

УДК 621.315.59

Вплив шарів CdS та CdCl₂ на параметри гнучких сонячних елементів ITO/CdS/CdTe/Cu/Au

Сусла Д.О., к.т.н., доц. Цибульський Л.Ю.

Вступ

В даний час в космічних і наземних умовах для електропостачання широко використовуються сонячні елементи (СЕ) на основі монокристалічного кремнію. До основних техніко-економічних показників таких сонячних елементів, поряд з коефіцієнтом корисної дії, собівартістю вироблюваної ними електроенергії і ступенем стійкості вихідних характеристик до впливу сонячного випромінювання, відноситься питома потужність. Під питоною потужністю розуміють потужність, що виробляється сонячним елементом на одиницю його ваги (кВт/кг). Відомо [1], що якщо собівартість електроенергії, що виробляється сонячними елементами, буде не вище 1 \$ за 1 Ватт·пік (1 Вт при інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м²), то фотоелектрика буде конкурентоспроможною по відношенню до електроенергії, що виробляється тепловими електростанціями. На сьогодні мінімально можлива ціна 1 Ватт·пік кремнієвих монокристалічних сонячних елементів складає не менше 2 \$, а для плівкових сонячних

елементів на основі телуриду кадмію – 0,5 \$ [1]. Дослідження показали [2], що найбільшу стійкість к.к.д. до радіаційного впливу космічних умов мають тонкоплівкові сонячні елементи на основі телуриду кадмію (CdTe). Традиційно високоефективні тонкоплівкові сонячні елементи на основі CdTe виготовляються на скляних підкладках вакуумними методами при температурах не менше 400° С (наприклад [3]). Такі сонячні елементи, незважаючи на економічність і радіаційну стійкість істотно поступаються СЕ на основі монокристалів кремнію за питоною потужністю. В даний час виробляють прозорі поліамідні плівки, що володіють термостабільністю до 450° С. Це принципово дозволяє формувати ефективні гнучкі сонячні елементи на основі телуриду кадмію. Такі гнучкі сонячні елементи теоретично здатні володіти високою питоною потужністю за рахунок істотного зниження їх ваги при заміні скляної підкладки на поліамідну плівку. Таким чином, порівняльні експериментальні дослідження ефективності, вихідних параметрів і наведеної потужності тонкоплівкових сонячних елементів на основі CdTe виготовлених на скляних

підкладках і поліамідних плівках є актуальними.

Методика отримання і дослідження зразків

Для отримання лабораторних зразків СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* спочатку на поліамідні плівки і скляні підкладки методом нереактивного високочастотного магнетронного розпорошення осаджуються шари *ITO*. При розпорошенні використовується мішень представляє собою механічно спресовану суміш порошоків In_2O_3 (90 мас.%) і SnO_2 (10 мас.%) напівпровідникової чистоти. Початковий парціальний тиск залишкової атмосфери 10^{-4} Па. Формування шару *ITO* товщиною (0,4 – 0,5) мкм здійснюється в аргоно-кисневій суміші при тиску $6 \cdot 10^{-1}$ Па. Концентрація кисню в складі газової суміші підтримується на рівні 3 об.%. Питома потужність магнетрона становить 1500 Вт/см^2 . Температура підкладки – 400°C . Ці режими магнетронного розпилення були ідентифіковані нами для осадження шарів *ITO* з оптимальними оптико-електричними властивостями на скляних підкладках і поліамідних плівках.

На шари *ITO* термічним випаровуванням осаджуються плівки *CdS* при тиску 10^{-4} Па і температурі підкладки 300°C . Потім без порушення вакууму при температурі підкладки 400°C осаджуються плівки *CdTe*. Отримані гетеро системи *ITO/CdS/CdTe* піддаються «хлоридній» обробці [4]. Для цього на шари *CdTe* без нагріву підкладки

термічним випаровуванням при тиску 10^{-4} Па наноситься плівки *CdCl_2*. Отримані гетеросистеми *ITO/CdS/CdTe/CdCl_2* піддаються відпалу на повітрі в закритому об'ємі при температурі 430°C протягом 25 хвилин. Після травлення відпалених гетеросистем в розчині бром метанолу на їх поверхні термічним випаровуванням наносяться двошарові електричні контакти *Cu-Au* і проводиться відпал сформованих СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* на повітрі при температурі 200°C протягом 30 хвилин.

Вимірювання світлових вольт-амперних характеристик СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* здійснюється в режимі стандартних спектральних умов освітлення АМ1.5. За експериментальними світловими вольт-амперними характеристиками визначаються вихідні параметри сонячних елементів: щільність струму короткого замикання ($J_{кз}$), напруга холостого ходу ($U_{хх}$), фактор заповнення (FF) навантажувальної світлової вольт-амперної характеристики (ВАХ) і коефіцієнт корисної дії (η) [5]:

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

де $P_{и} = 100 \text{ мВт/см}^2$ – потужність падаючого сонячного випромінювання

Результати і їх обговорення

СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* на поліамідних плівках були в 56 разів легше за такі ж СЕ на скляних підкладках. Для встановлення найбільш оптимальних конструктивно-технологічних рішень

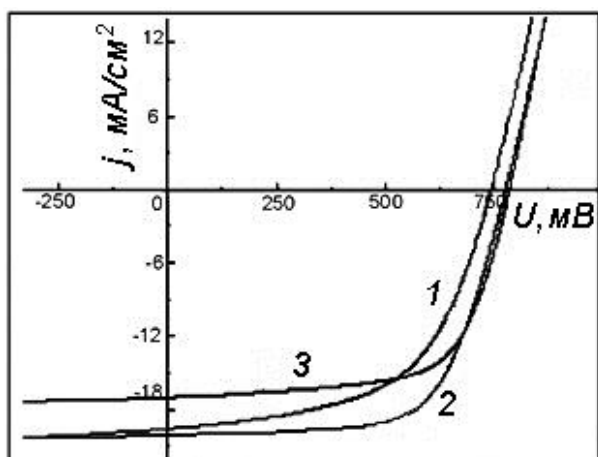
вивчено вплив товщини плівок сульфідів кадмію і товщини плівок хлориду кадмію. Згідно з літературними даними [6], для тонкопліткових СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au*, в яких осадження базового шару здійснюється вакуумним випаровуванням, оптимальна товщина *CdTe* становить 4 мкм. Тому при формуванні СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* товщина плівок телуриду кадмію також вибиралась 4 мкм.

На рис 1 та рис.2 порівняно результати виміру світлових вольт-амперні характеристик СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* на скляних підкладках і поліамідних плівках.

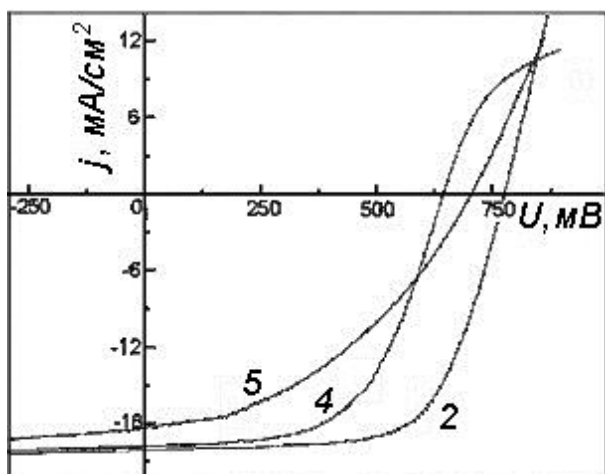
Видно, що на скляних підкладках при товщині шару сульфідів кадмію 0,40 мкм і товщині шару хлориду кадмію 0,35 мкм спостерігається максимальна ефективність СЕ – 10,3%. При цьому спостерігається напруга холостого ходу $U_{xx} = 774$ мВ, щільність струму короткого замикання $J_{кз} = 20,1$ мА/см², фактор заповнення світлової вольт-амперної характеристики $FF = 0,660$ (рис. 1а, крива 2). Зниження товщини шару сульфідів кадмію від 0,40 мкм приводить до зниження ефективності СЕ, в основному, за рахунок зменшення фактора заповнення світлової вольт-амперної характеристики. Так, наприклад, зменшення товщини шару *CdS* від 0,40 мкм до 0,20 мкм, при незмінній товщині шару хлориду кадмію 0,35 мкм, приводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 10,3\%$ до $\eta = 8,2\%$. При цьому фактор заповнення

світлової вольт-амперної характеристики зменшується від $FF = 0,660$ до $FF = 0,558$ (рис. 1а, криві 1,2). Збільшення товщини шару сульфідів кадмію понад 0,40 мкм приводить до зниження ефективності за рахунок зменшення щільності струму короткого замикання. Так, наприклад, збільшення товщини шару *CdS* від 0,40 мкм до 0,60 мкм, при незмінній товщині хлориду кадмію 0,35 мкм, приводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 10,3\%$ до $\eta = 8,8\%$. При цьому щільність струму короткого замикання зменшується від $J_{кз} = 20,1$ мА/см² до $J_{кз} = 17,0$ мА/см² (рис. 1а, криві 1, 3).

Зниження товщини шару хлориду кадмію при проведенні "хлоридної" обробки СЕ *ITO/CdS/CdTe/Cu/Au* (рис. 1б), які були сформовані на скляних підкладках, від 0,35 мкм приводить до зниження ефективності за рахунок зменшення напруги холостого ходу і фактора заповнення світлової вольт-амперної характеристики. Так, наприклад, зменшення товщини шару *CdCl₂* від 0,35 мкм до 0,06 мкм, при незмінній товщині шару сульфідів кадмію 0,40 мкм, приводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 10,3\%$ до $\eta = 7,4\%$.



а)



б)

Рис. 1. Світлові ВАХ СЕ ІТО/CdS/CdTe/ Cu/Au на скляних підкладках:

а) вплив товщини шару CdS ($d_{CdCl_2} = 0,35$ мкм): 1 – $d_{CdS} = 0,20$ мкм: $U_{xx} = 749$ мВ, $J_{кз} = 19,7$ мА/см², $FF = 0,558$, $\eta = 8,2\%$;

2 – $d_{CdS} = 0,40$ мкм: $U_{xx} = 774$ мВ, $J_{кз} = 20,1$ мА/см², $FF = 0,660$, $\eta = 10,3\%$; 3 – $d_{CdS} = 0,60$ мкм: $U_{xx} = 783$ мВ, $J_{кз} = 17,0$ мА/см², $FF = 0,660$, $\eta = 8,8\%$.

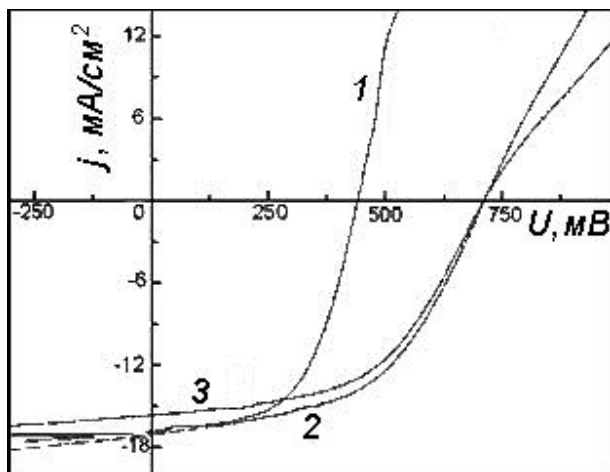
б) вплив товщини шару CdCl₂

($d_{CdS} = 0,40$ мкм): 4 – $d_{CdCl_2} = 0,06$ мкм: $U_{xx} = 640$ мВ, $J_{кз} = 19,8$ мА/см², $FF = 0,583$, $\eta = 7,4\%$; 2 – $d_{CdCl_2} = 0,35$ мкм: $U_{xx} = 774$ мВ, $J_{кз} = 20,1$ мА/см², $FF = 0,660$, $\eta = 10,3\%$; 5 – $d_{CdCl_2} = 1,20$ мкм: $U_{xx} = 713$ мВ, $J_{кз} = 18,3$ мА/см², $FF = 0,410$, $\eta = 5,4\%$.

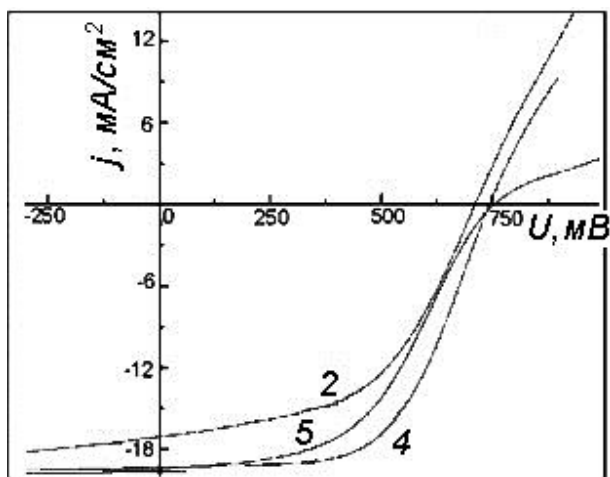
При цьому напруга холостого ходу зменшується від $U_{xx} = 774$ мВ до $U_{xx} = 640$ мВ, фактор заповнення – від $FF = 0,660$ до $FF = 0,568$, (рис. 1б, крива 2, 4). Зростання товщини шару хлориду кадмію понад 0,35 мкм приводить до зниження ефективності, в основному, за рахунок зменшення фактора заповнення. Так, збільшення товщини шару CdCl₂ від 0,35 мкм до 1,2 мкм, при незмінній товщині шару сульфід кадмію 0,35 мкм, призводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 10,3\%$ до $\eta = 5,4\%$. При цьому фактор заповнення світлової вольт-амперної характеристики зменшується від $FF = 0,660$ до $FF = 0,410$ (рис. 1б, криві 2, 5).

Варіювання товщини плівок сульфід кадмію і хлориду кадмію при виготовленні СЕ на поліамідних плівках показало, що при товщині шару сульфід кадмію 0,55 мкм і товщині шару хлориду кадмію 0,11 мкм спостерігається максимальна ефективність – 8,5%. При цьому напруга холостого ходу $U_{xx} = 746$ мВ, щільність струму короткого замикання $J_{кз} = 19,3$ мА/см², фактор заповнення світлової вольт-амперної характеристики $FF = 0,591$ (рис. 2б, крива 4). Питома потужність такого

гнучкого СЕ становить 1,9 кВт/кг. Зіставлення максимально досягнутих питомих потужностей СЕ, сформованих на поліамідній плівці і скляній підкладці, свідчить про те, що наведена потужність гнучкого сонячного елемента вище в 47 разів.



а)



б)

Рис. 2. Світлові ВАХ СЕ ITO/CdS/CdTe/ Cu/Au на поліамідних плівках:

а) вплив товщини шару CdS ($d_{CdCl_2} = 0,08$ мкм): 1 – $d_{CdS} = 0,30$ мкм: $U_{xx} = 440$ мВ, $J_{кз} = 16,9$ мА/см², FF=0,568, $\eta =$

4,2%; 2 – $d_{CdS} = 0,55$ мкм: $U_{xx} = 712$ мВ, $J_{кз} = 17,1$ мА/см², FF = 0,514, $\eta = 6,3$ %; 3 – $d_{CdS} = 0,70$ мкм: $U_{xx} = 711$ мВ, $J_{кз} = 15,7$ мА/см², FF = 0,490, $h = 5,8$ %.

б) вплив товщини шару CdCl₂ ($d_{CdS} = 0,55$ мкм): 2 – $d_{CdCl_2} = 0,08$ мкм: $U_{xx} = 712$ мВ, $J_{кз} = 17,1$ мА/см², FF = 0,514, $\eta = 6,3$ %; 4 – $d_{CdCl_2} = 0,11$ мкм: $U_{xx} = 746$ мВ, $J_{кз} = 19,3$ мА/см², FF = 0,591, $h = 8,5$ %; 5 – $d_{CdCl_2} = 0,16$ мкм: $U_{xx} = 756$ мВ, $J_{кз} = 19,4$ мА/см², FF = 0,490, $\eta = 7,2$ %.

Зниження товщини шару сульфиду кадмію від 0,55 мкм, при виготовленні СЕ на поліамідних плівках, призводить до зниження ефективності за рахунок зменшення напруги холостого ходу. Так, зменшення товщини шару CdS від 0,55 мкм до 0,30 мкм, при незмінній товщині хлориду кадмію 0,08 мкм, призводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 6,3\%$ до $\eta = 4,2\%$.

При цьому напруга холостого ходу зменшується від $U_{xx} = 712$ мВ до $U_{xx} = 440$ мВ (рис. 2а, криві 1, 2). Збільшення товщини шару сульфиду кадмію в гнучких сонячних елементах на основі CdTe понад оптимального значення, як і для СЕ сформованих на скляних підкладках, призводить до зниження ефективності за рахунок зменшення щільності струму короткого замикання. Так, наприклад, збільшення товщини шару CdS від 0,55 мкм до 0,70 мкм, при незмінній товщині хлориду кадмію 0,08 мкм, призводить до зниження ефективності гнучкого СЕ від $\eta = 6,3\%$ до $\eta =$

5,6%. При цьому щільність струму короткого замикання зменшується від $J_{кз} = 17,1 \text{ мА/см}^2$ до $J_{кз} = 14,7 \text{ мА/см}^2$ (рис. 2а, криві 1, 3). Можна припустити, що в обох конструкціях СЕ спостерігається експериментально зниження $J_{кз}$ обумовлено зниженням щільності потоку фотонів, що надходять в базовий шар при збільшенні товщини шару CdS .

Зниження товщини шару хлориду кадмію при проведенні "хлоридної" обробки сонячних елементів, сформованих на поліамідних плівках від 0,11 мкм приводить до зниження ефективності за рахунок зменшення всіх вихідних параметрів СЕ. Так, зменшення товщини шару $CdCl_2$ від 0,11 мкм до 0,08 мкм, при незмінній товщині сульфід кадмію 0,55 мкм, призводить до зниження ефективності СЕ від $\eta = 8,5\%$ до $\eta = 6,3\%$. При цьому напруга холостого ходу зменшується від $U_{xx} = 746 \text{ мВ}$ до $U_{xx} = 721 \text{ мВ}$, фактор заповнення – від $FF = 0,590$ до $FF = 0,514$, щільність струму короткого замикання – від $J_{кз} = 19,3 \text{ мА/см}^2$ до $J_{кз} = 17,1 \text{ мА/см}^2$ (рис. 2б, криві 2, 4). Зростання товщини шару хлориду кадмію при формуванні гнучких сонячних елементів понад оптимального значення, як і для СЕ сформованих на скляних підкладках, призводить до зниження ефективності в основному за рахунок зменшення фактора заповнення світлової вольт-амперної характеристики. Так, збільшення товщини шару $CdCl_2$ від 0,11 мкм до 0,16 мкм, при незмінній товщині сульфід кадмію 0,55 мкм, призводить до зниження ефективності

СЕ від $\eta = 8,5\%$ до $\eta = 7,2\%$ (рис. 2б, криві 2, 5).

Висновок

Шляхом порівняльних досліджень СЕ $ITO/CdS/CdTe/Cu/Au$, сформованих на скляних підкладках і поліамідних плівках, доведено, що заміна скляної підкладки поліамідної плівкою дозволяє збільшити питому потужність таких сонячних елементів в 47 разів.

Визначено товщину шару сульфід кадмію і хлориду кадмію, при яких спостерігається максимальне значення ефективності СЕ $ITO/CdS/CdTe/Cu/Au$ отриманих методом термічного вакуумного осадження. Показано, що оптимальна товщина шару сульфід кадмію в конструкції СЕ $ITO/CdS/CdTe/Cu/Au$ сформованому на поліамідних підкладках більша, ніж при використанні скляних підкладок, а товщина шару хлориду кадмію – менша. Механізм зниження ефективності при збільшенні товщини шару сульфід кадмію і хлориду кадмію понад оптимальних значень для обох типів сонячних елементів однаковий і обумовлений зниженням щільності струму короткого замикання і зменшення фактора заповнення світлової вольт-амперної характеристики відповідно.

Визначена експериментально максимальна ефективність СЕ $ITO/CdS/CdTe/Cu/Au$ на скляних підкладках склала 10,3%, а для гнучких СЕ – 8,5%. Більш висока ефективність СЕ сформованих на скляних підкладках, в першу чергу, обумовлена великим фактором

заповнення світлової вольт-амперної характеристики.

Література

1. Rauschenbach H.S. Solar Cell Array Design "The principles and Technology of photovoltaic Energy Conversion". New York: "Litton Educational Publishing", 1980. – 350 p.
2. Romeo A., Batzner D.L., Zogg H., Tiwari A.N. A comparison of the vacuum evaporated CdTe substrate and superstrate solar cells// Pros. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Glasgow.– 2000.– P. 843 - 846.
3. Wu X., Keame J.C., Dhere R.G. at all. 16,5% - Efficient CdS/cdTe polycrystalline thin-film solar cells//Proceeding 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich. – 2002. – P. 995 - 999.
4. Romeo A. , Tiwari A.N. , Batzner D.L., Zogg H. Recrystallization in CdTe/CdS// Proceeding of 1999 European Material Conference. Strasbourg. – 2000.– P. 420 - 425.
5. Bonnet D., Meyers P. Cadmium telluride-materials for thin film solar cells // J. Mater. Res.– 1999.– Vol. 13, № 10. – P. 2740 - 2753.
6. Batrner D., Romeo A., Dobeli M., Weinert K., Zogg H., Tiwari A.N. High energy irradiation properties of CdTe/CdS solar cells//Proceedings of 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. New Orleans.– 2002.– P. 982 - 985.