

# Электрические и фотоэлектрические свойства солнечных элементов $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$ , изготовленных электрохимическим методом

© А.Ш. Абдинов<sup>¶</sup>, Н.М. Мехтиев, Г.М. Мамедов, С.И. Амирова

Бакинский государственный университет,  
370148 Баку, Азербайджан

(Получена 30 января 2006 г. Принята к печати 28 февраля 2006 г.)

Методом электрохимического осаждения изготовлены солнечные элементы на основе гетеропереходов  $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$ . Изучены зависимости их электрических и фотоэлектрических свойств от режима термической обработки. Показано, что термическая обработка снижает туннельные токи почти на 2 порядка величины. Определен оптимальный режим термической обработки ( $t = 300^\circ\text{C}$  и  $\tau = 9$  мин), при котором обеспечивается максимальная фоточувствительность исследуемых гетеропереходов ( $I_{sc} \approx 21.2 \text{ mA/cm}^2$ ,  $U_{oc} \approx 813 \text{ mV}$ ,  $\eta = 14.7\%$ ).

PACS: 84.60.Jt; 82.45.Qr

## 1. Введение

Широкое применение теллурида кадмия в качестве материала для солнечных элементов продиктовано его высокой фоточувствительностью и оптимальным для преобразования солнечной энергии значением ширины запрещенной зоны [1–4]. В мировой научной литературе сообщается о достижении эффективности солнечных элементов (СЭ) на основе гетеропереходов  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  выше 16% [1]. Однако авторы работы [5] полагают, что тройные соединения  $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}$  и теллурид кадмия являются более подходящими парами, чем  $\text{CdS}$  и  $\text{CdTe}$ . Так, показано, что использование  $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}$  позволяет свести к минимуму величину разрыва в зонах проводимости контактирующих материалов и уменьшить концентрацию дефектов на границе раздела.

В настоящей работе нами изучены вольт-амперные (ВАХ), вольт-фарадные (ВФХ) характеристики и спектральное распределение тока короткого замыкания (СРТ) электрохимически осажденных СЭ  $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$ , при различных режимах термической обработки (ТО) на открытом воздухе при  $t = 100\text{--}400^\circ\text{C}$  в течение 1–20 мин. Коэффициент полезного действия СЭ ( $\eta$ ), напряжение холостого хода ( $U_{oc}$ ) и плотность тока короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) определялись при мощности светового потока  $W = 100 \text{ мВт/см}^2$ .

## 2. Эксперимент

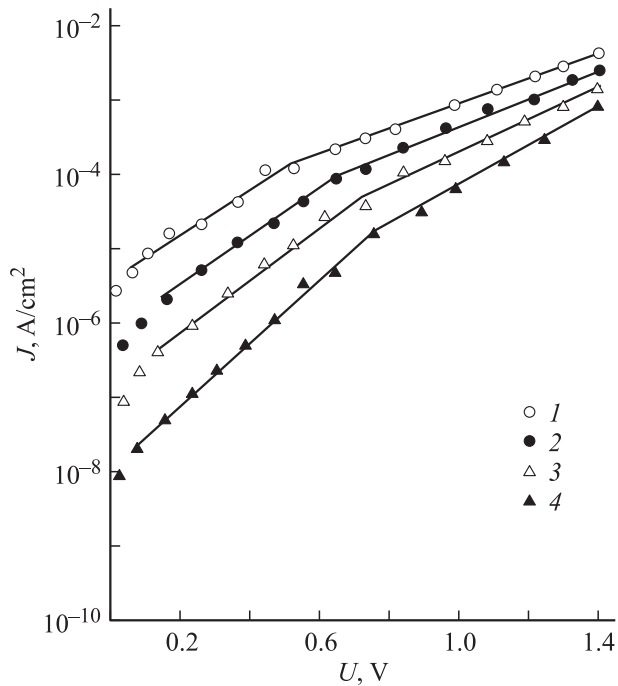
Для изготовления СЭ на подложки из стекла со слоем  $\text{SnO}_2$  толщиной 0.5 мкм с помощью методики, описанной в [6,7], из водного раствора  $\text{CdSO}_4$  (0.2 М) +  $\text{ZnSO}_4$  (0.5 М) +  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (10 мМ) электрохимическим способом осаждались пленки  $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}$  толщиной 1 мкм, при комнатной температуре. Все полученные пленки обладали электронной проводимостью,

а их удельное сопротивление существенно зависело от pH (добавлением в раствор  $\text{HCl}$  и  $\text{NaOH}$ ) раствора, так как с ростом pH удельное сопротивление пленки уменьшается. Путем контроля pH удельное сопротивление изменено от 3000 до 200 Ом·см. Концентрация электронов при комнатной температуре в пленках составляла  $n \approx (2\text{--}8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , подвижность  $\mu_n \approx 100\text{--}130 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  соответственно. Состав пленок определялся с помощью рентгенодифрактометрического анализа по известной зависимости параметра кристаллической решетки от состава. Полученные пленки  $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}$  сразу после осаждения повторно погружались в химический раствор  $\text{CdSO}_4$  (1.0 М) +  $\text{TeO}_2$  (0.1 М). Потенциал осаждения при этом составлял  $-0.6 \text{ В}$ . В результате реакции на поверхности структур  $\text{стекло}/\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}$  образовывался тонкий (3–4 мкм) слой теллурида кадмия  $p$ -типа. После травления структур в растворе бромметанола на поверхности пленок  $\text{CdTe}$  термическим испарением формировались традиционные омические контакты  $\text{Cu}/\text{графит}$  [8]. Активная площадь полученных таким способом СЭ при оптимальных условиях достигала  $\sim 0.5\text{--}3 \text{ см}^2$ .

## 3. Результаты и их обсуждение

Исследование ВАХ образцов показало, что все полученные структуры  $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$  обладают выпрямляющими свойствами. Пропускное направление, как правило, реализуется при положительной полярности внешнего смещения на  $p$ - $\text{CdTe}$ . Вольт-амперные характеристики одного из типичных образцов при прямом смещении в полулогарифмическом масштабе представлены на рис. 1. Кривые были измерены до (кривая 1) и после ТО при температуре  $100\text{--}400^\circ\text{C}$  в течение 1–20 мин (кривые 2–4). Как видно из рисунка, кривые содержат два участка. На первом участке до 0.9 В доминируют туннельно-рекомбинационные токи, кото-

<sup>¶</sup> E-mail: mhhuseyng@yahoo.co.uk



**Рис. 1.** Прямые ветви вольт-амперных характеристик солнечных элементов  $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$  до (1) и после термической обработки (2-4):  $t$ , °C: 2 — 180, 3 — 240, 4 — 300;  $\tau$ , мин: 2 — 3, 3 — 7, 4 — 9.

рые описываются уравнением [9]

$$I = I_0 \exp(eU/akT),$$

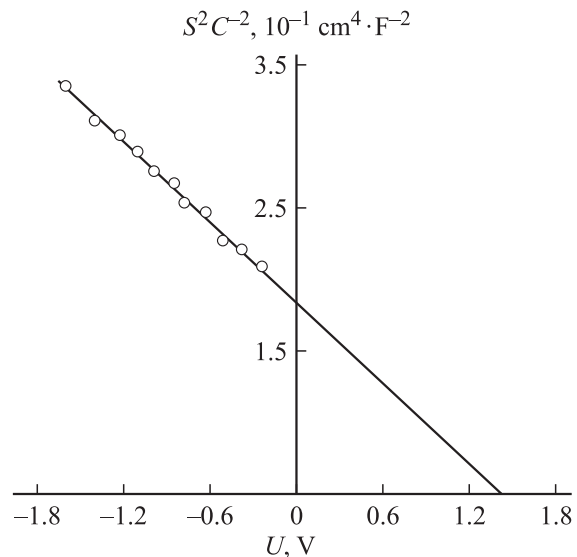
где  $\alpha$  — коэффициент идеальности. Для исходных структур значение  $\alpha$  изменяется от 2.1 до 4.2 для первого и второго участка соответственно. После ТО механизм токопереноса существенно изменяется: туннельные токи резко уменьшаются, что свидетельствует об уменьшении числа дефектов, связанных с несоответствиями постоянных решеток контактирующих материалов и участвующих в многоступенчатом процессе формирования туннельного тока. Для структур, отожженных при температуре 300°C в течение 9 мин, туннельные токи уменьшаются почти на 2 порядка, так как коэффициент идеальности ВАХ принимает значения 1.5 и 2.8 для первого и второго участка соответственно.

Анализ ВФХ солнечных элементов  $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$  показал, что в интервале частот 100 кГц–1 МГц зависимость линеаризуется в координатах  $C^{-2} = f(U)$ . Это указывает на то, что контакт является резким (рис. 2). Значение высоты барьера, полученное экстраполяцией зависимости  $C^{-2}-U$  на ось абсцисс, составляет  $V_d = 1.43$  В.

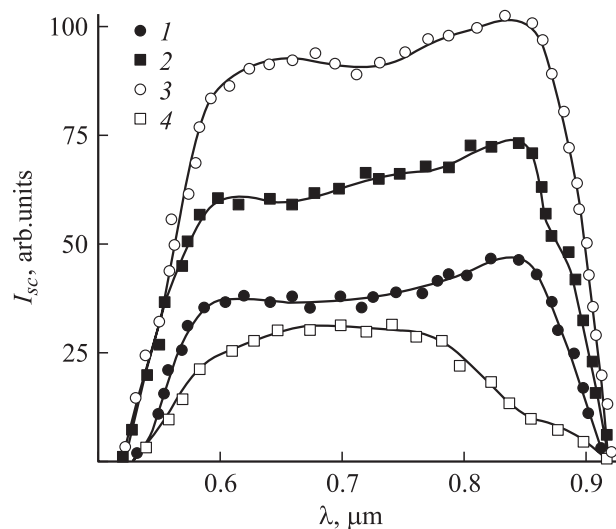
На рис. 3 приведены спектральные распределения плотностей фототока короткого замыкания СЭ  $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$ . До проведения ТО все образцы проявляли слабую фоточувствительность во всем спектральном диапазоне (кривая 1). При освещении имитатором солнца мощностью  $W = 100$  мВт/см<sup>2</sup> нетермо-

обработанные СЭ имели следующие фотоэлектрические параметры:  $I_{sc} \approx 5.43$  мА/см<sup>2</sup>,  $U_{oc} \approx 0.58$  В,  $\eta = 6.46\%$ .

Отжиг на воздухе приводил к значительному увеличению фоточувствительности пленочных элементов. После ТО при  $t = 300^\circ\text{C}$  и  $\tau = 9$  мин элементы обладали значениями плотности фототока короткого замыкания, напряжения холостого хода, коэффициента полезного действия:  $I_{sc} = 21.2$  мА/см<sup>2</sup>,  $U_{oc} = 813$  мВ,  $\eta = 14.7\%$ . Из спектральных зависимостей видно, что коротковолновый максимум при  $\lambda_1 = 0.6$  мкм обусловлен поглощением в  $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}$ , а длинноволновая граница фоточувствительности соответствует ширине запрещенной зоны



**Рис. 2.** Вольт-фарадные характеристики солнечных элементов  $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$ , подвергнутых термической обработке при  $t = 300^\circ\text{C}$  и  $\tau = 9$  мин.



**Рис. 3.** Спектральное распределение тока короткого замыкания солнечных элементов  $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$ , снятых до (1) и после термической обработки (2-4):  $t$ , °C: 2 — 250, 3 — 300, 4 — 450;  $\tau$ , мин: 2 — 5, 3 — 9, 4 — 20.

пленок CdTe ( $E_g = 1.44$  эВ,  $\lambda_2 = 0.86$  мкм). Последующий отжиг СЭ на воздухе при  $t \geq 450^\circ\text{C}$  и  $\tau \geq 15$  мин приводит к резкому уменьшению фоточувствительности (кривая 4). Эти изменения, очевидно, связаны с процессами десорбции и адсорбции кислорода на межзеренных границах поликристаллической структуры [6,7].

В заключение можно сказать, что, выбирая оптимальные режимы электрохимического осаждения и ТО, единым технологическим циклом можно изготовить экономически выгодные пленочные солнечные элементы  $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$ , параметры которых не уступают своим аналогам, существующим в настоящее время.

## Список литературы

- [1] K. Durose, P.R. Edwards, D.P. Halliday. *J. Cryst. Growth*, **197**, 733 (1999).
- [2] M.A. Green. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **9**, 123 (2001).
- [3] Г.С. Хрипунов. *ФТП*, **39**, 1266 (2005).
- [4] P.R. Edwards, S.A. Galloway, K. Durose. *Thin Sol. Films*, **372**, 385 (2000).
- [5] Т.М. Razykov, В.Кх. Kadyrov, М.А. Khodyaeva. *Phys. Status Solidi A*, **91**, 87 (1985).
- [6] Г.М. Мамедов, Г.А. Гасанов, С.И. Аморова. *Неорг. матер.*, **41**, 276 (2005).
- [7] A.Sh. Abdinov, N.M. Mamedov, H.A. Hasanov, S.I. Amirova. *Thin Sol. Films*, **480–481**, 388 (2005).
- [8] N. Suyama, T. Arita, Y. Nishiyama, N. Ueno, S. Kitamura, M. Morono. *Conf. Record 26th IEEE Photovolt. Specialist Conference* (Anaheim, USA, 1997) p. 419.
- [9] Б.Л. Шарма, Р.Л. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Радио и связь, 1979).

Редактор Л.В. Беляков

## Electrical and photoelectrical properties of electrochemically deposited $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$ solar cells

A.Sh. Abdinov, N.M. Mekhtiev, N.M. Mamedov, S.I. Amirova

Baku State University,  
370148 Baku, Azerbaijan

**Abstract** Solar cells based on  $\text{SnO}_2/\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}/\text{CdTe}$  heterojunctions are produced by a method of electrochemical deposition. Their electric and photoelectric properties are investigated as a function of the thermal annealing regime. It is shown that the thermal annealing reduces the tunnel currents by two orders of magnitude. The highest photosensitivity has been achieved under annealing at  $300^\circ\text{C}$  for 9 min: has been  $V_{oc} = 813$  mV,  $I_{sc} = 21.2$  mA/cm<sup>2</sup>,  $\eta = 14.7\%$ .