

УДК 620.91

doi:10.20998/2413-4295.2022.01.04

МЕТОД АКТИВАЦІЇ ПЛІВОК ТЕЛУРИДУ КАДМІЮ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

М. Г. ХРИПУНОВ¹, Г. С. ХРИПУНОВ¹, А. І. ДОБРОЖАН², Т. М. ШЕЛЕСТ^{3*}, С. С. КРИВОНІС³

¹ кафедра мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

² кафедра природничих наук, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

³ кафедра фізики, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

* e-mail: tshelst@ukr.net

АНОТАЦІЯ Досліджувався вплив відпалу у фреоні на кристалічну структуру плівок телуриду кадмію, отриманих сублімацією в замкнутому об'ємі, а також вихідні параметри і світлові діодні характеристики сонячних елементів виготовлених на основі цих плівок. Відпал приладових структур проводився при температурі 400 °C протягом різного часу. Дослідження кристалічної структури проводилися методом рентгендифрактометричного аналізу. Ці дослідження показали, що відпал у фреоні призводить до перекристалізації плівок телуриду кадмію, що зменшує мікронапруження про що свідчить зменшення періоду решітки після відпалу від $a = 6.491 \text{ \AA}$ до $a = 6.488 \text{ \AA}$. Проведено дослідження впливу часу відпалу у фреоні на вихідні параметри та світлові діодні характеристики сонячних елементів. Для цього були досліджені світлові вольт-амперні характеристики приладових структур ITO/SnO₂/CdS/CdTe, які піддавалися відпалу протягом 20-40 хвилин. Встановлено, що оптимальний час відпалу у фреоні становив 30 хвилин. Показано, що в результаті відпалу у фреоні протягом 30 хвилин сонячні елементи на основі таких плівок мають найбільшу ефективність 11.7%. Моделювання впливу світлових діодних характеристик на коефіцієнт корисної дії показало, що зростання ефективності сонячних елементів при збільшенні часу відпалу у фреоні до 30 хвилин обумовлено зменшенням густини діодного струму насичення. Зниження коефіцієнта корисної дії при подальшому збільшенні часу відпалу до 40 хвилин пов'язане зі зниженням шунтувального опору. Також показано, що витримка сонячних елементів при освітленні протягом 20 хвилин в режимі AM1.5 призводить до додаткового збільшення їх ефективності до 12.2%. Згідно з результатами моделювання, таке підвищення також обумовлено зниженням густини діодного струму насичення.

Ключові слова сонячні елементи; телурид кадмію; відпал у фреоні; кристалічна структура; ефективність

ACTIVATION METHOD OF CADMIUM TELLURIDE THIN FILMS FOR CREATION EFFECTIVE SOLAR CELLS

М. KHRYPUNOV¹, G. KHRYPUNOV¹, A. DOBROZHAN², T. SHELEST³, S. KRYVONIS³

¹ Department of Micro- and Nanoelectronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Department of Natural Sciences, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

³ Department of Physics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The influence of annealing in freon on the cadmium telluride films crystal structure obtained by closed space sublimation method and the output parameters and light diode characteristics of solar cells based on these films were studied. Annealing of structures was performed at a temperature of 400 °C for different times. The studies of the crystal structure were performed by the X-ray diffraction analysis. These studies have shown that the annealing in freon leads to a recrystallization of cadmium telluride films, which reduces microstress. It is evidenced by the lattice period decrease after annealing from $a = 6.491 \text{ \AA}$ to $a = 6.488 \text{ \AA}$. The study of the influence of annealing in freon on the output parameters and light diode characteristics of solar cells was performed. For this purpose the light current-voltage characteristics of ITO/SnO₂/CdS/CdTe structures, annealed for 20-40 minutes, were studied. It was found that the optimal annealing time in freon is 30 minutes. It is shown that the solar cells based on such films have the highest efficiency in 11.7% after annealing in freon for 30 minutes. A simulation of light diode characteristics influence on the efficiency showed that the solar cells efficiency increase due to the diode saturation current density decrease when the annealing time in freon increases to 30 minutes. When the annealing time increases to 40 minutes the efficiency decrease is associated with a shunt resistance decrease. It is also shown that the pre-irradiation of solar cells in the AM1.5 mode for 20 minutes leads to an additional efficiency increase to 12.2%. According to the simulation results, such efficiency increase is also due to the diode saturation current density decrease.

Keywords: solar cells; cadmium telluride; annealing in freon; crystal structure; efficiency

Вступ

Для досягнення цінового паритету з традиційними джерелами електроенергії фірми США, Німеччини та Японії розгорнули промислове виробництво економічних плівкових сонячних модулів на основі телуриду кадмію [1]. В таких екологічно чистих джерелах енергії відбувається безпосереднє перетворення сонячної енергії в електричну. Світовим лідером промислового

виробництва найбільш ефективних сонячних модулів на основі телуриду кадмію є фірма First Solar (США) [2]. У 2020 році загальна електрична потужність вироблених First Solar сонячних модулів досягла 2.4 ГВт [3]. Очікується, що протягом наступних років на світовому ринку сегмент сонячних модулів на основі тонких плівок CdTe зросте на 18.7% і досягне 8590 мільйонів доларів США в 2024 році. Комерційні перспективи інтенсифікували наукові дослідження в

галузі розвитку фізико-технічних основ промислових технологій отримання пліткових СЕ на основі CdTe які передбачають для покращення ефективності фотоелектричних процесів проведення «хлоридної» обробки базових шарів телуриду кадмію [4-8].

Останнім часом інтенсивно розвивається технологія відпалу базових шарів телуриду кадмію у фреоні [9], яка є альтернативною до технології відпалу в парах хлориду кадмію. Перевага використання фреону полягає в нетоксичності цього газу за нормальних температур. Окрім цього після такої обробки немає необхідності травлення базового шару перед формуванням тильного контакту, що є серйозними технологічними перевагами при промисловому виробництві. Цей альтернативний метод активації базових шарів телуриду кадмію було розроблено в групі Ніколи Ромео [10]. При цьому було досліджено вплив відпалу у фреоні на морфологію поверхні базових шарів телуриду кадмію та ефективність сонячних елементів. Проте для аналізу фізичних процесів, які визначають ефективність, доцільно визначити світлові діодні параметри та зіставляти їх з результатами структурних досліджень.

Мета роботи

Для подальшої оптимізації технології виготовлення сонячних елементів на основі телуриду кадмію в роботі було проведено дослідження впливу відпалу у фреоні на ступінь переважної орієнтації і період кристалічної решітки плівок телуриду кадмію, отриманих сублімацією в замкнутому об'ємі, а також на вихідні параметри і світлові діодні характеристики сонячних елементів на їх основі.

Методика експерименту

Сонячні елементи було отримано Стефаном Бухелером в групі фізики тонких плівок фізичного факультету університету Парми (Італія), яку очолює професор Нікола Ромео. При виготовленні СЕ для формування фронтальних електродів на скляні підкладки методом магнетронного розпилення на постійному струмі в атмосфері аргону і кисню осаджувалися плівкові шари ІТО товщиною 0.8 мкм із середнім коефіцієнтом пропускання 90 % у діапазоні довжин хвиль (0.4 – 0.8) мкм. Величина поверхневого опору шарів ІТО становила менше 10 Ом/□. Для зменшення дифузії індію в плівку телуриду кадмію в процесі високотемпературного формування базового шару на шари ІТО методом магнетронного розпилення на постійному струмі в атмосфері аргону і кисню осаджувалися шари нелегованого оксиду олова товщиною 0.2 мкм. Далі методом високочастотного магнетронного розпилення осаджувалися шари сульфід кадмію товщиною (0.06 – 0.1) мкм. Шари сульфід кадмію осаджувалися в атмосфері аргону з додаванням газу CHF_3 , що призводить до збільшення

ефективності сонячних елементів за рахунок легування фтором у процесі росту та пасивації поверхні границь зерна. Потім на шар сульфід кадмію здійснювалося формування базового шару телуриду кадмію шляхом сублімації в замкнутому об'ємі. Після осадження телуриду кадмію зразки гетеросистем були розділені на дві групи. На першій групі зразків було проведено дослідження морфології поверхні та кристалічної структури телуриду кадмію, після чого для обох груп зразків проводився відпал у фреоні протягом різного часу. Для цього до вакуумної камери з атмосферою аргону на рівні 100 мбар додавали фреон з парціальним тиском 20 мбар і потім здійснювали відпал приладової гетероструктури при температурі 400 °С.

Для першої групи відпалених зразків було повторно проведено структурні дослідження. Для визначення періоду кристалічної решітки (a) аналізувалися кутові положення дифракційних піків [11]. Були розраховані текстурні коефіцієнти (C_i) та визначено напрямок та ступень переважної орієнтації плівок (G) [11].

На другій частині зразків нанесенням тильного контакту Cu/Au завершувалося формування СЕ та здійснювалося вимірювання світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ). Аналітичне опрацювання світлових ВАХ проводилося за методикою, описаною в роботі [12]. При цьому визначалися вихідні параметри сонячного елемента: густини струму короткого замикання ($J_{\text{кз}}$), напруги холостого ходу ($U_{\text{хх}}$), фактор заповнення (FF) навантажувальної світлової вольт-амперної характеристики (ВАХ) і, у кінцевому підсумку, – коефіцієнта корисної дії (η). Потім визначалися світлові діодні характеристики СЕ: густина фотоструму ($J_{\text{ф}}$), густина діодного струму насичення (J_0), коефіцієнт ідеальності діода (A), послідовний електроопір ($R_{\text{п}}$) і шунтувальний електроопір ($R_{\text{ш}}$) [13]. Далі здійснювалося моделювання впливу світових діодних характеристик на ефективність сонячних елементів.

Обговорення результатів

Дослідження фазового складу плівок телуриду кадмію, які було виконано методом рентгенівської дифрактометрії, свідчать про те, що отримані плівки телуриду кадмію мали кубічну структуру цинкової обманки, про що однозначно свідчать виявлені відображення від площин (111), (220), (311), (400), (331), (422), (511), (440), (531) (рис. 1, а).

Було встановлено, що отримані шари телуриду кадмію мали незначний ступінь переважної орієнтації в напрямку [311]. При цьому коефіцієнт переважної орієнтації G становив всього 0.26 (табл. 1).

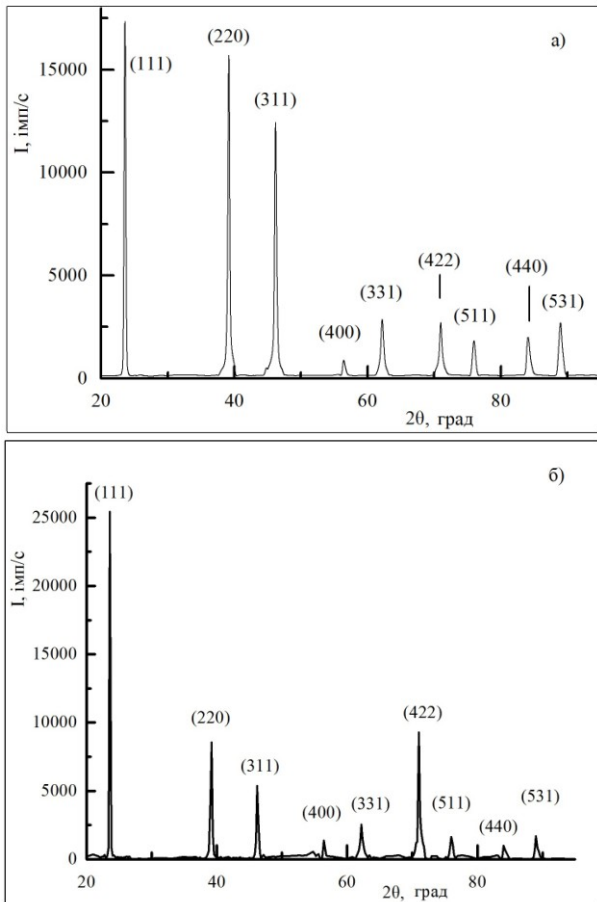


Рис. 1 – Рентгендифрактограми плівки телуриду кадмію, яку було отримано методом сублімації в замкнутому об'ємі до (а) та після відпалу у фреоні (б)

Таблиця 1 – Результати аналітичної обробки рентгендифрактограм шарів телуриду кадмію для визначення напрямку та ступеня їх переважної орієнтації

(hkl)	C_i	
	Вихідний стан	Після відпалу у фреоні протягом 30 хвилин
(111)	0.7	0.7
(220)	1.0	0.6
(311)	1.5	0.5
(400)	0.9	0.7
(331)	1.2	0.6
(422)	1.0	1.9
(511)	1.3	1.1
(440)	1.1	1.1
(531)	1.1	1.4
G	0.26	0.41

Рентгендифрактометричні дослідження показали, що відпал у фреоні призводить до зміни напрямку переважної орієнтації: плівки телуриду кадмію стають орієнтованими в напрямку [422] (див. табл. 1). Коефіцієнт переважної орієнтації плівок телуриду кадмію збільшується до 0.46. Зміна

орієнтації з напрямку [331] ($C_{331} = 1.2$) на напрямок [422] ($C_{422} = 1.9$) свідчить про міжзеренну перекристалізацію плівок у процесі відпалу у фреоні. Це підтверджується результатами дослідження морфології поверхні, які вказують на зміну зернограниць поверхні.

Необхідно зауважити, що оскільки зміна переважної орієнтації відбувається в напрямку [422], то відпал у фреоні призводить до зниження концентрації двійників і дефектів упаковки. Орієнтація в напрямку [422] свідчить про те, що відпал приводить структуру до стану, ближчого до термодинамічної рівноваги. Це припущення підтверджують результати прецизійного визначення періоду решітки базових шарів телуриду кадмію, які показали, що до відпалу період кристалічної решітки становить $a = 6.491 \text{ \AA}$, а після відпалу – $a = 6.488 \text{ \AA}$. Таким чином, відпалені у фреоні плівки телуриду кадмію відчують менші розтягуючі макродеформації, які викликаються збільшення періоду решітки порівняно з еталонним значенням.

Було проведено дослідження впливу часу відпалу у фреоні на вихідні параметри та світлові діодні характеристики СЕ, у конструкції яких використовувалися шари телуриду кадмію, вирощені методом сублімації в замкнутому об'ємі і відпалені у фреоні при температурі $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Для цього було виміряно світлові ВАХ приладових структур ІТО/SnO₂/CdS/CdTe, які піддавалися відпалу протягом 20 – 40 хвилин (рис. 2).

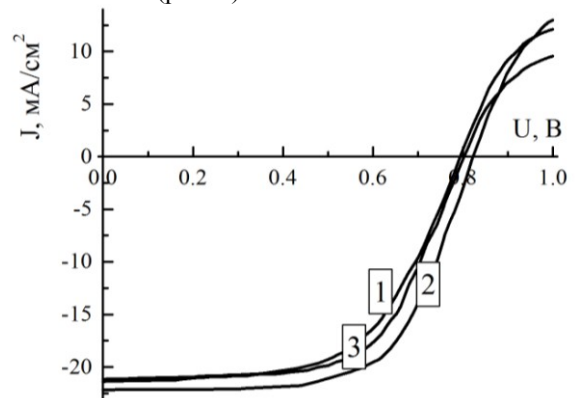


Рис. 2 – Світлові ВАХ СЕ ІТО/SnO₂/CdS/CdTe: 1 – час відпалу 20 хвилин, 2 – час відпалу 30 хвилин, 3 – час відпалу 40 хвилин

Результати аналітичної обробки світлових ВАХ типових зразків СЕ ІТО/SnO₂/CdS/CdTe представлено в таблиці 2. Аналіз даних табл. 2 показує, що максимальне значення ККД 11.7% спостерігається при 30-ти хвилинному відпалі у фреоні, що обумовлено одночасним збільшенням всіх вихідних параметрів. При збільшенні часу відпалу від 20 хвилин до 30 хвилин збільшення ефективності СЕ від 10.0% до 11.7% відбувається за рахунок збільшення густини струму короткого замикання від 21.2 mA/cm^2 до 22.3 mA/cm^2 , напруги холостого ходу від 794 мВ до 821 мВ і фактору заповнення світлової ВАХ від 0.59 до 0.64.

Таблиця 2 – Вплив часу відпалу у фреоні на вихідні параметри та світлові діодні характеристики CE ITO/SnO₂/CdS/CdTe

Вихідні параметри та світлові діодні характеристики	Час відпалу у фреоні, хвилин		
	20	30	40
$I_{КЗ}$, мА/см ²	21.2	22.3	21.5
$U_{ХХ}$, мВ	794	821	800
FF , відн. од.	0.59	0.64	0.62
ККД, %	10.0	11.7	10.7
$I_{Ф}$, мА/см ²	21.3	22.4	21.9
$R_{П}$, Ом·см ²	5.4	4.4	6.5
$R_{Ш}$, Ом·см ²	764	850	384
A , відн. од.	2.613	2.247	1.606
J_0 , А/см ²	$1.48 \cdot 10^{-7}$	$1.44 \cdot 10^{-8}$	$7.6 \cdot 10^{-11}$

Моделювання впливу світлових діодних характеристик на ККД показало, що зростання ефективності CE ITO/SnO₂/CdS/CdTe при збільшенні часу відпалу до 30 хвилин обумовлено зменшенням густини діодного струму насичення.

Аналіз даних табл. 2 також показує, що при збільшенні часу відпалу від 30 до 40 хвилин спостерігається зменшення ефективності від 11.7% до 10.7%, що обумовлено зменшенням густини струму короткого замикання від 22.3 мА/см² до 21.5 мА/см², напруги холостого ходу від 821 мВ до 800 мВ і фактору заповнення світової ВАХ з 0.64 до 0.62. Моделювання показало, що зниження ККД при збільшенні часу відпалу від 30 хвилин до 40 хвилин пов'язано зі зниженням шунтувального електроопору та зростанням густини діодного струму насичення.

Зіставлення ефективності CE, у яких базові шари було отримано методом сублімації в замкнутому об'ємі та які були піддані відпалу у фреоні і традиційній «хлоридній» обробці в газовій фазі [14], свідчать про те, що при традиційній «хлоридній» обробці в газовій фазі спостерігається більший ККД. Аналіз вихідних параметрів показав, що це обумовлено більшим значенням фактору заповнення світлової ВАХ. Моделювання світлових діодних характеристик показує, що визначальний вплив на зростання ефективності надає менше значення послідовного опору CE з базовим шаром телуриду кадмію, який було отримано сублімацією в замкнутому об'ємі, а потім піддано традиційній «хлоридній» обробці в газовій фазі. Необхідно відзначити, що відпал у фреоні дозволяє отримати менші значення густини діодного струму насичення, що свідчить про меншу швидкість рекомбінаційних процесів. Це підтверджується результатами проведених нами структурних досліджень, згідно з якими було показано, що при відпалі у фреоні відбувається міжзеренна рекристалізація базового шару про що свідчить зміна напрямку переважної орієнтації. Тому, якщо за рахунок додаткових технологічних операцій буде знижено послідовний електроопір CE, у яких базовий шар активовано

відпалом у фреоні, то ми зможемо отримати приладові структури з більшим ККД.

Було проведено дослідження впливу тривалості освітлення в режимі AM1.5 при потужності світового потоку 100 мВ/см² на ККД CE, під час виготовлення яких проводився відпал у фреоні шарів телуриду кадмію, отриманих методом сублімації в замкнутому об'ємі. Світлових вольт-амперні характеристики зразків, які були піддані обробці у фреоні та витримані різний час при освітленні приведені на рис. 3-5, а результати аналітичної обробки цих ВАХ приведені в табл. 3.

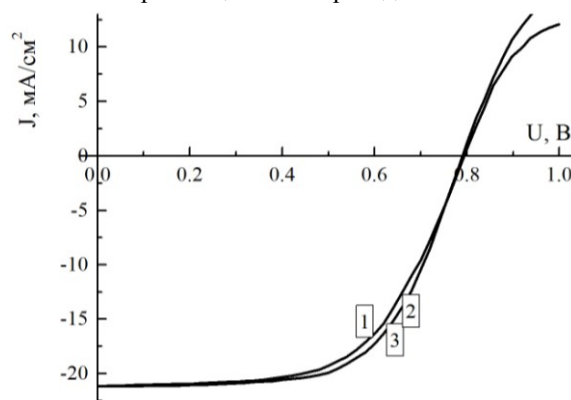


Рис. 3 – Світлові ВАХ CE SnO₂/ITO/CdS/CdTe (відпал у фреоні 20 хвилин), час витримки при освітленні: 1 – 0 хвилин, 2 – 10 хвилин, 3 – час – 20 хвилин

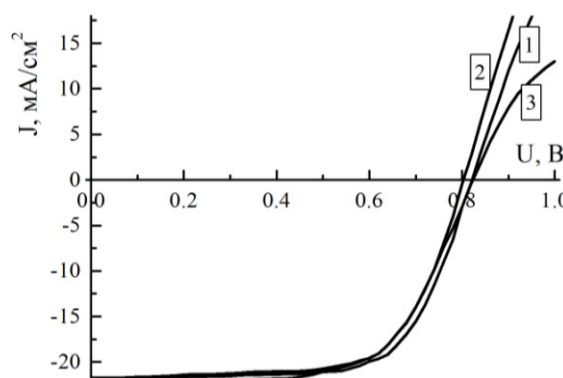


Рис. 4 – Світлові ВАХ CE ITO/SnO₂/CdS/CdTe (відпал у фреоні 30 хвилин), час витримки при освітленні: 1 – 0 хвилин, 2 – 10 хвилин, 3 – 20 хвилин

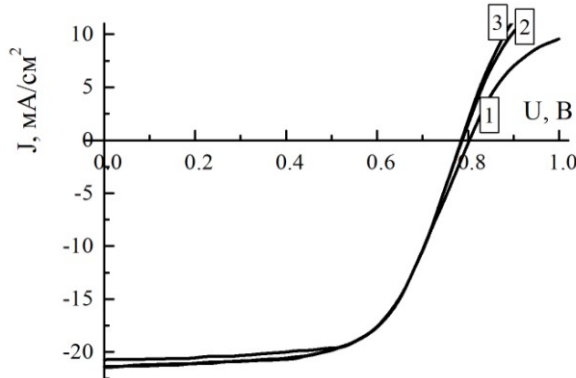


Рис. 5 – Світлові ВАХ CE ITO/SnO₂/CdS/CdTe (відпал у фреоні 40 хвилин), час витримки при освітленні: 1 – 0 хвилин, 2 – 10 хвилин, 3 – 20 хвилин

Аналіз результатів, наведених в табл. 2 і 3 показує, що для зразків СЕ ІТО/SnO₂/CdS/CdTe, у яких базові шари відпалювали у фреоні протягом 20 хвилин, витримка при освітленні в режимі АМ1,5 протягом 10 хвилин, призводить до зростання ефективності в результаті збільшення фактору заповнення ВАХ, *FF*. Моделювання впливу світлових діодних характеристик на ККД СЕ показало, що це головним чином обумовлено зниженням послідовного опору. Подальше зростання часу витримки при освітленні СЕ, у яких базові шари відпалювали протягом 20 хвилин у фреоні, від 10 хвилин до 20 хвилин не впливає на величину ККД.

Для СЕ, у яких базові шари CdTe відпалювали у фреоні протягом 30 хвилин, витримка при

освітленні в режимі АМ1.5 протягом 10 хвилин не призводить до зростання ефективності. Збільшення часу витримки приладових структур при освітленні до 20 хвилин призводить до зростання ефективності від 11.7 % до 12.2 %. Аналіз світлових діодних характеристик показав, що це головним чином обумовлено поступовим зниженням діодного струму насичення.

Для СЕ, у яких базові шари CdTe відпалювали у фреоні протягом 40 хвилин, витримка при освітленні не приводить до зміни ККД. Аналіз світлових діодних характеристик показує, що їхні зміни під дією освітлення в кінцевому підсумку компентують одне одного з точки зору впливу на ефективність СЕ.

Таблиця 3 – Вплив часу освітлення на вихідні параметри та світлові діодні характеристики СЕ ІТО/SnO₂/CdS/CdTe, які пройшли різний час відпалу у фреоні

Вихідні параметри та світлові діодні характеристики	відпал у фреоні 20 хвилин		відпал у фреоні 30 хвилин		відпал у фреоні 40 хвилин	
	час витримки при освітленні, хвилин		час витримки при освітленні, хвилин		час витримки при освітленні, хвилин	
	10	20	10	20	10	20
$I_{КЗ}$, мА/см ²	21.2	21.2	21.8	21.9	21.4	20.8
$U_{ХХ}$, мВ	788	788	803	821	784	784
<i>FF</i> , відн. од.	0.63	0.63	0.67	0.68	0.63	0.65
ККД, %	10.5	10.5	11.7	12.2	10.6	10.7
$I_{Ф}$, мА/см ²	21.3	21.3	21.9	22.0	21.6	21.1
$R_{П}$, Ом·см ²	3.8	3.8	3.1	3.66	4.2	5.2
$R_{Ш}$, Ом·см ²	900	900	566	796	515	508
<i>A</i> , відн. од.	2.603	2.603	2.007	1.868	2.157	1.581
J_0 , А/см ²	$1.55 \cdot 10^{-7}$	$1.55 \cdot 10^{-7}$	$3.5 \cdot 10^{-9}$	$7.9 \cdot 10^{-10}$	$1.43 \cdot 10^{-8}$	$8.0 \cdot 10^{-11}$

Висновки

Рентгендіфрактометричні дослідження показали, що відпал у фреоні призводить до зміни напрямку переважної орієнтації з напрямку [331] на напрямок [422], що свідчить про міжзеренну перекристалізацію плівок телуриду кадмію стабільної кубічної модифікації у процесі відпалу у фреоні. Крім того, було показано, що відпалені у фреоні плівки телуриду кадмію відчувають менші розтягуючі макродеформації про що свідчить зменшення періоду решітки після відпалу від $a = 6.491 \text{ \AA}$ до $a = 6.488 \text{ \AA}$, що є ближчим до еталонного значення.

Було встановлено, що для досліджених зразків оптимальними параметрами при відпалу у фреоні шарів телуриду кадмію, отриманих сублімацією в замкнутому об'ємі є температура 400 °С і час 30 хвилин, що дозволяє отримати сонячні елементи на їх основі з ефективністю 11.7 %. Моделювання впливу світлових діодних характеристик на ККД показало, що зростання ефективності СЕ при збільшенні часу відпалу у фреоні до 30 хвилин обумовлено зменшенням густини діодного струму насичення, а зниження ККД при збільшенні часу відпалу до 40 хвилин пов'язане зі зниженням шунтувального опору.

Було експериментально показано, що для плівок СЕ на основі CdS/CdTe, у яких базові шари телуриду кадмію відпалювали протягом 30 хвилин у фреоні, після 20 хвилин витримки при освітленні в режимі АМ1.5 відбувається зростання ефективності від 11.7 % до 12.2 %, що, згідно з результатами моделювання, обумовлено зниженням діодного струму насичення.

Список літератури

1. Bosio A., Pasini S., Romeo N. The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules. *Coatings*. 2020. V.10, № 4. P. 344-1-30. doi: 10.3390/coatings10040344.
2. Green M. A., Dunlop E. D., Levi D. H., Hohl-Ebinger J., Yoshit M., Ho-Baillie A.W. Solar cell efficiency tables (Version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2019. V. 27, № 7. P. 565–575. doi: 10.1002/pip.3171.
3. First Solar.com, Series 6 Datasheet. URL: <http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/TechnicalDocuments/Series-6-Datasheets/Series-6-Datasheet.ashx> (accessed 20 January 2020).
4. Dharmadasa I. M., Alam A. E., Ojo A. A., Echendu O. K. Scientific complications and controversies noted in the field of CdS/CdTe thin film solar cells and the way forward for further development. *Journal of Materials Science:*

- Materials in Electronics*. 2019. V. 30. P. 20330–20344. doi: 10.1007/s10854-019-02422-6.
- Zeng G., Liu X., Zhao Y., Shi Y., Li B., Zhang J., Feng L., Wang Q. Study on the stability of unpackaged CdS/CdTe Solar Cells with different structures. *International journal of photoenergy (Special Issue: Materials for Photoelectric and Electrooptical Conversion and Device Applications)*. 2019. V. 2019. P. 3579587-1-8. doi: 10.1155/2019/3579587.
 - Kartopu G., Williams B. L., Zardetto V., Gürlek A. K., Clayton A. J., Jones S., Kessels W. M. M., Creatore M., Irvine S. J. C. Enhancement of the photocurrent and efficiency of CdTe solar cells suppressing the front contact reflection using a highly-resistive ZnO buffer layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019. V. 191. P. 78-82. doi: 10.1016/j.solmat.2018.11.002.
 - Awni R. A., Li D.-B., Song Z., Bista S. S., Razoqi M. A., Grice C. R., Chen L., Liyanage G. K., Li C., Phillips A. B., Heben M. J., Ellingson R. J., Li J. V., Yan Y. Influences of buffer material and fabrication atmosphere on the electrical properties of CdTe solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2019. V. 27, № 12. P. 1115–1123. doi: 10.1002/pip.3192.
 - Niasse O. A., Diaw A., Niane M., Mbengue N., Tankhari M. A., Ba P. O. B. Comparative study of the influence of antireflective coatings and transparent oxides on a CdS/CdTe solar cell. *American Journal of Materials Science and Engineering*. 2018. V. 6, № 2. P. 43–48. doi: 10.12691/ajmse-6-2-4.
 - Romeo N., Bosio A., Menossi D., Romeo A. and Aramini M. Last progress in CdTe/CdS thin film solar cell fabrication process. *Energy Procedia*. 2014. 57. P. 65 – 72. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.009.
 - Mazzamuto S., Roca L. V., Bosio A., Romeo N., Armani N., Salvati G. A study of the CdTe treatment with a Freon gas such as CHF₂Cl. *Thin Solid Films*. 2008. V. 516, № 20. P. 7079-7083. doi: 10.1016/j.tsf.2007.12.124.
 - Moutinho H. R., Hasoon F. S., Abulfotuh F., Kazmerski K. Investigation of polycrystalline CdTe thin films deposited by physical vapor deposition, close-space sublimation, and sputtering. *Journal Vacuum Science Technology A*. 1995. V. 13, № 6. P. 2877-2883. doi: 10.1116/1.579607.
 - Хрипунов Г. С., Мериуц А. В. Аналіз діодних характеристик плівкових сонячних елементів на основі CdTe. *Український фізичний журнал*. 2004. Т. 49, № 12. С. 1188–1191.
 - Rauschenbach H. S. *Solar cell array design "The principles and technology of photovoltaic energy conversion"*. Litton Educational Publishing, New York. 1980. 350 p.
 - Bosio A., Rosa G., Romeo N. Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. *Solar Energy*. 2018. 175. P. 31–43. doi: 10.1016/j.solener.2018.01.018.
 - Applications*, 2019, V. 27, 7, pp. 565–575, doi: 10.1002/pip.3171.
 - First Solar.com, Series 6 Datasheet. Available at: <http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/TechnicalDocuments/Series-6-Datasheets/Series-6-Datasheet.ashx> (accessed 20 January 2020).
 - Dharmadasa I. M., Alam A. E., Ojo A. A., Echendu O. K. Scientific complications and controversies noted in the field of CdS/CdTe thin film solar cells and the way forward for further development. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, V. 30, pp. 20330–20344, doi: 10.1007/s10854-019-02422-6.
 - Zeng G., Liu X., Zhao Y., Shi Y., Li B., Zhang J., Feng L., Wang Q. Study on the stability of unpackaged CdS/CdTe Solar Cells with different structures. *International journal of photoenergy (Special Issue: Materials for Photoelectric and Electrooptical Conversion and Device Applications)*, 2019, V. 2019, pp. 3579587-1-8, doi: 10.1155/2019/3579587.
 - Kartopu G., Williams B. L., Zardetto V., Gürlek A. K., Clayton A. J., Jones S., Kessels W. M. M., Creatore M., Irvine S. J. C. Enhancement of the photocurrent and efficiency of CdTe solar cells suppressing the front contact reflection using a highly-resistive ZnO buffer layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, V. 191, p. 78-82, doi: 10.1016/j.solmat.2018.11.002.
 - Awni R. A., Li D.-B., Song Z., Bista S. S., Razoqi M. A., Grice C. R., Chen L., Liyanage G. K., Li C., Phillips A. B., Heben M. J., Ellingson R. J., Li J. V., Yan Y. Influences of buffer material and fabrication atmosphere on the electrical properties of CdTe solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2019, V. 27, 12, pp. 1115–1123, doi: 10.1002/pip.3192.
 - Niasse O. A., Diaw A., Niane M., Mbengue N., Tankhari M. A., Ba P. O. B. Comparative study of the influence of antireflective coatings and transparent oxides on a CdS/CdTe solar cell. *American Journal of Materials Science and Engineering*, 2018, V. 6, 2, pp. 43-48, doi: 10.12691/ajmse-6-2-4.
 - Romeo N., Bosio A., Menossi D., Romeo A. and Aramini M. Last progress in CdTe/CdS thin film solar cell fabrication process. *Energy Procedia*, 2014, 57, pp. 65-72, doi:10.1016/j.egypro.2014.10.009.
 - Mazzamuto S., Roca L. V., Bosio A., Romeo N., Armani N., Salvati G. A study of the CdTe treatment with a Freon gas such as CHF₂Cl. *Thin Solid Films*, 2008, V. 516, 20, pp. 7079-7083, doi: 10.1016/j.tsf.2007.12.124.
 - Moutinho H. R., Hasoon F. S., Abulfotuh F., Kazmerski K. Investigation of polycrystalline CdTe thin films deposited by physical vapor deposition, close-space sublimation, and sputtering. *Journal Vacuum Science Technology A*, 1995, V. 13, 6, pp. 2877-2883, doi: 10.1116/1.579607.
 - Khrypunov G. S., Meriuts A. V. Analysis of diode characteristics of film solar cells based on CdTe. *Ukrainian Physical Journal*, 2004, V. 49, 12, pp. 1188-1191.
 - Rauschenbach H. S. *Solar cell array design "The principles and technology of photovoltaic energy conversion"*. Litton Educational Publishing, New York, 1980. 350 p.
 - Bosio A., Rosa G., Romeo N. Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. *Solar Energy*, 2018, 175, pp. 31–43, doi: 10.1016/j.solener.2018.01.018.

References (transliterated)

- Bosio A., Pasini S., Romeo N. The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules. *Coatings*, 2020, V. 10, 4, pp. 344-1-30, doi: 10.3390/coatings10040344.
- Green M. A., Dunlop E. D., Levi D. H., Hohl-Ebinger J., Yoshit M., Ho-Baillie A.W. Solar cell efficiency tables (Version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and*

Відомості про авторів (About authors)

Хрипунов Максим Геннадійович – аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5498-1831>; e-mail: lauman@ukr.net

Khrypunov Maxim – PhD student, Department of Micro- and Nanoelectronics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5498-1831>; e-mail: lauman@ukr.net

Хрипунов Геннадій Семенович – доктор технічних наук, професор, проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: khrip@ukr.net

Khrypunov Gennadiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: khrip@ukr.net

Доброжан Андрій Ігорович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри природничих наук Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8830-0942>. e-mail: dobr.abs@gmail.com

Dobrozhan Andrii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer, Department of Natural Sciences, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8830-0942>; e-mail: dobr.abs@gmail.com

Шелест Тетяна Миколаївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-6189>; e-mail: tshelest@ukr.net

Shelest Tetiana – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Physics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-6189>; e-mail: tshelest@ukr.net

Кривоніс Світлана Станіславівна – старший викладач кафедри фізики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1938-293X>; e-mail: svkriwonos@gmail.com

Kryvonis Svitlana – Senior Lecturer, Department of Physics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1938-293X>; e-mail: svkriwonos@gmail.com

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Хрипунов М. Г., Хрипунов Г. С., Доброжан А. І., Шелест Т. М., Кривоніс С. С. Метод активації плівок телуриду кадмію для формування ефективних сонячних елементів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 1(11). С. 23-29. doi:10.20998/2413-4295.2022.01.04.

Please cite this article as:

Khrypunov M., Khrypunov G., Dobrozhan A., Shelest T., Kryvonis S. Activation method of cadmium telluride thin films for creation effective solar cells. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 1(11), pp. 23-29, doi:10.20998/2413-4295.2022.01.04.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Хрипунов М. Г., Хрипунов Г. С., Доброжан А. И., Шелест Т. Н., Кривонис С. С. Метод активации пленок теллурида кадмия для создания эффективных солнечных элементов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2022. № 1 (11). С. 23-29. doi:10.20998/2413-4295.2022.01.04.

АННОТАЦІЯ Исследовалось влияние отжига во фреоне на кристаллическую структуру пленок теллурида кадмия, полученных сублимацией в замкнутом объеме, а также выходные параметры и световые диодные характеристики солнечных элементов, изготовленных на основе этих пленок. Отжиг приборных структур проводился при температуре 400 °С в течение разного времени. Исследования кристаллической структуры проводились методом рентгенодифрактометрического анализа. Эти исследования показали, что отжиг во фреоне приводит к перекристаллизации пленок теллурида кадмия, что уменьшает микронапряжение, о чем свидетельствует уменьшение периода решетки после отжига от $a = 6.491 \text{ \AA}$ до $a = 6.488 \text{ \AA}$. Проведено исследование влияния отжига во фреоне на выходные параметры и световые диодные характеристики солнечных элементов. Для этого были исследованы световые вольт-амперные характеристики приборных структур $\text{ITO/SnO}_2/\text{CdS/CdTe}$, подвергавшихся отжигу в течение 20-40 минут. Установлено, что оптимальное время отжига во фреоне составляло 30 минут. Показано, что в результате отжига во фреоне в течение 30 минут солнечные элементы на основе таких пленок имеют наибольшую эффективность 11.7%. Моделирование влияния световых диодных характеристик на коэффициент полезного действия показало, что рост эффективности солнечных элементов при увеличении времени отжига во фреоне до 30 минут обусловлен уменьшением плотности диодного тока насыщения. Снижение коэффициента полезного действия при дальнейшем увеличении времени отжига до 40 минут связано с понижением шунтирующего сопротивления. Также показано, что выдержка солнечных элементов при освещении в течение 20 минут в режиме AM1.5 приводит к дополнительному увеличению их эффективности до 12.2%. Согласно результатам моделирования, такое повышение обусловлено также снижением плотности диодного тока насыщения.

Ключевые слова: солнечные элементы; теллурид кадмия; отжиг во фреоне; кристаллическая структура; эффективность

Надійшла (received) 20.02.2022