

## Влияние наноразмерной прослойки оксида олова на эффективность фотоэлектрических процессов в пленочных солнечных элементах на основе теллурида кадмия

Г.С. Хрипунов<sup>1</sup>, А.В. Пирогов<sup>1</sup>, Д.А. Кудий<sup>1</sup>, Р.В. Зайцев<sup>1</sup>, А.Л. Хрипунова<sup>1</sup>,  
В.А. Геворкян<sup>2</sup>, П.П. Гладышев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
ул. Фрунзе, 21, 61002 Харьков, Украина*

<sup>2</sup> *Российско-Армянский (Славянский) университет, ул. Овсена Эмина, 123, 0051 Ереван, Армения*

<sup>3</sup> *Государственный университет «Дубна», ул. Университетская, 19, 141980 Дубна, Московская обл., Россия*

(Получено 02.10.2014; опубликовано online 25.03.2015)

Было исследовано влияние толщины наноразмерной прослойки на эффективность фотоэлектрических процессов в солнечных элементах (СЭ) ITO / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au, сформированных на различных подложках. Для приборных структур, сформированных на стеклянных подложках, максимальная эффективность 11,4 % достигается при толщине слоя оксида олова 80 нм. Для гибких солнечных элементов, сформированных на полиимидных пленках, максимальная эффективность 10,8 % наблюдается при толщине слоя оксида олова 50 нм. В работе обсуждаются физические механизмы наблюдаемых отличий в КПД.

**Ключевые слова:** Тонкопленочный солнечный элемент, Стеклянные и гибкие подложки, Диоксид олова, Теллурид и сульфид кадмия.

PACS numbers: 81.40.Ef, 61.05. – Cr, 68.57. – Hk

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современным инновационным направлением совершенствования перспективных для широкомасштабного применения пленочных солнечных элементов (СЭ) на основе сульфида и теллурида кадмия является создание гибких приборных структур путем замены стеклянной подложки на прозрачную термостабильную полиимидную пленку [1]. Такие гибкие приборные структуры имеют рекордную мощность на единицу веса и могут монтироваться на поверхностях любых форм [2], что позволяет увеличить сегменты рынка СЭ за счет применения в космической и военной технике. Радиационная стойкость теллурида кадмия позволяет использовать такие СЭ даже для электропитания гамма детекторов [3]. В последнее время одним из подходов увеличения эффективности СЭ на основе CdS / CdTe, формируемых на стеклянной подложке, стало снижение толщины слоя сульфида кадмия для увеличения плотности потока фотонов, поступающих в базовый слой теллурида кадмия [4]. При этом, для предотвращения шунтирования приборной структуры, в результате электрического контакта базового слоя и фронтального электрода, через несплошности в слое сульфида кадмия при формировании СЭ на поверхность фронтального электрода наносят диэлектрические наноразмерные прослойки нелегированных окислов различных металлов [5]. Для реализации такого подхода к совершенствованию конструктивно-технологических решений гибких СЭ на основе CdS / CdTe в работе были проведены сопоставительные исследования влияния наноразмерных прослоек оксида олова на эффективность фотоэлектрических процессов указанных приборных структур, сформированных на стеклянных и гибких подложках.

### 2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пленочные СЭ на основе CdS / CdTe формировались на стеклянных подложках Nippon sheet

company и гибких полиимидных пленках Upilex company, с нанесенными промышленным способом пленками оксидов олова и индия (ITO). Толщина пленок ITO составляла 120 нм. Затем, в вакуумной установке ВУП-5М на слой ITO методом неактивного магнетронного распыления на постоянном токе при температуре подложки 300 °С наносили тонкие пленки нелегированного оксида олова различной толщины. После формирования фронтальных электродов в модернизированной вакуумной установке УВН методом термического вакуумного испарения без нарушения вакуума осаждались пленки сульфида и теллурида кадмия при температуре подложки 200 °С и 300 °С соответственно. При этом, толщина сульфида кадмия (d<sub>CdS</sub>) составляла 0,2 мкм, теллурида кадмия – 4 мкм. Затем, по методике, описанной в [6], производилась «хлоридная» обработка. После «хлоридной» обработки осуществлялось травление базового слоя в растворе брома в метаноле и, затем, методом термического вакуумного испарения формировались тыльные пленочные контакты Cu / Au. Определение выходных параметров и световых диодных характеристик СЭ осуществлялось путем аппроксимации экспериментальных световых ВАХ теоретическим выражением [7]. При аналитической обработке среднеквадратичное отклонение теоретической ВАХ от экспериментальной не превосходило 10<sup>-8</sup>, что соответствует относительной погрешности в определении выходных параметров и световых диодных характеристик на уровне не более 1 %.

Исследование спектральной зависимости коэффициента квантовой эффективности  $Q(\lambda)$  позволяет анализировать интегральную эффективность фотоэлектрических процессов: генерацию, диффузию, дрейф, разделение и сбориение, генерированных под действием света, неравновесных носителей заряда в зависимости от энергии падающего излучения. Поэтому, наряду с измерениями световых ВАХ такие исследования являются необходимыми при оптимизации конструктивно-технологических решений СЭ.

Коэффициент квантовой эффективности  $Q$  определяется как отношение числа носителей заряда, вносящих вклад в фототок, к общему числу фотонов, поступающих на активную поверхность СЭ [8]. Между фототоком короткого замыкания  $I_{кз}$  и величиной  $Q(\lambda)$  существует функциональная связь, описываемая при достаточно большом шунтирующем сопротивлении  $R_{ш}$  соотношением [7]:

$$I_{кз} = e \int Q(\lambda) \cdot N(\lambda) d\lambda - I_d, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны света;  $\lambda_k$  – красная граница фотоэффекта;  $N(\lambda)$  – скорость поступления фотонов на поверхность СЭ;  $I_d$  – диодный ток СЭ.

В реальных условиях интенсивность поступающего на поверхность СЭ солнечного излучения такова, что при наблюдаемом значении последовательного сопротивления приборной структуры  $I_d \ll I_{кз}$ , поэтому:

$$I_{кз} = eQ(\lambda) \cdot N(\lambda). \quad (2)$$

Величина  $N(\lambda)$  может быть выражена через интенсивность света  $I_c(\lambda)$ , поступающего на поверхность СЭ:

$$Q(\lambda) = [I_{кз}(\lambda) \cdot E(\lambda)] / [eS \cdot I_c(\lambda)]. \quad (3)$$

Значения  $I_{кз}(\lambda)$  в соотношении (3) были определены экспериментально,  $I_c(\lambda)$  является характеристикой используемого источника света, в качестве которого использовалась 500 Вт лампа накаливания. При проведении исследований спектральной зависимости фотоотклика СЭ размещался на выходной щели двойного монохроматора и проводилось измерение величины тока короткого замыкания при плавном изменении длины волны падающего излучения.

### 3. ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Были исследованы световые ВАХ СЭ ИТО / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au, которые были сформированы на стеклянных подложках и гибких полиимидных пленках. По световым ВАХ рассчитывались выходные параметры СЭ: плотность тока короткого замыкания ( $J_{кз}$ ), напряжение холостого хода ( $U_{хх}$ ), фактор заполнения световой вольтамперной характеристики (FF) и эффективность ( $\eta$ ). Затем, путем аналитической обработки световых ВАХ, были определены световые диодные характеристики: плотность фототока ( $J_{ф}$ ), плотность диодного тока насыщения ( $J_0$ ), коэффициент идеальности диода ( $A$ ), последовательное ( $R_n$ ) и шунтирующее ( $R_{ш}$ ) сопротивления, рассчитываемые на единицу активной площади приборной структуры [9]. Исследования выходных параметров и световых диодных характеристик СЭ позволили выделить интервалы толщины слоев оксида олова, которые соответствуют смене физических механизмов влияния диэлектрической прослойки на эффективность фотоэлектрических процессов приборных структур. Типичные световые ВАХ СЭ ИТО / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au приведены на рис. 1 а, б.

Выходные параметры и световые диодные характеристики СЭ ИТО / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au, сформированных на стеклянных подложках и полиимидных пленках представлены в таблице 1.

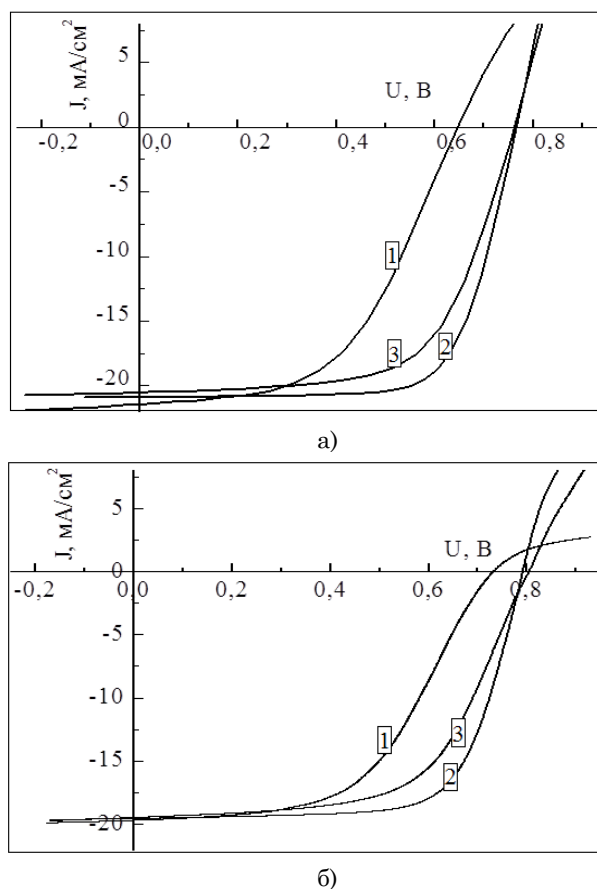


Рис. 1 – Световые ВАХ СЭ ИТО / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au: а) стеклянные подложки: 1 –  $d_{SnO_2} = 50$  нм, 2 –  $d_{SnO_2} = 80$  нм, 3 –  $d_{SnO_2} = 120$  нм; б) гибкие подложки: 1 –  $d_{SnO_2} = 0$  нм, 2 –  $d_{SnO_2} = 50$  нм, 3 –  $d_{SnO_2} = 80$  нм

Анализ таблицы 1 показывает, что при толщине слоя сульфида кадмия 0,2 мкм рост толщины слоя оксида олова ( $d_{SnO_2}$ ) до 80 нм приводит к увеличению коэффициента полезного действия СЭ ИТО / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au, сформированных на стеклянных подложках до  $\eta = 11,4$  %. При этом, напряжение холостого хода увеличивается до  $U_{хх} = 765$  мВ, фактор заполнения световой ВАХ возрастает до  $FF = 0,71$ ; а плотность тока короткого замыкания снижается до  $J_{кз} = 20,9$  мА/см<sup>2</sup>. Согласно результатам математического моделирования количественного влияния световых диодных характеристик на эффективность СЭ, методика проведения которого описана в работе [10], рост  $\eta$  обусловлен увеличением шунтирующего сопротивления до  $R_{ш} = 800$  Ом см<sup>2</sup> и уменьшением плотности диодного тока насыщения до  $J_0 = 2,5 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>. Дальнейший рост толщины слоя приводит к уменьшению эффективности СЭ. Результаты моделирования показывают, что это обусловлено ростом последовательного сопротивления и уменьшением плотности фототока.

**Таблица 1** – Выходные параметры и световые диодные характеристики СЭ ITO / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au, сформированных на стеклянных (1) и полиимидных (2) подложках

Выходные параметры и световые диодные характеристики	$d_{\text{CdS}} = 0,2 \text{ мкм (1)}$			$d_{\text{CdS}} = 0,2 \text{ мкм (2)}$		
	$d_{\text{SnO}_2} = 50 \text{ нм}$	$d_{\text{SnO}_2} = 80 \text{ нм}$	$d_{\text{SnO}_2} = 120 \text{ нм}$	$d_{\text{SnO}_2} = 0 \text{ нм}$	$d_{\text{SnO}_2} = 50 \text{ нм}$	$d_{\text{SnO}_2} = 80 \text{ нм}$
$J_{\text{КЗ}}$ , мА/см <sup>2</sup>	21,4	20,9	20,5	19,8	19,5	19,0
$U_{\text{ХХ}}$ , мВ	649	765	760	735	792	802
FF, отн. ед.	0,52	0,71	0,63	0,52	0,70	0,60
$\eta$ , %	7,2	11,4	9,9	7,4	10,8	9,2
$J_{\text{Ф}}$ , мА/см <sup>2</sup>	21,6	21,3	20,7	20,2	19,6	19,2
$R_{\text{П}}$ , Ом см <sup>2</sup>	1,8	2,8	4,2	1,5	2,1	2,3
$R_{\text{Ш}}$ , Ом см <sup>2</sup>	450	800	700	600	1100	1300
$A$ , отн. ед.	2,7	2,1	2,2	2,5	1,9	1,8
$J_0$ , А/см <sup>2</sup>	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$9,3 \cdot 10^{-9}$

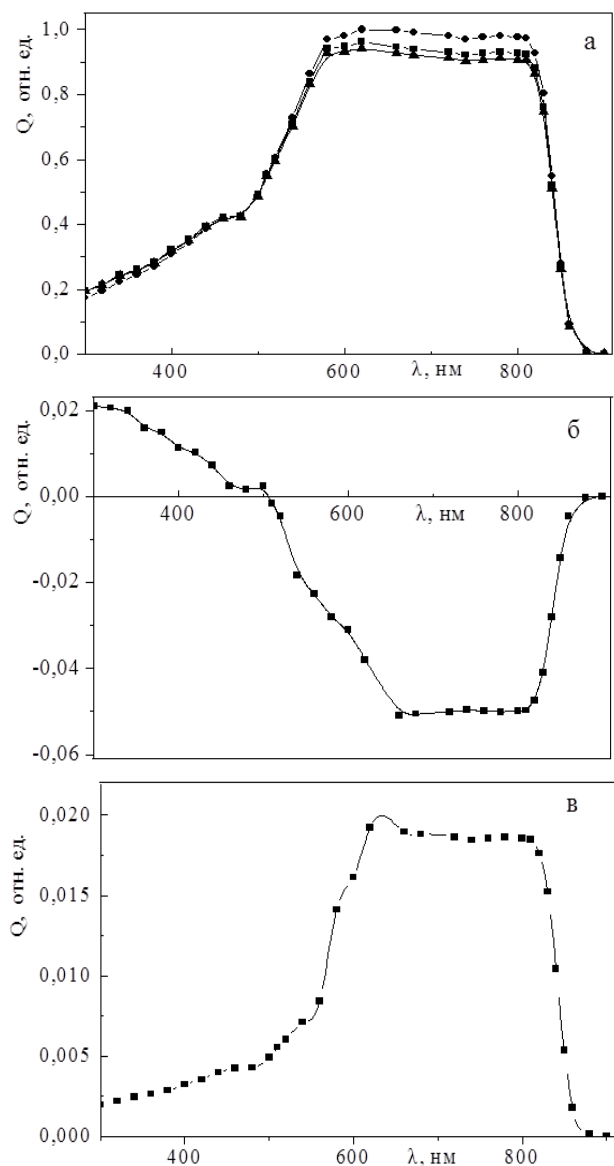
Было установлено, что в СЭ ITO / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au, сформированных на полиимидных пленках, рост толщины слоя оксида олова до  $d_{\text{SnO}_2} = 50 \text{ нм}$  приводит к увеличению коэффициента полезного действия до  $\eta = 10,8 \%$ . При этом, напряжение холостого хода увеличивается до  $U_{\text{ХХ}} = 792 \text{ мВ}$ , фактор заполнения световой ВАХ возрастает до  $\text{FF} = 0,70$ ; а плотность тока короткого замыкания снижается до  $J_{\text{КЗ}} = 19,5 \text{ мА/см}^2$ . Согласно результатам математического моделирования количественного влияния световых диодных характеристик на эффективность СЭ рост  $\eta$  обусловлен увеличением шунтирующего сопротивления до  $R_{\text{Ш}} = 1100 \text{ Ом см}^2$  и уменьшением плотности диодного тока насыщения до  $J_0 = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$ . Дальнейший рост толщины слоя приводит к уменьшению эффективности СЭ. Результаты моделирования показывают, что положительное влияние на эффективность СЭ за счет продолжающегося увеличения шунтирующего сопротивления и снижения плотности диодного тока насыщения перестает компенсировать негативное влияние на эффективность СЭ вследствие увеличения последовательного сопротивления и уменьшения плотности фототока.

Проведенные исследования выходных параметров и световых диодных характеристик были дополнены исследованиями спектральных зависимостей коэффициентов квантовых эффективностей характерных СЭ (рис. 2, 3). Было экспериментально установлено, что интервал fotocувствительности СЭ ITO / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au, сформированных на стеклянных подложках составляет 300-900 нм (рис. 2а). С ростом толщины слоя диоксида олова до 80 нм наблюдается рост fotocувствительности в спектральном интервале 300-500 нм и снижение fotocувствительности в спектральном диапазоне 500-900 нм (рис. 2б). Поскольку, с уменьшением длины волны уменьшается глубина поглощения света, то рост вклада фотоотклика в спектральном диапазоне 300-400 нм свидетельствует о снижении поверхностной рекомбинации при увеличении толщины слоя оксида олова до 80 нм. Об этом также свидетельствует наблюдаемый рост шунтирующего сопротивления и уменьшения плотности диодного тока насыщения. Дальнейший рост толщины слоя оксида олова приводит к снижению fotocувстви-

тельности во всем спектральном диапазоне 300-800 нм (рис. 2 в).

В отличие от приборных структур на стеклянных подложках спектральный интервал fotocувствительности СЭ ITO / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au, сформированных на полиимидных пленках составляет 400-900 нм (рис. 3). При этом, с ростом толщины слоя диоксида олова наблюдается снижение fotocувствительности во всем спектральном диапазоне. Оптические исследования спектров пропускания стеклянной подложки, полиимидной пленки и сульфида кадмия (рис. 4) свидетельствуют о том, что смещение коротковолновой границы fotocувствительности гибких СЭ в длинноволновую область обусловлена отсутствием пропускания полиимидной пленки в спектральном интервале 300-400 нм, несмотря на то, что при толщине слоя сульфида кадмия 0,2 мкм значительная часть фотонов с энергией больше ширины запрещенной зоны CdS поступает в базовый слой теллурида кадмия. Более низкий коэффициент пропускания полиимидной пленки в спектральном интервале 400-900 нм приводит к экспериментально наблюдаемому снижению плотности тока короткого замыкания гибких СЭ. В то же время гибкие СЭ имеют большие значения шунтирующего сопротивления и меньшие плотности диодного тока насыщения, что, с нашей точки зрения, связано с переходом от стеклянной подложки на полиимидную пленку. Применение в качестве подложки натрийсодержащих стекол вызывает диффузию натрия в приборную структуру [10]. Согласно литературным данным [11], в базовых слоях CdTe атом натрия, который занимает позицию кадмия (Na<sub>Cd</sub>), представляет собой акцептор, донорно-акцепторная пара Na<sub>Cd</sub>-Cl<sub>Te</sub> – глубокий центр рекомбинации. Появление таких структурных дефектов прогнозируется в результате диффузии Na из стеклянных натрийсодержащих подложек в базовый слой.

Наличие Na<sub>Cd</sub> и Na<sub>Cd</sub>-Cl<sub>Te</sub> на зернограничной поверхности в области гетероперехода шунтирует сепарирующий барьер, что снижает  $R_{\text{ш}}$ . Формирование в объеме зерен базового слоя дефектных комплексов Na<sub>Cd</sub>-Cl<sub>Te</sub> уменьшает время жизни неравновесных носителей заряда, что приводит к увеличению  $J_0$ . Послойный элементный анализ гетеросистем ITO / CdS / CdTe / Cu / Au (рис. 5а), сформированных на стеклянных подложках свидетельствует о значи-

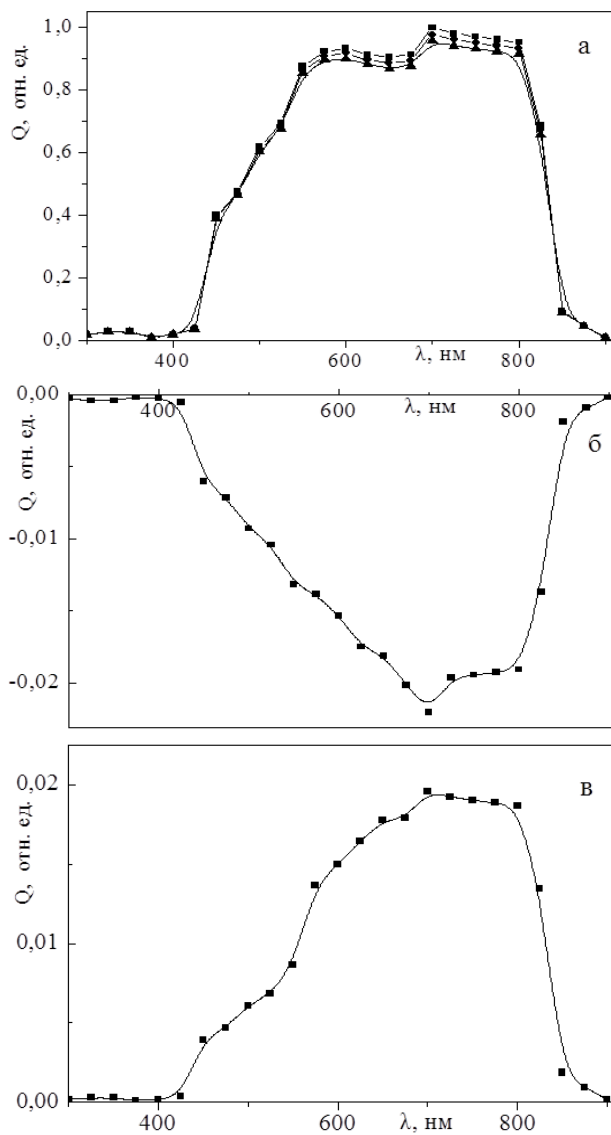


**Рис. 2** – Спектральные зависимости коэффициента квантовой эффективности: а)  $Q(\lambda)$  СЭ ИТО/ $\text{SnO}_2$ / $\text{CdS}$ / $\text{CdTe}$ / $\text{Cu}/\text{Au}$ , сформированных на стеклянных подложках:  $\blacklozenge$  –  $d_{\text{SnO}_2} = 50$  нм,  $\blacksquare$  –  $d_{\text{SnO}_2} = 80$  нм,  $\blacktriangledown$  –  $d_{\text{SnO}_2} = 120$  нм; б)  $Q(\lambda)$   $d_{\text{SnO}_2} = 80$  нм,  $Q(\lambda)$   $d_{\text{SnO}_2} = 50$  нм; в)  $Q(\lambda)$   $d_{\text{SnO}_2} = 80$  нм,  $Q(\lambda)$   $d_{\text{SnO}_2} = 120$  нм

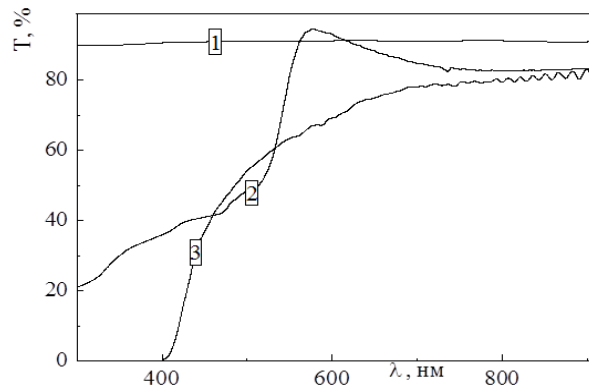
тельной концентрации Na в базовых слоях CdTe. Послойный элементный анализ гетеросистем ИТО /  $\text{SnO}_2$  /  $\text{CdS}$  /  $\text{CdTe}$  /  $\text{Cu}$  /  $\text{Au}$  (рис. 5б) показывает, что использование в конструкции СЭ прослойки оксида олова приводит к существенному снижению концентрации натрия в слое теллурида кадмия.

#### 4. ВЫВОДЫ

Было установлено, что тип подложки определяет оптимальную толщину диэлектрической прослойки оксида олова, при которой наблюдается максимальный коэффициент полезного действия в солнечных элементах ИТО /  $\text{SnO}_2$  /  $\text{CdS}$  /  $\text{CdTe}$  /  $\text{Cu}$  /  $\text{Au}$ . Для приборных структур, сформированных на стеклянных подложках, максимальная эффективность 11,4 %



**Рис. 3** – Спектральные зависимости коэффициента квантовой эффективности: а)  $Q(\lambda)$  СЭ ИТО/ $\text{SnO}_2$ / $\text{CdS}$ / $\text{CdTe}$ / $\text{Cu}/\text{Au}$ , сформированных на гибких подложках:  $\blacklozenge$  –  $d_{\text{SnO}_2} = 0$  нм,  $\blacksquare$  –  $d_{\text{SnO}_2} = 50$  нм,  $\blacktriangledown$  –  $d_{\text{SnO}_2} = 80$  нм; б)  $Q(\lambda)$   $d_{\text{SnO}_2} = 50$  нм;  $Q(\lambda)$   $d_{\text{SnO}_2} = 80$  нм; в)  $Q(\lambda)$   $d_{\text{SnO}_2} = 50$  нм;  $Q(\lambda)$   $d_{\text{SnO}_2} = 80$  нм



**Рис. 4** – Спектральные зависимости коэффициента пропускания: 1 – стеклянная подложка, 2 – полиимидная пленка, 3 – пленка CdS

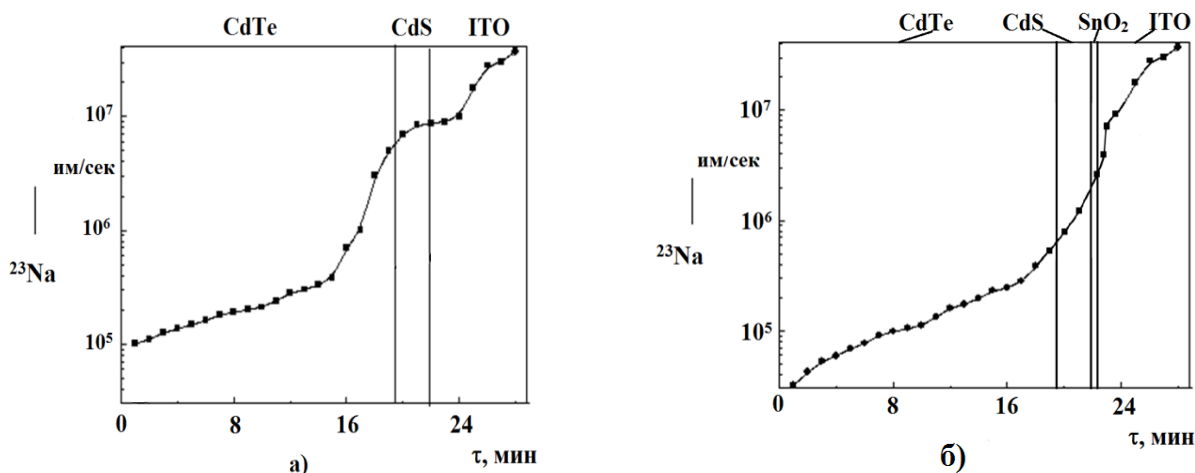


Рис. 5 – Распределение натрия в СЭ, сформированных на стеклянных подложках: а) ITO / CdS / CdTe / Cu / Au, б) ITO / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au при  $d_{\text{SnO}_2} = 50$  нм

достигается при толщине слоя оксида олова 80 нм. Для гибких солнечных элементов, сформированных на полиимидных пленках, максимальная эффективность 10,8 % наблюдается при толщине слоя оксида олова 50 нм.

Экспериментально показано, что в приборных структурах, сформированных на стеклянных подложках, наблюдается диффузия натрия в базовый слой CdTe, что приводит, к зафиксированному экспериментально, увеличению плотности диодного тока насыщения и снижению коэффициента квантовой эффективности в коротковолновой части спектрального диапазона фоточувствительности. Поэтому, большие оптимальные значения диэлектрической прослойки для СЭ на стеклянных подложках обусловлены тем, что в таких приборных структурах

наноразмерные слои диоксида олова не только препятствуют шунтированию гетероперехода за счет контакта теллурида кадмия с фронтальным электродом ITO, но и служат диффузионным барьером для натрия.

Снижение коэффициента полезного действия СЭ ITO / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au при переходе от стеклянной на гибкую подложку обусловлены отсутствием пропускания полиимидной пленки в спектральном интервале 300-400 нм и более низким коэффициентом пропускания в спектральном интервале 400-900 нм, что приводит к соответствующему снижению коэффициента квантовой эффективности во всем диапазоне фоточувствительности и уменьшению плотности тока короткого замыкания.

### Вплив нанорозмірного прошарку оксиду олова на ефективність фотоелектричних процесів у плівкових сонячних елементах на основі телуриду кадмію

Г.С. Хрипунов<sup>1</sup>, О.В. Пирогов<sup>1</sup>, Д.А. Кудій<sup>1</sup>, Р.В. Зайцев<sup>1</sup>, А.Л. Хрипунова<sup>1</sup>,  
В.О. Геворкян<sup>2</sup>, П.П. Гладишев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
вул. Фрунзе, 21, 61002 Харків, Україна

<sup>2</sup> Російсько-Армянський (Славянський) університет, вул. Овсена Еміна, 123, 0051 Єреван, Армєнія

<sup>3</sup> Державний університет «Дубна», вул. Університетська, 19, 141980 Дубна, Московська обл., Росія

Був досліджений вплив товщини нанорозмірного прошарку на ефективність фотоелектричних процесів у сонячних елементах (СЕ) ITO / SnO<sub>2</sub> / CdS / CdTe / Cu / Au, сформованих на різних підкладках. Для приладових структур, сформованих на скляних підкладках, максимальна ефективність 11,4 % досягається при товщині шару оксиду олова 80 нм. Для гнучких сонячних елементів, сформованих на поліімидних плівках, максимальна ефективність 10,8 % спостерігається при товщині шару оксиду олова 50 нм. У роботі обговорюються фізичні механізми спостережуваних відмінностей у ККД.

**Ключові слова:** Тонкоплівковий сонячний елемент, Скляні та гнучкі підкладки, Діоксид олова, Телурид та сульфід кадмію.

## Effect of Nanosized Tin Oxide Layer on the Efficiency of Photovoltaic Processes in Film Solar Cells Based on Cadmium Telluride

G.S. Khripunov<sup>1</sup>, O.V. Pirohov<sup>1</sup>, D.A. Kudiy<sup>1</sup>, R.V. Zaitsev<sup>1</sup>, A.L. Khripunova<sup>1</sup>,  
V.A. Gevorkyan<sup>2</sup>, P.P. Gladyshev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
21, Frunze Str., 21, 61002 Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> Russian-Armenian (Slavonic) University, 123, Hovsep Emin Str., 0051 Yerevan, Armenia

<sup>3</sup> "Dubna International University", 19, Universitetskaya Str., 141980 Dubna, Moscow Region, Russia

The influence of the thickness of the nanosized layer on the efficiency of photoelectric processes in solar cells (SC) ITO/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au formed on different substrates was investigated. For device structures formed on the glass substrates, the maximum efficiency of 11.4 % is achieved when thickness of the tin oxide layer is 80 nm. For flexible solar cells formed on a polyimide film, the maximum efficiency of 10.8 % is observed when thickness of the tin oxide layer is 50 nm. This paper discusses the physical mechanisms of the observed differences in efficiency.

**Keywords:** Thin film solar cells, Glass and flexible substrates, Tin dioxide, Cadmium sulfide and cadmium telluride.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W.L. Rance, J.M. Burst, D.M. Meysing, C.A. Wolden, M.O. Reese, L.A. Gessert, W.K. Metzger, P. Cimo, T.M. Barnes, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 143903 (2014).
2. J. Perrenoud, S. Buechleler, A.N. Tiwari, *Proceedings 34th IEEE Photovoltaic Specialist Conference Materials Research Society Spring Meeting, 695* (Philadelphia USA: 2013).
3. A.I. Skrypnyk, A.A. Zakharchenko, M.A. Khazhmuradov, E.M. Prokhorenko, V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenko, *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigation* No 3(85), 231 (2013).
4. H.A. Mohamed, *J. Appl. Phys.* **113**, 093105 (2013).
5. A. Fuchs, H.J. Schimper, A. Klein, W. Jaegermann, *Energ. Procedia* **10**, 149 (2011).
6. G.S. Khripunov, *Semiconductors* **40**, 113 (2006).
7. H.S. Raushenbach, *Solar Cells Array Design* (New York: Litton Education Publishing: 1980).
8. D.L. Batzner, G. Agostinelli, N. Campo, A. Romeo, H. Zogg, A.N. Tiwari, *Thin Solid Films* **431-432**, 421 (2003).
9. G.S. Khripunov, A.V. Mepiyts, *Ukr. J. Phys.* **49** № 12, 1188 (2004).
10. L. Kranz, J. Perrenoud, F. Pianezzi, C. Gretener, P. Rossbach, S. Buechleler, A.N. Tiwari, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* **105**, 213 (2012).
11. S.Y. Wei, S.B. Zang, *phys. status solidi b* **229**, 305 (2002).