

УДК 621.315.592

**Исследование промежуточного слоя на гетерогранице  $n^+$ -CdS/ $p$ -CdTe**© С.А. Музафарова<sup>¶</sup>, Б.У. Айтбаев, Ш.А. Мирсагатов, К. Дуршимбетов\*, Ж. Жанабергенов<sup>+</sup>Физико-технический институт, Научно-производственное объединение „Физика солнца“  
Академии наук Республики Узбекистан,  
700084 Ташкент, Узбекистан\* Каракалпакский государственный университет,  
708004 Нукус, Узбекистан+ Каракалпакский государственный педагогический институт,  
708004 Нукус, Узбекистан

(Получена 13 марта 2008 г. Принята к печати 27 марта 2008 г.)

Исследовано формирование твердого раствора на гетерогранице  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe в солнечных элементах в зависимости от технологического режима и последующего стимулирующего фактора — ультразвукового воздействия. Фазовый состав переходного слоя твердого раствора исследован с помощью неразрушающего фотоэлектрического метода, путем измерения спектрального распределения фоточувствительности в вентильном и фотодиодном режимах. Проведенные исследования показали, что фазовый состав и толщина слоя промежуточного твердого раствора CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> сильно зависят от технологического режима формирования гетероструктуры.

PACS: 73.61.Ga, 73.40.Lq, 81.40.Tv

**1. Введение**

В последние годы многими авторами проведены исследования [1,2] по разработке солнечных элементов на основе поликристаллических пленок  $p$ -CdTe с гетероструктурой  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe, где было показано, что такие солнечные элементы (СЭ) имеют большую перспективу в области использования солнечной энергии. Поэтому большое внимание уделяется технологическим приемам создания гетероструктур (ГС)  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe и изучению электрофизических процессов в таких структурах. Было установлено, что в процессе выращивания структуры  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe на гетерогранице образуется тонкий слой между пленками CdS и CdTe. Недавние специально проведенные экспериментальные исследования ГС  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe методом NSOM (near-field scanning optical microscopy) показали [3–5], что переходный промежуточный слой формируется благодаря диффузии серы из CdS в CdTe в определенных технологических условиях, в результате чего образуется твердый раствор CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>.

Авторами [6,7] было показано, что полупроводниковые бинарные соединения CdS и CdTe, взаимодействуя между собой, образуют твердый раствор CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> с непрерывным изменением содержания CdS ( $0 < x < 1$ ) [7]. Эффективность солнечных элементов на основе  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe во многом определяется совершенством состава, структуры, геометрическими размерами и фазами раствора [2]. Обеспечение непрерывности по составу твердого раствора CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> на гетерогранице [6] создает благоприятный эффект. Ширина запрещенной зоны гетероструктуры увеличивается к облучаемой поверхности и встроенное электрическое поле, обусловленное градиентом ширины запрещенной зоны, приводит к затягиванию неосновных носителей

заряда в объем на глубину, значительно превышающую диффузионную длину. В результате уменьшается поверхностная рекомбинация. Из-за этого коэффициент собирания неосновных носителей заряда может оказаться близким к 1 в широкой области фоточувствительности. Спад фоточувствительности в коротковолновой области спектра определяется толщиной слоя твердого раствора и энергией фотонов, начиная с которой поглощение в широкозонном  $n$ -слое на поверхности структуры становится существенным.

Для достижения лучшей эффективности СЭ твердый раствор в нашем случае должен обладать непрерывным составом и на толщине порядка 1 мкм изменяться от CdS до CdTe. Это сложная технологическая задача, связанная с применением высокой температуры. Использование высокотемпературной технологии при формировании гетероструктуры  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe приводит к увеличению содержания неконтролируемых примесей по всей структуре, в том числе в пленке CdTe. Поэтому представляет интерес исследование формирования гетероструктуры  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe в тех пределах температуры окружающей среды, при которых не меняются свойства тонких пленок CdTe.

**2. Методика эксперимента**

В данной работе исследуется формирование твердого раствора CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> на гетерогранице  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe в солнечных элементах в зависимости от технологического режима и последующего стимулирующего фактора — ультразвукового воздействия (УЗВ). Солнечные элементы  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe площадью 1 см<sup>2</sup> изготавливались по технологии [8] на молибденовой подложке. Передний контакт, со стороны которого осуществлялось

<sup>¶</sup> E-mail: samusu@rambler.ru

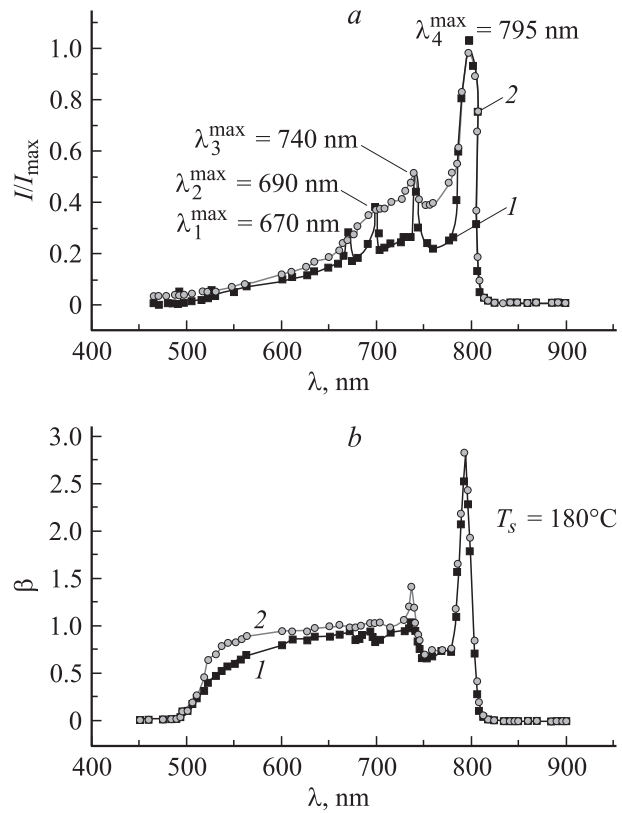
освещение, изготовлен из чистого индия, нанесенного в вакууме  $10^{-5}$  Торр в виде гребенки. При этом ширина контактной полосы составляет 0.8 мм, расстояние между полосами 2 мм. Тыльным контактом служила молибденовая фольга.

Фазовый состав переходного слоя твердого раствора исследован с помощью фотоэлектрического метода путем измерения спектрального распределения fotocувствительности в вентиляльном и фотодиодном режимах. Этот метод является точным и неразрушающим. Спектральная зависимость fotocувствительности измерялась на монохроматоре ЗМР-3 при комнатной температуре. Источником излучения служила ксеноновая лампа типа ДКСШ-1000, которая обеспечивала световой поток 53 000 мм, яркостью до  $120 \text{ Мкд/м}^2$  с центральным световым пятном, работающая в режиме минимально допустимой мощности. Излучение отградуировано в абсолютных единицах при помощи термоэлемента с кварцевым окошком РТЭ-9. Лампа ДКСШ-1000 имеет в ультрафиолетовой (УФ) и видимой областях сплошной спектр, а в ближней инфракрасной (ИК) области 800–820 нм мощные линии излучения. Поэтому большое значение имеет установление размеров входных и выходных щелей и разрешающей способности монохроматора, позволяющего корректно измерять параметры исследуемого образца. Проведенная оценка в работе [9] показывает, что при ширине щели около 10 мкм обеспечивается вышеуказанное требование. Однако в эксперименте ширина щели установлена гораздо шире, чтобы обеспечить достаточное значение fotocувствительности исследуемого объекта, сохраняя при этом возможность исследования тонких явлений. Исследуемые образцы были подвергнуты также и ультразвуковому облучению. Облучение проводилось на частоте  $\nu = 2.5 \text{ МГц}$  с мощностью  $W = 0.5\text{--}1 \text{ Вт/см}^2$  в течение 10–15 мин.

### 3. Экспериментальные результаты

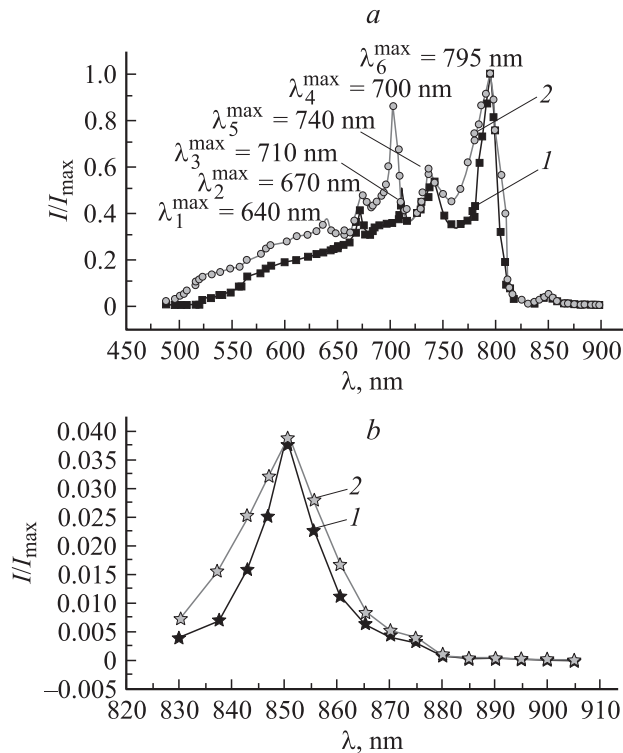
Проведенные исследования показывают, что фазовый состав и толщина промежуточного слоя твердого раствора сильно зависят от технологического режима формирования, особенно от температуры подложки и роста гетероструктуры. При этом обнаружено, что твердые растворы  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$  начинают формироваться при температуре подложки  $T_s \approx 150^\circ\text{C}$ . Однако экспериментально было выявлено, что твердые растворы, обеспечивающие наилучшие фотоэлектрические свойства ГС  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ , синтезируются при температурах подложки  $T_s = 180\text{--}220^\circ\text{C}$ , на которых остановимся далее более подробно. С повышением температуры твердый раствор начинает обогащаться атомами серы. В результате значение  $x$  начинает расти. Как известно [7,8], каждому составу твердого раствора  $x$  соответствует значение постоянной решетки  $a_0$ , находящееся между постоянными решетками  $\text{CdS}$  ( $a_0 = 5.832 \text{ \AA}$ ) и  $\text{CdTe}$  ( $a_0 = 6.423 \text{ \AA}$ ).

На рис. 1, *a* (кривая 1) и 2, *a* (кривая 1) показаны спектральные распределения fotocувствительности ГС  $n\text{-}$



**Рис. 1.** Спектральное распределение для гетероструктуры  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$  ( $T_s = 180^\circ\text{C}$ ): *a* — fotocувствительности, *b* — эффективного квантового выхода  $\beta$ ; 1 — до, 2 — после ультразвукового облучения.

$\text{CdS}/p\text{-CdTe}$ , полученные для структур, выращенных при температурах подложки  $T_s = 180$  и  $T_s = 220^\circ\text{C}$ . В спектральном распределении fotocувствительности между краями собственного поглощения  $\text{CdS}$  и  $\text{CdTe}$  для ГС  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ , полученной при температуре  $T_s = 180^\circ\text{C}$ , наблюдаются явные пики  $\lambda_1^{\text{max}} = 670 \text{ нм}$ ,  $\lambda_2^{\text{max}} = 690 \text{ нм}$ ,  $\lambda_3^{\text{max}} = 740 \text{ нм}$ ,  $\lambda_4^{\text{max}} = 795 \text{ нм}$  (рис. 1, кривая 1). После УЗ воздействия в течение 10 мин (рис. 1, *a*, кривая 2) максимумы  $\lambda_1^{\text{max}} = 670 \text{ нм}$  и  $\lambda_2^{\text{max}} = 690 \text{ нм}$  исчезают, пик  $\lambda_3^{\text{max}} = 740 \text{ нм}$  значительно усиливается по амплитуде. Основной пик  $\lambda_4^{\text{max}} = 794\text{--}797 \text{ нм}$  практически остается неизменным. Ультразвуковое воздействие также приводит к повышению fotocувствительности во всем диапазоне спектра, особенно в коротковолновой области спектра. На рис. 1, *b* приводится спектральное распределение внутреннего квантового выхода  $\beta$  до (кривая 1) и после (кривая 2) воздействия ультразвукового облучения структур  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$  в течение 10 мин. Внутренний квантовый выход оценен по формуле  $\beta = I_{s1}/qN_\lambda$ , где  $N_\lambda$  — число падающих квантов при данной длине волны на поверхность образца. Следовательно, предполагается, что все падающие на поверхность кванты поглощаются и генерируют электронно-дырочные пары, которые участвуют в формировании фототока. Даже в таком гипотетическом предположении, значения  $\beta$  являются



**Рис. 2.** Спектральное распределение фоточувствительности для гетероструктуры  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe ( $T_s = 220^\circ\text{C}$ ): 1 — до, 2 — после ультразвукового воздействия (а). б — то же длинноволновой области спектра.

достаточно высокими во всем диапазоне спектра между полосами собственного поглощения CdS и CdTe. Как видно на рис. 1, б, внутренний квантовый выход имеет особенно аномально высокое значение, равное  $\sim 1.05$  и  $2.5$ , в области длин волн  $737$ – $741$  и  $795$ – $797$  нм (до облучения с ультразвуком). После облучения ультразвуком значение  $\beta$  достигает значений  $\sim 1.5$  и  $2.85$  соответственно.

В спектральном распределении фоточувствительности ГС, полученной при  $T_s = 220^\circ\text{C}$ , имеются несколько пиков при  $\lambda_1^{\max} = 670$  нм,  $\lambda_2^{\max} = 710$  нм,  $\lambda_3^{\max} = 740$  нм,  $\lambda_4^{\max} = 795$  нм (рис. 2, а, кривая 1), также слабый пик при  $\lambda_5^{\max} = 850$  нм, амплитуда которого в среднем на 2 порядка меньше, чем у пиков, обнаруженных в видимой области спектра (рис. 2, б). Практически последний пик в спектре фоточувствительности обнаружен у всех структур, полученных при температуре подложки  $T_s \geq 180^\circ\text{C}$ . Амплитуда пиков изменяется от образца к образцу, но амплитуда пика  $\lambda_3^{\max} = 740$  нм остается довольно постоянной.

После УЗ воздействия на структуру  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe, полученную при  $T_s = 220^\circ\text{C}$ , пик  $\lambda_2^{\max} = 710$  нм исчезает и образуется новый усиленный пик  $\lambda_4^{\max} = 700$  нм, амплитуда которого достигает  $\sim 90\%$  амплитуды основного пика  $\lambda_5^{\max} = 795$  нм. После УЗ воздействия в некоторых образцах появляется новый пик  $\lambda_1^{\max} = 640$  нм (рис. 2, а, кривая 2). УЗ облучение повышает фоточувствитель-

ность практически в одинаковой степени во всем диапазоне спектра. Для обнаруженных пиков в спектральной зависимости распределения фоточувствительности определены соответствующие края фундаментального поглощения  $\lambda_{\text{e.f.a}}$  с помощью экстраполяции длинноволнового края максимумов фоточувствительности на ось  $\lambda$ . Используя значения краев фундаментального поглощения для обнаруженных пиков в спектре фоточувствительности, определены ширины запрещенных зон  $E_g$  твердых растворов (ТР), формируемых на гетерогранице  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe.

На основе зависимости между составом ТР и шириной запрещенной зоны  $E_g(x)$  [10] определен состав ТР  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$  для найденных значений  $E_g$ . Определенные значения края фундаментального поглощения  $\lambda_{\text{e.f.a}}$ , ширина запрещенной зоны  $E_g$ , состав  $x$  ТР для всех обнаруженных пиков на спектре фоточувствительности при  $T_s = 180^\circ\text{C}$  и  $T_s = 220^\circ\text{C}$  приводятся в табл. 1. Значения постоянной кристаллической решетки  $a_0(x)$  для обнаруженных ТР  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$  на границе ГС  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe, которые оценены по эмпирической формуле  $a_0(x) [\text{Å}] = 0.6477 - 0.057x$  [11], также приводятся в табл. 1.

Следует отметить, что при определении состава ТР  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$  с  $E_g = 1.4$  эВ по эмпирической формуле  $E_g [\text{эВ}] = 1.74x^2 - 1.01x + 1.51$  [11] получается решение для  $x$  в виде двух положительных значений. Для других значений  $E_g$  ТР получается только одно положительное значение  $x$ . Поэтому в табл. 1 для ТР с  $E_g = 1.4$  эВ приводятся два значения состава, а для других  $E_g$  одно значение состава  $x$ . Повышение температуры подложки  $T_s$  усиливает процесс проникновения серы и процесс образования устойчивого ТР с фазами  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  [7]. Состав этих ТР соответствует областям взаимной растворимости компонентов на равновесной диаграмме состояния систем. Сравнительно при низкой температуре ( $T_s \approx 180^\circ\text{C}$ ) синтезируется ТР с составом  $\text{CdTe}_{0.32}\text{S}_{0.68}$ , которому соответствуют пик при  $\lambda = 740$  нм и край фундаментального поглощения  $\lambda_{\text{e.f.a.}} = 755$ – $770$  нм, а также ТР с составом  $x = 0.21$ . Последний ТР на спектре фоточувствительности характеризуется пиком  $\lambda^{\max} = 850$  нм и краем фундаментального поглощения  $\lambda_{\text{e.f.a.}} = 890$  нм (рис. 2, б и табл. 1) на спектре фоточувствительности. Согласно [12], ТР  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$  с составом  $x \approx 0.2$ – $0.22$  имеет ширину запрещенной зоны  $E_g = 1.39$  эВ, поэтому его поглощение в спектре фоточувствительности проявляется при  $\lambda = 845$ – $850$  нм. Этот твердый раствор, по-видимому, имеет устойчивый состав, так как его пик на спектре фоточувствительности практически не изменяется после УЗ воздействия. Что касается амплитуды фоточувствительности этого пика, как указывалось выше, то, вероятно, она обусловлена малой толщиной твердого раствора. При этом на гетерогранице образуются также метастабильные ТР с характерными пиками при  $\lambda^{\max} = 670$  нм и  $\lambda^{\max} = 690$  нм, которые отжигаются в процессе УЗ воздействия.

Как видно из табл. 1, ТР при составах  $x = 0.68$  и  $x = 0.21$  имеют значения постоянных кристаллической

**Таблица 1.** Зависимость постоянной решетки  $a_0(x)$ , средней ширины запрещенной зоны  $E_g^{av}$ , а также края фундаментального поглощения  $\lambda_{c.f.a.}$  для твердого раствора  $CdS_xTe_{1-x}$  от температуры подложки  $T_s$  и ультразвукового воздействия

Температура подложки, $T_s$ , °C	До или после УЗ воздействия	$\lambda_i^{max}$ , нм	$\lambda_{c.f.a.}$ , нм	$E_g$ , эВ	$x$	$a_0(x)$ , Å
180	до	670	674	1.84	0.81	0.5942
		690	704	1.76	0.77	0.5972
		740	760	1.63	0.68	0.6030
		795	810	1.53	0	0.6477
		850	880	1.4	0.38	0.6181
180	после				0.21	0.6346
		740	760	1.63	0.68	0.6030
		795	810	1.53	0	0.6477
		850	880	1.4	0.38	0.6181
					0.21	0.6346
220	до	670	673	1.84	0.81	0.5942
		710	630	1.7	0.73	0.5997
		740	760	1.63	0.59	0.6030
		795	810	1.53	0	0.6477
		850	880	1.4	0.38	0.6181
220	после				0.21	0.6346
		640	650	1.9	0.84	0.5925
		670	673	1.84	0.81	0.5942
		700	710	1.74	0.75	0.5984
		740	760	1.63	0.68	0.6030
			0.38	0.6477		
			0.21	0.6181		
					0.6346	

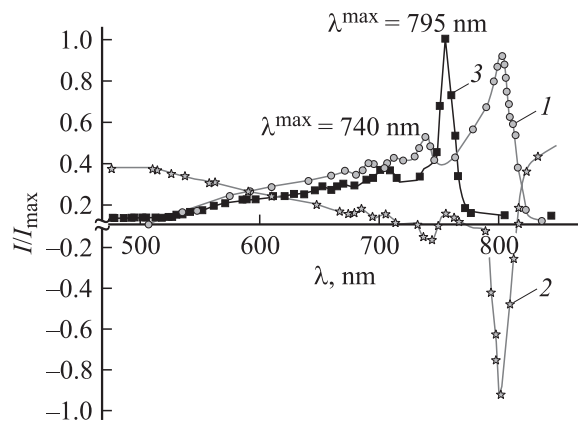
решетки  $a_0(x) = 0.6030$  и  $0.6346$  Å соответственно. ТР с составом  $x = 0.68$  более близок по составу к слоям CdS, а ТР с составом  $x = 0.21$  — к слоям CdTe. Оценка показывает, что величины  $a_0(x)$  для CdS и ТР с  $x = 0.68$  отличаются на 3.4%, а  $a_0(x)$  для пленок CdTe и ТР с  $x = 0.21$  отличаются всего на 0.5%.

Согласно [13], при разнице постоянных кристаллических решеток полупроводниковых материалов  $\Delta a_0(x) \leq 4\%$  между ними можно формировать гетеропереход без поверхностных состояний. Этим требованиям соответствует вышеприведенная оценка. Подтверждением тому является высокое значение коэффициента выпрямления темного тока ( $K = I_{s1}/I_{ret} = 10^4 - 10^5$ ), тока короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) и коэффициента заполнения световой вольт-амперной характеристики ( $Q \approx 0.5$ ).

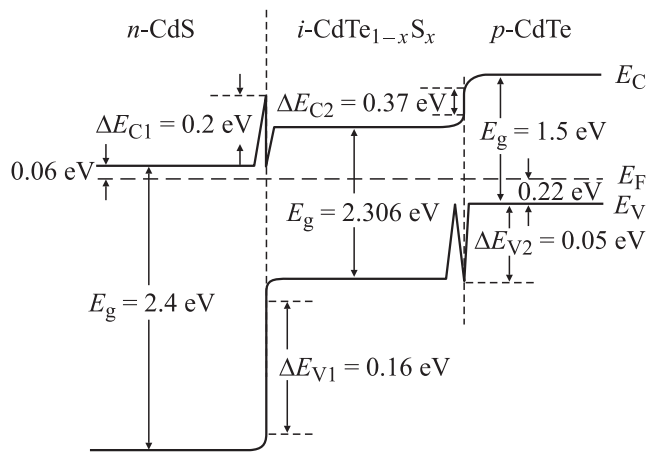
С повышением температуры подложки повышается вероятность образования твердого раствора  $CdT_{1-x}S_x$  с различным составом, о чем свидетельствует количество пиков на спектре фоточувствительности ГС (рис. 2, б, кривые 1 и 2). В области температур подложки  $T_s \geq 240^\circ\text{C}$  на границе  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe синтезируется довольно толстый промежуточный слой  $\sim 3$  мкм, который состоит из твердых растворов, отличающихся геометрическими размерами и удельными сопротивлениями. Спектральное распределение фоточувствительности в вентильном и фотодиодном режимах (рис. 3, кривые 1 и 2) наглядно демонстрирует это утверждение. Приравни-

вание значения фототока к нулю при четырех значениях длин волн падающего излучения (рис. 3, кривая 2) показывает, что промежуточный слой ТР действительно отличается между собой по составу, электрофизическим свойствам и геометрическими размерами.

УЗ облучение сильно изменяет спектральное распределение фоточувствительности: исчезают экстремальные точки и появляются ярко выраженные пики



**Рис. 3.** Спектральное распределение фоточувствительности для гетероструктуры  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe ( $T_s = 220^\circ\text{C}$ ): 1 — вентильный режим, 2 — фотодиодный режим, 3 — вентильный режим после ультразвукового воздействия.



**Рис. 4.** Зонная диаграмма гетероперехода  $p\text{-CdTe}/i\text{-CdTe}_{1-x}\text{S}_x/n\text{-CdS}$ .

$\lambda^{\max} = 737\text{--}740$  нм и  $\lambda^{\max} = 795$  нм (рис. 3, кривая 3). Пик  $\lambda^{\max} = 850$  нм в длинноволновой области спектра фоточувствительности остается практически без изменения.

Полученные данные по вольт-амперным характеристикам показывают [14–17], что формируемый твердый раствор  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$  —  $i$ -слой на гетерогранице  $p\text{-CdTe}/n\text{-CdS}$  — является сильно компенсированным материалом [11], неоднородным не только по удельному сопротивлению, но и по составу.

На основе анализа вольт-амперных и вольт-емкостных характеристик гетероперехода  $\text{CdTe}/\text{CdS}$  построена зонная диаграмма структуры (рис. 4).

Следуя Мильнсу [13], разрывы в зоне проводимости можно оценить как

$$\Delta E_{C1} = \chi_{\text{CdS}} - \chi_{\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x} \quad \text{и} \quad \Delta E_{C2} = \chi_{\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x} - \chi_{\text{CdTe}},$$

где  $\chi_{\text{CdS}}$ ,  $\chi_{\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x}$ ,  $\chi_{\text{CdTe}}$  — значения электронного сродства  $\text{CdS}$ ,  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$  и  $\text{CdTe}$  соответственно. Величина разрывов в валентной зоне

$$\Delta E_{V1} = (E_g^{\text{CdS}} - E_g^{\text{CdTeS}}) - \Delta E_{C1}$$

и

$$\Delta E_{V2} = (E_g^{\text{CdTeS}} - E_g^{\text{CdTe}}) - \Delta E_{C2},$$

где  $E_g^{\text{CdS}}$ ,  $E_g^{\text{CdTeS}}$  и  $E_g^{\text{CdTe}}$  — значения ширины запрещенной зоны  $\text{CdS}$ ,  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$  и  $\text{CdTe}$  соответственно. Численные значения этих параметров приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Ширина запрещенной зоны, работа выхода и уровень Ферми для гетероперехода  $n\text{-CdTe}/p\text{-CdS}$

Материал	$E_g$ , эВ	$\chi$ , эВ	$E_F$ , эВ
CdTe	1.5	4.28	0.22
$\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$	2.3	4.3	
CdS	2.4	4.5	0.06

## 4. Заключение

Тонкий переходной слой твердого раствора в гетероструктуре, сглаживающий несоответствие решеток, дает большой вклад в относительно высокое значение квантового выхода  $\beta$  гетероперехода  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ . Это означает возможность эффективного разделения генерируемых светом электронно-дырочных пар, которое обусловлено тем, что выбранный технологический режим в процессе изготовления гетеропереходов позволяет получить на границе раздела гетероперехода тонкий  $i$ -слой TP  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ , снижающий количество поверхностных состояний.

Аномально высокое значение внутреннего квантового выхода  $\beta = 2.5\text{--}2.85$ , вероятно, получается за счет усиления фототока на основе инжекции неравновесных носителей — электронов из прослоек между зернами в слой объемного заряда [18]. При этом инжекция электронов в слой объемного заряда стимулируется самим объемным зарядом. Следовательно, чем выше поле потенциального барьера, тем больше электронов, инжектированных из прослоек в слой объемного заряда, и тем больше значение внутреннего квантового выхода. Из фотоэлектрических измерений определены значения состава  $x$  для TP  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ . Наличие тонкого слоя, обладающего высокой фотопроводимостью и большим сопротивлением, приводит к значительному увеличению фоточувствительности гетероструктуры.

Можно сделать вывод о том, что на гетерогранице  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$  образуется TP  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$  различного состава в зависимости от температуры подложки  $p\text{-CdTe}$  при осаждении  $\text{CdS}$  на ее поверхность термическим испарением в вакууме. При этом наряду со стабильными состояниями образуется метастабильный TP  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ , который распадается при воздействии УЗ с частотой  $\nu = 2.5$  МГц с мощностью  $W = 0.5\text{--}1$  Вт/см<sup>2</sup> в течение 10–15 мин. УЗ воздействие повышает фоточувствительность во всем диапазоне спектра фоточувствительности у гетероструктур  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ , полученных при  $T_s \geq 220^\circ\text{C}$ , а у образцов, полученных при  $T_s < 180^\circ\text{C}$ , фоточувствительность возрастает в основном в области спектра  $\lambda = 610\text{--}750$  нм.

Как было установлено [19], природа акустостимулированных (АС) эффектов в полупроводниках типа  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  определяется акустодислокационным взаимодействием и эффективной трансформацией поглощения УЗ энергии во внутренние колебательные состояния кристалла. Поглощенная УЗ энергия в образце интенсифицирует диффузионное перераспределение точечных неравновесных дефектов между объемом „субблока“ — зерен и протяженными дефектами (дислокации, межзеренные границы, поликристаллы, включения второй фазы и др.).

Известно, что интенсивный ультразвук, распространяясь в твердых телах, может существенно влиять на состояние дефектов структуры [20,21]. Например, ультразвук формирует приповерхностный слой в кремнии [20], вызывает диссоциацию сложных комплексов, состоящих



из нескольких точечных дефектов, в том числе метастабильных соединений и твердых растворов, а также усиливает гетерирование дислокациями, межзеренными границами и преципитатами точечных дефектов [22–25], снижает барьер диффузии дефектов.

Эти физические процессы вполне могут привести к изменению зарядовых состояний рекомбинационных центров. В результате изменяются проводимость и рекомбинационные параметры исследуемой структуры, а также состав твердых растворов, образующихся между слоями  $n$ -CdS и  $p$ -CdTe.

Вероятно, этими физическими процессами обусловлены возрастание фототока и распад метастабильных твердых растворов в гетероструктуре  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe после воздействия УЗ облучения, которые наблюдаются экспериментально.

Однако для окончательного установления механизма влияния УЗ облучения на гетероструктуру  $n$ -CdS– $p$ -CdTe необходимо провести специальное исследование, в виду того, что объект сложный — многослойный поликристалл, и, кроме того, гетероструктура  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe работает как  $p$ – $i$ – $n$ -структура [15], где  $i$ -слой  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$  неоднороден не только по проводимости, но и по составу и имеет как стабильные, так и не стабильные по составу области.

## Список литературы

- [1] Wu. Xuanzhi. J. Solar Energy, **77** (6), 803 (2004).
- [2] N.B. Romeo, A. Bosio, V. Canevari, A.J. Podesta. J. Solar Energy, **77** (6), 795 (2004).
- [3] M.K. Herndon, A. Gupta, V.I. Kaydanov, R.T. Collins. Appl. Phys. Lett., **75** (22), 3503 (1995).
- [4] Ж. Жанабергенов, Ш.А. Мирсагатов, С.Ж. Каражанов. Неорг. матер., **41** (8), 915 (2005).
- [5] A.S. Gilmore. PhD dissertation. P. 136 (2002).
- [6] R.A. Reynolds, M.J. Brau, H. Kraus et al. J. Phys. Chem. Sol. Suppl., **42**, 511 (1971).
- [7] Л.Д. Мизецкая, Н.Д. Буденная, Н.Д. Олейник. *Физико-химические основы синтеза полупроводниковых монокристаллов*. (Киев, Наук. думка, 1975) с. 30–40.
- [8] Ш.А. Мирсагатов, А.И. Сулганов, С.А. Музафарова. Гелиотехника, № 2, 8 (1986).
- [9] *Лабораторные оптические приборы*, под ред. А.А. Новицкого (М., Машиностроение, 1979).
- [10] А. Амброзьяк. *Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов* (М., Сов. радио, 1970).
- [11] D. Bonnet, H. Rabenhorst. *Proc. Int. Conf. Physics and Chemistry of Semiconductor Heterojunction and Layer Structure* (Hungary, Budapest, Akademiai Kiado, 1971) т. 1, с. 119.
- [12] K. Ohata, J. Saraie, T. Tanaka. Jpn. J. Appl. Phys., **12** (10), 1641 (1973).
- [13] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл–полупроводник* (М., Мир, 1975).
- [14] Ш.А. Мирсагатов, К. Сабиров, С.А. Музафарова. ФТП, **21** (4), 733 (1987).

- [15] Ш.А. Мирсагатов, Ж. Жанабергенов, С.Ж. Каражанов. Неорг. матер., **41** (8), 915 (2005).
- [16] Ж. Жанабергенов, Ш.А. Мирсагатов, С.Ж. Каражанов, С.А. Музафарова. Письма ЖТФ, **29** (21), 82 (2003).
- [17] Ш.А. Мирсагатов, С.А. Музафарова. *Матер. конф. „Физика в Узбекистане“* (Узбекистан, Ташкент, 27–28 сентября 2005) с. 97.
- [18] Ш.А. Мирсагатов, Б.У. Айтбаев, В.М. Рубинов. ФТП, **30** (3), 550 (1987).
- [19] И.В. Островский. *Акустолюминесценция и дефекты в кристаллах* (Киев, Выща. шк., 1995) гл. 4, гл. 6.
- [20] И.В. Островский, Л.П. Стебленко, А.Б. Надточий. ФТТ, **42** (3), 478 (2000).
- [21] V. Ostapenko, K. Bell. J. Appl. Phys., **77** (10), 5458 (1995).
- [22] И.Б. Ермолович, В.В. Миленин, Р.В. Конакова, Л.Н. Применко, И.В. Прокопенко, В.Л. Громашевский. ФТП, **31** (4), 503 (1997).
- [23] В.С. Аракелян, А.А. Авакян, Л.К. Капанакян. ФТТ, **27** (8), 2536 (1985).
- [24] M.K. Sheinkman, L.V. Borkovskaya, B.R. Dzhumayev, L.A. Drozdova, N.E. Korsunskaya, I.V. Morkevich, A.F. Singaevsky. Mater. Sci. Forum, **196–201**, 1467 (1995).
- [25] А.И. Власенко, Я.М. Олих, Р.К. Савкина. ФТП, **33** (4), 410 (1999).

Редактор Т.А. Полянская

## Research of an intermediate layer on interface, $n^+$ -CdS/ $p$ -CdTe

S.A. Muzafarova, B.U. Aitbaev, Sh.A. Mirsagatov, K. Durshimbetov\*, Z. Zhanabergenov<sup>+</sup>

Physicotechnical Institute,  
Research and Production Associations  
„Physics of Sun“,  
Academy of Sciences of Republic Uzbekistan,  
700084 Tashkent, Uzbekistan  
\* Karakalpak State University,  
708004 Nukus, Uzbekistan  
<sup>+</sup> Karakalpak State Teacher's Training Institute,  
708004 Nukus, Uzbekistan

**Abstract** Formation of a solid solution on  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe interface of solar elements in dependence on a technological operation and the subsequent stimulating factor — ultrasonic influence — has been investigated. The phase structure of a transition layer of solid solution was investigated by means of not-destroyed photo-electric method, by measurement of spectral distribution of photosensitivity in gate modes and photodiode modes. Carried out researches show, that the phase structure and thickness of intermediate layer of  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$  strongly depends on a technological mode of formation heterostructure.