

Особенности световой вольт-амперной характеристики двусторонне чувствительных солнечных элементов на основе тонких базовых слоев CdTe

© А.В. Мериуц[†], Г.С. Хрипунов, Т.Н. Шелест, Н.В. Дейнеко

Национальный технический университет „Харьковский политехнический институт“,
61002 Харьков, Украина

(Получена 22 октября 2009 г. Принята к печати 12 ноября 2009 г.)

Показано, что особенности световых вольт-амперных характеристик двусторонне чувствительных солнечных элементов glass/SnO₂:F/CdS/CdTe/Cu/ITO с тонким базовым слоем связаны с возникновением фотовольтаического эффекта на тыльном контакте. Предложена эквивалентная схема исследуемой приборной структуры, которая учитывает наличие двух освещенных диодов — фронтального диода (основного сепарирующего барьера) и диода на тыльном контакте.

1. Введение

Одним из современных направлений повышения эффективности фотоэлектрического преобразования солнечной энергии является разработка тандемных солнечных элементов (СЭ) [1]. В таких приборных структурах используется несколько базовых слоев с различной шириной запрещенной зоны, что позволяет эффективно преобразовывать солнечное излучение в широком спектральном диапазоне. Перспективной комбинацией базовых слоев для тандемных СЭ является сочетание пленок CdTe и CuInSe₂ или α -Si. При этом в конструкции СЭ с большей шириной запрещенной зоны (т.е. на основе CdTe) необходимо использовать прозрачные электроды. Поэтому в таких СЭ фототок генерируется при освещении как с фронтальной, так и с тыльной стороны. Таким образом, приборные структуры являются двусторонне фоточувствительными.

Известно, что при разработке СЭ на основе CdTe одной из основных проблем является проблема создания тыльного контакта, поскольку не существует металла, за исключением платины, который мог бы образовать омический контакт с *p*-CdTe [2]. Проблема формирования тыльных контактов к пленочным слоям теллурида кадмия в конструкции СЭ обсуждалась во многих работах [3–7] как с теоретической, так и с практической точки зрения. В работах [6,7] было показано, что традиционные тыльные контакты Cu/Au или Au, которые позволяют получать СЭ на основе CdTe с эффективностью до 13%, образуют диод с высотой потенциального барьера < 0.3 эВ, включенный навстречу основному сепарирующему барьеру.

Основным требованием при создании тандемных структур к СЭ с широкозонным базовым слоем является его малая толщина. Это необходимо, чтобы через базовый слой с минимальными потерями проходила длинноволновая часть солнечного спектра. Нами были разработаны пленочные СЭ на основе CdTe с толщиной базового слоя 2.5 мкм, в которых в качестве прозрач-

ного тыльного электрода был использован слой ITO (оксиды индия и олова) с наноразмерным слоем меди (glass/SnO₂:F/CdS/CdTe/Cu/ITO) [8]. Эффективность таких приборных структур достигала 10%. Для дальнейшего повышения их эффективности и практического использования в тандемных структурах необходимо исследовать особенности фотоэлектрических процессов в таких СЭ и их деградационную стойкость.

2. Методика эксперимента

Приборные гетероструктуры CdS/CdTe получали методом термического вакуумного испарения на подложках из стекла со слоем прозрачного фронтального электрода SnO₂:F [8]. Вначале при температуре подложки 200°C осаждались пленки CdS, затем без нарушения вакуума при температуре подложки 300°C осаждались пленки CdTe. Полученные приборные гетеросистемы подвергались „хлоридной“ обработке [8]. Для этого на поверхность слоев CdTe без нагрева подложки наносились пленки CdCl₂. Полученные многослойные пленочные системы отжигались на воздухе в закрытом объеме при температуре 430°C в течение 25 мин. Формирование прозрачных фронтальных контактов Cu/ITO производилось по методике, описанной в [9]. Измерение световых вольт-амперных характеристик (ВАХ) СЭ проводилось при освещении имитатором солнечного излучения с мощностью светового потока 100 мВт/см², соответствующего режиму наземного излучения AM1. Деградационные испытания проводились в лаборатории Технологического университета (Цюрих, Швейцария) с помощью специальной камеры, имитирующей работу СЭ в режиме холостого хода при мощностях светового потока 1000 Вт/см² и температуре 80°C, что ускоряет деградацию приборной структуры в 100 раз [10].

3. Результаты и их обсуждение

В процессе исследования СЭ glass/SnO₂:F/CdS/CdTe/Cu/ITO с толщиной базового слоя 2.5 мкм было установ-

[†] E-mail: meriuts@ukr.net

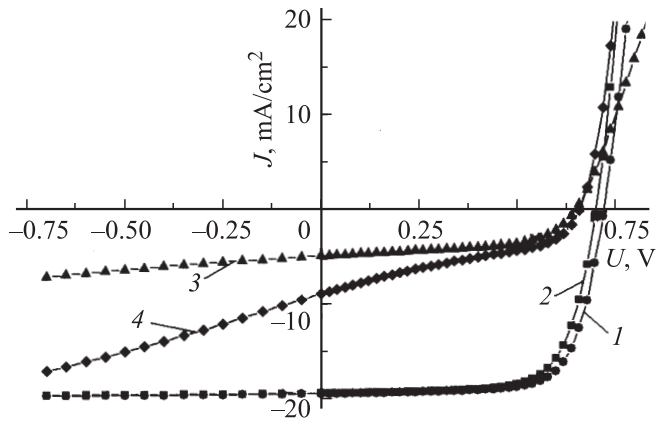


Рис. 1. Типичный вид изменения ВАХ СЭ в процессе эксплуатации; 1 — ВАХ в исходном состоянии, 2 — ВАХ в конце испытаний (~ 8 лет) при освещении с фронтальной стороны (со стороны $\text{SnO}_2:\text{F}$), 3 — ВАХ в исходном состоянии, 4 — ВАХ в конце испытаний (~ 8 лет) при освещении с тыльной стороны (со стороны ИТО).

лено, что полученные приборные структуры обладают деградационной стойкостью. В начале срока испытаний КПД СЭ незначительно возрастает с 9.8% до 10.3% и остается выше 10% в течение порядка 6 лет, а к концу срока испытаний (~ 8 лет) незначительно падает до 9.7%, т.е. практически до исходного значения. При этом вид вольт-амперной характеристики, снятой при освещении с фронтальной стороны (со стороны $\text{SnO}_2:\text{F}$), изменяется также незначительно в течение всех 8 лет испытаний (рис. 1, кривые 1 и 2). В то же время ВАХ, снятая при освещении с тыльной стороны (со стороны ИТО), претерпевает существенные изменения по сравнению с исходной ВАХ (кривая 3, рис. 1). Во-первых, почти вдвое возрастает ток короткого замыкания, во-вторых, на ВАХ появляется дополнительный перегиб (рис. 1, кривая 4).

Такой вид ВАХ может быть обусловлен тем, что структура исследуемого СЭ представляет собой два диода, один из которых находится на фронтальном, а другой на тыльном контакте, и включены эти диоды навстречу друг другу.

Наличие двух включенных навстречу друг другу диодов в СЭ на основе CdS/CdTe с базовым слоем толщиной ~ 10 мкм учитывалось в работе [6] для объяснения особенности световой вольт-амперной характеристики СЭ, связанной с ее изгибом и пересечением световой и темновой ВАХ в первом квадранте (рис. 2).

В этой работе была использована модель СЭ, основанная на электрической схеме (см. вставку на рис. 2), с освещенным фронтальным диодом (основным барьером) и неосвещенным диодом на тыльном контакте. Световая ВАХ СЭ (рис. 2, кривая 3) моделировалась на основе идеальной темновой ВАХ тыльного диода (рис. 2, кривая 1) и идеальной световой ВАХ фронтального барьера (рис. 2, кривая 2).

В отличие от стандартных СЭ в разработанных нами двусторонне чувствительных СЭ заметная часть солнечного излучения будет поглощаться вблизи слоя объемного заряда тыльного контакта из-за малой толщины базового слоя. Поэтому эквивалентная электрическая схема солнечного элемента с тонким базовым слоем должна учитывать наличие двух освещенных диодов — основного сепарирующего барьера и барьера на тыльном контакте (рис. 3, а), где J_{Lj} , J_{Lc} — фототоки, $R_{sh,j}$, $R_{sh,c}$ — шунтирующие сопротивления основного барьера и тыльного контакта соответственно, R_s — последовательное сопротивление базового слоя солнечного элемента. Тогда диод на тыльном контакте можно рассматривать как активную нагрузку для фронтального контакта, который генерирует основной ток и напряжение. Предлагаемая схема и проведенное далее рассмотрение будут справедливым только в случае, если области объемного заряда фронтального и тыльного контактов не перекрываются.

Для анализа особенностей ВАХ исследуемых СЭ можно ограничиться упрощенной электрической схемой (см. вставку на рис. 3, б), пренебрегая последовательным сопротивлением, а шунтирующее сопротивление считая бесконечным. Тогда вольт-амперные характеристики диодов можно записать в виде

$$J_j = J_{sj} \left[\exp \left(\frac{eU_j}{A_j kT} \right) - 1 \right] - J_{Lj}, \quad (1)$$

$$J_c = -J_{sc} \left[\exp \left(\frac{-eU_c}{A_c kT} \right) \right] + J_{Lc}, \quad (2)$$

где J_{sj} , J_{sc} — токи насыщения, A_j , A_c — коэффициенты идеальности, $R_{sh,j}$, $R_{sh,c}$ — шунтирующие сопротивления основного барьера и тыльного контакта соответственно, U_j , U_c — напряжения, падающие на основном барьере и тыльном контакте.

Вольт-амперные характеристики, заданные выражениями (1) и (2), представлены на рис. 3, б соответствен-

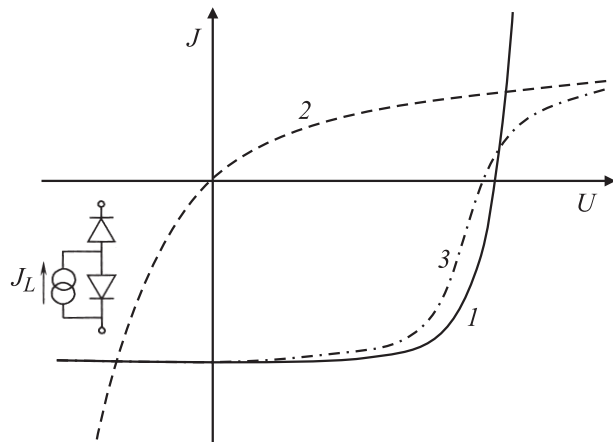


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики и электрическая схема для СЭ с освещенным барьером и неосвещенным диодом тыльного контакта [6].

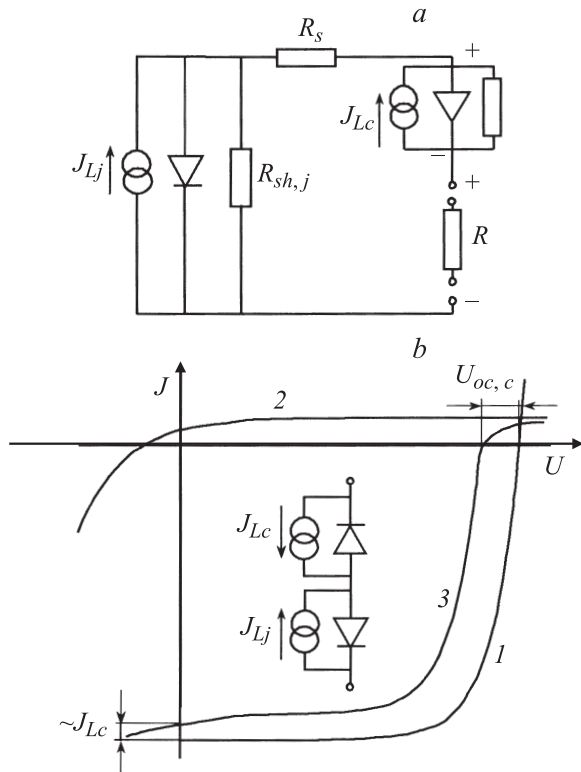


Рис. 3. *a* — эквивалентная электрическая схема и *b* — вольт-амперные характеристики для двусторонне чувствительного СЭ с тонким базовым слоем и фотовольтаическим эффектом на основном барьере и на диоде тыльного контакта.

ющими линиями. Полный ток (J), протекающий через нагрузку (R), будет равен сумме токов, генерируемых на фронтальном и тыльном контактах:

$$J = J_j + J_c. \tag{3}$$

Напряжение на нагрузке также будет равно сумме напряжений, падающих на фронтальном и тыльном контактах:

$$U = U_c + U_j. \tag{4}$$

Из схемы, изображенной на рис. 3, *a*, видно, что диод на тыльном контакте при работе СЭ в режиме источника питания будет включен в прямом направлении. Тогда, пока сопротивление внешней нагрузки велико и напряжение, падающее на тыльном диоде меньше, чем высота его потенциального барьера: $U_c = U - U_j < e\phi_{c,c}$ — сгенерированные под действием света вблизи тыльного контакта неравновесные носители заряда будут разделены встроенным полем этого контакта. Дырки, выброшенные полем тыльного контакта в базовую область, приведут к уменьшению градиента их концентрации, созданного за счет дырок, поступивших при разделении неравновесных носителей основным барьером. Это должно привести к уменьшению фототока, генерируемого СЭ примерно на величину фототока, генерируемого на тыльном диоде. При этом эдс, которую генерирует освещенный тыльный

диод, будет вычитаться из эдс фронтального барьера. Это приведет к уменьшению напряжения холостого хода СЭ.

С уменьшением сопротивления нагрузки все большая часть напряжения будет падать на тыльном диоде, и при $U_c = U - U_j > e\phi_{c,c}$ тыльный диод перестанет генерировать эдс. При этом тыльный диод будет играть роль последовательного сопротивления с нелинейной вольт-амперной характеристикой, что приведет к уменьшению тока короткого замыкания для солнечного элемента и изгибу ВАХ. Изгиб ВАХ должен начаться в момент, когда падение напряжения на нем станет примерно равным высоте его потенциального барьера $U_c \approx e\phi_{c,c}$. Уменьшение тока короткого замыкания и изгиб ВАХ, возникающие при наличии освещенного диода на тыльном контакте, очевидно, приводят к уменьшению фактора заполнения ВАХ и КПД.

Условия, которые могут привести к появлению точек перегиба на ВАХ, можно получить аналитически, приравняв нулю вторую производную (3) по напряжению. С учетом (1), (2) и (4) имеем

$$\begin{aligned} \frac{d^2J}{dV^2} &= J_{sj} \left(\frac{e}{A_j kT} \right)^2 \exp \left(\frac{eU_j}{A_j kT} \right) \\ &- J_{sc} \left(\frac{e}{A_c kT} \right)^2 \exp \left(\frac{-eU_c}{A_c kT} \right) = 0 \end{aligned} \tag{5}$$

или

$$J_{sc} = J_{sj} \left(\frac{A_c}{A_j} \right)^2 \exp \left(\frac{e}{kT} \frac{U_j A_c + U_c A_j}{A_j A_c} \right). \tag{6}$$

Выражение (6) является условием, определяющим возможность появления точек перегиба на ВАХ в зависимости от диодных параметров основного барьера и тыльного контакта, определяемых технологией изготовления и материалом контакта. Это уравнение может иметь три решения при следующих комбинациях напряжений, падающих на основном барьере и на тыльном диоде:

- I $U_c, U_j > 0,$
- II $U_c < 0, U_j > 0,$
- III $U_c > 0, U_j < 0.$ (7)

Комбинация (7, II) соответствует перегибу ВАХ в первом квадранте и не накладывает каких-либо ограничений на соотношение между параметрами основного и тыльного барьеров. Наиболее сложно удовлетворить условию (6) для комбинации (7, I) (именно в этом случае точка перегиба лежит в четвертом квадранте и ВАХ имеет вид, схематически изображенный на рис. 3, *b*, кривая 3). Это требует больших величин J_{sc} и „медленного“ выхода на насыщение ВАХ тыльного диода. Отметим, что использование полной эквивалентной схемы СЭ (с учетом шунтирующих сопротивлений диодов и последовательного сопротивления) приведет к

более сложному соотношению, чем (6), из-за наличия внутреннего последовательного сопротивления СЭ. При этом в условия возникновения точки перегиба на ВАХ войдут все диодные характеристики обоих барьеров, но основной вклад по-прежнему будут вносить токи насыщения и коэффициенты идеальности диодов.

Условия для наблюдения указанного перегиба ВАХ проще реализуются при освещении СЭ с тыльной стороны, что наблюдается в эксперименте (рис. 1). Это связано с тем, что диодный ток зависит от уровня освещенности, при этом проще достигаются достаточно большая его величина для тыльного диода и более низкое, чем при освещении с фронтальной стороны, значение диодного тока насыщения для фронтального барьера, что обуславливает наличие точки перегиба в первом квадранте.

Отсутствие точки перегиба в исходном состоянии и появление после некоторого времени эксплуатации объясняется деградированными процессами на тыльном контакте. Наличие меди на тыльном контакте приводит к тому, что ее диффузия по границам зерен практически сразу шунтирует тыльный барьер за счет увеличения проводимости границ зерен, которые проходят через него. Это приводит к уменьшению последовательного сопротивления СЭ, основной вклад в которое давала слабо освещенная область обеднения тыльного барьера. При этом шунтирование тыльного барьера также приводит к увеличению его диодного тока насыщения, что обеспечивает условия возникновения точек перегиба на ВАХ при освещении с тыльной стороны. Диффузия меди катастрофически влияет на характеристики тыльного барьера, что положительно сказывается на эффективности работы СЭ при освещении с фронтальной стороны. Поэтому наряду с традиционными туннельными контактами в конструкции двусторонне чувствительных СЭ на основе CdTe можно использовать шунтированные медью барьеры Шоттки.

Отметим также, что если условие (6) не может быть выполнено и точки перегиба на ВАХ не появляются, то наличие освещенного диода на тыльном контакте может приводить к увеличению наклона прямолинейного участка ВАХ. Поэтому, если обрабатывать вольт-амперную характеристику такого СЭ в однодиодном приближении, можно получить заниженное значение шунтирующего сопротивления. Полученное при этом заниженное значение шунтирующего сопротивления не будет связано с шунтированием фронтального сепарирующего барьера. Для получения достоверных значений диодных параметров обработку ВАХ необходимо проводить с учетом эквивалентной схемы, изображенной на рис. 3, а.

4. Заключение

Обнаруженные особенности ВАХ двусторонне чувствительных пленочных СЭ с малой толщиной базового

слоя теллурида кадмия объяснены в рамках эквивалентной схемы, учитывающей наличие в приборной структуре двух освещенных диодов — фронтального диода (основного сепарирующего барьера) и диода на тыльном контакте.

Существенное влияние наноразмерного слоя меди при изготовлении тыльного контакта двусторонне чувствительных СЭ на основе теллурида кадмия заключается в шунтировании барьера Шоттки, который образуется между базовым слоем и тыльным электродом, в результате диффузии атомов меди. Это позволяет расширить круг материалов, которые могут применяться для создания тыльного контакта таких приборных структур за счет использования шунтированных барьеров Шоттки.

Работа поддержана проектом УНТЦ № 4301.

Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев. ФТП, **38**, 937 (2004).
- [2] D.L. Batzner. *Performance and stability of CdTe/CdS solar cells for terrestrial and space applications*: PhD Thesis ETH 15214.–Zurich (2003).
- [3] M. Hounq, F. Jeng. Sol. St. Commun., **66** (1), 1 (1988).
- [4] C.S. Ferekides, V. Viswanathathan, D.L. Morel. *Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Anaheim, USA, 1997).
- [5] N. Romeo, A. Bosio, R. Tedeschi. Int. J. Solar Energy, **12**, 183 (1992).
- [6] A. Niemegeers, M. Burgelman. J. Appl. Phys., **81**, 2881 (1997).
- [7] Y. Roussillon, V.G. Karpov, Diana Shvydka, J. Drayton, A.D. Compaan. IEEE, 441 (2005).
- [8] G. Khrypunov, A. Romeo, F. Kurtzesau, D.L. Batzner, H. Zogg, A.N. Tiwari. Sol. Energy Mater. Solar Cells, **90**, 664 (2006).
- [9] A. Romeo, G. Khrypunov, S. Galassini, H. Zogg, A.N. Tiwari. Sol. Energy Mater. Solar Cells, **90**, 1388 (2007).
- [10] D.L. Batzner, A. Romeo, H. Zogg, R. Wendt, A.N. Tiwari. Thin Sol. Films, **387**, 151 (2001).

Редактор Л.В. Беляков

Peculiarities of light current-voltage characteristics of bifacial solar cells on the thin CdTe base layer

A.V. Meriuts, G.S. Khrypunov, T.N. Shelest, N.V. Deyneko

National Technical University „Kharkiv Polytechnic Institute“,
61002 Kharkov, Ukraine

Abstract It is shown that peculiarities of light current-voltage characteristics of bifacial solar cells glass/SnO₂:F/CdS/CdTe/Cu/ITO with a thin CdTe base layer are joined with photovoltaic effect on a back contact. The equivalent electrical circuit of the solar cell in direct current which takes into account two illuminated diode — the front diode (main separation junction) and the diode on the back contact are proposed.