

Г.С. Хрипунов

Плівкові сонячні елементи NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Фрунзе 21, 61002, Харків, Україна, E-mail: khrup@ukr.net

Проведені комплексні дослідження впливу шарів, що сполучаються, на ефективність і вихідні параметри плівкових сонячних елементів NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au. Експериментально було показано, що максимальна ефективність сонячних елементів 7,8% спостерігається при товщині шару сульфиду кадмію 0,6 мкм, товщині шару хлориду натрію 0,2 мкм і товщині шару хлориду кадмію 0,07 мкм. Уперше виявлено позитивний вплив сонячного опромінення на ефективність сонячних елементів на основі телуриду кадмію, який приводить до збільшення ефективності досліджуваних лабораторних зразків до 8,9%.

Ключові слова: плівкові сонячні елементи, світлові вольт-амперні характеристики, ефективність, вихідні параметри.

Стаття постуила до редакції 19.09.2004; прийнята до друку 24.11.2004.

Вступ

Загальновідомо, що перспективні для широкомасштабного наземного використання високоефективні плівкові сонячні елементи (СЕ) на основі CdS/CdTe виготовляються в «superstrate» конфігурації [1]. Традиційно при реалізації цієї конфігурації СЕ формується при температурах понад 400°C на скляній підкладці через яку здійснюється його освітлення [1]. Ефективність «substrate» СЕ на основі CdS/CdTe, при виготовленні яких приладова структура формується на непрозорій металевій підкладці, а освітлення здійснюється з фронтальної сторони СЕ, істотно нижча [2]. Це обумовлено перевагою «superstrate» конфігурації для більш ефективного проведення «хлоридної» обробки сформованого СЕ [3]. Така обробка є обов'язковою технологічною операцією при створенні високоефективних плівкових СЕ на основі CdS/CdTe оскільки вона призводить до зростання ефективності в кілька разів [4,5].

Останнім часом почали розроблятися гнучкі СЕ на основі CdS/CdTe. Це обумовлено тим, що гнучкі СЕ мають рекордно високу потужність на одиницю ваги – більш 2 кВт/кг [6]. Такі характеристики досягаються тим, що в конструкції гнучких СЕ на основі CdS/CdTe скляна підкладка заміняється на поліамідну плівку. Для реалізації СЕ у «superstrate» конструкції поліамідна плівка повинна мати високу прозорість і термічну стабільність при високих температурах подальшого формування приладової структури. Тому що для прозорих плівок органічних сполук важко одержати термічну стабільність при

температурах понад 400 °С, то для гнучких сонячних елементів більш технологічною та економічною є «substrate» конфігурація. Кілька років тому у [7] вперше були виготовлені «substrate» гнучкі сонячні елементи NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au з ефективністю 7,2%. При реалізації цієї конструкції спочатку приладова структура формується в «superstrate» конфігурації на скляній підкладці з прошарком хлориду натрію (рис. 1а). Після проведення «хлоридної» обробки на поверхні СЕ формується гнучка підкладка (рис. 1б). Шляхом розчинення шару хлориду натрію водою приладова структура СЕ відокремлюється від скляної підкладки і здобуває «substrate» конфігурацію (рис. 1в). Для такого конструктивно-технологічного рішення «хлоридна» обробка проводиться в оптимальних умовах, а в конструкції СЕ з'являється можливість використовувати металеву фольгу або звичайну поліамідну плівку, яка не володіє високою термічною стабільністю та не повинна мати високу прозорість.

З огляду на вище викладене, комплексні дослідження впливу шарів, що сполучаються, на вихідні характеристики та коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) плівкових сонячних елементів NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au становлять значний інтерес для розробки технології одержання економічних і високоефективних гнучких сонячних елементів.

I. Експеримент

Для одержання лабораторних зразків СЕ NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au на скляній підкладці

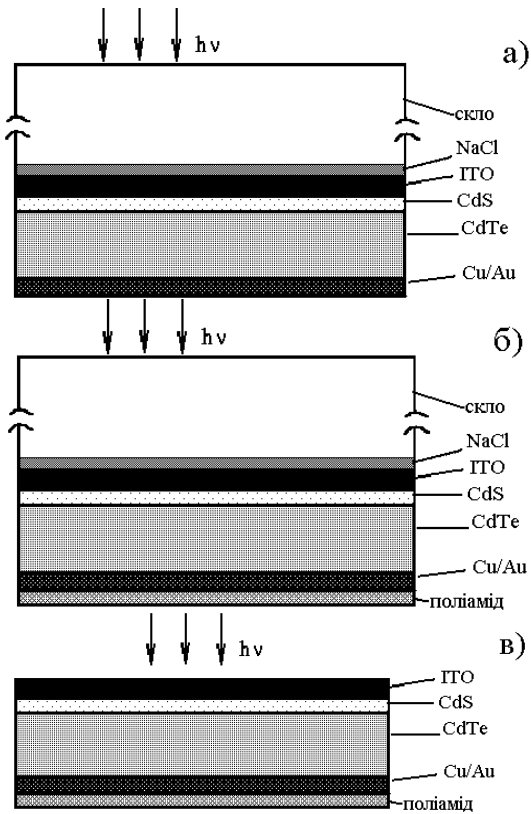


Рис. 1. Конструктивне рішення "substrate" гнучкого СЕ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au.

методом термічного випарування осаджувалися прошарки NaCl товщиною (0,2-0,6) мкм. Нижня межа товщини прошарку NaCl представляє собою мінімально можливу товщину, при якій удавалося відтворено відокремлювати виготовлену приладову структуру СЕ від скляної підкладки. На скло з прошарком NaCl методом неактивного високочастотного магнетронного розпилення осаджувалися прозорі та електропровідні шари ITO (оксиди індію та олова). На шари ITO термічним випаруванням осаджувалися плівки CdS при тиску 10^{-6} мм.рт.ст. і температурі підкладки 200°C . Потім без порушення вакууму при температурі підкладки 300°C осаджувалися плівки CdTe, з оптимальною для використання в конструкції ефективних СЕ товщиною – 4 мкм [8]. Отримані гетеросистеми NaCl/ITO/CdS/CdTe піддавалися «хлоридній» обробці. Для цього на шари CdTe без нагрівання підкладки термічним випаруванням наносилися плівки CdCl_2 . Потім гетеросистеми NaCl/ITO/CdS/CdTe/ CdCl_2 піддавалися відпалу на повітрі в закритому об'ємі при температурі 430°C протягом 25 хвилин. Після травлення відпалених структур у розчині бром метанолу на поверхні CdTe формувалися двошарові електричні контакти Cu-Au.

Вимірювання світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ) отриманих СЕ NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au здійснювалося в режимі освітлення AM1.5 при потужності світлового потоку $P_{\text{и}}=100$ мВт/см². По експериментальним світлових ВАХ визначалися вихідні характеристики СЕ:

густина струму короткого замикання ($J_{\text{кз}}$), напруга холостого ходу ($U_{\text{хх}}$), фактор заповнення (FF) світлової ВАХ і, в остаточному підсумку, - коефіцієнт корисної дії (η):

$$\eta = (J_{\text{кз}} * U_{\text{хх}} * \text{FF}) / P_{\text{и}}, \quad (1)$$

II. Результати та обговорення

Були проведені вимірювання світлових ВАХ СЕ NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au (див, наприклад, рис. 2а). виготовлених при варіюванні товщини шару CdCl_2 . Товщина шару CdS і NaCl були незмінними і складала 0,6 мкм і 0,4 мкм відповідно. Було показано, що зростання товщини шару CdCl_2 до 0,07 мкм приводить до збільшення ефективності СЕ в

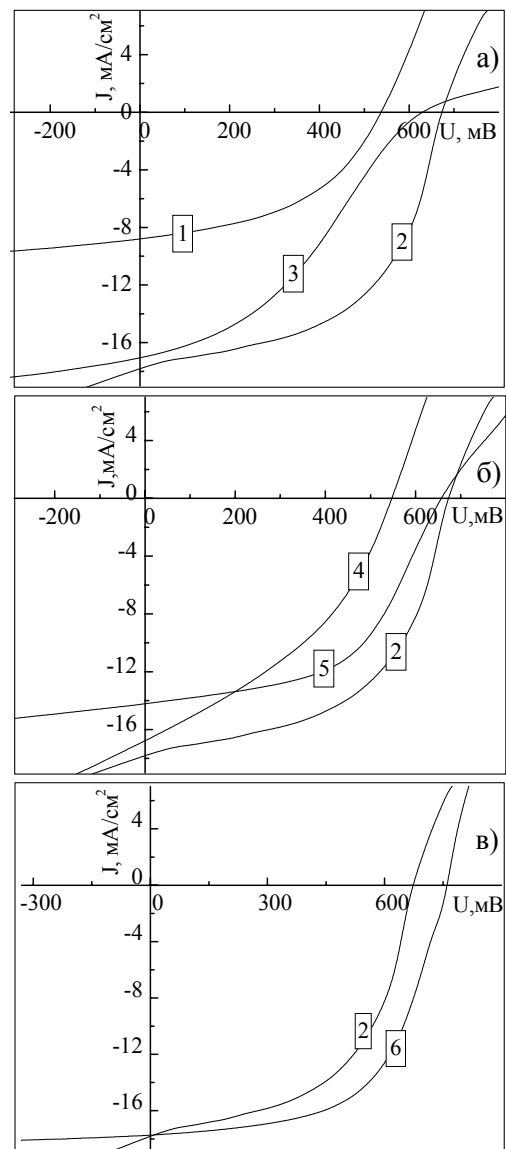


Рис. 2. Вплив сполучених шарів на світлові ВАХ СЕ NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au:

- а) 1- $d_{\text{CdCl}_2}=0,02$ мкм, 2- $d_{\text{CdCl}_2}=0,07$ мкм, 3- $d_{\text{CdCl}_2}=0,12$ мкм;
- б) 4- $d_{\text{CdS}}=0,4$ мкм, 2- $d_{\text{CdS}}=0,6$ мкм, 5- $d_{\text{CdS}}=0,7$ мкм;
- в) 2- $d_{\text{NaCl}}=0,4$ мкм, 6- $d_{\text{NaCl}}=0,2$ мкм.

першу чергу за рахунок збільшенням $J_{кз}$ (зразки 1,2 у таблиці 1). Згідно з [7], у результаті «хлоридної» обробки відбувається зниження питомого електроопору базових шарів CdTe у результаті генерації акцепторів $Cl_{Te} - V_{Cd}$, що і призводить до зростання $J_{кз}$, яке спостерігається експериментально. Подальше збільшення товщини шару $CdCl_2$ призводить до зниження ефективності СЕ, що в першу чергу обумовлено зменшенням FF (зразки 2,3 у таблиці 1). Згідно з [8], надлишкова товщина $CdCl_2$ при проведенні “хлоридної” обробки СЕ на основі CdTe приводить до зниження адгезії на границі

Таблиця 1
Вихідні характеристики СЕ
NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au

Зразок	1	2	3	4	5	6
d_{CdCl_2} , мкм	0,02	0,07	0,12	0,07	0,07	0,07
d_{CdS} , мкм	0,6	0,6	0,6	0,4	0,7	0,6
d_{NaCl} , мкм	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2
U_{xx} , мВ	536	678	633	546	659	751
$J_{кз}$, mA/cm^2	8,8	17,8	17,0	16,8	14,2	17,7
FF	0,465	0,526	0,362	0,384	0,530	0,589
η , %	2,2	6,4	3,9	3,5	5,0	7,8

CdS/CdTe, що, напевно, і знижує FF.

При оптимальній товщині шару $CdCl_2$ 0,07 мкм і незмінній товщині прошарку NaCl натрію 0,4 мкм шляхом обробки експериментальних світлових ВАХ (див., наприклад, рис. 2.б) були проведені дослідження впливу товщини шару CdS на вихідні параметри СЕ. Було ідентифіковано, що оптимальна товщина CdS складає 0,6 мкм. Зниження товщини шару CdS від 0,6 мкм (зразки 2, 4 у таблиці 1) призводить до зниження к.к.д. за рахунок зниження U_{xx} і FF. Згідно з [3], зниження товщини шару CdS за інших рівних умов призводить до погіршення електричних властивостей бар'єра, що сепарує генеровані під дією світла нерівноважні носії заряду. На наш погляд це і викликає експериментально спостережене зменшення U_{xx} і FF. Зростання товщини плівки CdS понад 0,6 мкм приводить до зменшення ефективності, в основному, за рахунок зниження $J_{кз}$ (зразки 2,5 у таблиці 1). Цілком очевидно, що зниження $J_{кз}$ обумовлено зменшенням коефіцієнта пропускання шарів CdS при збільшенні їх товщини, що приводить до зменшення щільності потоку фотонів які надходять у базовий шар CdTe. Зниження кількості генерованих під дією фотонів викликає експериментально спостережене зниження $J_{кз}$.

При оптимальних товщинах шарів $CdCl_2$ і CdS хлориду кадмію і сульфід кадмію зниження товщини шару NaCl до мінімально технологічно припустимої для формування гнучкого СЕ величини 0,2 мкм дозволило збільшити ефективність до $\eta=7,8\%$, що обумовлено збільшенням U_{xx} і FF (зразки 2, 6 у таблиці 1). Очевидно, що це відбувається в

результаті зменшення негативного впливу на ефективність фотоелектричних процесів атомів натрію та хлору, що дифундують у базовий шар. Негативний вплив натрію і хлору може бути пов'язаний з шунтуванням р-n переходу у наслідок зернограничної дифузії цих елементів при високотемпературному виготовленні приладової структури.

З метою підвищення к.к.д. СЕ NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au піддавалися впливу сонячного опромінення. Збільшення часу освітленості до 200 хвилин дозволило підвищити к.к.д. лабораторних зразків СЕ від $\eta=7,8\%$ до $\eta=8,9\%$ (таблиця 2), що обумовлено збільшенням

Таблиця 2
Вплив сонячного освітлення на вихідні
характеристики СЕ NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au

Час освітлення, хв.	0	2	6	15	30	60	100	200
U_{xx} , мВ	751	736	736	739	745	751	753	751
$J_{кз}$, mA/cm^2	17,7	17,7	17,7	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8
FF,	0,589	0,608	0,621	0,637	0,650	0,653	0,658	0,663
η , %	7,8	7,9	8,1	8,4	8,6	8,7	8,8	8,9

FF. З нашої точки зору цей ефект пов'язаний з заповненням рекомбінаційних центрів, які утворені атомами натрію та хлору, генерованими під дією світла нерівноважними носіями заряду.

Висновки

Визначені товщини шарів сульфід кадмію, хлориду кадмію і хлориду натрію, при яких експериментально спостерігаються максимальні значення ефективності плівкових сонячних елементів NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Pu – 7,8 %. Експериментально показано, що зменшення товщини шару хлориду кадмію від оптимального значення 0,07 мкм викликає зниження густини струму короткого замикання, а збільшення – призводить до зниження фактора заповнення світлової ВАХ. Зниження товщини шару сульфід кадмію від 0,6 мкм викликає зменшення напруги холостого ходу і фактора заповнення світлової ВАХ, а зростання викликає зменшення щільності струму короткого замикання. Мінімізація товщини шару хлориду натрію приводить до росту ефективності за рахунок збільшення напруги холостого ходу і фактора заповнення світлової ВАХ.

Уперше для сонячних елементів на основі телуриду кадмію експериментально виявлений позитивний вплив на к.к.д. сонячного опромінення, що дозволило підвищити ефективність досліджуваних СЕ NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au до 8,9%.

Хрипунов Г.С. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, докторант кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики.

- [1] B.E. McCandless, *Proceeding Mat. Res. Soc. Symp*, 16-20 April, San Francisco (USA), H1.6.1 (2001).
- [2] A. Romeo , D.L. Batzner , H. Zogg, A.N. Tiwari, *Pros. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Glasgow, 843 (2000).
- [3] K. Gurose, P.R. Edvards, D.P. Halliday, *Journal of Crystal Growth*, **197**, 733 (1999).
- [4] Bonnet D., Meyers P. Cadmium telluride –materials for thin film solar cells, // *J. Mater. Res.*, **13**(10), 2740 (1999).
- [5] A.N. Tiwari, M Krejci, F.J. Haug, H. Zogg, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **7**, 393 (1999).
- [6] A.Romeo, M. Arnold, D.L. Batzner, H. Zogg, A.N. Tiwari, *Proc. Conf. “ PV in Europe from PV Technology to Energy Solutions”*. Rome, 377 (2002).
- [7] V.Valdna , J. Hiie, *Pros. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Munich, 1233 (2001).
- [8] X. Wu, J.C. Keame, R.G. Dhere, *Proceeding 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Munich, 995 (2002).

G.S. Khrypunov

Thin Film Solar Cells NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au

National Technical University "Kharkov polytechnical institute"
Frunze St. 21, 61002, Kharkov, Ukraine, E-mail: khrip@ukr.net

The complex researches of connected layers influence on the efficiency and initial characteristics of the NaCl/ITO/CdS/CdTe/Cu/Au thin film solar cells was carried out. Experimentally was shown, that the peak efficiency 7.8 % of solar cells is observed at the thickness of CdS layer 0.6 microns, thickness of CdCl₂ layer 0.07 microns, thickness of NaCl layers 0.2 microns. The first time positive influence of the solar irradiation on the CdTe solar cells efficiency was founded. After 200 minutes of the solar irradiation the efficiency increased up to 8.9%.