

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТОНКОГО СЛОЯ CdTe

### В ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ n-CdS/p-CdTe

О.М. Маматов<sup>1</sup>, А.С. Байгазиев<sup>2</sup>, Н.Х. Юлдашев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ферганский политехнический институт, Фергана, Узбекистан.

[uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru)

<sup>2</sup>Ошский государственный университет, Кыргызстан

#### АННОТАЦИЯ

В работе исследованы спектры низкотемпературной фотолюминесценции тонкого и мелкозернистого поликристаллического слоя CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe. Показано, что при фронтальном возбуждении Ar<sup>+</sup>-лазером спектр состоит из доминирующей полосы собственного (e-h) излучения и её LO+nLA-фононного повторения, а при тыловой подсветке фоторезистивного слоя CdS вместо их возгораются асимметричная дублетная линия излучения экситонов и широкая линия мелких донорно-акцепторных пар.

**Ключевые слова.** Фотолюминесценция, мелкозернистый поликристалл, тонкая пленка, теллурид кадмия, пленочная гетероструктура n-CdS/p-CdTe, собственное излучение, фононное повторение, экситонное излучение, донорно-акцепторная пара.

#### ABSTRACT

We have studied the low-temperature photoluminescence spectra of a thin and fine-grained polycrystalline CdTe layer in an n-CdS / p-CdTe film heterostructure. It is shown that, upon frontal excitation by an Ar + laser, the spectrum consists of the dominant intrinsic (e-h) band and its phonon repetition, while under back illumination of the CdS photoresist layer, an asymmetric doublet emission line of excitons and a broad line of shallow donor-acceptor pairs ignite instead of them.

**Keywords.** Photoluminescence, fine-grained polycrystal, thin film, cadmium telluride, n-CdS / p-CdTe film heterostructure, intrinsic emission, phonon repetition, exciton emission, donor-acceptor pair.

#### ВВЕДЕНИЕ

Оптическая спектроскопия низкотемпературной фотолюминесценции с успехом используется для исследования характеристик тонкопленочного n-CdS/p-CdTe гетероперехода в солнечных батареях с целью повышения их

эффективности и усовершенствования технологии изготовления, где поликристаллическая пленка  $p\text{-CdTe}$  представляет основным поглощающим слоем [1,2]. В работе [1] изучены спектры люминесценции слоя  $\text{CdTe}$  гетероструктуры  $\text{CdS/CdTe}$  как фотоэлемент с КПД  $\sim 12\%$  в зависимости от мощности лазерного возбуждения и температуры. При тыловом освещении  $\text{He-Ne}$  лазером ( $\lambda=0.6328 \text{ мкм}$ ) солнечной батареи  $\text{CdTe / CdS}$  в спектрах люминесценции (10 К) обнаружили три характерные области [2]: (a) излучательные переходы связанных экситонов от 1.58 до 1.60 эВ, (b) широкая полоса донорно-акцепторных пар (ДАП) вблизи энергии 1.53 эВ, (c) широкая полоса излучения группы дефектов с фоннными повторениями в пределах от 1.4 до 1.46 эВ. В последнее время [3,4-11], часто утверждают о целесообразности изготовления солнечных элементов из тонкопленочных гетероструктур  $n\text{-CdS/p-CdTe}$  с характерными размерами  $h, d_{cr} \sim \lambda$ , когда тонкая мелкозернистая пленка  $\text{CdTe}$  приобретает свойствами фотонных кристаллов, оптические спектры которой недостаточно изучены.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.

Данная работа посвящена интерпретации экспериментальных спектров низкотемпературной (4,2 К) фотолюминесценции тонкого и мелкозернистого ( $h, d_{cr} \leq 1 \text{ мкм}$ ) поликристаллического слоя  $\text{CdTe}$  в пленочной гетероструктуре  $n\text{-CdS/p-CdTe}$ . Показано, что при фронтальном возбуждении (со стороны свободной поверхности  $\text{CdTe}$ )  $\text{Ar}^+$ -лазером мощности потока  $\sim 44 \text{ Вт/см}^2$  спектр состоит из доминирующей полосы собственного ( $e-h$ ) излучения (А-линия) с полушириной  $\Delta_A = 10-12 \text{ мэВ}$  и коротковолновым смещением  $\Delta E_r \approx 25 \text{ мэВ}$  красной границы А –  $e-h$ -полоса, В, В', С – фоннные относительно  $E_g$ , а также её повторения, ДАП – линия излучения  $LO+nLA$ -фоннного повторения ( $\Delta_{B,C} \approx 40 \text{ мэВ}$ ) со слабой дублетной структурой и широкой полосы ( $\Delta_D \approx 100 \text{ мэВ}$ ) поверхностно-интерфейсной люминесценции с максимумом на частоте  $\hbar\omega \approx 1.49 \text{ эВ}$ . Тыловая подсветка фоторезистивного слоя

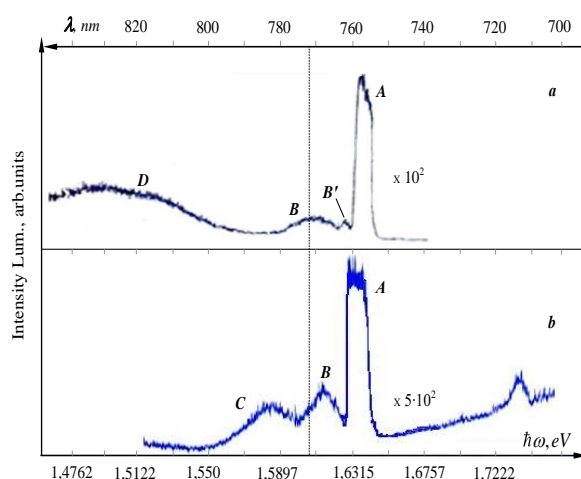


Рис.1. Спектры фотолюминесценции слоя  $\text{CdTe}$  в гетероструктуре  $n\text{-CdS/p-CdTe}$  без подсветки  $\text{CdS}$  (a) и на чистой стеклянной подложке (b).  $T=4.2 \text{ К}$ . А –  $e-h$ -полоса, В, В', С – фоннные относительно  $E_g$ , а также её повторения, ДАП – линия излучения  $LO+nLA$ -фоннного повторения ( $\Delta_{B,C} \approx 40 \text{ мэВ}$ ) со слабой дублетной структурой и широкой полосы ( $\Delta_D \approx 100 \text{ мэВ}$ ) поверхностно-интерфейсной люминесценции с максимумом на частоте  $\hbar\omega \approx 1.49 \text{ эВ}$ . Тыловая подсветка фоторезистивного слоя

CdS из области собственного поглощения с интенсивностью  $L_{\text{тс}} \approx 5 \cdot 10^2$  лк почти полностью разрушает  $e-h$  - и связанные с ней всех линий люминесценции. Вместо их возгораются асимметричная дублетная линия излучения поляритонов с экситонной резонансной частотой  $\hbar\omega \approx 1.59$  эВ ( $\Delta_{\text{ex}} \approx 25$  мэВ) и широкая линия мелких донорно-акцепторных пар ( $\Delta_{\text{DAP}} \approx 40$  мэВ) на частоте  $\hbar\omega \approx 1.53$  эВ, максимальная интенсивность которых почти на два порядка ниже интенсивности А-линии без подсветки.

На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции при фронтальном возбуждении слоя *CdTe* в гетероструктуре *n-CdS/p-CdTe* без подсветки *CdS* (а) и слоя *CdTe* на чистой стеклянной подложке (б), выращенные в идентичных технологических условиях. Здесь сразу же следует заметить, что в отличие от монокристаллов и крупноблочных поликристаллов, в спектрах мелкозернистых пленок отсутствуют излучения экситонов и ДАП. Как видно из сопоставления спектральных кривых рисунков 1а и 1б, наличие тонкого поликристаллического слоя *CdS*, играющего как бы роль подложки с гетерограницей, существенно отражается лишь в далекой краевой области спектра. Спектры люминесценции в области 750-760 нм качественно совпадают и состоят из доминирующей  $e-h$ -полосой излучения (А-линия) с полуширинами  $\Delta E_A \approx 11.2 \pm 0.1$  мэВ и  $\Delta E_A \approx 14.2 \pm 0.1$  мэВ, соответственно. Резкие длинноволновые границы А-линий означают, что кристаллические зерна пленок *CdTe* как на стеклянной, так и на фоторезистивной подложках выращивались с достаточно совершенной объемной кристаллической структурой. А-линии лежат выше дна зоны проводимости (вертикальная штрихпунктирная линия) монокристалла при  $T = 4.2$  К ( $E_g = 1.606$  эВ) на энергии  $\Delta E_T \approx 24.4 \pm 0.1$  мэВ и  $\Delta E_T \approx 21.4 \pm 0.1$  мэВ так, что сумма величин  $\Delta E_T + \Delta E_A = \varphi_0 \approx 35.6 \pm 0.2$  мэВ остается почти одинаковым для обеих А-линий.

Спектральную зависимость интенсивности А-линий, можно представить как [3,4].

$$L(\omega) = A_0(\hbar\omega - E'_g)^{1/2} \exp(-(\hbar\omega - E'_g)/kT_{eh}), \quad (1)$$

где  $A_0$ -постоянная, зависящая от типа пленки и условия ее фотовозбуждения,  $E'_g = E_g + \Delta E_r$ -энергия красной границы  $A$ -линии излучения,  $k$  -постоянная Больцмана,  $T_{eh}$  -средняя характерная температура фотоносителей. Очевидно, что второй и третий множители в правой части (1) обусловлены плотностями состояний в простых квадратичных зонах и квазиравновесными функциями распределений неравновесных носителей тока.

Под действием подсветки  $CdS$  с интенсивностью  $L_{nc}=500$  лк спектр люминесценции слоя  $CdTe$  существенно перестраивается (рис.2, а). Линии излучения  $A, B, B'$  и  $C$  практически исчезают. Отчетливо проявляется область 770-790 нм излучения свободных экситонов и область 790,0-820,0 нм излучения ДАП. Это подтверждается без сомнений спектром отражения (рис.2, b), где видны экситонный резонанс ( $\lambda_{ex}=782.5$  нм,  $\hbar\omega_{ex}=1.585$  эВ) и область ДАП 800-812.5 нм.

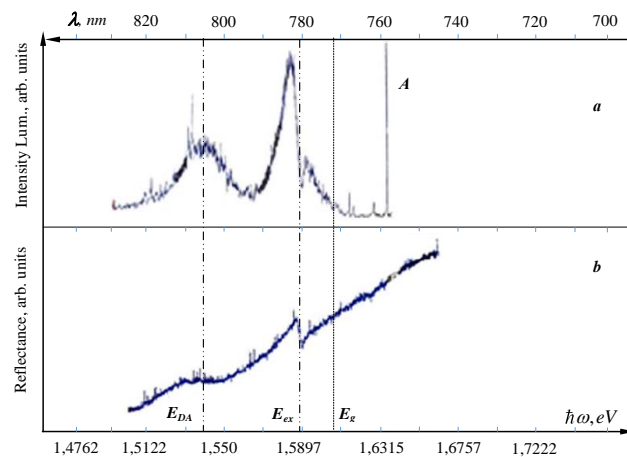


Рис.2. Сравнение спектра фотолюминесценции АФВ-слоя  $CdTe$  в гетероструктуре  $n-CdS/p-CdTe$  с

На рис.3 сравниваются контура экспериментальных спектров поляритонной люминесценции из работы [9] для сверхчистого кристалла  $CdTe$  при  $T=77$  К (сплошная линия) и НТФЛ мелкозернистой поликристаллической пленке  $CdTe$  в гетероструктуре  $n-CdS/p-CdTe$ , снятый при  $T=4.2$  К с подсветкой интенсивностью  $L_{nc}=500$  лк в области собственного поглощения  $CdS$  (линия из треугольников). Видно качественно хорошее совпадение этих контуров, несмотря на то, что они принадлежат разным структурам и температурам, а их спектральный интервал довольно широко простирается от 1.570 эВ до 1.595 эВ, т.е. составляет почти 25 мэВ. Такое сильное уширение спектра поляритонной люминесценции говорит о том, что поляритоны испытывают колоссально сильное взаимодействие с фононами в чистом кристалле  $CdTe$  при  $T=77$  К и с внутренними встроенными потенциалами в тонкой мелкозернистой пленке  $p-CdTe$  в гетероструктуре  $n-CdS/p-CdTe$  при  $T=4.2$  К. Экспериментальная линия ПЛ грубо может быть удовлетворительно описана теоретическим расчетом, проведенным в работе [4].

Подсветка слоя  $CdS$  уменьшает его шунтирующее сопротивление, а значит, и максвелловское время релаксации разделенных фотоносителей в объеме, благодаря чему они втягиваются полем гетероперехода, прежде чем, рекомбинировать излучательно. Это и приводит к тушению линии излучения А, В, С, обнаруживаемых без подсветки, и возгоранию линии свободных экситонов и мелких ДАП под действием подсветки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что созданная фотовольтаическая пленочная структура  $n-CdS/p-CdTe$  открывает новые возможности не только практического приложения её в качестве фотоприемника, но и для разработки новых методов изучения фотоэлектрических явлений в полупроводниковых пленочных структурах.

### REFERENCES

1. M. Tuteja, P. Koirala, J. Soares, R. Collins, A. Rockett. Low temperature photoluminescence spectroscopy studies on sputter deposited CdS/CdTe junction and solar cells *Journal of Materials Research*, (2016) Vol.31, Issue 02, pp. 186-194.
2. Ikhmayies Sh. J., Ahmad-Bitar R. N. // *Journal of Luminescence*. 2012, Vol.132, Is.2, pp. 502–506.
3. Bozorboy Joboralievich Akhmadaliev, Olmos Muhammaddovidovich Mamatov, Bakhtiyor Zaylobidinovich Polvonov, Nosirjon Khaydarovich Yuldashev (2016) Correlation between the Low-Temperature Photoluminescence Spectra and Photovoltaic Properties of Thin Polycrystalline CdTe Films. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 04, 391-397. doi: 10.4236/jamp.2016.42046
4. Akhmadaliev, B.Z., Yuldashev, N.K. & Yulchiev, I.I. Surface-Radiative Modes and Longitudinal Excitons in the Spectra of Exciton–Polariton Luminescence. *Opt. Spectrosc.* 125, 343–352 (2018). <https://doi.org/10.1134/S0030400X18090023>.

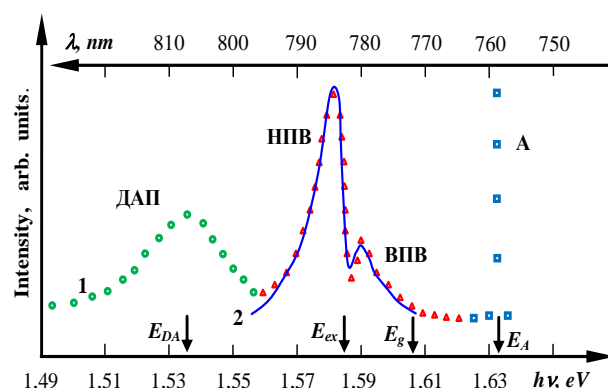


Рис.3. Фрагменты спектров фотолуминесценции поликристаллического АФВ-слоя CdTe на фоторезисторе CdS с подсветкой в области собственного поглощения CdS интенсивностью  $L_{лс}=500$  лк (кривая 1,  $T=4.2$  К) и чистого кристалла CdTe (кривая 2, при приложении её в качестве фотоприемника, температуре  $T=77$  К [12]).

5. Mamatov, O M. (2020) "Preparation by thermovacuum evaporation of film heterostructure n-CdS / p-CdTe with anomalous photoelectric properties," Scientific-technical journal: Vol. 3 : Iss. 5 , Article 1.
6. B.J. Akhmadaliev, B.Z. Polvonov, O.M. Mamatov, N.Kh. Yuldashev. Low-Temperature Photoluminescence of Fine-Grained CdTe Layer in n-CdS/p-CdTe Film Heterostructure. // International Journal of Modern Physics and Application. , -USA, 2017,-Vol. 4, No. 5, pp. 28-33. Article ID 1650077.
7. Маматов, О М. and Yuldashev, N Kh (2019) "Study of photovoltaic and photoresistive properties of a thin CdTe layer in a film heterostructure n-CdS / p-CdTe," Scientific-technical journal: Vol. 2 : Iss. 4 , Article 1.
8. Axmadjonov, M F.; Mamatov, O M.; Nurmatov, O R.; Rahmonov, T I.; and Yuldashev, N Kh (2019) "The spectral characteristics of CdTe:Ag photoelectrical films in the areas own and impurite absorption," Scientific-technical journal: Vol. 2 : Iss. 2 , Article 4.
9. Nurmatov, O., Rahmonov, T., Sulaymonov, K., & Yuldashev, N. (2020). Phototenzoelectric properties of polycrystalline films of chalcogenides of cadmium and zinc, produced by portional evaporation in vacuum. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering, 2(5), 10.
10. Rakhmonov, T I. and Yuldashev, N Kh (2021) "Photo-tensoelectric properties of thin polycrystalline CdTe, CdSe, CdS films obtained by portional thermal evaporation in a vacuum," Scientific-technical journal: Vol. 4 : Iss. 4 , Article 4.
11. Маматов, О., Нурматов, О. Р., Рахмонов, Т. И., & Юлдашев, Н. Х. (2019). Фото-и тензоэлектрические свойства тонких пленок халькогенидов кадмия, полученных методом порционных испарений в вакууме.
12. Паносян Ж.Р. Излучательная рекомбинация в кристаллах теллурида кадмия // Тр. ФИ РАН.-1973. -68.-С.147-202.