

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ P-CDTE-NCDS И PCDTE-CDSE С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ

С.М. Отажонов, Р.Н.Эргашев, Т.Ахмедов, К.А.Ботиров

Ферганский государственный университет, Фергана

Аннотация. В данной статье рассмотрено фотоэлектрические и вольтамперные характеристики солнечных элементов на основе пленочных гетеропереходов p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe с участием глубоких примесных уровней. Установлено, что в гетероструктурах значительно улучшается фоточувствительность при введении легиранта Ag и Cu в пленки CdTe и сдвигается ближе инфракрасной области спектра. Определено, глубокие примесные уровни в CdTe энергия активации, которых равны $E_c=1,15$ эВ.

Ключевые слова: Солнечные элементы, глубокие примесные уровни, CdTe, коэффициент поглощения, КПД, фоточувствительность.

Annotation. This article examines the photoelectric and current-voltage characteristics of solar cells based on p CdTe – n CdS and p CdTe – n CdSe film heterojunctions with the participation of deep impurity levels. It has been established that in heterostructures the photosensitivity significantly improves with the introduction of Ag and Cu dopant into CdTe films and shifts closer to the infrared region of the spectrum. The activation energy of deep impurity levels in CdTe is determined to be equal to $E_c = 1.15$ eV.

Key words: Solar cells, deep impurity levels, CdTe, absorption coefficient, efficiency, photosensitivity.

Введение. В последнее время тонкослойные технологии приобрели большое значение в связи с высокими требованиями в области современной микроэлектроники и нанoeлектроники. В частности, следует отметить бурное развитие систем преобразования солнечной энергии во всем мире. В связи с этим возникает проблема поиска способов прогнозирования их стойкости и обеспечения стойкости фотоприемников и фотопреобразователей к работе внешних воздействиях, таких как сильное световое воздействие, радиация высокая температура и другие внешние факторы [1-7]. В последние годы наряду с другими полупроводниковыми приборами на основе соединений $A_2 B_6$ возрастает интерес к технологическим и химико-физическим свойствам соединения теллурида кадмия CdTe наряду с арсенидами кремния Si и галлия в полупроводниковой технике. CdTe также является прямозонным полупроводником с оптимальным диапазоном энергий $E_g \approx 1.5$ эВ и высоким коэффициентом поглощения [5]. Благодаря этим свойствам слои CdTe могут эффективно поглощать кванты света в широком диапазоне солнечного излучения.

Тонкие пленки CdTe и гетероструктуры на их основе также перспективны для изготовления солнечных элементов [2,3]. Тонкие поликристаллические пленки CdTe, содержащие встроенные гетеропереходы, перспективны и для производства ячеек оптической памяти [4,5,6]. А также на основе гетероструктуры CdTe-SiO₂-Si можно создать фотоприемники с управляемой спектральной фоточувствительностью [5], запоминающее устройства [8], элементы памяти с управляемым временем запоминания [9].

В настоящее время на основе CdTe получены гетеропереходы, эффективно работающие в качестве солнечных элементов и фотоприемников в видимой и ИК области спектра [1,2].

Предельный теоретический КПД солнечного элемента с гетеропереходом p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe составляет соответственно 17 и 21% [3]. В такие гетеропереход существенно снижается влияние поверхностной рекомбинации и последовательного сопротивления. Рассогласование постоянных кристаллических решеток CdTe и CdS составляет ~ 10%, в случае пары CdTe – CdSe ~ 13%. При таком рассогласовании постоянных решеток возникает большая концентрация рекомбинационных центров на границе раздела двух полупроводников. Однако результаты исследования [3] показали, что для фоточувствительных приборов наличие высокой плотности рекомбинационных центров N_s на границе не является губительным. Это видно из того факта, что скорости поверхностной рекомбинации S на гетерогранице при N_s → ∞ стремятся не к бесконечности, а к конечной дрейфовой скорости в приграничном электрическом поле.

Авторами работы [5] по методике переходные процессы контактной фотопроводимости в пленках CdTe было определено скорости поверхностной рекомбинации которые равна $\tau_R \approx 19$ нс. В этих работах также определено доминирующий глубокий уровень с энергией фотоионизации 1,23 эВ, которые приводят к уменьшению воздействия поверхностной рекомбинации.

В связи с этим в настоящей работе было исследовано электрофизические, фотоэлектрические и поверхностно активные свойства пленочное гетероструктуры на основе p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe глубокими примесными уровнями.

Методика эксперимента.

Пленки CdTe осаждались на графитовые подложки. В качестве источника CdTe использовались порошки CdTe полупроводниковой чистоты. Температура источника во время процесса варьировалась в диапазоне 850 – 950°C. Размер зерен пленке зависел от температуры подложки, при 500°C, получалась пленка размером зерен 20-30 мкм, а при 600°C – 50 мкм и более [10].

Гетеропереходы p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe изготавливались напылением в вакууме (~10⁻⁵ мм рт.ст.) слоя CdS и CdSe толщиной 1...5 мкм на поверхность базовых слоев p-CdTe. Пленки CdS и CdSe формировались при температуре подложки 250°C и 300°C соответственно. Слои CdS и CdSe легировались индием (In)

непосредственно во время их напыления. Токосъемочные контакты были получены напылением In в вакууме ($\sim 10^{-5}$ мм рт.ст.) [11].

Для гетероструктуры в качестве легирующих примесей, были выбраны нами элементы первой группы Ag и Cu. Выбор этих материалов в качестве примесей обусловлен тем что оптимальная температура диффузии Ag и Cu в CdTe, сравнительно низкая и лежит в интервале температур подложки $80 \div 300$ °C, при котором лишь можно получить пленки из CdTe наибольшими фоточувствительностью и стабильными характеристиками [5]. А также, они образуют глубокие уровни в запрещённой зоне CdTe, которые увеличивает концентрации носителей заряда, и они участвуют при образовании фото ЭДС.

Таблица 1

Эксплуатационные параметры структур	p CdTe – n CdS	p CdTe – n CdSe
$I_0, \frac{A}{\text{CM}^2}$	10^{-9}	10^{-8}
A	$1,7 \div 2$	$1,5 \div 1,7$
$I_{\text{кз}}, \frac{\text{mA}}{\text{CM}^2}$	$13 \div 15$	$6 \div 7$
V_{xx}, mB	$600 \div 700$	$350 \div 400$
θ	$0,4 \div 0,45$	$0,35 \div 0,4$
$\eta, \%$	$5 \div 6$	$3 \div 4$

Проведенные оценки предэкспоненциального множителя показывают, что в структуре p CdTe – n CdSe при малых уровнях освещенности ток ограничивается рекомбинацией в слое объемного заряда. А при высоких уровнях освещенности в структуре p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe в ток начинают вносить свой вклад диффузионные токи неосновных неравновесных носителей.

При высоких температурах ($T \geq 375$ K) первый участок в зависимости $\ln I_{\text{кз}} = f(V_{\text{xx}})$ (для p CdTe – n CdSe) исчезает, второй участок простирается на весь диапазон измеряемого тока и напряжения.

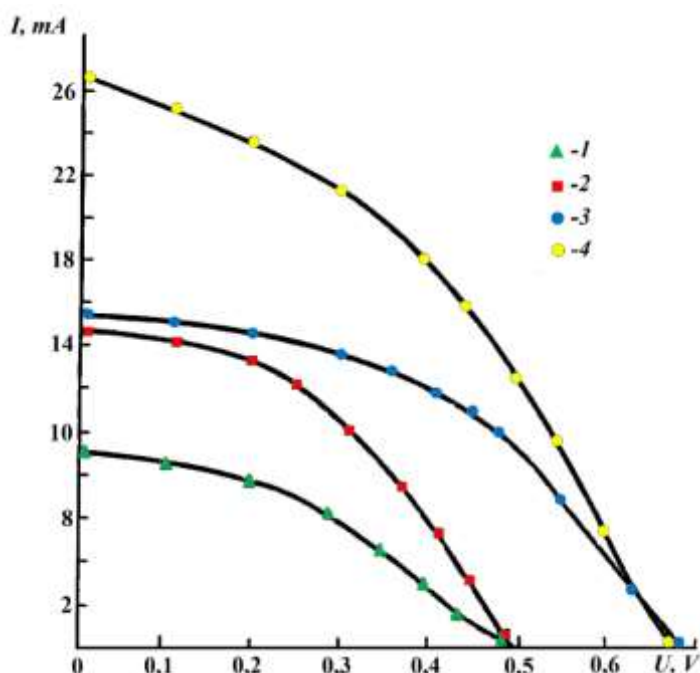


Рис. 1. Нагрузочная ВАХ пленочной структуры p CdTe – n CdS (3,4) и p CdTe – n CdSe (1,2) при освещении W – лампой накаливания (1,3) и источником внеатмосферного солнца (2,4) с мощностью 55 и $139 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$.

Следует отметить, что термоциклирование улучшает на природу перехода структуры p CdTe – n CdS и тем самым улучшается вольт амперные характеристики. Это является одним из важнейших преимуществ структуры p CdTe – n CdS перед пленочными элементами на основе системы p Cu_{2-x}S – n CdS и p Cu_{2-x}Te – n CdTe.

Обратные ветви ВАХ (рис. 2) гетероперехода p CdTe – n CdSe имеют три участка, характерные для токов, ограниченных пространственными зарядами. Первый участок – ловушечные квадратичные, второй участок – участок резкого роста тока, начинается при напряжении, необходимом для полного заполнения ловушек, затем следует квадратичный участок.

Как видно на рис.2, с увеличениями температуры, протяжённость ловушечное квадратичного участка расширяется, а участок резкого роста тока укорачивается. Кроме того, значение тока при высоких температурах в квадратичном участке меньше, чем его значение при комнатной температуре, то есть при постоянном напряжении с увеличением температуры ток уменьшается.

Такое поведение ВАХ явно свидетельствует о режиме токов, ограниченных пространственными зарядами.

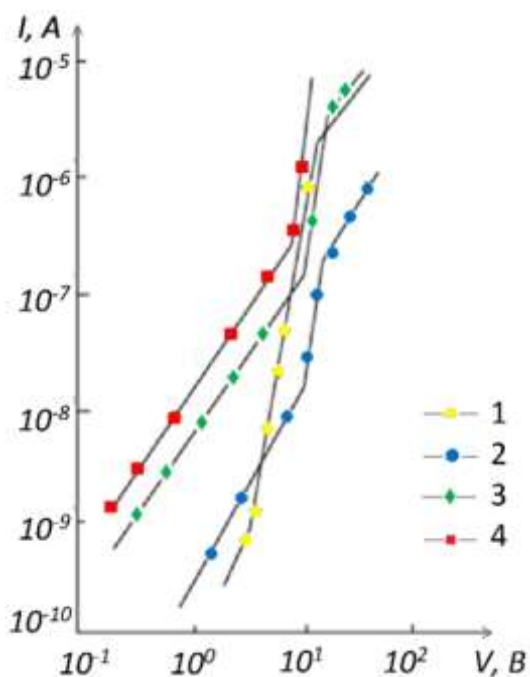


Рис. 2. Обратные ветви ВАХ гетероперехода р CdTe – n CdS при различных температурах, К: 1-302, 2-338, 3-358, 4-376

На рис.3 приведены нагрузочные ВАХ солнечного элемента на основе гетероперехода р CdTe – n CdS (кривая 1) и р CdTe – n CdSe (кривая 2). При интенсивности солнечного излучения $\sim 60 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$ солнечного элемента на основе гетероперехода р CdTe – n CdS имели следующие характеристики: $V_{\text{xx}} \approx 0,65\text{В}$, $I_{\text{кз}} \approx 14 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$, коэффициент заполнения нагрузочной характеристики 0,4, КПД 5...6%. При таких условиях солнечного элемента на основе гетероперехода р CdTe – n CdSe обладали меньшими показателями: $I_{\text{кз}} \approx 13 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$, $V_{\text{xx}} \approx 0,5\text{В}$, коэффициент заполнения 0,45, КПД 3...4% [9, 10].

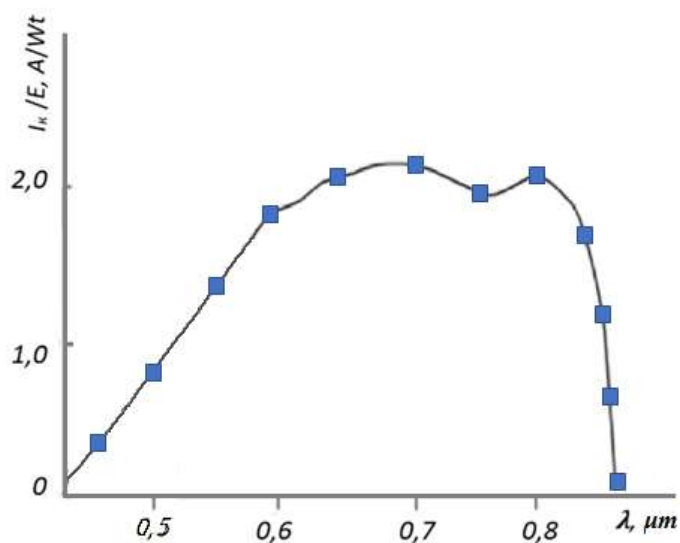


Рис. 3. Спектральное распределение fotocувствительности структуры p CdTe – n CdSe

Спектральная область чувствительности солнечного элемента со структурой CdTe – CdS ограничена значениями длины волны 0,52 и 0,85 мкм, причем в диапазоне 0,58...0,81 мкм кривая чувствительности имеет плоскую форму (рис. 3) [11,12]. Спектральные положения коротковолновой и длинноволновой границ области чувствительности определяется значениями ширины – запрещенных зон, соответственно CdTe и CdS и не зависят от напряжения смещения, которое влияет на эффективность собирания носителей заряда. Еще одна особенность этих элементов состоит в том, что разделение носителей происходит не на границе раздела CdS и CdTe, а в глубине слоя CdTe, на расстоянии от его поверхности, равном нескольким микрометрам, что связано с образованием слоя в результате диффузия свободного атома кадмия в p-CdTe [13, 14].

При введении легиранта Ag и Cu в пленке CdTe спектральная область чувствительности солнечного элемента на основе структуры CdTe – CdSe лежит в диапазоне 0,40...0,80 мкм (рис. 3). Это свидетельствует о том, что Ag и Cu образует в CdTe глубокие уровни энергии активации, которых равны $E_c=1,15$ эВ. они будут участвовать при образовании фото – ЭДС. Однако коэффициент собирания носителя заряда в коротковолновой части спектра меньше чем в длинноволновой, что свидетельствует о малой диффузионной длине носителей CdSe.

Заключение. Таким образом, по полученным экспериментальным результатам можно судить, созданные гетероструктуры на основе p CdTe – n CdS и CdTe – n CdSe существенно снижает влияние поверхностной рекомбинации на fotocувствительности и расширяется спектральное распределение fotocувствительности от 0,4 мкм до 0,9 мкм. При введениях легиранта Ag и Cu образует в запрещенной зоне CdTe глубокие уровни, которые участвуют фото ЭДС, при этом fotocувствительность простирается в ближе ИК области.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУР

[1] P.J. Sellin, D. Hoxley, A. Lohstroh, A.Simon, W.Cunningham, M.Rahman, J.Vaitkus, E.Gaubas, Ion beam induced charge imaging of epitaxial GaN detectors, Nucl. Instr. Meth. Phys. A 531 (2004) 82-86.

[2] C.Li, J.Poplawsky, Y. Yans, S.J. Pennycook, Understanding individual defects in CdTe thin-film solar cells via STEM: from atomic structure to electrical activity, Mater.Sci. Semicond. Process. 65 (2017) 64-76.

[3] T. Okamoto, A. Yamada, M. Konagai, Optical and electrical characterizations of highly efficient CdTe thin film solar cells, Thin Solid Films 387 (2001) 6-10.

[4] E. Fernander-Domingues, G. Torres-Deigado, R. Castanedo-Perez, Marguez-Marin, O.Zelaya-Angei. Effects of rapid thermal annealing as back contacts activation treatment on CdS/CdTe mult-contacted solar cells// Superlattices and Microstructures 2021, volume 151 March 2021, 106832 doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106832.

[5] Ali Ciris, M. Bulent, Basol, Yayuz Atasoy, Taytur Kuchinmeroglu, Adullah Karaca, Murat Tomakin, Emin Bacaksiz. Effect of CdS and CdSe pretreatment of interdiffusion with CdTe in CdS/CdTe and CdSe/ CdTe heterostructures// Materials Science in Semiconductor Processing 2021, june, volume 128, 105750 doi.org. 10.1016/j.jimssp.2021.105750.

[6] Отажонов С.М. Фотоприемник в ближней ИК-области поглощения на основе CdTe-SiO₂-Si // Прикладная физика. Научно-технический журнал. Москва, Россия, 2005. N1.C.95-97 <https://applphys.orion-ir.ru/appl-05/05-1/05-1-r.htm>.

[7] Отажонов С.М. Фотодетектор для регистрации рентгеновского и ультрафиолетового излучений на основе гетероструктур CdTe-ZnSe// Прикладная физика. Научно-технический журнал. Москва, Россия, 2005. N2.C.42-45 <https://applphys.orion-ir.ru/appl-05/05-2/05-2-r.htm>.

[8] Н.Алимов., Н.Жураев., П.Мовлонов., М.Халилов., С.Отажонов. Элементы памяти с управляемым временем запоминания и спектральной фоточувствительности// Патент№ IAP 20170249 Агенства по интеллектуальной собственности РУз 26 декабря 2017. Официальный бюллетень 2018, 12(212).

[9] M. Rami, E. Benamar, M. Fahoume, F. Chraibi, and A. Ennaoui. Effect of heat treatment with CdCl₂ on the electrodeposited CdTe/CdS heterojunction// M.J. CONDENSED MATTER. VOLUME 3, NUMBER 1.1 JULY 2000. P. 68-70//<https://www.researchgate.net/publication/229172307>.

[10] E.Arteqiani, P.Punathit, V.Kumar, M.Berton-cello, M.Meneghini. Effects of CdTe selenization on the electrical properties of the absorber for the fabrication of CdSex Te1-x / CdTe based solar cells//Solar Energy. Volume 227, October 2021, Pages 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.070>

[11] С. Отажонов, Р. Эргашев, Н. Юнусов. Изучение поверхностной рекомбинации гетеропереходов на основе p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe. // ISSN 2308-4804. Science and world. 2022. № 9 (109).

[12] Отажонов С.М. Фотоприемник в ближней ИК-области поглощения на основе CdTe-SiO₂-Si // Прикладная физика. Научно-технический журнал. Москва, Россия, 2005. N1.C.95-97 <https://applphys.orion-ir.ru/appl-05/05-1/05-1-r.htm>.

[13] С.Отажонов, Р. Эргашев. Улучшения характеристики фотоэлементов на основе p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe при термоциклирование в области альтернативных источников энергии // Научно технический журнал «Узбекгидроэнергетика» 2022*№3 (15).

[14] S.M. Otajonov, R.N.Ergashev. Influence of thickness and temperature on photoelectric properties of p-CdTe-nCdS and pCdTe-CdSe heterostructures. //Journal of physics.conferen.ser. tom 3388 (2022).