

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ ТВЕРДОГО РАСТВОРА НА ГЕТЕРОГРАНИЦЕ CdTe/CdS

С.А. Музафарова<sup>1</sup>, К.М. Файзуллаев<sup>1,2</sup>, Г.Т. Бадалова<sup>2</sup>, М.Р. Каюмова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИ Физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз,

<sup>2</sup>Ташкентский химико-технологический институт

E-mail: [samusu@rambler.ru](mailto:samusu@rambler.ru)

### АННОТАЦИЯ.

Исследовано гетерограница CdTe/CdS где формируется высокоомный переходный i-слой. Приводятся результаты систематических исследований по выявлению элементного состава i-слоя в гетероструктуре CdTe/CdS, который состоит из твердого раствора  $CdTe_{1-x}S_x$ , где значение x меняется от технологических параметров. Знание природы слоя на гетерогранице представляет большой интерес, так как оно может позволить узнать технологические способы управления его свойствами гетероперехода.

**Ключевые слова:** переходной слой, твёрдый раствор, гетероструктура, фаза, толщина, состав.

### ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении гетеропереходов часто возникает высокоомный слой на гетеро границе. Исследование условий возникновения и свойств такого слоя представляет научный и практический интерес, так как оно может позволить управлять физическими свойствами и расширить функциональные возможности полупроводниковых гетероструктур. О наличии высокоомного слоя на гетерогранице можно узнать многими экспериментальными методами, как вольтфарадная характеристика, релаксация емкости, спектральная зависимость фототока, электронно-микронзондовый анализ и др. Образование на гетерогранице перекомпенсированного или инверсного слоя следует из обнаружения дополнительного гомоперехода, который определяется из измерения спектрального отклика квантовой эффективности, эффекты Холла, ВАХ и токов, индуцированных электронным пучком,

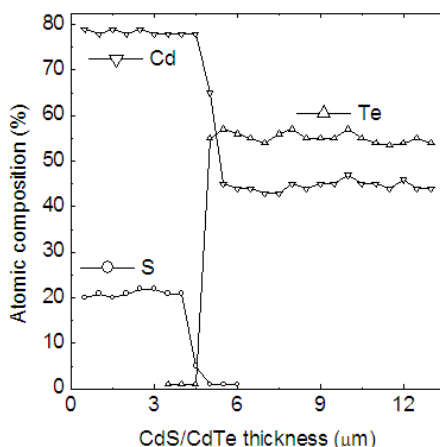
Гетероструктура CdS/CdTe обычно подвергается отжигу при температурах  $\sim 450^{\circ}C$  после осаждения CdS на CdTe. Часто отжиг сопровождается обработкой CdTe с  $CdCl_2$ . Известно, что именно в процессе такого отжига происходит взаимная диффузия Te(S) из CdTe(CdS) в

CdS(CdTe), что, возможно, приведет к формированию на гетерогранице тройного соединения  $CdTe_{1-x}S_x$

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Изготовлены гетеропереходы CdTe/CdS (рис.1) площадью  $1 \text{ см}^2$  по технологии, описанной в [1]. Для изготовления структур были использованы поликристаллические пленки CdTe, выращенные на молибденовых подложках толщиной 200 мкм, газотранспортным методом в потоке водорода в интервале температур  $600-650^\circ \text{C}$ . Выращенные пленки имели проводимость p-типа. Толщина пленок была порядка 50-70 мкм. Полученные пленки имели крупноблочную и столбчатую структуру с величиной зерен 100-150 мкм [1]. Микрострукстуры охватывают всю толщину пленки. Расстояние между микрострукстурами составляет  $40-60 \text{ \AA}$ . На основе выращенных пленок получены исследуемый гетеропереход CdS/CdTe нанесением слоёв CdS в вакууме квазизамкнутом объёме.

На рис. 1. приведено распределение элементного состава гетероперехода CdS/CdTe по глубине, полученное рентгеновским микрозондовым анализом с помощью установки "Камека".



**Рис.1.** Распределение концентрации атомов Cd, Te и S по глубине гетероструктуры CdTe/CdS

Обращает на себя внимание резкость гетерограницы. Нетрудно заметить также, что в CdTe(CdS) имеет место избыток атомов Te(Cd), придающий p(n)-тип проводимости. Кроме того, наблюдается проникновение атомов S в CdTe, типа обнаруженного в [2-4], и атомов Te в CdS в глубину  $\sim 1 \text{ мкм}$ . Этот результат позволяет сделать вывод о формировании промежуточного слоя на гетерогранице CdTe/CdS, состоящего из твердого раствора  $CdTe_{1-x}S_x$  типа обнаруженного в [2-4] методом NSOM (near-field scanning optical microscopy).

Проведено исследование фазового состава промежуточного слоя с помощью рентгеновской дифракции на установке DRON-1УМ. Дифракционная картина получена с помощью излучений  $CuK_{\alpha_1}$  с длинами волн  $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$  для  $CuK_{\alpha_1}$  и  $\lambda=1.5443 \text{ \AA}$  для  $CuK_{\alpha_2}$ . Для определения параметров решетки проведен анализ сигналов отражения в моде точечного сканирования шагом  $\Delta(2\Theta) = 0.01^\circ$  и временем сканирования в каждой точке  $\tau = 20 \text{ с}$ . Затем по формуле  $a = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$  найдена постоянная решетки  $a = 5.8935 \text{ \AA}$  для  $2\Theta = 56.9^\circ$ . Здесь  $h, k, l$  - индексы Миллера. Значение параметра  $a$  находится между постоянными решеток CdS ( $a = 5.832 \text{ \AA}$ ) и CdTe ( $a = 6.423 \text{ \AA}$ ). Это свидетельствует о наличии промежуточного слоя на гетерогранице CdTe/CdS, свойства которого отличается от свойств CdTe и CdS. Следовательно, можно говорить о возникновении гетероструктуры, из пленок p-CdTe,  $CdTe_{1-x}S_x$  и n-CdS слоев. Зная постоянную решетки CdTe, CdS, ширину их запрещенной зоны, постоянную решетки твердого раствора  $CdTe_{1-x}S_x$ , предполагая пропорциональную зависимость, можно оценить ширину запрещенной зоны твердого раствора, которая равна  $E_g = 2.306 \text{ эВ}$ . Затем базирясь на результат работы [5], о зависимости  $E_g$  твердого раствора от его состава  $x$  можно найти значение  $x$ , который в нашем случае равен  $x = 0.98$ . Далее по общеизвестному выражению [6] найдена плотность поверхностных состояний  $N_s \approx 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Найдены плотности поверхностных состояний между CdS и  $CdTe_{1-x}S_x$  ( $N_s = 10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) и  $CdTe_{1-x}S_x$  и CdTe ( $N_s = 10^{12} \div 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ).

Анализируя рис.2 и учитывая поликристаллическую природу CdTe, можно сказать, что упомянутый слой на гетерогранице является неоднородным по толщине. По этой причине точно определить тип проводимости и электрические параметры этого слоя представляется затруднительным

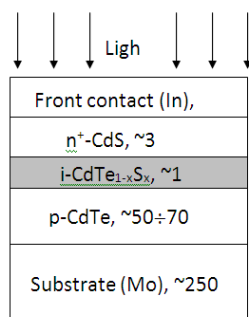


Рис. 2. Схематическое изображение гетероперехода CdS-CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>-CdTe.

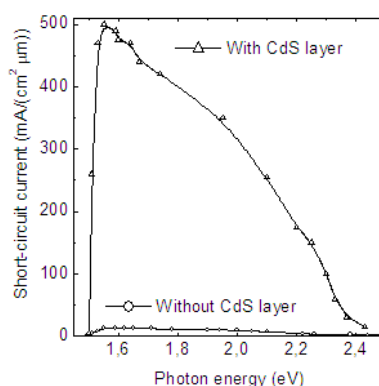
Проведено исследование спектрального распределения фоточувствительности  $S_{ph}(\lambda)$  для двух типов гетеропереходов  $CdTe_{1-x}S_x/CdTe$  и  $CdS/CdTe_{1-x}S_x/CdTe$  (рис.3) в вентильном



режиме в области энергии фотонов  $E_{g1} \leq hv \leq E_{g2}$ , где  $E_{g1}$  и  $E_{g2}$  соответствуют ширинам запрещенной зоны CdTe и CdS. Гетероструктура CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>/CdTe получена последовательно с удалением слоя CdS, вытравливанием в растворе HCl и нанесением на поверхность твердого раствора токоъемных контактов из индия. Видно, что длинноволновый край фоточувствительности обеих гетеропереходов совпадают, тогда как коротковолновый край гетероперехода CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>/CdTe слегка смещен в область более низких энергий по сравнению с CdS/CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>/CdTe (рис. 3).

Следует, однако, отметить, что фоточувствительность гетероструктуры CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>/CdTe несколько десятков раз меньше, чем у CdS/CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>/CdTe. По-видимому, это связано с удалением барьера между CdS и твердым раствором, формированием поверхностных состояний при удалении CdS, малым значением величины потенциального барьера между слоями CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> и CdTe, а также толщиной промежуточного слоя.

Исследована спектральная зависимость фототока  $S_{ph}(\lambda)$  гетеро-структуры CdS/CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>/CdTe в фотодиодном режиме (рис.3.) при комнатной температуре и разных величинах обратного напряжения  $V_{обр}$ .



**Рис. 3.** Спектральное распределение фоточувствительности гетероструктур (o) CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>/CdTe и (Δ) CdS/CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>/CdTe.

Обнаружено наличие двух пиков при длинах волн  $\lambda_1 \approx 600$  нм и  $\lambda_2 \approx 800$  нм и монотонное возрастание  $S_{ph}(\lambda)$  с ростом  $V_{обр}$ . Кроме того, при обратном напряжении  $V_{обр} \approx -2$  В,  $S_{ph}(\lambda_2 \approx 800$  нм)  $\approx 0.9$  А/см<sup>2</sup>·мкм, что почти в три раза больше, чем при нулевом напряжении. Отметим также, что чем больше обратное напряжение, тем отчетливее проявляются пики на спектральной зависимости фототока, причем спектральное положение коротковолнового пика зависит от параметров технологии формирования исследуемой гетероструктуры.

## ВЫВОДЫ

Результаты свидетельствуют о том, что промежуточный слой является высокоомным твердым раствором [7], приводящим к росту фототока в фотодиодном режиме, фазовый состав которого определяется технологическим режимом получения исследуемой фоточувствительной структуры.

Исследованиями на рентгеновском микроанализаторе “Камека” найдено распределение элементного состава по толщине гетероперехода CdTe/CdS и показано на возможность образования сильно неоднородного по составу твердого раствора  $CdTe_{1-x}S_x$ , обусловленный диффузией S в CdTe и Te в CdS.

С помощью рентгеноструктурного анализа найден параметр решетки  $a=5.8935 \text{ \AA}$ . Значение “a”  $CdTe_{1-x}S_x$  находится между постоянными решеток CdTe ( $a = 6.423 \text{ \AA}$ ) и CdS ( $a = 5.832 \text{ \AA}$ ). База многослойной структуры представляет собой ряд дискретных твердых растворов, дальнейшее исследование которых создает большой научный и практический интерес.

## REFERENCES

1. Расулов Д.Т., // Исследование фоточувствительности пленочных структур pCdTe – nCdS и pCdTe/CdSe., Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ-мат. наук, 1981, Ташкент.
2. Herndon M.K., Gupta A., Kaydanov V.I., and R.T.Collins R.T. // Evidence for Grain-Boundary-Assisted Diffuzion of Sulfur in polycrystalline CdS/CdTe Heterojunctions, //Appl. Phys. Lett. 1999. 75(22), pp.3503-3505.
3. K.Ohata, J. Sarate and T. Tanaka: Optical Energy Gap of the Mixed Crystal  $CdS_xTe_{1-x}$  Japan.J.Appl.Phys. 1973, Vol.12, No.10, p1641-1643.
4. Музафарова С.А., Мирсагатов С.А., Джамалов Ф.Н. Влияние облучения гамма-квантами на механизм переноса заряда в гетероструктурах n-CdS / p-CdTe.// Полупроводники.– Т. 43. 2009.С.175–180. <https://doi.org/10.1134/S1063782609020109>.
5. Fangyang L., Yangiang L., Jun L. Characterization of Chemical Bath Deposited CdS thin Films at Different Deposition Temperature // Journal of Alloys and Compounds.– 2010. –V. 493, No.1-2.–pp.305-308.
6. Muzafarova S.A., Mirsagatov Sh.A., Janabergenov J. Mechanism of charge transfer in nCdS/pCdTe heterojunctions // Physics of the solid state. – 2007. – V. 49, No. 6. – pp. 1168-1174.
7. Ведущие производители солнечных батарей по данным отгрузки модулей в 2018 и 2019 годах. Доступно на сайте: <https://www.statista.com/statistics/858456/global-companies-for-pv-cell-and-module-shipments/> (по состоянию на 21 января 2021 г.).