

## Влияние наноразмерных слоев диоксида олова на эффективность пленочных солнечных элементов на основе CdS/CdTe

© Г.С. Хрипунов, А.В. Пирогов, Т.А. Горстка, В.А. Новиков, Н.А. Ковтун

Харьковский политехнический институт,  
61002 Харьков, Украина  
Государственный университет им. Т. Шевченко,  
03680 Киев, Украина

(Получена 8 апреля 2014 г. Принята к печати 16 июня 2014 г.)

С целью оптимизации конструктивно-технологических решений фронтальных электродов были проведены сопоставительные исследования выходных параметров и световых диодных характеристик пленочных солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au и SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/Au. Установлено, что большее напряжение и больший фактор заполнения солнечных элементов при использовании в конструкции пленок SnO<sub>2</sub>:F обусловлены меньшими значениями плотности диодного тока насыщения и последовательного сопротивления, что обусловлено устойчивостью кристаллической структуры и электрических свойств этих пленок к „хлоридной“ обработке базового слоя при изготовлении приборной структуры. В то же время солнечные элементы с фронтальным электродом ITO имеют большую плотность тока короткого замыкания, что обусловлено большим средним коэффициентом пропускания слоев ITO. Использование в конструкции фронтальных контактов ITO наноразмерных слоев SnO<sub>2</sub> позволяет увеличить эффективность солнечных элементов на основе CdS/CdTe до 11.4% за счет стабилизации кристаллической структуры и электрических свойств пленок ITO, а также возможности снижения толщины слоя сульфида кадмия без шунтирования приборной структуры.

### 1. Введение

Высокий коэффициент поглощения и оптимальная для фотоэлектрического преобразования солнечного излучения в наземных условиях ширина запрещенной зоны пленок теллурида кадмия обуславливают перспективность их использования в качестве базовых слоев эффективных и экономичных солнечных элементов (СЭ) [1]. Современные пленочные СЭ на основе сульфида и теллурида кадмия изготавливаются в тыльной конфигурации [2]. При реализации этой конструкции формирование приборной структуры осуществляется на стеклянной подложке, через которую солнечное излучение поступает в базовый слой. В таких СЭ вначале на подложке формируется пленка фронтального прозрачного электрода, а затем проводятся высоко-температурные технологические операции формирования гетеросистемы CdS/CdTe, в процессе которых исходные оптические и электрические свойства фронтального электрода могут изменяться. Рост поверхностного сопротивления фронтального электрода снижает эффективность солнечного элемента в результате увеличения последовательного сопротивления всей приборной структуры. Снижение коэффициента пропускания фронтального электрода приводит к уменьшению эффективности СЭ в результате снижения плотности потока фотонов, поступающих в базовый слой.

В конструкции пленочных СЭ на основе CdS/CdTe тыльной конфигурации в качестве фронтальных электродов традиционно используются слои ITO и SnO<sub>2</sub>:F [3]. Поэтому с целью оптимизации конструктивно-техно-

логических решений фронтальных электродов пленочных СЭ на основе CdS/CdTe были проведены сопоставительные исследования таких приборных структур с фронтальными электродами на основе оксидов индия и олова.

### 2. Методика эксперимента

Пленочные СЭ на основе CdS/CdTe формировались на стеклянных подложках с фронтальными электродами ITO и SnO<sub>2</sub>:F производства Nippon sheet company. Толщина пленок ITO и SnO<sub>2</sub>:F ( $d$ ) составляла 120 и 380 нм соответственно. Для ряда СЭ в вакуумной установке ВУП-5М на слои ITO методом неактивного магнетронного распыления на постоянном токе при температуре подложки 300°C мы наносили тонкие пленки нелегированного оксида олова. На поверхности трех типов фронтальных электродов (ITO, SnO<sub>2</sub>:F, ITO/SnO<sub>2</sub>) в модернизированной вакуумной установке УВН методом термического вакуумного испарения при температуре подложки 200°C осаждались пленки сульфида кадмия толщиной  $d_{CdS} = (0.2-0.4)$  мкм, а затем, без нарушения вакуума, слои теллурида кадмия толщиной 4 мкм. Полученные гетеросистемы подвергались „хлоридной“ обработке, которая является стандартной технологической операцией для изготовления эффективных СЭ на основе CdS/CdTe [2]. Для этого на поверхность CdTe методом термического вакуумного испарения без нагрева подложки наносились слои CdCl<sub>2</sub> и проводился отжиг на воздухе при температуре 430°C в течение 25 мин. После отжига осуществлялось травление базового слоя в растворе брома в метаноле. Это позволяло удалить продукты химической реакции, протекающей

† E-mail: khrip@ukr.net

**Таблица 1.** Выходные параметры и световые диодные характеристики СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au и SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/Au, при проведении „хлоридной“ обработки которых использовались слои хлорида кадмия различной толщины

Выходные параметры и световые диодные характеристики	ITO			SnO <sub>2</sub> :F		
	<i>d</i> <sub>CdCl<sub>2</sub></sub> = 0.2 мкм	<i>d</i> <sub>CdCl<sub>2</sub></sub> = 0.4 мкм	<i>d</i> <sub>CdCl<sub>2</sub></sub> = 0.6 мкм	<i>d</i> <sub>CdCl<sub>2</sub></sub> = 0.4 мкм	<i>d</i> <sub>CdCl<sub>2</sub></sub> = 0.6 мкм	<i>d</i> <sub>CdCl<sub>2</sub></sub> = 0.8 мкм
<i>J</i> , мА/см <sup>2</sup>	19.8	21.1	19.7	16.9	19.6	19.2
<i>U</i> , мВ	640	734	643	758	778	719
FF, отн. ед.	0.58	0.62	0.64	0.56	0.64	0.67
<i>η</i> , %	7.4	9.5	8.1	7.2	9.8	9.3
<i>J</i> <sub>ph</sub> , мА/см <sup>2</sup>	19.9	21.1	19.8	17.5	19.8	19.5
<i>R</i> <sub>p</sub> , Ом·см <sup>2</sup>	2.8	5.0	3.0	7.2	4.0	3.8
<i>R</i> <sub>sh</sub> , Ом·см <sup>2</sup>	855	580	624	405	680	556
<i>A</i> , отн. ед.	2.8	2.5	2.6	2.3	2.0	2.7
<i>J</i> <sub>0</sub> , А/см <sup>2</sup>	4.4 · 10 <sup>-7</sup>	6.3 · 10 <sup>-8</sup>	5.3 · 10 <sup>-7</sup>	5.7 · 10 <sup>-8</sup>	2.5 · 10 <sup>-8</sup>	4.1 · 10 <sup>-8</sup>

при „хлоридной“ обработке, и получить на поверхности CdTe наноразмерную прослойку теллура, необходимого для формирования эффективного туннельного контакта. После травления методом термического вакуумного испарения осаждались пленки Cu/Au толщиной 11 и 50 нм соответственно и проводился отжиг на воздухе при температуре 200°C в течение 20 мин.

Для определения выходных параметров: плотности тока короткого замыкания (*J*), напряжения холостого хода (*U*), фактора заполнения световой вольт-амперной характеристики (FF) и эффективности (*η*) при облучении СЭ световым потоком мощностью 100 мВт/см<sup>2</sup> измерялись их световые вольт-амперные характеристики (ВАХ). Использование светодиодного имитатора позволяло реализовывать световой поток со спектральным составом, соответствующим спектру солнечного излучения в наземных условиях.

Согласно эквивалентной схеме [4], количественными характеристиками фотоэлектрических процессов, протекающими при освещении СЭ, являются его световые диодные характеристики: плотность фототока (*J*<sub>ph</sub>), плотность диодного тока насыщения (*J*<sub>0</sub>), коэффициент идеальности диода (*A*), последовательное (*R*<sub>p</sub>) и шунтирующее (*R*<sub>sh</sub>) сопротивления, рассчитываемые на единицу активной площади приборной структуры. Связь эффективности СЭ со световыми диодными характеристиками в неявном виде описывается теоретической световой ВАХ СЭ [4]:

$$J_{ch} = -J_{ph} + J_0 \left\{ \exp \left[ \frac{e(U_{ch} - J_{ch}R_p)}{AkT} \right] - 1 \right\} + (U_{ch} - JR_p)/R_{sh}, \quad (1)$$

где *J*<sub>ch</sub> — плотность тока, протекающего через нагрузку; *e* — заряд электрона; *k* — постоянная Больцмана; *T* — температура солнечного элемента; *U*<sub>ch</sub> — падение напряжения на нагрузке.

Определение выходных параметров и световых диодных характеристик СЭ осуществлялось путем аппроксимации экспериментальных световых ВАХ теоретиче-

ским выражением (1). При аналитической обработке среднеквадратичное отклонение теоретической ВАХ от экспериментальной ВАХ не превосходило 10<sup>-8</sup>, что соответствует относительной погрешности в определении выходных параметров и световых диодных характеристик на уровне не более 1%.

### 3. Экспериментальные результаты

#### 3.1. Влияние фронтальных электродов ITO и SnO<sub>2</sub>:F на эффективность солнечных элементов на основе CdS/CdTe

Были измерены световые ВАХ лабораторных образцов СЭ ITO/CdS/CdTe/Cu/Au, для которых „хлоридная“ обработка проводилась с использованием слоев хлорида кадмия (*d*<sub>CdCl<sub>2</sub></sub>) различной толщины. Путем аналитической обработки световых ВАХ были определены выходные параметры и световые диодные характеристики изготовленных СЭ. Было выделено несколько характерных диапазонов толщин слоя хлорида кадмия, которые соответствуют смене физических механизмов влияния *d*<sub>CdCl<sub>2</sub></sub> на *η*. Эффективность, выходные параметры и световые диодные характеристики СЭ, которые соответствуют этим диапазонам, представлены в табл. 1. Анализ табл. 1 показывает, что возрастание *d*<sub>CdCl<sub>2</sub></sub> до 0.4 мкм приводит к росту *η* до 9.5% в результате роста *U*, *J* и FF. Дальнейший рост *d*<sub>CdCl<sub>2</sub></sub> до 0.6 мкм приводит к снижению эффективности до 8.1% за счет уменьшения *U* и *J*.

Для анализа количественного влияния световых диодных характеристик на экспериментально наблюдаемое изменение эффективности проводилось математическое моделирование влияния световых диодных характеристик на теоретическую световую ВАХ. Для моделирования были выбраны световые диодные характеристики СЭ с *η* = 7.4 и 9.5% (табл. 1). Для каждого СЭ при фиксированном наборе четырех световых диодных характеристик, которые были получены путем аналитической обработки экспериментальных световых

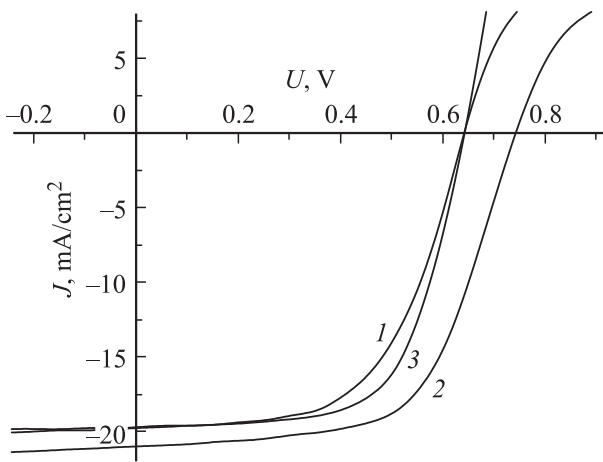


Рис. 1. Световые ВАХ СЭ ИТО/CdS/CdTe/Cu/Au: 1 —  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.20$ , 2 —  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.4$ , 3 —  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.6$  мкм.

ВАХ, производилось моделирование влияния изменения в экспериментально определенном диапазоне значений оставшейся диодной характеристики на эффективность. Для этого в теоретическое выражение (1) подставлялись значения пяти световых диодных характеристик, строилась теоретическая световая ВАХ и по ней определялась теоретическая эффективность СЭ. Затем операция многократно повторялась для других наборов световых диодных характеристик. В результате мы получали теоретическую зависимость эффективности СЭ от изменения одной диодной характеристики в выбранном интервале значений при фиксированных четырех остальных (см., например, рис. 2). На этих графиках также откладывались экспериментальные значения  $\eta$ . Было установлено, что рост эффективности СЭ ИТО/CdS/CdTe/Cu/Au от  $\eta = 7.4\%$  до  $\eta = 9.5\%$  при увеличении толщины хлорида кадмия от  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.2$  мкм до  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.4$  мкм обусловлен снижением плотности диодного тока насыщения от  $J_0 = 4.4 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> до  $J_0 = 6.3 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> (см. табл. 1 и рис. 2, a). Изменение остальных диодных характеристик не оказывает существенного влияния на экспериментально наблюдаемое изменение эффективности (см. рис. 2, b). Снижение плотности диодного тока насыщения свидетельствует об улучшении качества сепарирующего барьера и росте времени жизни генерированных под действием света неравновесных носителей заряда. Было показано, что экспериментально наблюдаемое снижение эффективности от  $\eta = 9.5\%$  до  $\eta = 8.1\%$  при дальнейшем увеличении толщины хлорида кадмия от  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.4$  мкм до  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.6$  мкм может быть промоделировано ростом плотности диодного тока насыщения от  $J_0 = 6.3 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> до  $J_0 = 5.3 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> (см. табл. 1 и рис. 2, b).

Было исследовано влияния толщины слоя хлорида кадмия при проведении „хлоридной“ обработки на выходные параметры и световые диодные характеристики СЭ SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/Au. Аналитическая обработка

световых ВАХ СЭ SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/Au (рис. 1, b) показывает, что при толщине слоя CdCl<sub>2</sub> 0.6 мкм наблюдается максимальная эффективность — 9.7%. Анализ табл. 1 показывает, что увеличение  $\eta$  до 9.7%, при возрастании толщины слоя хлорида кадмия до  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.6$  мкм, происходит в результате роста всех выходных параметров. Последующее увеличение  $\eta = 9.3\%$  приводит к снижению эффективности до  $\eta = 9.3\%$  за счет снижения всех выходных параметров. Анализ количественного влияния световых диодных характеристик на экспериментально наблюдаемое изменение эффективности показал, что на рост  $\eta$  при увеличении  $d_{\text{CdCl}_2}$  до 0.6 мкм в равной степени оказывают влияние снижение последовательного сопротивления, плотность диодного тока насыщения и рост плотности фототока. Снижение  $\eta = 9.3\%$  при росте  $d_{\text{CdCl}_2}$  до 0.8 мкм, согласно результатам моделирования, обусловлено ростом  $J_0$  и уменьшением  $J_{\text{ph}}$ .

Сопоставление выходных характеристик и световых диодных параметров СЭ ИТО/CdS/CdTe/Cu/Au и

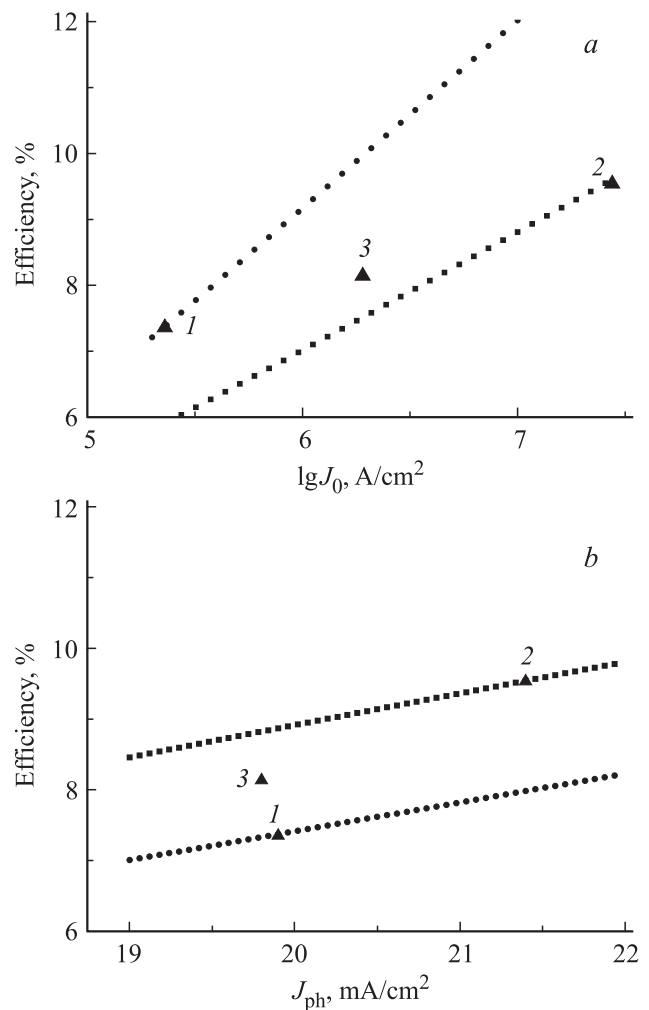


Рис. 2. Моделирование влияния световых диодных характеристик на кпд СЭ ИТО/CdS/CdTe/Cu/Au: 1 —  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.2$ , 2 —  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.4$ , 3 —  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.6$  мкм.

$\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Cu}/\text{Au}$  показывает, что большее напряжение и больший фактор заполнения световых ВАХ приборных структур с прозрачным фронтальным электродом  $\text{SnO}_2:\text{F}$  обусловлены меньшими значениями плотности диодного тока насыщения и последовательного сопротивления соответственно. В то же время необходимо отметить, что СЭ с фронтальным электродом ИТО имеют большую плотность тока короткого замыкания, что обусловлено большим значением плотности фототока.

### 3.2. Изменение кристаллической структуры и свойств фронтальных электродов в процессе изготовления пленочных СЭ на основе $\text{CdS}/\text{CdTe}$

Самой высокотемпературной технологической операцией при изготовлении СЭ на основе  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  является „хлоридная“ обработка, которая предполагает отжиг на воздухе. Поэтому в работе были исследованы кристаллическая структура, оптические и электрические свойства пленок ИТО и  $\text{SnO}_2:\text{F}$  до и после отжига на воздухе при температуре  $430^\circ\text{C}$  в течение 25 мин, что соответствует режимам проведения „хлоридной“ обработки.

Было установлено, что в пленках ИТО после проведения „хлоридной“ обработки приборной структуры  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  наблюдается смена преимущественной ориентации с направления  $[001]$  на направление  $[111]$ , что оценивалось по изменению соотношения величин соответствующих дифракционных максимумов [5]. Согласно литературным данным [6,7], при недостатке кислорода формируются пленки ИТО, ориентированные в направлении  $[001]$ , а при избытке — в направлении  $[111]$ . Это обусловлено количественным соотношением между атомами кислорода и индия в кристаллографических плоскостях  $(002)$  и  $(222)$ , которые соответствуют указанным выше кристаллографическим направлениям. Поэтому зафиксированное экспериментально изменение направления преимущественной ориентации в исследуемых нами пленках ИТО является закономерным следствием высокотемпературного отжига на воздухе. Было также установлено, что отжиг на воздухе приводит к уширению дифракционных максимумов, что свидетельствует о снижении качества кристаллической структуры пленок ИТО за счет одного или одновременно нескольких негативных процессов: роста микродеформаций, уменьшения размеров областей когерентного рассеивания, увеличения плотности дефектов упаковки и двойников.

После отжига на воздухе пленок ИТО было зафиксировано возрастание в несколько раз удельного сопротивления ( $\rho$ ) с соответствующим ростом поверхностного сопротивления ( $R_{\square}$ ) (табл. 2). Исследование подвижности носителей ( $\mu$ ) и концентрации основных носителей заряда ( $n$ ) в пленках ИТО до и после отжига свидетельствует о том, что наблюдаемое снижение удельного сопротивления обусловлено уменьшением  $n$  (табл. 2). Уменьшение концентрации основных носителей заряда

**Таблица 2.** Влияние отжига на воздухе при температуре  $430^\circ\text{C}$  в течение 25 мин на оптические и электрические свойства фронтальных электродов ИТО и  $\text{SnO}_2:\text{F}$

Фронтальные электроды	До отжига		После отжига	
	ИТО	$\text{SnO}_2:\text{F}$	ИТО	$\text{SnO}_2:\text{F}$
$d$ (нм)	120	380	120	380
$\mu$ ( $\text{cm}^2/\text{B}$ )	27	34	30	33
$n$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.8 \cdot 10^{21}$	$3.9 \cdot 10^{20}$	$6.0 \cdot 10^{20}$	$3.8 \cdot 10^{20}$
$\rho$ (Ом·см)	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$4.9 \cdot 10^{-4}$
$R_{\square}$ (Ом/□)	10.8	12.4	29.6	13.1
$T_{450-900}$ (%)	82.8	78.3	86.8	78.5

после отжига на воздухе может быть связано как со снижением концентраций вакансий кислорода, которые являются мелкими донорами, так и переходом олова из электрически активного состояния (узлы подрешетки индия) в электрически неактивное состояние, которое обусловлено формированием оксидов олова на развитой зернограничной поверхности пленок ИТО.

Исследование оптических свойств пленок ИТО показало, что отжиг на воздухе приводит к увеличению среднего коэффициента пропускания пленки на стеклянной подложке ( $T_{450-900}$ ) в диапазоне  $(450-900 \text{ нм})$ , который соответствует спектральному интервалу фоточувствительности базовых слоев теллурида кадмия. Повидимому, это обусловлено уменьшением концентрации вакансий кислорода во фронтальном электроде при отжиге на воздухе.

Изменения кристаллической структуры, электрических и оптических свойств (табл. 2) пленок  $\text{SnO}_2:\text{F}$  после отжига на воздухе зафиксировано не было. Это обусловлено химической инертностью фтора и, вероятно, более низкой концентрацией вакансий кислорода в пленках оксида олова. Большая стабильность кристаллической структуры пленок  $\text{SnO}_2:\text{F}$  обусловила получение более качественного сепарирующего барьера в СЭ  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Cu}/\text{Au}$ , который характеризуется более низкими значениями плотности тока диодного насыщения по сравнению с СЭ ИТО/ $\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Cu}/\text{Au}$ . Меньшее значение последовательного сопротивления СЭ  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Cu}/\text{Au}$  обусловлено меньшим поверхностным сопротивлением слоя  $\text{SnO}_2:\text{F}$  после отжига на воздухе по сравнению со слоями ИТО (табл. 2) и большой оптимальной толщиной слоя хлорида кадмия при проведении „хлоридной“ обработки, что позволило более эффективно пролегирировать базовый слой теллурида кадмия.

Большее значение плотности фототока в СЭ ИТО/ $\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Cu}/\text{Au}$  по сравнению с СЭ  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Cu}/\text{Au}$  обусловлено большим коэффициентом пропускания слоев ИТО по сравнению со слоями  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (табл. 2), что обеспечивает поступление в базовый слой большей плотности потока фотонов.

Таблица 3. Выходные параметры и световые диодные характеристики СЭ ИТО/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au

Выходные параметры и световые диодные характеристики	$d_{\text{CdS}} = 0.4 \text{ мкм}$		$d_{\text{CdS}} = 0.2 \text{ мкм}$		
	$d_{\text{SnO}_2} = 50 \text{ нм}$	$d_{\text{SnO}_2} = 80 \text{ нм}$	$d_{\text{SnO}_2} = 50 \text{ нм}$	$d_{\text{SnO}_2} = 80 \text{ нм}$	$d_{\text{SnO}_2} = 100 \text{ нм}$
$J$ , mA/cm <sup>2</sup>	20.5	19.6	21.4	20.9	20.5
$U$ , мВ	761	792	649	765	760
FF, отн. ед.	0.67	0.64	0.52	0.71	0.63
$\eta$ , %	10.5	9.9	7.2	11.4	9.9
$J_{\text{ph}}$ , mA/cm <sup>2</sup>	20.8	20.3	21.6	21.3	20.7
$R_{\text{n}}$ , Ом·см <sup>2</sup>	2.2	5.4	1.8	2.8	4.2
$R_{\text{sh}}$ , Ом·см <sup>2</sup>	760	1200	450	800	700
$A$ , отн. ед.	2.3	1.9	2.7	2.1	2.2
$J_0$ , A/cm <sup>2</sup>	$2.7 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-8}$	$4.3 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^{-8}$	$2.8 \cdot 10^{-8}$

### 3.3. Исследование СЭ ИТО/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au

Для объединения высокой прозрачности фронтальных электродов ИТО и стабильности фронтальных электродов SnO<sub>2</sub>:F для формирования СЭ на основе CdS/CdTe были использованы двуслойные фронтальные электроды ИТО/SnO. Толщина хлорида кадмия при проведении „хлоридной“ обработки СЭ ИТО/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au составляла 0.6 мкм, что соответствовало оптимальным значениям  $d_{\text{CdCl}_2}$  для СЭ SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/Au.

Аналитическая обработка световых ВАХ показала, что рост толщины слоя оксида олова ( $d_{\text{SnO}_2}$ ) в составе двуслойных электродов ИТО/SnO до  $d_{\text{SnO}_2} = 50 \text{ нм}$  приводит к росту эффективности СЭ ИТО/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au до  $\eta = 10.5\%$ . Было установлено, что напряжение холостого хода и фактор заполнения световой ВАХ в СЭ ИТО/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au выше, чем в приборных структурах с фронтальным электродом ИТО, а плотность тока короткого замыкания — выше, чем для СЭ с фронтальным электродом SnO<sub>2</sub>:F (табл. 1 и 3). Моделирование показывает, что рост эффективности СЭ ИТО/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au по сравнению с СЭ ИТО/CdS/CdTe/Cu/Au обусловлен снижением плотности диодного тока насыщения и уменьшением последовательного сопротивления. Моделирование также показало, что рост эффективности СЭ ИТО/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au по сравнению с СЭ SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/Au обусловлен увеличением плотности фототока.

Дальнейший рост толщины наноразмерной прослойки диоксида олова до  $d_{\text{SnO}_2} = 80 \text{ нм}$  приводит к росту напряжения холостого хода до  $U = 792 \text{ мВ}$ , однако при этом снижается плотность тока короткого замыкания и фактор заполнения световой ВАХ, что приводит к снижению  $\eta$  до 9.9%. Моделирование показывает, что определяющее влияние на снижение КПД оказывает снижение плотности фототока и рост последовательного сопротивления.

Согласно литературным данным [8], значительные потери фототока обусловлены поглощением света в

слое сульфида кадмия. Поэтому нами были изготовлены СЭ ИТО/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au, у которых толщина слоя сульфида кадмия была снижена от  $d_{\text{CdS}} = 0.4 \text{ мкм}$  до  $d_{\text{CdS}} = 0.2 \text{ мкм}$ . Толщина слоя оксида олова составляла  $d_{\text{SnO}_2} = 50 \text{ нм}$ , что соответствовало максимальной эффективности СЭ ИТО/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au при  $d_{\text{CdS}} = 0.4 \text{ мкм}$ . Снижение толщины слоя сульфида кадмия при толщине слоя оксида олова 50 нм приводит к росту плотности тока короткого замыкания, что обусловлено увеличением плотности потока фотонов, поступающих в базовый слой. Однако при этом наблюдалось снижение напряжения холостого хода и фактора заполнения, что приводит к снижению эффективности. Моделирование показало, что снижение  $\eta$  обусловлено снижением шунтирующего сопротивления и ростом плотности диодного тока насыщения. Проведенные нами ранее исследования показали [9], что снижение КПД при снижении толщины слоя сульфида кадмия обусловлено шунтированием основного сепарирующего барьера гетеропереходом  $n$ -ИТО– $p$ -CdTe, который в силу существенного различия в периодах решетки гетеропартнеров имеет высокую плотность диодного тока насыщения и

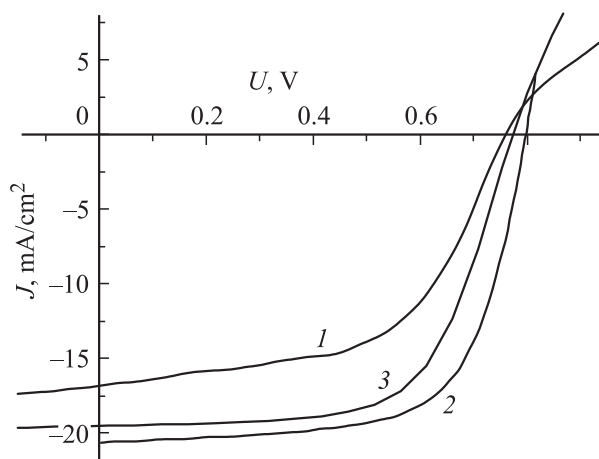
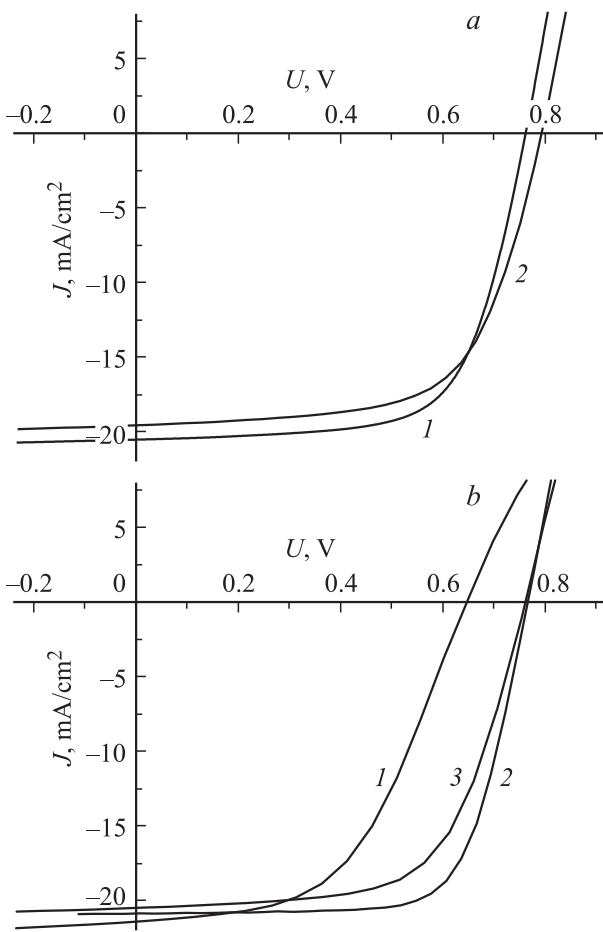


Рис. 3. Световые ВАХ СЭ SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/Au: 1 —  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.4$ , 2 —  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.6$ , 3 —  $d_{\text{CdCl}_2} = 0.8 \text{ мкм}$ .



**Рис. 4.** Световые ВАХ СЭ ITO/SnO/CdS/CdTe/Cu/Au. а) 1 —  $d_{\text{CdS}} = 0.4 \text{ мкм}$ ,  $d_{\text{SnO}_2} = 50 \text{ нм}$ ; 2 —  $d_{\text{CdS}} = 0.4 \text{ мкм}$ ,  $d_{\text{SnO}_2} = 80 \text{ нм}$ . б) 1 —  $d_{\text{CdS}} = 0.2 \text{ мкм}$ ,  $d_{\text{SnO}_2} = 50 \text{ нм}$ ; 2 —  $d_{\text{CdS}} = 0.2 \text{ мкм}$ ,  $d_{\text{SnO}_2} = 80 \text{ нм}$ ; 3 —  $d_{\text{CdS}} = 0.2 \text{ мкм}$ ,  $d_{\text{SnO}_2} = 100 \text{ нм}$ .

меньшее шунтирующее сопротивление. Поэтому нами при толщине слоя сульфида кадмия 0.2 мкм, для исключения шунтирования основного сепарирующего барьера, была увеличена толщина слоя оксида олова. Было установлено, что при толщине слоя сульфида кадмия 0.2 мкм увеличение толщины слоя оксида олова до  $d_{\text{SnO}_2} = 80 \text{ нм}$  приводит к росту эффективности до  $\eta = 11.4\%$ , что обусловлено ростом напряжения холостого хода и фактора заполнения световой ВАХ. Наблюдаемая оптимизация фотоэлектрических процессов, согласно результатам моделирования, обусловлена ростом шунтирующего сопротивления и снижением плотности диодного тока насыщения. Таким образом, рост толщины слоя оксида олова до  $d_{\text{SnO}_2} = 80 \text{ нм}$  компенсирует снижение толщины слоя сульфида кадмия до 0.2 мкм и приводит к росту эффективности за счет роста плотности фототока и снижения последовательного сопротивления.

При дальнейшем увеличении толщины слоя оксида олова до  $d_{\text{SnO}_2} = 100 \text{ нм}$  наблюдается снижение эффективности, что обусловлено уменьшением плотности то-

ка короткого замыкания и фактора заполнения световой ВАХ. Моделирование влияния диодных характеристик на эффективность СЭ показывает, что снижение эффективности обусловлено уменьшением плотности фототока и ростом последовательного сопротивления. Необходимо отметить, что при толщинах сульфида кадмия 0.2 мкм увеличение толщины слоя оксида олова до  $d_{\text{SnO}_2} = 100 \text{ нм}$  не приводит к росту напряжения холостого хода, в отличие от наблюдаемого экспериментально возрастания этого выходного параметра для СЭ с толщиной слоя сульфида кадмия 0.4 мкм при увеличении толщины слоя оксида олова до  $d_{\text{SnO}_2} = 80 \text{ нм}$ . Таким образом, дальнейшее снижение толщины слоя сульфида кадмия уже не может компенсироваться дальнейшим ростом толщины слоя оксида олова.

#### 4. Заключение

Использование в составе фронтальных электродов солнечных элементов ITO/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au наноразмерных прослоек диоксида оксида олова при проведении „хлоридной“ обработки приборных структур CdS/CdTe минимизирует поступление кислорода в пленки ITO. Это позволяет избежать ограничения эффективности СЭ, связанного с ростом последовательного сопротивления приборной структуры в результате снижения концентрации основных носителей заряда в пленках ITO. Кроме того, при использовании фронтальных контактов ITO/SnO<sub>2</sub> в конструкции СЭ на основе CdS/CdTe экспериментально зафиксирован рост напряжения холостого хода, который обусловлен снижением плотности диодного тока насыщения в результате стабилизации кристаллической структуры пленок ITO к „хлоридной“ обработке.

Наличие наноразмерной прослойки высокоомного диоксида олова на межфазной границе ITO/CdS позволяет предотвратить шунтирование основного сепарирующего барьера гетеропереходом *n*-ITO–*p*-CdTe при снижении толщины слоя CdS для увеличения плотности потока фотонов, поступающий в базовый слой CdTe. При снижении толщины слоя сульфида кадмия до 0.2 мкм, толщине слоя оксида олова 80 нм эффективность лабораторных образцов пленочных солнечных элементов ITO/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Cu/Au достигает 11.4%.

#### Список литературы

- [1] J. Han, C. Spanheimer, G. Haindl et al. *Solar Energy Mater. and Solar Cells*, **95** (3), 816 (2011).
- [2] M. Hadrich, C. Heisler, U. Reislöhner, C. Kraft, H. Metzner. *Thin Sol. Films*, **519** (21), 7156 (2011).
- [3] M.A. Martinez, C. Gullien, C. Gutierrez, J. Herrero. *Solar Energy Mater. and Solar Cells*, **43** (4), 297 (1996).
- [4] H.S. Raushenbach. *Solar Cells Array Design* (N.Y., Litton Uducation Publishing, 1980).
- [5] H.R. Moutinho, F.S. Hasoon, F. Abulfotuh, K. Kazmerski. *J. Vacuum Sci. Technol. A*, **13** (6), 2877 (1995).

- [6] G. Guillen, J. Herrero. *Vacuum*, **67**, 611 (2002).
- [7] G. Guillen, J. Herrero. *Thin Sol. Films*, **431–432**, 403 (2003).
- [8] L.A. Kosyachenko, E.V. Grushko, X. Mathew. *Solar Energy Mater. and Solar Cells*, **96**, 231 (2012).
- [9] Г.С. Хрипунов, Б.Т. Бойко, Г.І. Копач и др. *Науч. весник Черновецкого уни-та*, **237**, 80 (2005).

*Редактор Т.А. Полянская*

## **Influence of tin dioxide nanoscale layers on the efficiency thin films CdS/CdTe solar cells**

*G.S. Khrypunov, O.V. Pirohov, T.A. Gorstka, V.A. Novikov, N.A. Kovtun*

Kharkiv Polytechnic Institute,  
61002 Kharkiv, Ukraine  
National Taras Shevchenko University,  
03680 Kyiv, Ukraine

**Abstract** For optimization of the design and technological solutions frontal electrodes comparative research external parameters and light diode characteristics thin film solar cells ITO/CdS/CdTe/Cu/Au and SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu/Au has been provided. It was found that higher open circuit voltage and higher fill factor of solar cells for using SnO<sub>2</sub>:F frontal electrodes due to lower values of the saturation diode current density and the series resistance in result resistant crystal structure and electrical properties of this films to the „chloride“ treatment CdTe base layer at manufacture of the device structure. At the same time solar cells with ITO front electrode have a higher short-circuit current density due to the high average transmittance layers of ITO. Using contacts in the design of the ITO frontal electrodes nanoscale SnO<sub>2</sub> layers increase the efficiency solar cells of CdS/CdTe base up to 11.4% due to the stabilization of the crystal structure and electrical properties of films of ITO, as well as the possibility of reducing the thickness of the layer of cadmium sulfide without shunting device structure.