛУРИДУ КАДМІЮ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ СУБЛІМАЦІЇ В ЗАМКНУТОМУ ОБ'ЄМІ

Отримано 24 січ. 2022; рекомендовано до публікації 21 бер. 2022
Доступно онлайн 29 квіт. 2022

Г. С. Хрипунов¹, А. В. Меріуц², А. І. Доброжан³,
М. Г. Хрипунов⁴, Т. М. Шелест⁵

Автор для кореспонденції: Тетяна Шелест
e-mail: tshelest@ukr.net

¹ д-р техн. наук, проф., проректор НТУ «ХПІ»
<https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>

² канд. фіз.-мат. наук, доц., ст. наук. співроб.
<https://orcid.org/0000-0003-4176-2530>

³ канд. техн. наук, ст. викл.
<https://orcid.org/0000-0002-8830-0942>

⁴ аспірант каф. фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики
<https://orcid.org/0000-0002-5498-1831>

⁵ канд. фіз.-мат. наук, доц. каф. Фізики
<https://orcid.org/0000-0002-8116-6189>

^{1, 2, 3, 4, 5} Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
Україна

З метою збільшення ефективності сонячних елементів (СЕ) на основі плівок телуриду кадмію, отриманих методом сублімації в замкнутому об'ємі, досліджено різні способи проведення «хлоридної» обробки для активації базового шару сонячних елементів. Сонячні елементи піддавалися як газофазній, так і твердотільній «хлоридній» обробці, що дало змогу провести порівняльний аналіз вихідних параметрів та світлових діодних характеристик. Було досліджено вплив часу відпалу базового шару телуриду кадмію в парах хлориду кадмію при газофазній «хлоридній» обробці. Встановлено, що оптимальний час цього процесу становить близько 10 хв, що забезпечує зростання коефіцієнта корисної дії (ККД) до 12,8 %. Проведене числове моделювання впливу зміни світлових діодних характеристик на величину ККД показало, що зростання ефективності СЕ $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}$ рівною мірою обумовлене зниженням послідовного електроопору та густини діодного струму насичення, а також зростанням шунтувального електроопору. При твердотільній «хлоридній» обробці на поверхню телуриду кадмію осаджувалися шари хлориду кадмію CdCl_2 різної товщини з подальшим відпалом гетеросистеми на повітрі. Встановлено, що така обробка не дозволяє формувати СЕ з ККД більше 9 %, що обумовлено негативним впливом підвищеного послідовного електроопору та більшими значеннями густини діодного струму насичення.

Встановлено, що вплив «хлоридної» обробки на коефіцієнт корисної дії пов'язаний з формуванням різних дефектних комплексів у базовому шарі. При газофазній «хлоридній» обробці формуються дрібні акцептори $\text{Cl}_{\text{Te}}-\text{V}_{\text{Cd}}$, а при твердотільній «хлоридній» обробці внаслідок надлишку хлору починають формуватися ізоелектронні комплекси $2\text{Cl}_{\text{Te}}-\text{V}_{\text{Cd}}$. Вказані комплекси по-різному впливають на діодні параметри сонячних елементів, що приводить до суттєвої різниці ККД СЕ.

Отже, встановлено, що для СЕ з базовим шаром телуриду кадмію, отриманим сублімацією в замкнутому просторі, оптимальним є газофазний метод проведення «хлоридної» обробки та визначені оптимальні значення умов її проведення. Бібл. 10, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: сонячні елементи, телурид кадмію, «хлоридна» обробка, ефективність.

INFLUENCE OF CHLORIDE TREATMENTS ON THE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS BASED ON CADMIUM TELLURIDE FILMS OBTAINED BY CLOSE SPACE SUBLIMATION METHOD

Received 21 Jan. 2022; accepted 21 March 2022.
Available online 29 April 2022

G. Khrypunov¹, A. Meriuts², A. Dobrozhan³,
M. Khrypunov⁴, T. Shelest⁵

Author for correspondence: Tetiana Shelest
e-mail: tshelest@ukr.net

¹ DScTech, Prof., Vice-Rector of NTU «KhPI»
<https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>

² Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher of NTU «KhPI» <https://orcid.org/0000-0003-4176-2530>

In order to increase the efficiency of solar cells (SCs) based on cadmium telluride films obtained by close space sublimation method, various methods of chloride treatment to activate the base layer of solar cells have been investigated. Both gas-phase and solid-state chloride treatment methods were taken to different solar cells, which allowed doing a comparative analysis of the output parameters and light diode characteristics. The effect of annealing time of the CdTe base layer in cadmium chloride vapors during gas-phase chloride treatment was investigated. It is established that the optimal time of this process is about 10 minutes, which provides efficiency increasing to 12.8%. Numerical modeling of the effect of changes in light diode characteristics on the efficiency showed that the increase in the efficiency of $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ SCs is equally due to a series resistance and diode saturation current density decreasing, as well as an shunt resistance increasing. During the solid-state chloride treatment, cadmium chloride layers of various thicknesses were

deposited on the cadmium telluride surface, followed by heterosystem annealing in air. It was found that such treatment does not allow the formation of SCs with an efficiency of more than 9%, due to the negative impact of increasing of series resistance and diode saturation current density.

It is established that the effect of chloride treatment on the efficiency is associated with the formation of various defective complexes in the base layer. In the case of gas-phase chloride treatment, small $\text{Cl}_{\text{Te}}\text{-V}_{\text{Cd}}$ acceptors are formed, and in the case of solid-state chloride treatment, isoelectronic $2\text{Cl}_{\text{Te}}\text{-V}_{\text{Cd}}$ complexes begin to form due to excess chlorine. These complexes affect the light diode parameters of solar cells in different ways, which leads to a significant difference in the SCs efficiency.

Thus, it is established that for SCs with a base layer of cadmium telluride obtained by close space sublimation method, the gas-phase method of chloride treatment is optimal and the optimal physical and technological values of this treatment are determined.

Bibl. 10, table. 2, fig. 3.

Keywords: solar cells, cadmium telluride, chloride treatment, efficiency.

Вступ. Плівкові сонячні елементи на основі телуриду кадмію за рахунок низької енерго- та матеріалоемності процесу виготовлення являють собою альтернативу широко розповсюдженим приладовим структурам на основі кристалічного кремнію [1]. Зараз для промислового виробництва високоефективних плівкових СЕ на основі телуриду кадмію використовують метод сублімації в замкнутому об'ємі [2]. Обов'язковою технологічною операцією при виготовленні таких приладових структур є активаційна «хлоридна» обробка, в процесі проведення якої відбувається збільшення ефективності СЕ в кілька разів [3]. В умовах масового виробництва «хлоридна» обробка базових шарів телуриду кадмію проводиться в газовій фазі шляхом відпалу в парах хлору або хлориду кадмію при температурі 400 °С [3]. Водночас твердотільна «хлоридна» обробка, яка здійснюється високотехнологічним методом, що передбачає нанесення на поверхню базового шару телуриду кадмію плівок хлориду кадмію з подальшим відпалом гетеросистеми на повітрі при температурі 430 °С, для плівок телуриду кадмію, отриманих сублімацією в замкнутому об'ємі, не проводиться [4].

Мета і завдання. Метою роботи є проведення порівняльного дослідження вихідних параметрів та

світлових діодних характеристик сонячних елементів на основі базових шарів телуриду кадмію, які було отримано методом сублімації в замкнутому об'ємі й піддано газофазній і твердотільній «хлоридній» обробці. Для досягнення мети було виконано такі завдання: проведено експериментальні вимірювання та аналітичну обробку світлових вольт-амперних характеристик плівкових сонячних елементів на основі базових шарів телуриду кадмію, які було отримано методом сублімації в замкнутому об'ємі й піддано газофазній і твердотільній «хлоридній» обробці; проведено моделювання впливу світлових діодних характеристики на ефективність сонячних елементів.

Методика. Зразки СЕ на основі базових шарів телуриду кадмію, отриманих методом сублімації в замкнутому об'ємі, було виготовлено в групі професора А. Байрамова в Інституті фізики Азербайджанської Академії наук.

При виготовленні СЕ (рис. 1) було використано скляні підкладки з нанесеним плівковим прозорим електродом $\text{SnO}_2\text{:F}$ товщиною 0,5 мкм з поверхневим електроопором 10 Ом/□ і середнім коефіцієнтом пропускання у видимому діапазоні 90 %.

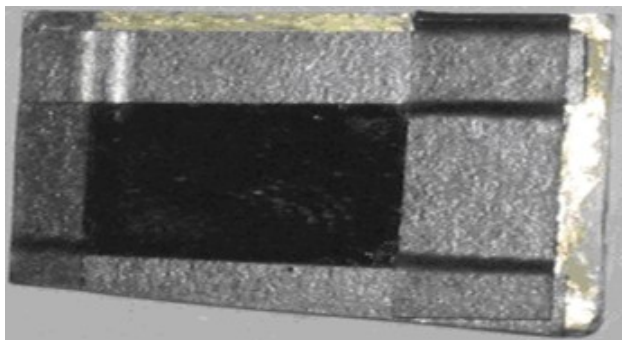


Рис. 1. Фотографія СЕ $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$, у конструкції якого використано базові шари CdTe , отримані сублімацією в замкнутому об'ємі

Fig.1. Photo of $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ SC, with CdTe base layer obtained by close space sublimation method

На ці фронтальні електроди хімічним методом осаджувалися плівкові шари CdS товщиною до 0,1 мкм. Потім на поверхні плівок сульфиду кадмію методом сублімації в замкнутому об'ємі осаджувалися шари CdTe товщиною 4 мкм. Температура підкладки при осадженні плівок телуриду кадмію становила 620°C , температура джерела – 660°C . Отримані шари телуриду кадмію піддавалися «хлоридній» обробці в газовій фазі. Для цього після їх отримання без порушення вакууму проводився їх відпал у парах хлориду кадмію при температурі 400°C . Потім було проведено травлення базового шару в розчині HNO_3 : H_3PO_4 : H_2O для формування на поверхні надлишку телуру. Для створення тильного контакту на протравлену поверхню базового шару телуриду кадмію наносилася суміш, що складається з графітової основи та сполук Cu_xTe і HgTe . Далі проводився відпал на повітрі при температурі 300°C протягом 25 хв в атмосфері інертного газу. Після чого осаджувався верхній нікелевий електрод.

Частина зразків була піддана твердотільній «хлоридній» обробці; для цього при виготовленні СЕ на поверхню шару телуриду кадмію осаджувалися шари хлориду кадмію різної товщини та проводився відпал їх на повітрі при температурі 430°C протягом 25 хв. Потім за вказаною вище методикою формувалися тильні контакти.

Для визначення вихідних параметрів сонячних елементів на основі CdS/CdTe – густини струму короткого замикання ($J_{\text{кз}}$), напруги холостого ходу ($U_{\text{хх}}$), фактора заповнення (FF) навантажувальної світлової вольт-амперної характеристики (ВАХ) і, у кінцевому підсумку, коефіцієнта корисної дії (η) – проводилися вимірювання світлових ВАХ зазначених приладових структур. Світлові ВАХ СЕ вимірювалися при потужності світлового потоку 100 мВт/см^2 . Світлові діодні

характеристики сонячного елемента: густина фотоструму ($J_{\text{ф}}$), густина діодного струму насичення (J_0), коефіцієнт ідеальності діода (A), послідовний електроопір ($R_{\text{п}}$) і шунтувальний електроопір ($R_{\text{ш}}$), що розраховуються на одиницю площі СЕ, – в неявному вигляді визначають його ефективність [5]:

$$J_{\text{н}} = -J_{\text{ф}} + J_0 \{ \exp[e(U_{\text{н}} - J_{\text{н}}R_{\text{п}})/(AkT)] - 1 \} + (U_{\text{н}} - J_{\text{н}}R_{\text{п}})/R_{\text{ш}}, \quad (1)$$

де e – заряд електрона; k – стала Больцмана; T – температура сонячного елемента; $U_{\text{н}}$ – падіння напруги на навантаженні; $J_{\text{н}}$ – густина струму, що протікає через навантаження.

Розрахунок вихідних параметрів і світлових діодних характеристик сонячних елементів на основі телуриду кадмію здійснювався шляхом апроксимації експериментальної світлової ВАХ теоретичною залежністю (1) за допомогою комп'ютерної програми [6]. Відносна похибка у визначенні вихідних параметрів і світлових діодних характеристик складала кілька відсотків.

За допомогою цієї програми, яку детально описано в [7], також можна проводити чисельне моделювання впливу зміни світлових діодних характеристик на ККД виготовлених сонячних елементів. Це дозволяє ідентифікувати можливі фізичні механізми впливу кристалічної та енергетичної структури базового шару СЕ на їх ефективність. У результаті таких досліджень у роботі встановлювалися закономірності впливу технологічних параметрів активаційних обробок на ефективність СЕ.

Результати й обговорення. Були досліджені світлові ВАХ СЕ $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$, при формуванні яких під час проведення газофазної «хлоридної» обробки змінювався час відпалу базового шару телуриду кадмію в парах хлориду кадмію (рис. 2).

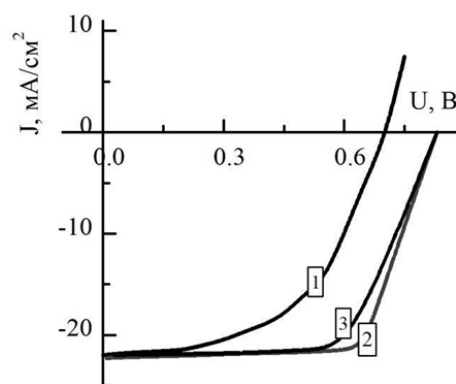


Рис. 2. Світлові ВАХ СЕ $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$: 1 – час відпалу 5 хв, 2 – 10 хв
Fig. 2. Light J-U characteristics of $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ SCs with different annealing time: 1 - 5 min., 2 - 10 min., 3 - 15 min.

Аналіз табл. 1, у якій представлено світлові характеристики та вихідні параметри характерних зразків $\text{CE SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$, показує, що збільшення часу «хлоридної» обробки від 5 до 10 хв приводить до збільшення ефективності приладових структур від 8,2 до 12,8 % за рахунок зростання напруги холостого ходу від 703 до 829 мВ і фактора заповнення світлової ВАХ від 0,53 до 0,71.

Таблиця 1. Вихідні параметри та світлові діодні характеристики $\text{CE SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ при зміні часу газофазної «хлоридної» обробки

Table 1. Output parameters and light diode characteristics of $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ SCs depending on the time of gas-phase chloride treat

Вихідні параметри та світлові діодні характеристики	Час відпалу, хв		
	5	10	12
$J_{\text{КЗ}}$, mA/cm^2	22,2	21,7	21,9
$U_{\text{ХХ}}$, мВ	703	829	830
FF , в. о.	0,53	0,71	0,61
ККД, %	82	12,8	11,1
$J_{\text{Ф}}$, mA/cm^2	22,8	21,7	22,0
$R_{\text{П}}$, $\text{Om}\cdot\text{cm}^2$	5,7	0,8	1,2
$R_{\text{Ш}}$, $\text{Om}\cdot\text{cm}^2$	183	840	800
A , в. о.	2,46	2,48	2,72
J_0 , A/cm^2	$2,7\cdot 10^{-7}$	$4,6\cdot 10^{-8}$	$5,1\cdot 10^{-8}$

Проведене числове моделювання впливу зміни світлових діодних характеристик на величину ККД показало, що при збільшенні часу «хлоридної» обробки до 10 хв зростання ефективності $\text{CE SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ рівною мірою обумовлене зниженням послідовного електроопору та густини діодного струму насичення, а також зростанням шунтувального електроопору.

Згідно з літературними даними [8, 9], у процесі проведення «хлоридної» обробки в газовій фазі в результаті міжфазної взаємодії $\text{CdCl}_2\text{-CdTe}$ за рахунок генерації акцепторів $\text{Cl}_{\text{Te}}\text{-V}_{\text{Cd}}$, відбувається зростання концентрації основних носіїв заряду, що приводить до експериментально зафіксованого зниження послідовного електричного опору. При цьому генерація акцепторів переважно відбувається поблизу поверхні границь зерна телуриду кадмію, що спричиняє формування поблизу цих границь ізотопного

$p\text{-}p$ бар'єра, який виштовхує генеровані під дією світла нерівноважні електрони в об'єм зерна. Цей процес обумовлює зниження шунтувального впливу границь зерна та зменшує рекомбінацію на цих границях. У результаті відбувається зафіксоване експериментально зростання шунтувального опору та зниження густини діодного струму насичення, що обумовлює зростання ККД приладової структури $\text{CE SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$.

Аналіз результатів обробки ВАХ, наведених в табл. 1, показує, що збільшення часу «хлоридної» обробки від 10 до 12 хв призводить до зменшення ефективності $\text{CE SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ від 12,8 до 11,1 % за рахунок зниження фактора заповнення світлової ВАХ від 0,71 до 0,61.

Проведене чисельне моделювання засвідчило, що при збільшенні часу «хлоридної» обробки від 10 до 12 хв зниження ефективності відбувається за рахунок зростання послідовного електричного опору. Зростання $R_{\text{П}}$ при збільшенні часу проведення «хлоридної» обробки виглядає парадоксально, оскільки при цьому концентрація хлору в базових шарах телуриду кадмію зростає. Однак, згідно з [10], зростання концентрації хлору приводить до еволюції електрично активних власних точкових дефектів у шарах телуриду кадмію: замість дрібних акцепторних комплексів $\text{Cl}_{\text{Te}}\text{-V}_{\text{Cd}}$ формуються ізоелектронні комплекси $2\text{Cl}_{\text{Te}}\text{-V}_{\text{Cd}}$. Описана еволюція енергетичної структури телуриду кадмію спричиняє зниження концентрації основних носіїв заряду в базовому шарі, що викликає зростання питомого електроопору базового шару телуриду кадмію. У результаті відбувається експериментально зафіксоване зростання послідовного опору $\text{CE SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ та зменшення ККД приладової структури.

У роботі було досліджено вплив твердотільної «хлоридної» обробки, що проводиться шляхом осадження шарів хлориду кадмію на поверхню телуриду кадмію з подальшим відпалом гетеросистеми на повітрі при температурі 430 °C протягом 25 хв, на ефективність $\text{CE SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$. Для цього було проведено аналітичну обробку експериментальних світлових ВАХ $\text{CE SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ (рис. 3), в яких на базові шари при проведенні «хлоридної» обробки осаджувалися плівки CdCl_2 різної товщини.

Дослідження показали, що можна виділити дві характерні ділянки залежності ефективності, вихідних параметрів і світлових діодних характеристик від товщини шару хлориду кадмію. Вихідні параметри та світлові діодні характеристики типових зразків $\text{CE SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ представлено в табл. 2.

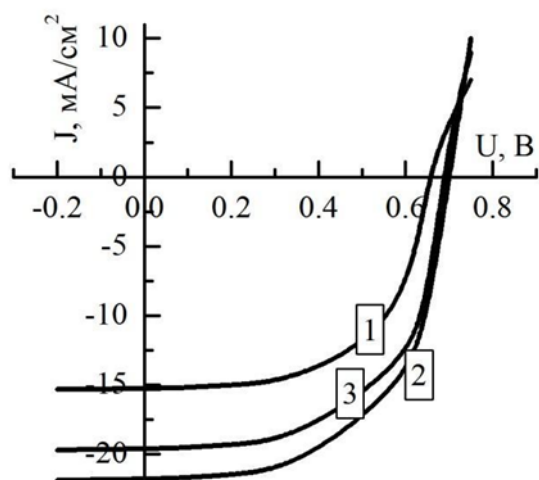


Рис. 3. Світлові ВАХ типових зразків СЕ $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ після «хлоридної» обробки з нанесенням різної товщини шару CdCl_2 :

1 – 0,4 мкм, 2 – 0,8 мкм, 3 – 1,0 мкм

Fig. 3. Light J-U characteristics of typical samples $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ SCs after chloride treatment depending on thickness of CdCl_2 layer:
1 – 0.4 μm , 2 – 0.8 μm , 3 – 1.0 μm

Таблиця 2. Вихідні параметри та світлові діодні характеристики СЕ $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ для різної товщини шару CdCl_2 при проведенні «хлоридної» обробки

Table 2. Output parameters and light diode characteristics of $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ SC after the chloride treatment depending on thickness of CdCl_2 layer

Вихідні параметри та світлові діодні характеристики	Товщина шару хлориду кадмію, мкм		
	0,4	0,8	1,0
$J_{\text{КЗ}}$, mA/cm^2	15,0	22,0	20,1
U_{XX} , мВ	650	700	690
FF , в. о.	0,65	0,58	0,58
ККД, %	6,3	9,0	8,1
$J_{\text{Ф}}$, mA/cm^2	16,0	22,3	20,5
$R_{\text{П}}$, $\text{OM}\cdot\text{cm}^2$	5,4	3,5	1,6
$R_{\text{Ш}}$, $\text{OM}\cdot\text{cm}^2$	870	650	420
A , в. о.	2,9	2,5	2,6
J_0 , A/cm^2	$8,7\cdot 10^{-7}$	$2,3\cdot 10^{-7}$	$5,1\cdot 10^{-7}$

Аналіз результатів обробки ВАХ, наведених в табл. 2, показує, що збільшення товщини шару хлориду кадмію від 0, до 0,8 мкм приводить до збільшення ефективності СЕ $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ від 6,3 до 9,0 % за рахунок збільшення густини струму корот-

кого замикання від 15,0 до 22 mA/cm^2 .

Числове моделювання засвідчило, що спостережуване експериментально зростання ККД до 9 % при збільшенні товщини шару CdCl_2 до 0,8 мкм рівною мірою обумовлене зниженням послідовного електроопору та густини діодного струму насичення.

Аналіз результатів, наведених в табл. 2, доводить, що при подальшому збільшенні товщини шару хлориду кадмію від 0,8 до 1,0 мкм спостерігається зниження ефективності СЕ $\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$ від 9,0 до 8,1 % за рахунок зменшення густини струму короткого замикання від 22 до 21 mA/cm^2 . Шляхом моделювання впливу світлових діодних параметрів на ККД було встановлено, що зафіксоване експериментально зниження ефективності СЕ при подальшому зростанні товщини шару хлориду кадмію до 1,0 мкм рівною мірою обумовлене зниженням шунтувального електроопору та зростанням густини діодного струму насичення.

Зіставлення результатів обробки ВАХ, наведених в таблицях 1 і 2, свідчить про те, що для СЕ з базовим шаром телуриду кадмію, отриманим сублімацією в замкнутому просторі при «хлоридній» обробці, яка проводиться в твердій фазі, ККД є нижчим, ніж при «хлоридній» обробці, яка проводиться в газовій фазі. Моделювання впливу світлових діодних характеристик на ККД показало, що спостережні закономірності обумовлені негативним впливом підвищеного послідовного опору та більшою густиною діодного струму насичення для СЕ, у конструкції яких базові шари телуриду кадмію, що були отримані сублімацією в замкнутому об'ємі, піддавалися твердотільній «хлоридній» обробці.

Висновки. Газофазна «хлоридна» обробка шарів телуриду кадмію, отриманих сублімацією в замкнутому об'ємі, яка була проведена шляхом їх відпалу в парах хлориду кадмію при температурі 400 °С, при збільшенні часу відпалу до 10 хв, приводить до формування СЕ на їх основі з ефективністю 12,8 %, що рівною мірою обумовлено зниженням послідовного електроопору та густини діодного струму насичення, а також зростанням шунтувального електроопору. Подальше зростання часу відпалу призводить до зниження ККД за рахунок зростання послідовного опору, що зумовлено еволюцією енергетичної структури телуриду кадмію, коли замість дрібних акцепторів ClTe-VCd починають формуватися ізоелектронні комплекси 2ClTe-VCd .

Твердотільна «хлоридна» обробка шарів телуриду кадмію, отриманих сублімацією в замкнутому об'ємі, яка проводиться шляхом осадження на поверхню базового шару хлориду кадмію з подальшим

відпалом на повітрі при температурі 430 °C протягом 25 хв, не дозволяє формувати СЕ з ефективністю більше 9 %, що обумовлено негативним впливом підвищеного послідовного електроопору та більшими значеннями густини діодного струму насичення.

ПОСИЛАННЯ

1. A. Bosio, S. Pasini, and N. Romeo, "The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules", *Coatings*, vol. 10, No 4, pp. 344-1-344-30, 2020. <https://doi.org/10.3390/coatings10040344>.
2. K. S. Rahman, et al., "Influence of deposition time in CdTe thin film properties grown by Close-Spaced Sublimation (CSS) for photovoltaic application", *Results in Physics*, vol. 14, pp. 102371-1-102371-9, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102371>.
3. A. Abbas, et al., "The effect of cadmium chloride treatment on close-spaced sublimated cadmium telluride thin-film solar cells", *IEEE Journal of Photovoltaics*, No 4, pp. 1361-1366, 2013. DOI: [10.1109/PVSC-Vol2.2012.6656778](https://doi.org/10.1109/PVSC-Vol2.2012.6656778).
4. A. Romeo, H. Zogg, and A. N. Tiwari, "Influence of transparent conducting oxide on the properties of CdTe/CdS solar cells" in *Proc. World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Vienna, Austria, 6-10 July 1998, pp. 1105-1108.
5. H. S. Rauschenbach, *Solar cell array design. The principles and technology of photovoltaic energy conversion*. New York: Litton Educational Publishing, 1980. DOI: [10.1007/978-94-011-7915-7_FM](https://doi.org/10.1007/978-94-011-7915-7_FM).
6. Г. С. Хрипунов, А. В. Меріуц, "Аналіз діодних характеристик плівкових сонячних елементів на основі CdTe", *Український фізичний журнал*, Т. 49, No 12, с. 1188-1191, 2004.
7. Г. С. Хрипунов, А. В. Пирогов, Н. А. Ковтун, А. Л. Хрипунова, Д. А. Кудий, "Пленочные солнечные элементы ITO/SnO₂/CdS/CdTe/Cu/Au", *Физическая инженерия поверхности*, Т. 12, No 4, с. 466-475, 2014.
8. R. W. Birkmire, and P. V. Meyers, "Processing Issues for thin film CdTe cells and modules" in *First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Hawaii, Dec. 5-9 1994.
9. K. Durose, et al., "Key aspects of CdTe/CdS solar cells", *Physics Status Solidi*, vol. 229, No 2. pp. 1055-1064, 2002. [https://doi.org/10.1002/1521-3951\(200201\)229:2<1055::AID-PSSB1055>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/1521-3951(200201)229:2<1055::AID-PSSB1055>3.0.CO;2-W).
10. J. Valdna, and E. Hill, "Efficiency limits of CdTe thin film solar cell" in *Proc. 17 European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Munich, Germany October 22-26 2001, pp. 1233-1235.

REFERENCE

1. A. Bosio, S. Pasini, and N. Romeo, "The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules", *Coatings*, vol. 10, No 4, pp. 344-1-344-30, 2020. <https://doi.org/10.3390/coatings10040344>.
2. K. S. Rahman, et al., "Influence of deposition time in CdTe thin film properties grown by Close-Spaced Sublimation (CSS) for photovoltaic application", *Results in Physics*, vol. 14, pp. 102371-1-102371-9, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102371>.
3. A. Abbas, et al., "The effect of cadmium chloride treatment on close-spaced sublimated cadmium telluride thin-film solar cells", *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, No 4, pp. 1361-1366, 2013. DOI: [10.1109/PVSC-Vol2.2012.6656778](https://doi.org/10.1109/PVSC-Vol2.2012.6656778).
4. A. Romeo, H. Zogg, and A. N. Tiwari, "Influence of transparent conducting oxide on the properties of CdTe/CdS solar cells", in *Proc. World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Vienna, Austria, 6-10 July 1998, pp. 1105-1108.
5. H. S. Rauschenbach, *Solar cell array design. The principles and technology of photovoltaic energy conversion*. New York: Litton Educational Publishing, 1980. DOI: [10.1007/978-94-011-7915-7_FM](https://doi.org/10.1007/978-94-011-7915-7_FM).
6. G. Khrypunov, and A. Meriuts, "Analysis of diode characteristics of film solar cells based on CdTe", (in Ukrainian), *Ukrainian Physical Journal*, vol. 49, No 12, pp. 1188-1191, 2004.
7. G. Khrypunov, A. Pirogov, N. Kovtun, A. Khrypunova, and D. Kudii, "Film solar cells ITO/SnO₂/CdS/CdTe/Cu/Au, (in Russian), *Physical surface engineering*, vol. 12, No 4, pp. 466-475, 2014.
8. R. W. Birkmire, and P. V. Meyers, "Processing Issues for thin film CdTe cells and modules" in *First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Hawaii, Dec. 5-9 1994.
9. K. Durose, et al., "Key aspects of CdTe/CdS solar cells", *Physics Status Solidi*, vol. 229, No 2. pp. 1055-1064, 2002. [https://doi.org/10.1002/1521-3951\(200201\)229:2<1055::AID-PSSB1055>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/1521-3951(200201)229:2<1055::AID-PSSB1055>3.0.CO;2-W).
10. J. Valdna, and E. Hill, "Efficiency limits of CdTe thin film solar cell" in *Proc. 17 European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Munich, Germany October 22-26 2001, pp. 1233-1235.