

## ГИБКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au С ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ

Г.С. Хрипунов, Б.Т. Бойко

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
Украина*

Поступила в редакцию 19.01.2004

Впервые проведены сопоставительные исследования выходных характеристик и удельной мощности тонкопленочных солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au сформированных на стеклянных подложках и полиамидных пленках. Экспериментально было доказано, что замена стеклянной подложки полиамидной пленкой позволяет приблизительно в пятьдесят раз повысить удельную мощность солнечного элемента ITO/CdS/CdTe/Cu/Au.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в космических и наземных условиях для электроснабжения широко используются солнечные элементы (СЭ) на основе монокристаллического кремния. К основным технико-экономическим показателям таких солнечных элементов, наряду с коэффициентом полезного действия, себестоимостью вырабатываемой ими электроэнергии и степенью устойчивости выходных характеристик к воздействию солнечного излучения, относится удельная мощность. Под удельной мощностью понимают мощность вырабатываемую солнечным элементом на единицу его веса (кВт/кг). Показано [1], что если себестоимость электроэнергии, вырабатываемой солнечными элементами, будет не выше 1\$ за 1 Ватт·пик (1Вт при интенсивности солнечного излучения  $1000\text{Вт/м}^2$ ), то фотоэлектричество будет конкурентоспособным по отношению к электроэнергии вырабатываемой тепловыми электростанциями. К 2010 году минимально возможная цена 1 Ватт·пик кремниевых монокристаллических солнечных элементов составит не менее 2\$, а для пленочных солнечных элементов на основе теллурида кадмия – 0,5\$ [1]. Исследования показали [2], что наибольшую устойчивость к.п.д. к радиационному воздействию космических условий имеют тонкопленочные солнечные элементы на основе теллурида кадмия. Традиционно высокоэффективные тонкопленочные солнечные элементы на основе CdTe изготавливаются на стеклянных подложках вакуумными методами при температурах не менее  $400^\circ\text{C}$  (см., например, в [3]). Такие солнечные элементы, несмотря на экономичность и радиационную стойкость существенно уступают СЭ на основе монокристаллов кремния по удельной мощности. В настоящее время ряд западных фирм начали производить прозрачные полиамид-

ные пленки, обладающие термостабильностью до  $450^\circ\text{C}$ . Это принципиально позволяет формировать эффективные гибкие солнечные элементы на основе теллурида кадмия. Такие гибкие солнечные элементы теоретически способны обладать высокой удельной мощностью за счет существенного снижения их веса при замене стеклянной подложки на полиамидную пленку. Таким образом, сопоставительные экспериментальные исследования эффективности, выходных параметров и приведенной мощности тонкопленочных солнечных элементов на основе теллурида кадмия изготовленных на стеклянных подложках и полиамидных пленках являются актуальными.

### МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Для получения лабораторных образцов СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au вначале на полиамидные пленки и стеклянные подложки методом нереактивного высокочастотного магнетронного распыления осаждались слои ITO. Осаждение осуществлялось в промышленной установке MRC 6031. При распылении использовалась мишень представляющая собой спрессованную механическую смесь порошков  $\text{In}_2\text{O}_3$  (90 вес. %) и  $\text{SnO}_2$  (10 вес.%) полупроводниковой чистоты. Исходное парциальное давление было  $10^{-6}$  Торр. Формирование ITO толщиной (0,4 – 0,5) мкм осуществлялось в аргоно-кислородной смеси при давлении  $6 \cdot 10^{-3}$  Торр. Концентрация кислорода в составе газовой смеси поддерживалась на уровне 3 об.%. Удельная мощность магнетрона составляла  $1500\text{Вт/см}^2$ . Температура подложки –  $400^\circ\text{C}$ . Эти режимы магнетронного распыления были идентифицированы нами для осаждения слоев ITO с оптимальными оптоэлектрическими свойствами на стеклянных подложках и полиамидных пленках.

На слои ITO термическим испарением осаждались пленки CdS при давлении  $10^{-6}$  мм.рт.ст. и температуре подложки  $300^{\circ}\text{C}$ . Затем без нарушения вакуума при температуре подложки  $400^{\circ}\text{C}$  осаждались пленки CdTe. Полученные гетеросистемы ITO/CdS/CdTe подвергались «хлоридной» обработке [4]. Для этого на слои CdTe без нагрева подложки, термическим испарением при давлении  $10^{-5}$  мм.рт.ст. наносились пленки CdCl<sub>2</sub>. Полученные гетеросистемы ITO/CdS/CdTe/CdCl<sub>2</sub> подвергались отжигу на воздухе в закрытом объеме при температуре  $430^{\circ}\text{C}$  в течение 25 минут. После травления отожженных гетеросистем в растворе бром метанола на их поверхности термическим испарением наносились двухслойные электрические контакты Cu-Au и затем проводился отжиг сформированных СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au на воздухе при температуре  $200^{\circ}\text{C}$  в течение 30 минут.

Измерения световых вольт-амперных характеристик полученных СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au осуществлялось в режиме освещения AM1.5. По экспериментальным световым вольт-амперным характеристикам в определялись выходные параметры солнечных элементов: плотность тока короткого замыкания ( $J_{\text{кз}}$ ), напряжение холостого хода ( $U_{\text{хх}}$ ), фактор заполнения (FF) нагрузочной световой вольт-амперной характеристики (ВАХ) и, в конечном итоге, – коэффициент полезного действия ( $\eta$ ) [5]:

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

где  $P_{\text{и}} = 100 \text{ мВт/см}^2$  – мощность падающего солнечного излучения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

На стеклянных подложках и полиамидных пленках были получены солнечные элементы ITO/CdS/CdTe/Cu/Au. СЭ на полиамидных пленках были в 56 раз легче (см. рисунок 1а, б). Для идентификации наиболее оптимальных конструктивно-технологических решений при формировании солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au варьировалась толщина пленок сульфида кадмия и толщина пленок хлорида кадмия. Согласно литературным данным [6], для тонкопленочных СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au, в которых осаждение базового слоя осуществляется вакуумным испарением, оптимальная толщина CdTe составляет 4 мкм. Поэтому при формировании СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au толщина пленок теллурида кадмия также была 4 мкм.

Были измерены световые вольт-амперные характеристики СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au (рис. 2, 3), которые формировались на стеклянных под-

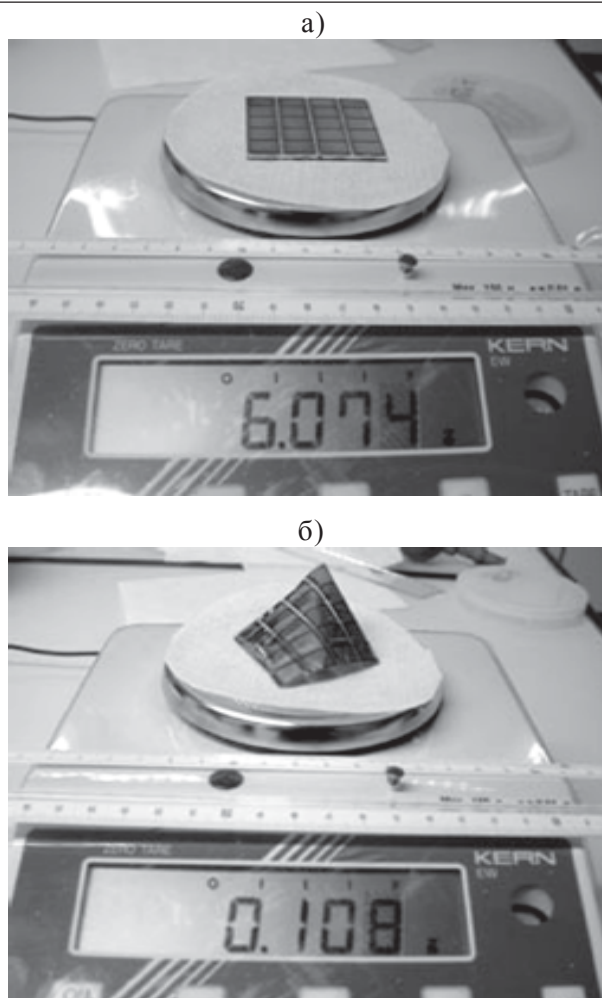


Рис. 1. Солнечные элементы ITO/CdS/CdTe/Cu/Au: а) на стеклянной подложке; б) на полиамидной пленке.

ложках и полиамидных пленках. Путем обработки экспериментальных световых вольт-амперных характеристик определены эффективность и выходные параметры изготовленных СЭ.

Результаты исследования эффективности и выходных параметров СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au на стеклянных подложках показали, что при толщине слоя сульфида кадмия 0,40 мкм и толщине слоя хлорида кадмия 0,35 мкм наблюдается максимальная эффективность – 10,3 %. При этом напряжение холостого хода  $U_{\text{хх}} = 774 \text{ мВ}$ , плотность тока короткого замыкания  $J_{\text{кз}} = 20,1 \text{ мА/см}^2$ , фактор заполнения световой вольт-амперной характеристики  $\text{FF} = 0,660$  (рис. 2а, кривая 2). Снижение толщины слоя сульфида кадмия от 0,40 мкм приводит к снижению эффективности СЭ, в основном, за счет уменьшения фактора заполнения световой вольт-амперной характеристики. Так, например, уменьшение толщины слоя CdS от 0,40 мкм до 0,20 мкм, при неизменной толщине слоя хлорида кадмия 0,35 мкм, приводит к снижению эффективности СЭ от  $\eta = 10,3 \%$  до  $\eta = 8,2 \%$ . При этом фактор заполнения световой

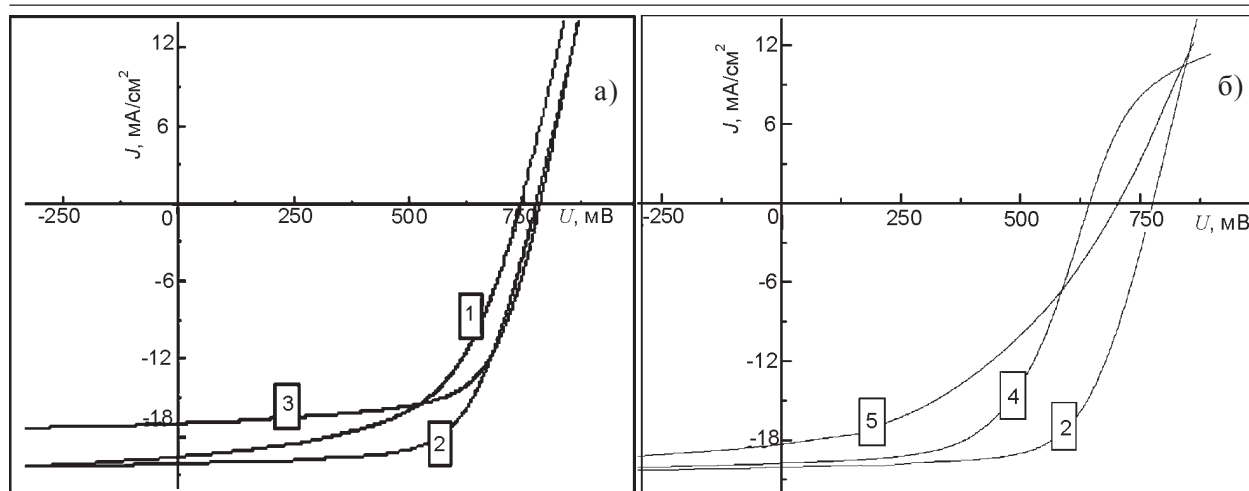


Рис. 2. Световые ВАХ СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au на стеклянных подложках. а) влияние толщины слоя CdS ( $d_{\text{CdCl}_2} = 0,35$  мкм): 1 –  $d_{\text{CdS}} = 0,20$  мкм:  $U_{\text{xx}} = 749$  мВ,  $J_{\text{кз}} = 19,7$  мА/см<sup>2</sup>,  $\text{FF} = 0,558$ ,  $\eta = 8,2\%$ ; 2 –  $d_{\text{CdS}} = 0,40$  мкм:  $U_{\text{xx}} = 774$  мВ,  $J_{\text{кз}} = 20,1$  мА/см<sup>2</sup>,  $\text{FF} = 0,660$ ,  $\eta = 10,3\%$ ; 3 –  $d_{\text{CdS}} = 0,60$  мкм:  $U_{\text{xx}} = 783$  мВ,  $J_{\text{кз}} = 17,0$  мА/см<sup>2</sup>,  $\text{FF} = 0,660$ ,  $\eta = 8,8\%$ . б) влияние толщины слоя CdCl<sub>2</sub> ( $d_{\text{CdS}} = 0,40$  мкм): 4 –  $d_{\text{CdCl}_2} = 0,06$  мкм:  $U_{\text{xx}} = 640$  мВ,  $J_{\text{кз}} = 19,8$  мА/см<sup>2</sup>,  $\text{FF} = 0,583$ ,  $\eta = 7,4\%$ ; 2 –  $d_{\text{CdCl}_2} = 0,35$  мкм:  $U_{\text{xx}} = 774$  мВ,  $J_{\text{кз}} = 20,1$  мА/см<sup>2</sup>,  $\text{FF} = 0,660$ ,  $\eta = 10,3\%$ ; 5 –  $d_{\text{CdCl}_2} = 1,20$  мкм:  $U_{\text{xx}} = 713$  мВ,  $J_{\text{кз}} = 18,3$  мА/см<sup>2</sup>,  $\text{FF} = 0,410$ ,  $\eta = 5,4\%$ .

вольт-амперной характеристики уменьшается от  $\text{FF} = 0,660$  до  $\text{FF} = 0,558$  (рис. 2а, кривые 1, 2). Увеличение толщины слоя сульфида кадмия свыше 0,40 мкм приводит к снижению эффективности за счет уменьшения плотности тока короткого замыкания. Так, например, увеличение толщины слоя CdS от 0,40 мкм до 0,60 мкм, при неизменной толщине хлорида кадмия 0,35 мкм, приводит к снижению эффективности СЭ от  $\eta = 10,3\%$  до  $\eta = 8,8\%$ . При этом плотность тока короткого замыкания уменьшается от  $J_{\text{кз}} = 20,1$  мА/см<sup>2</sup> до  $J_{\text{кз}} = 17,0$  мА/см<sup>2</sup> (рис. 2а, кривые 1, 3).

Снижение толщины слоя хлорида кадмия при проведении “хлоридной” обработки СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au (рис. 2б), которые были сформированы на стеклянных подложках, от 0,35 мкм приводит к снижению эффективности за счет уменьшения напряжения холостого хода и фактора заполнения световой вольт-амперной характеристики. Так, например, уменьшение толщины слоя CdCl<sub>2</sub> от 0,35 мкм до 0,06 мкм, при неизменной толщине слоя сульфида кадмия 0,40 мкм, приводит к снижению эффективности СЭ от  $\eta = 10,3\%$  до  $\eta = 7,4\%$ . При этом напряжение холостого хода уменьшается от  $U_{\text{xx}} = 774$  мВ до  $U_{\text{xx}} = 640$  мВ, фактор заполнения – от  $\text{FF} = 0,660$  до  $\text{FF} = 0,568$ , (рис. 2б, кривая 2, 4). Рост толщины слоя хлорида кадмия свыше 0,35 мкм приводит к снижению эффективности, в основном, за счет уменьшения фактора заполнения. Так, увеличение толщины слоя CdCl<sub>2</sub> от 0,35 мкм до 1,2 мкм, при неизменной толщине слоя сульфида кадмия 0,35 мкм, приводит к снижению эффективности СЭ от  $\eta = 10,3\%$  до  $\eta = 5,4\%$ . При этом фактор заполнения световой

вольт-амперной характеристики уменьшается от  $\text{FF} = 0,660$  до  $\text{FF} = 0,410$  (рис. 2б, кривые 2, 5).

Варьирование толщины пленок сульфида кадмия и хлорида кадмия при изготовлении солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au на полиамидных пленках показало, что при толщине слоя сульфида кадмия 0,55 мкм и толщине слоя хлорида кадмия 0,11 мкм наблюдается максимальная эффективность – 8,5%. При этом напряжение холостого хода  $U_{\text{xx}} = 746$  мВ, плотность тока короткого замыкания  $J_{\text{кз}} = 19,3$  мА/см<sup>2</sup>, фактор заполнения световой вольт-амперной характеристики  $\text{FF} = 0,591$  (рис. 3б, кривая 4). Удельная мощность такого гибкого солнечного элемента ITO/CdS/CdTe/Cu/Au составляет 1,9 кВт/кг. Сопоставление максимально достигнутых удельных мощностей СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au, сформированных на полиамидной пленке и стеклянной подложке, свидетельствует о том, что приведенная мощность гибкого солнечного элемента выше в 47 раз.

Снижение толщины слоя сульфида кадмия от 0,55 мкм, при изготовлении солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au на полиамидных пленках, приводит к снижению эффективности за счет уменьшения напряжения холостого хода. Так, уменьшение толщины слоя CdS от 0,55 мкм до 0,30 мкм, при неизменной толщине хлорида кадмия 0,08 мкм, приводит к снижению эффективности СЭ от  $\eta = 6,3\%$  до  $\eta = 4,2\%$ . При этом напряжение холостого хода уменьшается от  $U_{\text{xx}} = 712$  мВ до  $U_{\text{xx}} = 440$  мВ (рис. 3а, кривые 1, 2). Увеличение толщины слоя сульфида кадмия в гибких солнечных элементах на основе CdTe выше оптимального значения, как и для СЭ сформированных на полиамидной пленке, приводит к снижению эффективности за счет уменьшения фактора заполнения световой вольт-амперной характеристики. Так, например, увеличение толщины слоя CdS от 0,55 мкм до 0,80 мкм, при неизменной толщине хлорида кадмия 0,11 мкм, приводит к снижению эффективности СЭ от  $\eta = 8,5\%$  до  $\eta = 7,8\%$ . При этом напряжение холостого хода уменьшается от  $U_{\text{xx}} = 746$  мВ до  $U_{\text{xx}} = 730$  мВ, плотность тока короткого замыкания  $J_{\text{кз}} = 19,3$  мА/см<sup>2</sup>, фактор заполнения световой вольт-амперной характеристики  $\text{FF} = 0,591$  (рис. 3б, кривая 4).

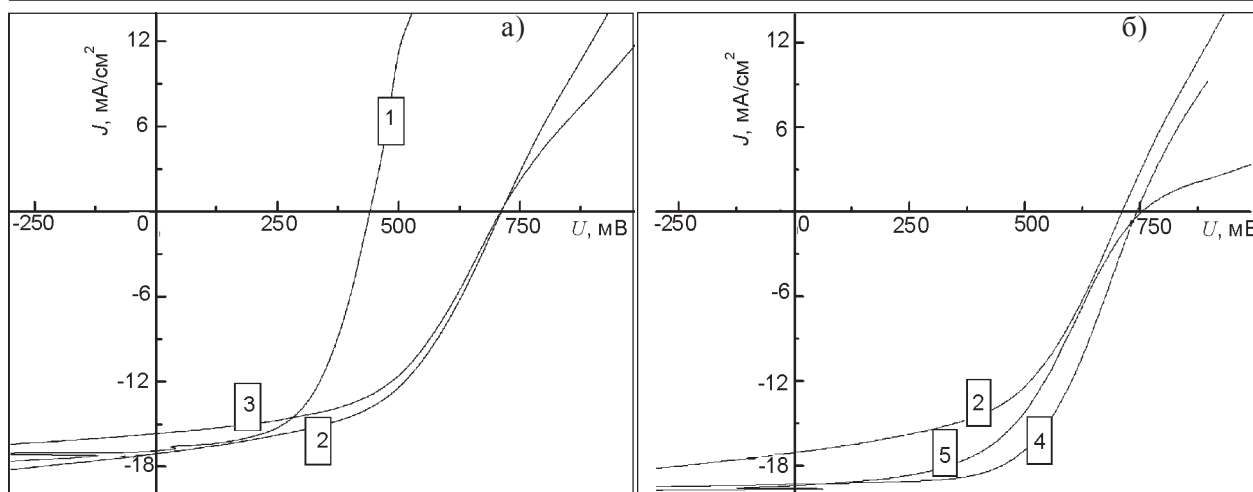


Рис. 3. Световые ВАХ СЭ ИТО/CdS/CdTe/Cu/Au на полиамидных пленках. а) влияние толщины слоя CdS ( $d_{CdCl_2} = 0,08$  мкм): 1 –  $d_{CdS} = 0,30$  мкм:  $U_{xx} = 440$  мВ,  $J_{кз} = 16,9$  мА/см<sup>2</sup>,  $FF = 0,568$ ,  $\eta = 4,2\%$ ; 2 –  $d_{CdS} = 0,55$  мкм:  $U_{xx} = 712$  мВ,  $J_{кз} = 17,1$  мА/см<sup>2</sup>,  $FF = 0,514$ ,  $\eta = 6,3\%$ ; 3 –  $d_{CdS} = 0,70$  мкм:  $U_{xx} = 711$  мВ,  $J_{кз} = 15,7$  мА/см<sup>2</sup>,  $FF = 0,490$ ,  $h = 5,8\%$ . б) влияние толщины слоя CdCl<sub>2</sub> ( $d_{CdS} = 0,55$  мкм): 2 –  $d_{CdCl_2} = 0,08$  мкм:  $U_{xx} = 712$  мВ,  $J_{кз} = 17,1$  мА/см<sup>2</sup>,  $FF = 0,514$ ,  $\eta = 6,3\%$ ; 4 –  $d_{CdCl_2} = 0,11$  мкм:  $U_{xx} = 746$  мВ,  $J_{кз} = 19,3$  мА/см<sup>2</sup>,  $FF = 0,591$ ,  $h = 8,5\%$ ; 5 –  $d_{CdCl_2} = 0,16$  мкм:  $U_{xx} = 756$  мВ,  $J_{кз} = 19,4$  мА/см<sup>2</sup>,  $FF = 0,490$ ,  $\eta = 7,2\%$ .

рованных на стеклянных подложках, приводит к снижению эффективности за счет уменьшения плотности тока короткого замыкания. Так, например, увеличение толщины слоя CdS от 0,55 мкм до 0,70 мкм, при неизменной толщине хлорида кадмия 0,08 мкм, приводит к снижению эффективности гибкого СЭ от  $\eta = 6,3\%$  до  $\eta = 5,6\%$ . При этом плотность тока короткого замыкания уменьшается от  $J_{кз} = 17,1$  мА/см<sup>2</sup> до  $J_{кз} = 14,7$  мА/см<sup>2</sup> (рис. 3а, кривые 1, 3). Можно предположить, что в обеих конструкциях СЭ наблюдаемое экспериментально снижение  $J_{кз}$  обусловлено снижением плотности потока фотонов поступающих в базовый слой при увеличении толщины слоя CdS.

Снижение толщины слоя хлорида кадмия при проведении “хлоридной” обработки солнечных элементов, сформированных на полиамидных пленках от 0,11 мкм приводит к снижению эффективности за счет уменьшения всех выходных параметров СЭ. Так, уменьшение толщины слоя CdCl<sub>2</sub> от 0,11 мкм до 0,08 мкм, при неизменной толщине сульфида кадмия 0,55 мкм, приводит к снижению эффективности СЭ от  $\eta = 8,5\%$  до  $\eta = 6,3\%$ . При этом напряжение холостого хода уменьшается от  $U_{xx} = 746$  мВ до  $U_{xx} = 721$  мВ, фактор заполнения – от  $FF = 0,590$  до  $FF = 0,514$ , плотность тока короткого замыкания – от  $J_{кз} = 19,3$  мА/см<sup>2</sup> до  $J_{кз} = 17,1$  мА/см<sup>2</sup> (рис. 3б, кривые 2, 4). Рост толщины слоя хлорида кадмия при формировании гибких солнечных элементов свыше оптимального значения, как и для СЭ сформированных на стеклянных подложках, приводит к снижению эффективности в основном за счет уменьшения фактора заполнения световой

вольт-амперной характеристики. Так, увеличение толщины слоя CdCl<sub>2</sub> от 0,11 мкм до 0,16 мкм, при неизменной толщине сульфида кадмия 0,55 мкм, приводит к снижению эффективности СЭ от  $\eta = 8,5\%$  до  $\eta = 7,2\%$  (рис. 3б, кривые 2, 5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые путем сопоставительных исследований солнечных элементов ИТО/CdS/CdTe/Cu/Au, сформированных на стеклянных подложках и полиамидных пленках, экспериментально доказано, что замена стеклянной подложки полиамидной пленкой позволяет увеличить удельную мощность таких солнечных элементов в 47 раз.

Определены толщины слоя сульфида и хлорида кадмия, при которых экспериментально наблюдается максимальное значение эффективности солнечных элементов ИТО/CdS/CdTe/Cu/Au полученных методом термического вакуумного осаждения. Показано, что оптимальная толщина слоя сульфида кадмия в конструкции солнечных элементов ИТО/CdS/CdTe/Cu/Au сформированных на полиамидных подложках выше, чем при использовании стеклянных подложек, а толщина слоя хлорида кадмия – ниже. Механизм снижения эффективности при увеличении толщины слоя сульфида кадмия и хлорида кадмия свыше оптимальных значений для обоих типов солнечных элементов одинаковый и обусловлен снижением плотности тока короткого замыкания и уменьшением фактора заполнения световой вольт-амперной характеристики соответственно.

Достигнутая экспериментально максимальная эффективность солнечных элементов

ITO/CdS/CdTe/Cu/Au на стеклянных подложках составила 10,3 %, а для гибких СЭ – 8,5 %. Более высокая эффективность солнечных элементов сформированных на стеклянных подложках, в первую очередь, обусловлена большим фактором заполнения световой вольт-амперной характеристики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bonnet D., Meyers P. Cadmium telluride-materials for thin film solar cells // J. Mater. Res.– 1999.– Vol. 13, № 10. – P. 2740 - 2753.
2. Batrner D., Romeo A., Dobeli M., Weinert K., Zogg H., Tiwari A.N. High energy irradiation pro-perties of CdTe/CdS solar cells//Proceedings of 29<sup>th</sup> EEE Photovoltaic Specialists Conference. New Orleans.– 2002.– P. 982 - 985.

3. Wu X., Keame J.C., Dhare R.G. at all. 16,5% - Efficient CdS/cdTe polycrystalline thin-film solar cells//Proceeding 17<sup>th</sup> 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. Rauschenbach H.S. Solar Cell Array Design “The principles and Technology of photovoltaic Energy Conversion”. New York: “Litton Educational Publishing”, 1980. – 350 p.
6. Romeo A., Batzner D.L., Zogg H., Tiwari A.N. A comparison of the vacuum evaporated CdTe substrate and superstrate solar cells// Pros. 16<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference. Glasgow.– 2000.– P. 843 - 846.

#### ГНУЧКІ СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au З ВИСОКОЮ ПИТОМОЮ ПОТУЖНІСТЮ

Г.С. Хрипунів, Б.Т. Бойко

Вперше проведені порівняльні дослідження вихідних характеристик і питомої потужності тонкоплівкових сонячних елементів ITO/Cd/CdTe/Cu/Au сформованих на скляних підкладках і поліамідних плівках. Експериментально було доведено, що заміна скляної підкладки поліамідною плівкою дозволяє у близько п'ятдесяти разів підвищити питому потужність сонячного елемента ITO/Cd/CdTe/Cu/Au .

#### FLEXIBLE ITO/CdS/CdTe/Cu/Au SOLAR CELLS WITH HIGH SPECIFIC CAPACITY

G.S. Khripunov, B.T. Boyko

The first time the comparative investigations of the photovoltaic characteristics and specific capacity of the ITO/CdS/CdTe/Cu/Au thin film solar cells on the glass substrates and polyamide film were carried out. Experimentally it was proved, that the replacement of the glass substrate on the polyimide film permits to increase the specific capacity of ITO/CdS/CdTe/Cu/Au solar cells in the around fifty times.