

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ, СУБСТРУКТУРА СЛОЕВ И СВОЙСТВА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ CdS/CdTe

¹*Е.К. Белоногов*, ²*Г.С. Хрипунов*

¹Воронежский государственный технический университет,
Московский пр., 14, Воронеж, Россия, 394026 e-mail: belonogov@phis.vorstu.ru
²Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21, Харьков, Украина, 61002 e-mail: khrip@ukr.net

Определены выходные параметры и стойкость к деградации, методами ПЭМ, РЭМ, ОЭС, АСМ исследована субструктура слоев СЭ на основе CdS/CdTe. Установлены размерные эффекты слоев Cu и CdTe. Показана принципиальная возможность увеличения КПД СЭ при высокой стойкости к деградации. Разработан новый тип тыльного прозрачного электрода для пленочных тандемных СЭ на основе CdS/CdTe с оптимальными толщинами базового слоя и прослойки меди. Изготовлены устойчивые к деградации пленочные СЭ FTO/CdS/CdTe/Cu/ITO с КПД более 10%.

DIMENSIONAL EFFECT, SUBSTRUCTURE OF LAYERS AND PROPERTIES OF SOLAR CELLS ON THE BASIS OF CdS/CdTe

¹*E.K. Belonogov*, ²*G.S. Khrypunov**

¹Voronezh state technical university, Moscow pr., 14, Voronezh, Russia, 394026,
e-mail: belonogov@phis.vorstu.ru
²National technical university, Kharkov polytechnical institute,
Frunze str., 21, Kharkov, Ukraine, 61002, e-mail: khrip@ukr.net

Target parameters and stability degradation are certain, by methods TEM, REM, OES, AFM the substructure of layers SC on the basis of CdS/CdTe is investigated. Dimensional effects of layers Cu and CdTe are established. The basic opportunity of increase in Efficiency SC is shown at high stability degradation. The new type of a back transparent electrode for film tandem SC on the basis of CdS/CdTe with optimum thickness of a base layer and a layer of copper is developed. Steady against degradation film SC FTO/CdS/CdTe/Cu/ITO from Efficiency more than 10% are made.



*Евгений
Константинович
Белоногов*

Сведения об авторе: доцент кафедры физики радиоэлектронного профиля ГОУ ВПО Воронежский государственный технический университет, канд. физ.-мат. наук.

Области научной деятельности: исследование закономерностей структурообразования и синтеза тонких пленок; материаловедение; фундаментальные основы синтеза новых металлических, полупроводниковых и керамических композиционных материалов функционального назначения; нано- и мембранные технологии.

Публикации: 87.

Введение

Солнечные элементы (СЭ) на базе пленок CdS/CdTe перспективны для широкомасштабного наземного применения благодаря устойчивости этого полупроводникового соединения к разложению [1], высокой эффективности фотоэлектрического преобразования солнечной энергии (16,5% [2]), низкой материало- и энергоемкости их промышленного производства [3]; даже при небольших объемах производства (менее 20 МВт в год) стоимость 1 Вт/пик (электрическая мощность при световом потоке – 100 мВт/см²)



*Геннадий
Семенович
Хрипунов*

Сведения об авторе: д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой физического материаловедения для электроники и гелиоэнергетики Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Область научных интересов: исследование оптических и электрических свойств, диодных параметров и спектральных зависимостей фотоотклика и фотоэлектрических параметров для оптимизации технологии изготовления пленочных и монокристаллических солнечных элементов.

Публикации: 98.

СЭ менее 1 Euro [4]. Проблемой при разработке эффективных и долговечных СЭ на основе CdS/CdTe является формирование стабильного электрического контакта к пленочным слоям CdTe с электропроводностью *p*-типа, что обусловлено высокой работой выхода основных носителей заряда (~5,5 эВ) [5]. Поэтому для *p*-CdTe формируют туннельный контакт через обогащенный теллуrom слой, на который наносят тонкий буферный слой металла (например меди) для создания прослойки *p*⁺ типа, а затем формируют металлический электрод [5]. Современным направлением повышения эффективности фотоэлектрического

преобразования является создание тандемных приборных структур [6]. Нами был разработан прозрачный тыльный электрод к пленочным слоям *p*-CdTe, что принципиально позволяет использовать СЭ на базе CdTe/CdS в составе тандемных структур [7]. Получены двусторонне чувствительные приборные структуры с эффективностью 7,8% при высокой стабильности их выходных параметров [7].

Цель работы – установление эффекта субструктуры функциональных слоев и подслоя меди, формируемого перед осаждением прозрачного слоя оксидов индия и олова (ITO), на эффективность и выходные параметры СЭ на основе CdTe/CdS.

Методика

СЭ на основе CdTe/CdS формировали на стеклянных подложках с подслоем фторсодержащих оксидов олова (FTO) в качестве прозрачного проводящего фронтального электрода. Методом термического испарения из графитовых тиглей и последующей конденсации при температуре подложки $T_n = 200^\circ \text{C}$ формировали слой CdS толщиной 0,4 мкм и последовательно, без нарушения вакуума, при $T_n = 300^\circ \text{C}$ наращивали слой CdTe. Для «хлоридной» обработки гетероструктуры на поверхность CdTe наносили слой CdCl₂ толщиной 0,2-0,6 мкм и отжигали на воздухе при $T_n = 430^\circ \text{C}$ в течение 25 минут. После обработки гетероструктуры раствором брома в метаноле на поверхности CdTe формировали варианты электрических контактов: слой ITO толщиной в интервале 0,3-0,4 мкм; последовательно нанесенные металлические слои Cu и Au толщиной 10 и 50 нм соответственно. Прозрачные контакты ITO наносили методом неактивного высокочастотного магнетронного распыления керамической мишени. Слои ITO имели поверхностное сопротивление 20 Ом/см² и средний коэффициент пропускания в диапазоне длин волн 0,4-0,8 мкм на уровне 85%. Для определе-

ния оптимальной толщины базового слоя изготовлены СЭ с тыльным контактом Cu/ITO и слоем CdTe толщиной 1-5 мкм. Толщина прослойки меди в таких СЭ составляла 1 нм, а толщину слоя хлорида кадмия при проведении «хлоридной» обработки изменяли пропорционально толщине слоя CdTe.

Исследования элементного состава, субструктуры и морфологии поверхности пленок проводили методами ПЭМ (ЭМ125; Tecnai G230 TEM/STEM с высокоугловым детектором рассеянных электронов и системой энергодисперсионного анализа EDAX), ДБЭ (ЭГ-100М), РЭМ (Quanta 3D), оже-электронной спектроскопии, АСМ (Solver 47). Методика «cross-section» реализована специалистами компании СМА.

Выходные параметры СЭ (напряжение холостого хода, плотность тока короткого замыкания, фактор заполнения световой ВАХ и коэффициент полезного действия (КПД)) определены из световых ВАХ, которые измеряли при мощности светового потока 100 мВт/см² (значения мощности излучения галогеновой лампы калиброваны по эталонному кремниевому СЭ). Ускоренные испытания и определение стабильности выходных параметров СЭ проведены в климатической камере (4145A Semiconductor analyzer, Швейцарский технологический институт), где СЭ в режиме холостого хода освещали при температуре 80° С и мощности светового потока 10 Вт/см². По оценкам [8] такие условия увеличивают скорость деградации параметров СЭ в 100 раз.

Результаты эксперимента

Были исследованы СЭ FTO/CdS/CdTe с разными типами тыльных контактов. В таких приборных структурах формирование пленочной гетеросистемы, ее «хлоридная» обработка, последующее травление раствором брома в метаноле проводили одновременно. Результаты исследования световых ВАХ приборных структур сведены в таблице.

Параметры СЭ на базе CdS/CdTe
Parameters SC on the basis of CdS/CdTe

Гетероструктура СЭ	Технологические параметры		КПД, %	Напряжение холостого хода, мВ	Плотность тока короткого замыкания, мА/см ²	Фактор заполнения световой ВАХ	
FTO/CdS/CdTe/ITO	?????		2,5	370	18,4	0,36	
	Отжиг на воздухе 25 минут	300° С	4,6	500	21,1	0,44	
		350° С	6,5	640	20,1	0,51	
FTO/CdS/CdTe/Cu/Au	Слой меди 3 нм	?????	1,6	320	12,2	0,40	
		Отжиг на воздухе	10,4	790	19,7	0,67	
FTO/CdS/CdTe/Cu/ITO	Слой меди 1 нм; осаждение ITO при $T_n = 350^\circ \text{C}$	Слой CdTe 4,0 мкм	?????	7,5	710	19,9	0,53
		отжиг на воздухе при $T_n = 350^\circ \text{C}$	9,2	790	20,5	0,57	
	Слой CdTe 2,7 мкм;		Более 10	710	19,3	0,73	
	Слой CdTe 1,0 мкм;		6,7	630	19,3	0,72	

Выходные параметры СЭ FTO/CdS/CdTe/ITO

КПД типичных образцов находится на уровне 2,5%, напряжение холостого хода – 370 мВ, плотность тока короткого замыкания – 18,4 мА/см², фактор заполнения световой ВАХ – 0,36. Увеличению исходной эффективности способствует отжиг СЭ на воздухе в течение 25 минут в температурном интервале 300-350° С. Максимальные значения КПД таких

структур не превышает 6,5%. На рис. 1, а представлены результаты ускоренных испытаний стабильности СЭ до и после отжига на воздухе при температуре 350° С. Очевидно, что СЭ демонстрируют не только высокую стабильность, но и увеличение эффективности; КПД возрастает до 3,8 и 7,4% соответственно в исходных и отожженных пленочных гетероструктурах.

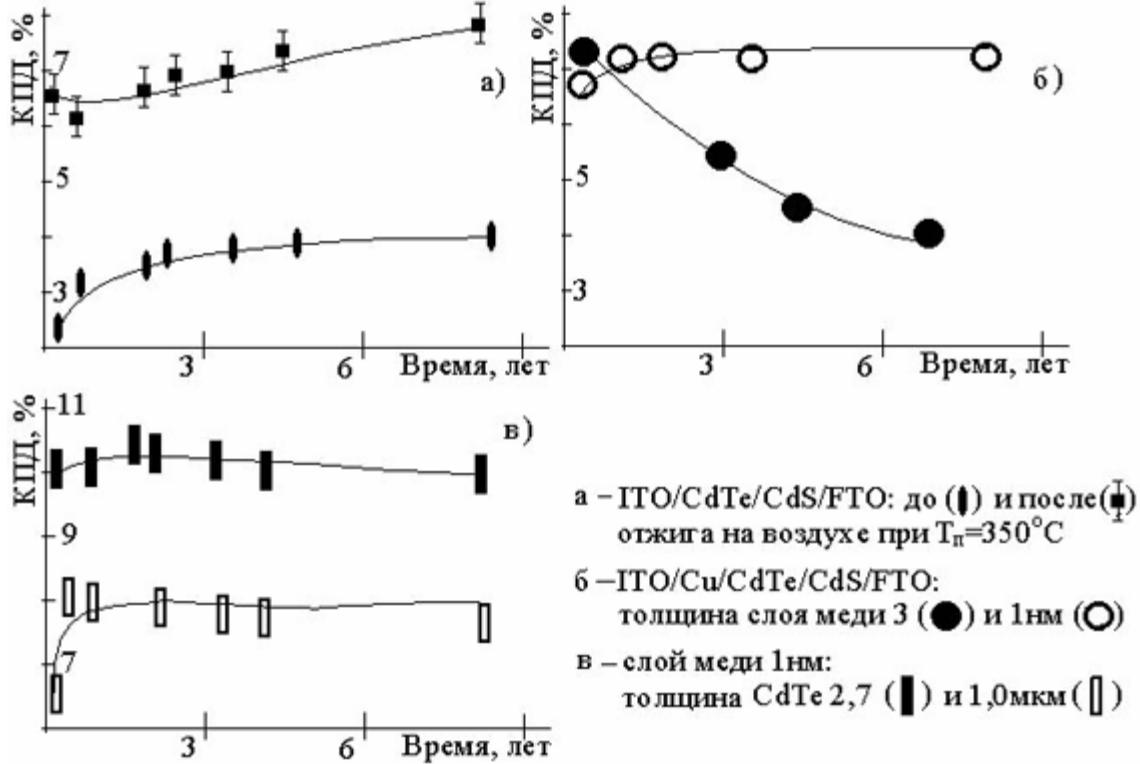


Рис. 1. Ускоренные испытания временной стабильности СЭ ITO/CdTe/CdS/FTO (а) и ITO/Cu/CdTe/CdS/FTO (б, с)
 Fig. 1. The accelerated tests of time stability SC ITO/CdTe/CdS/FTO (a) and ITO/Cu/CdTe/CdS/FTO (b, c)

Выходные параметры СЭ FTO/CdS/CdTe/Cu/Au

Анализ ВАХ, полученных до и после отжига тыльных контактов Cu/Au на воздухе, показал (таблица), что отжиг гетероструктуры способен увеличить КПД СЭ в шесть и более раз. Однако стабильность параметров этих СЭ невысокая; за 6,3 года КПД уменьшился до 6,9%, т.е. стал ниже, чем у СЭ без слоев Cu/Au. Таким образом, нанесение металлических слоев Cu/Au способствует существенному увеличению КПД, но вызывает деградацию выходных параметров, что делает СЭ малоэффективным.

Выходные параметры СЭ FTO/CdS/CdTe/Cu/ITO

Поскольку без прослойки меди в конструкции тыльного контакта не удается получить КПД более 10%, была реализована конструкция, где перед формированием слоя ITO на поверхность протравленных слоев CdTe осаждали слой меди. Для того чтобы медь вызвала увеличение эффективности фотоэлек-

трического преобразования энергии и не приводила к деградации параметров приборной структуры, были созданы СЭ FTO/CdS/CdTe/Cu/ITO с ограниченным содержанием Cu (толщина слоя 1-3 нм). Было установлено, что исходная эффективность таких СЭ практически не зависит от толщины слоя меди. На рис. 1, б, представлены результаты ускоренных испытаний СЭ с тыльным контактом содержащим прослойку меди толщиной 3 и 1 нм. При толщине слоя меди 3 нм СЭ имеет низкую временную стабильность, с ростом времени выдержки в режиме холостого хода происходит уменьшение КПД подобно приборной структуре со стандартным контактом Cu/Au, т.е. эффективность СЭ со временем существенно уменьшается. Характер изменения выходных параметров СЭ с прослойкой меди толщиной 1 нм в тыльном контакте подобен СЭ FTO/CdS/CdTe/ITO (ср. рис. 1, а), который не содержит меди в тыльном контакте: с ростом времени выдержки в режиме хо-

лостого хода эффективность увеличивается. Для СЭ с тыльным контактом Cu/ITO исходный КПД составляет 7,5%, а в результате отжига увеличивается до 9,2% (см. таблицу).

На рис. 1, с представлены результаты ускоренных испытаний СЭ с тыльным контактом, содержащим прослойку меди толщиной 1 нм при толщине 1,0 и 2,7 мкм базового слоя. Было установлено, что толщина 2,7 мкм является оптимальной, при которой возможно формирование приборных структур с КПД более 10% и дальнейшее снижение толщины базового слоя приводит только к снижению исходного КПД (см. рис. 1, с и таблицу).

Субструктура пленочной гетеросистемы СЭ FTO/CdS/CdTe/Cu/Au

На рис. 2 представлены результаты элементного анализа методом оже-электронной спектроскопии слоев вблизи контакта Au/Cu/CdTe. При фактической толщине нанесенных слоев Au и Cu соответственно 50 и 10 нм профиль концентрации элементов (рис. 2, а) свидетельствует об активной диффузии меди как в пленку Au, так и в CdTe. Это вызывает формирование слоя твердого раствора AuCu у свободной поверхности и обогащение CdTe медью у межфазной границы на глубину до 25 нм (рис. 2, б).

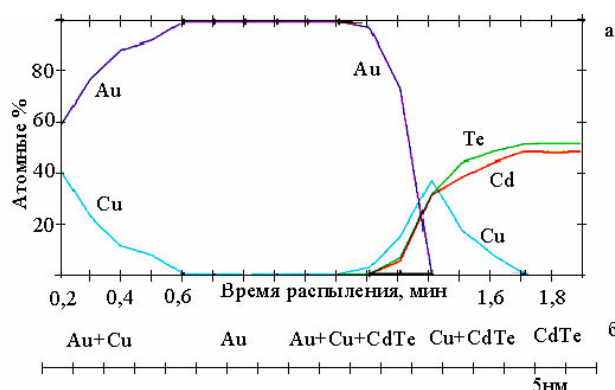


Рис. 2. Профиль концентрации элементов (а) и схема взаимного расположения слоев вблизи контакта Au/Cu/CdTe (б)
Fig. 2. A structure of concentration of elements (a) and the scheme of a relative positioning of layers near to contact Au/Cu/CdTe (b)

На рис. 3 приведены АСМ сканы поверхности слоев CdTe и Au/Cu/CdTe, которые иллюстрируют эволюцию рельефа пленки CdTe с толщиной. Средние значения шероховатости пленок указанной толщины в пределах участка сканирования (рис. 3, а-с) составляют 16, 19 и 76 нм, т. е. существенное развитие рельефа происходит при толщине слоя более 4 мкм. Увеличению толщины слоя от 1,0 до 4,5 мкм отвечает уменьшение дисперсности кристаллической структуры на порядок величины среднего размера кристаллита. В пределах отдельных кристаллитов выявлены ступени и террасы ростового происхождения, что свидетельствует о дефектности и блочной субструктуре CdTe (рис. 3, с).

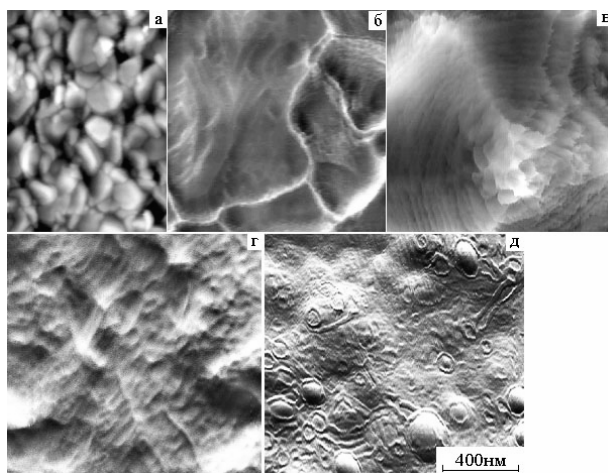


Рис. 3. АСМ сканы поверхности слоев CdTe толщиной 1,0 (а), 2,7 (б), 4,5 мкм (с-е) в исходном состоянии, после хлоридной обработки (д) и нанесения слоев Cu и Au толщиной 10 и 50 нм соответственно (е)
Fig. 3. AFM Scans surfaces of layers CdTe thickness 1,0 (a), 2,7 (b), 4,5 microns (c-e) in an initial condition, after "Chlorinate" processing (d) and drawings of layers Cu and Au thickness of 10 and 50 nanometers, accordingly (e)

Хлоридная обработка снижает шероховатость поверхности до 25 нм (рис. 3, д), а нанесение слоев Cu и Au увеличивает до 30 нм за счет декорирования неоднородностей рельефа.

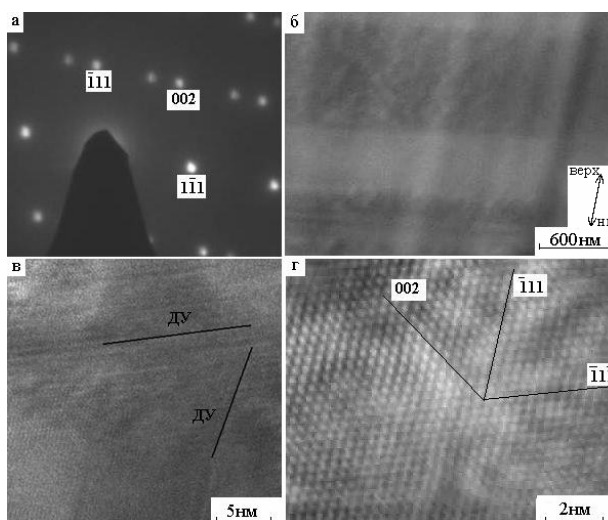


Рис. 4. Электронограмма (а) и ПЭМ изображения профиля пленки CdTe (б-д)
Fig. 4. Picture of electron diffraction (a) and TEM images profile structure of film CdTe (b-d)

На рис. 4 приведены результаты "cross-section" ПЭМ исследования пленки CdTe и ее межфазной границы со слоями Cu/Au. Анализ электронограммы (рис. 3, а) позволил определить ось зоны – [110], принадлежащую одновременно двум ориентациям кристаллитов CdTe с ГЦК решеткой ($a = 0,641$ нм). На темнопольном изображении структуры (рис. 3, б) полосчатый контраст выделяет горизонтальные слои пленки, образованные кристаллитами CdTe в двой-

никовой ориентации. Электронограммы, полученные от соседних слоев, имеют зеркальную симметрию и при наложении дают картину, представленную на рис. 3, а. В направлении от подложки к свободной поверхности пленки толщина этих слоев увеличивается от 0,6 до 1,2 мкм. В пределах одного слоя субструктура (рис. 3, с) характеризуется высокой плотностью дефектов упаковки по плоскостям $\{111\}$. Наличие двойников по комплексу плоскостей $\{111\}$ в пленке CdTe с аксиальной текстурой $\langle 111 \rangle$ возможно при условии исходной параллельной ориентации (111) и многократного двойникования по схеме, когда плоскости $\{002\}$ двойника первого и $\{111\}$ второго порядка становятся почти параллельными поверхности пленки. Таким образом фронтальный рост пленки сопровождается развитием двойникования в исходных кристаллитах параллельной ориентации, что приводит к смене ориентации и формированию слоистой субструктуры поликристаллической пленки с аксиальной текстурой.

Прямое разрешение кристаллографических плоскостей (см. рис. 3, d) иллюстрирует характерное для ГЦК решетки чередование атомных слоев в направлении $[111]$, а также примеры нарушения последовательности расположения слоев, что приводит к 60° симметрии и формированию областей с ГПУ решеткой. У свободной поверхности пленки кристаллитов меди не выявлено, т.е. атомы меди могут быть только в решетке CdTe, что подтверждают результаты же-спектроскопии (рис. 2).

Обсуждение результатов

Изменения КПД вызваны достаточно очевидными механизмами: для обоих типов СЭ (CdS/CdTe/Cu/Au и CdS/CdTe/ITO) после травления слоя CdTe раствором брома в метаноле на поверхности базового слоя формируется прослойка теллура [10] с низкой электропроводностью из-за аморфной структуры, конденсационно-стимулированный отжиг пленочной гетероструктуры при магнетронном наращивании слоя ИТО на поверхность базового слоя вызывает кристаллизацию теллура, повышение электропроводности и диффузию теллура, который для CdTe является акцепторной примесью. Эти субструктурные процессы формируют туннельный контакт n^+ITO-p^+CdTe . Процессы диффузии и кристаллизации имеют место при увеличении температуры от длительного освещения приборной структуры в режиме холостого хода, что приводит к увеличению КПД СЭ в процессе ускоренных испытаний (рис. 1, а).

Известно [10], что для СЭ с тыльным контактом Cu/Au отжиг приборной структуры CdS/CdTe/Cu/Au на воздухе вызывает формирование на поверхности базового слоя соединения типа p^+Cu_xTe , которое представляет собой вырожденный полупроводник с высокой электропроводностью по сравнению с кристаллическим теллуrom. Диффундирующие в базовый слой при отжиге СЭ атомы меди генерируют в нем мелкие

акцепторные уровни. Эти процессы формируют туннельный контакт $Cu-p^+CdTe$ с низким электросопротивлением, что увеличивает КПД приборной структуры CdS/CdTe/Cu/Au по сравнению с СЭ CdS/CdTe/ITO. Диффузию меди в слой CdTe подтверждают исследования распределения элементов вблизи тыльного контакта (рис. 2). Дegradaция приборной структуры обусловлена диффузией меди в область гетероперехода CdS/CdTe, что вызывает его шунтирование.

Влияние толщины базового слоя CdTe на КПД приборных структур FTO/CdS/CdTe/Cu/ITO при неизменной толщине слоя меди свидетельствует о ее роли в формировании свободных носителей заряда. С учетом зернограничной диффузии атомов меди (акцепторной примеси) в объем базового слоя возможно формирование на межфазной границе слоя CdTe с проводимостью p^+ -типа. Возникает изотипный переход $p^+CdTe-pCdTe$, электрическое поле которого вытесняет генерированные под действием света неравновесные электроны в объем зерна, что уменьшает вероятность зернограничной рекомбинации носителей заряда и увеличивает эффективность фотоэлектрического преобразования в базовом слое. Увеличение толщины базового слоя приводит к тому, что эффект присутствия меди ослабевает и не оказывает существенного влияния на КПД приборной структуры. Напротив, при малых толщинах CdTe шунтирование гетероперехода $pCdTe-nCdS$ за счет диффузии атомов меди на межфазную границу становится существенным. Присутствие меди уменьшает время рекомбинации свободных носителей и шунтирует $p-n$ -переход; эти два процесса оказывают конкурирующее влияние на выходные параметры СЭ.

Выше было показано, что наращивание толщины базового слоя от 1,0 до 4,5 мкм сначала совершенствует кристаллическую структуру, а затем происходит развитие рельефа за счет формирования крупноблочных кристаллитов, ступеней и террас. Эволюция субструктуры с ростом толщины базового слоя обусловлена интенсивными процессами двойникования на всех этапах наращивания, что способствует формированию аксиальной текстуры, которая размывается слоевым характером роста. Сохранение совершенной текстуры при увеличении толщины CdTe становится невозможно. Таким образом, оптимальная толщина базового слоя (2,7 мкм) CdTe удовлетворяет условиям, при которых положительный эффект рекомбинационных процессов максимален, шунтирование $p-n$ -перехода незначительно, аксиальная текстура сформирована и не размыта.

Заключение

Впервые экспериментально обнаружено влияние наноразмерных слоев меди на эффективность фотоэлектрического преобразования в двусторонне чувствительных пленочных СЭ на основе CdS/CdTe. Установлены размерные эффекты слоев меди и теллурида кадмия, возникающие вследствие эволюции

субструктуры и морфологии слоев, а также их межфазного взаимодействия. Определены значения толщины слоев Cu и CdTe, обеспечивающие оптимальные характеристики СЭ. Двойники и дефекты упаковки, как основные дефекты кристаллической структуры, сопутствуют формированию аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$ ГЦК решетки CdTe и слоевому характеру роста пленки; высокая плотность дефектов упаковки формирует области, отвечающие симметрии ГПУ решетки. Дефектность и шероховатость пленки CdTe возрастает с увеличением толщины, но применение «хлоридной» обработки подавляет развитие рельефа. Это способствует формированию надежных контактов n -ITO- p^+ CdTe и Cu - p^+ CdTe с низким электросопротивлением, что увеличивает КПД СЭ. Таким образом, основными технологическими условиями создания эффективных СЭ являются: совершенная аксиальная текстура $\langle 111 \rangle$ слоя CdTe с шероховатостью не более 30 нм, минимальная плотность двойников и дефектов упаковки и толщина, при которой положительный эффект рекомбинационных процессов максимален; создание подслоя меди толщиной ~ 1 нм, обеспечивающего туннельный контакт со стабильно низким электросопротивлением.

Показана принципиальная возможность увеличения КПД СЭ без заметного снижения стойкости к деградации. Изготовлены устойчивые к деградации пленочные СЭ FTO/CdS/CdTe/Cu/ITO с КПД более 10% для tandemных фотоэлектрических преобразователей. Разработанные СЭ показали стабильность КПД на протяжении более 7 лет. Поскольку для промышленных образцов стандартные гарантии КПД не превышают 5 лет, полученные лабораторные образцы СЭ обладают высокой конкурентоспособностью.

Работа поддержана грантом РФФИ №08-08-99071-р_офи.

Список литературы

1. Ethenakis V.M., Fuhrmann M., Heiswer J., Lanzirrotti A., Fitts J., Wang W. Emission and encapsulation of cadmium in CdTe PV modules during fires // *Progress in Photovoltaic: Researches and Application*. 2005. Vol. 13, No. 8. P. 713-723.
2. De Vos A., Parrott J., Baruch P., Landsberg P. Bandgap effects in thin-film heterojunction solar cells // *Proceeding 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Amsterdam (Netherlands). 1994. P. 1315-1319.
3. Loferski J.J. Theoretical consideration governing the choice of the optimal semiconductor for photovoltaic solar energy conversion // *J. Appl. Phys.* 1956. Vol. 27. P. 777-784.
4. Goetzberger A., Luther J., Willere G. Solar cells: past, present, Future // *Solar Energy Material & Solar Cells*. 2002. Vol. 74, No. 1. P.1-11.
5. Mc. Candless B.E., Dobson K.D. Processing option for CdTe thin film solar cells // *Solar Energy Material & Solar Cells*. 2004. Vol. 77, No. 4. P. 839-856.
6. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент М.: Мир, 1988.
7. Khrypunov G.S. Thin film solar cells on CdS/CdTe/ITO base // *Functional Materials*. 2005. Vol. 12, No. 3, P. 517-520.
8. Batrner D.L., Romeo A., Zogg H., Wendt R., Tiwari A.N. Development of efficient and stable back contact on CdTe/CdS solar cells // *Thin Solid Films*. 2001. Vol. 387. P. 151-154.
9. Kurdesau F., Khrypunov G., Cunha A.F., Kaelin M., Tiwari A.N. Comparative study of ITO layers deposited by DC and RF magnetron sputtering // *Non-crystalline materials*. 2006. Vol. 352. P. 1466-1470.
10. Hegedus S.S., Mc. Candless B.E. CdTe contact for CdTe/CdS solar cells: effect of Cu thickness, surface preparation and recontacting on device performance and stability // *Solar Energy Material & Solar Cells*. 2005. Vol. 88, No. 4. P. 75-95.

