

## Особенности физических свойств модифицированной поверхности теллурида кадмия

© В.П. Махний<sup>†</sup>

Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,  
58012 Черновцы, Украина

(Получена 4 октября 2004 г. Принята к печати 10 ноября 2004 г.)

Обнаруженные особенности оптоэлектронных свойств подложек теллурида кадмия с модифицированным слоем и поверхностно-барьерных диодов на их основе объясняются квантово-размерными эффектами в нанокристаллической структуре этого слоя. Образование модифицированного слоя подтверждается результатами исследования поверхности методами атомно-силовой микроскопии и связывается с процессами самоорганизации, доминирующими при определенных условиях отжига.

Поверхностно-барьерные диоды (ПБД) на основе монокристаллического теллурида кадмия могут быть использованы в качестве эффективных детекторов различного рода излучений, в том числе солнечного [1,2]. Их основные фотоэлектрические параметры во многом определяются материалом и методом нанесения выпрямляющего контакта, а также способом обработки базовой подложки. Весьма многообещающей оказалась технология получения ПБД, включающая предварительный отжиг на воздухе (модификация поверхности) монокристаллических пластин  $n$ -CdTe. Этим методом, в частности, удалось изготовить контакты Au–CdTe с эффективностью фотопреобразования  $\sim (13–15)\%$  при 300 К в условиях солнечного освещения (источник AM1.5) [3,4]. Последующие более детальные исследования таких образцов позволили обнаружить ряд особенностей, основными из которых являются следующие.

1. Несмотря на достаточно сложные зависимости плотности тока короткого замыкания ( $J_{sc}$ ) и напряжения холостого хода ( $V_{oc}$ ) от технологических условий получения ПБД, существуют оптимальные температура ( $T_a$ ) и время ( $t_a$ ) отжига подложки, а также ее электрофизические параметры, при которых достигается максимальная эффективность фотопреобразования [5].

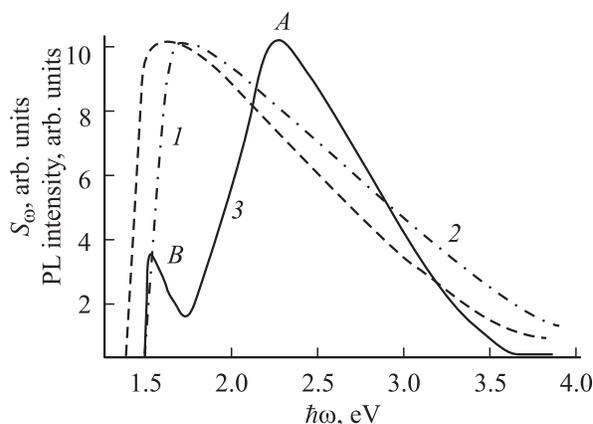
2. ПБД, изготовленные на подложках с модифицированной поверхностью, обладают более высокой фоточувствительностью ( $S_\omega$ ) в высокоэнергетической области спектра по сравнению с контактом золото– $\Gamma$ базовый кристалл<sup>†</sup> (контрольный образец). Кроме того, отсечка на оси энергий фотонов (рис. 1, кривая 2) дает энергию  $\hbar\omega \approx 1.3$  эВ, что значительно меньше ожидаемой величины 1.5 эВ, соответствующей ширине запрещенной зоны  $E_g$  теллурида кадмия при 300 К (рис. 1, кривая 1).

3. В ряде случаев наблюдаемая на опыте плотность тока короткого замыкания ПБД с модифицированной поверхностью [6] заметно превышает теоретически возможную величину этого параметра при тех же условиях освещения [2].

4. Независимо от типа и величины проводимости кристаллы теллурида кадмия, отожженные при оптималь-

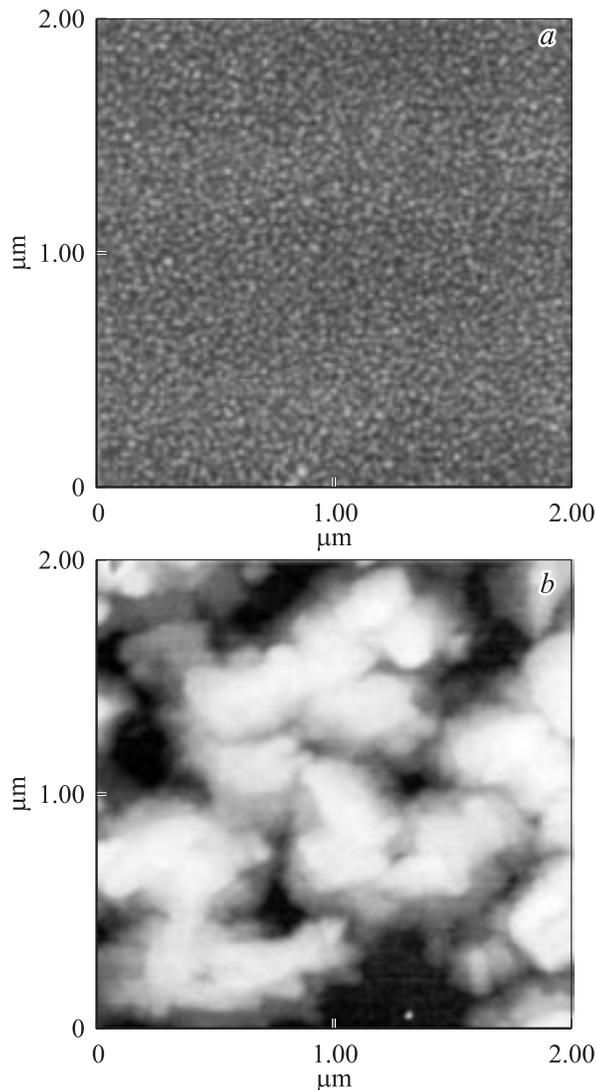
ных условиях (время и температура отжига), обладают также максимальной эффективностью фотолюминесценции (ФЛ) при 300 К [7]. Обратим внимание на то, что при тех же условиях возбуждения краевая ФЛ базовых подложек в области комнатных температур не наблюдается вообще. Излучение отсутствует также в отожженных образцах после удаления с них модифицированного поверхностного слоя путем обработки в полирующем травителе.

5. Облучение модифицированной поверхности, полученной при оптимальных значениях  $T_a$  и  $t_a$ ,  $N_2$ -лазером вызывает ФЛ, спектр которой представлен кривой 3 на рис. 1. Наиболее характерной особенностью спектра является наличие широкой А-полосы, охватывающей интервал энергий фотонов 1.7–3.5 эВ. С течением времени ее интенсивность уменьшается, а максимум смещается в низкоэнергетическую область. Отметим, что стационарные значения интенсивности и энергии максимума достигаются через несколько минут после включения лазерного возбуждения, а приведенный на рис. 1 спектр фотолюминесценции измерен именно при таких условиях. Рассматриваемая А-полоса ФЛ может быть обусловлена квантово-размерным эффектом, по-



**Рис. 1.** Спектры фоточувствительности контактов золота с обычной (1), модифицированной (2) поверхностями теллурида кадмия и спектр ФЛ (PL) модифицированного слоя (3).

<sup>†</sup> E-mail: oe-dpt@chnu.cv.ua



**Рис. 2.** Структура поверхностей базового (а) и отожженного (b) кристаллов теллурида кадмия.

сколькo ее поведение характерно для высокоэнергетического излучения низкоразмерных систем, например, кремниевых нанокристаллов [8]. Рассмотрим этот вопрос более детально.

В первую очередь отметим, что модифицированная поверхность визуально воспринимается матовой в сравнении с зеркальной поверхностью исходных подложек. Исследования микрорельефа при помощи атомно-силового микроскопа серии Nanoscope IIIa в режиме периодического контакта показывают, что поверхность отожженных образцов характеризуется зернистой структурой с латеральными размерами зерен 10–50 нм, которые могут объединяться в более крупные (100–300 нм) (рис. 2). Мелкие зерна представляют собой нанокристаллы, которые и формируют А-полосу. Размытость максимума и большую ширину спектра можно объяснить дисперсией размеров и формы мелких нанокристаллов CdTe. Заметим, что А-полоса не

может быть обусловлена люминесценцией пленки оксида кадмия, возникновение которой в принципе не исключено при проведении отжига. Это подтверждается несколькими экспериментальными фактами. Первый из них состоит в том, что в спектрах ФЛ образцов со специально выращенной пленкой CdO, но имеющих зеркальную поверхность, отсутствует заметное видимое излучение. Во-вторых, спектр отражения с модуляцией длины волны таких образцов содержит пик, соответствующий ширине запрещенной зоны оксида кадмия, который отсутствует в аналогичных спектрах модифицированной поверхности. Наконец, высокоэнергетическое „крыло“ А-полосы обрывается при энергиях, которые заметно превышают ширину запрещенной зоны CdO [9]. Вместе с тем совершенно не исключается участие пленки оксида кадмия в пассивации поверхностных связей и эффекте диэлектрического усиления, однако это требует отдельных исследований.

В заключение отметим, что предложенная выше модель модифицированной поверхности адекватно объясняет также наблюдаемые особенности фотоэлектрических свойств контактов Au–n-CdTe. Наличие достаточно интенсивного краевого излучения (В-полоса на рис. 1) свидетельствует о значительном уменьшении скорости поверхностной рекомбинации. Последнее должно приводить к увеличению коротковолновой чувствительности, что и наблюдается на опыте. Кроме того, поверхность отожженных образцов характеризуется более развитым рельефом, обеспечивая тем самым большую эффективную площадь фотоэлемента, а в конечном итоге и больший ток короткого замыкания. Вследствие многократных отражений увеличивается также коэффициент поглощения фотонов, особенно низкоэнергетических, что и приводит к наблюдаемому смещению края fotocувствительности. Этот эффект, как и в текстурированном фотоэлементе [2], вызывает также увеличение  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  и высокоэнергетической чувствительности.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что модифицированный поверхностный слой представляет собой нанокристаллическую структуру, в которой наблюдаются квантово-размерные эффекты. Образование же самой структуры, по-видимому, обусловлено процессами самоорганизации, которые вполне вероятны с учетом особенностей условий отжига. В первую очередь отметим достаточно узкие температурный и временной интервалы отжига [7]. Кроме того, соблюдение этих параметров в иных условиях (вакуум или инертная атмосфера) не приводят к желаемому результату. В связи с этим окончательный ответ на процесс самоорганизации могут дать лишь дополнительные экспериментальные и теоретические исследования, выходящие за рамки данной работы.

Автор признателен И.В. Прокопенко за проведение структурных исследований и М.М. Слетову за помощь при измерении спектров фотолюминесценции.

## Список литературы

- [1] Д.В. Корбутяк, С.В. Мельничук, С.В. Корбут и др. *Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості* (Київ, Іван Федоров, 2000).
- [2] А. Фаренбрех, Р. Бьюб. *Солнечные элементы: теория и эксперимент* (М., Энергоатомиздат, 1987).
- [3] R. Siach, M.V. Demich, P.M. Gorley, Z. Kuznicki, V.P. Makhniy, I.V. Malimon, Z. Swiatek. *J. Cryst. Growth*, **197**, 675 (1999).
- [4] K. Pranab, P. Raychaudhuri. *J. Appl. Phys.*, **62** (7), 3025 (1987).
- [5] М.В. Демич, П.М. Горлей, В.П. Махний и др. *Науков. вісн. ЧДУ: Фізика*, **30**, 124 (1998).
- [6] P.M. Gorley, M.V. Demich, V.P. Makhniy et al. *Thin Sol. Films*, **30**, 124 (2002).
- [7] В.П. Махний, М.В. Демич, М.М. Сльотов. Декл. патент України № 5010А, пр. 22.04.2003.
- [8] Э.Б. Каганович, Э.Г. Манойлов, И.Р. Базылюк, С.В. Свечников. *ФТП*, **37** (3), 353 (2003).
- [9] К. Чопра, С. Дас. *Тонкопленочные солнечные элементы* (М., Мир, 1986).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## **Peculiarities of physical properties of a modified surface of cadmium telluride**

*V.P. Makhny*

The Fed'kovich National University in Chernovtsy,  
58012 Chernovtsy, Ukraine