

Ахмадалиев Бозорбой Жоборалиевич, к.ф.-м.н., доц.,  
uzferfizika@mail.ru  
Маматов Олмосбек Мухамматдовидович,  
Полвононов Бахтиёр Зайлобидинович, к.ф.-м.н., доц.,  
Урмонов Санжарбек Рахмонжонович,  
Юлдашев Носиржон Хайдарович, д.ф.-м.н., проф.,  
Ферганский политехнический институт, Узбекистан

### **ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ CdTe В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ n-CdS/p-CdTe**

*Показано, что тыловая подсветка фоторезистивного слоя CdS в области собственного поглощения с интенсивностью  $L_{nc} \approx 5 \cdot 10^2$  лк почти полностью уничтожает  $e-h$  - и связанные с ней B-, D- полосы люминесценции. Вместо их возгораются асимметричная дублетная линия излучения поляритонов с продольной экситонной частотой  $\hbar\omega \approx 1.59$  эВ ( $\Delta_{ex} \approx 25$  мэВ) и широкая линия мелких донорно-акцепторных пар ( $\Delta_{DAS} \approx 40$  мэВ) на частоте  $\hbar\omega \approx 1.53$  эВ, максимальная интенсивность которых на два порядка ниже интенсивности A-линии.*

*Ключевые слова: мелкозернистая поликристаллическая пленка, фоторезистор, гетероструктура, низкотемпературная фотолюминесценция, донорно-акцепторная пара, экситон-поляритонное излучение.*

Akhmadaliev Bozorboy Zhoboralalievich, C. Ph.-M.Sc.,  
Associate professor,  
Mamatov Olmosbek Muhammaddovidovich,  
Polvononov Bakhtiyor Zaylobidinovich, C. Ph.-M.Sc.,  
Associate Professor,  
Urmonov Sanjar Rahmonjonovich  
Yuldashev Nosirjon Khaidarovich, D.Ph.-M.Sc., prof.,  
Fergana Polytechnic Institute, Uzbekistan

### **PHOTOLUMINESCENCE OF A FINE-GRAINED POLYCRYSTALLINE CdTe FILM IN THE n-CdS / p-CdTe HETEROSTRUCTURE**

*Rear illumination of photoresistive layer CdS in the field of intrinsic absorption with intensity  $L_{nc} \approx 5 \cdot 10^2$  lx almost completely destroys  $e-h$  - and connected with it B - D - luminescence bands. Instead of them flare up an asymmetric doublet line of polaritons radiation with longitudinal excitons frequency  $\hbar\omega \approx 1.59$  эВ ( $\Delta_{ex} \approx 25$  мэВ) and a wide line small donor-acceptor pairs ( $\Delta_{DAS} \approx 40$  мэВ) on the frequency  $\hbar\omega \approx 1.53$  эВ, which maximum intensity on two order below intensity of the A-line.*

*Key words: fine-grain polycrystalline a film, photoresistor, heterostructure, low temperature luminescence, donor-acceptor pair, exciton-polariton radiation.*

**Введение.** Спектроскопия низкотемпературной фотолюминесценции (НТФЛ) является быстрым, неразрушающим методом изучения электронных, оптических и фотоэлектрических явлений в поликристаллических полупроводниковых пленочных структурах с фотовольтаическим свойством [1-3]. Поэтому в последнее время его с успехом применяют для тонких исследований параметров тонкопленочного n-CdS/p-

*CdTe* гетероперехода в солнечных батареях с целью повышения их эффективности и усовершенствования технологии изготовления [4-8], где поликристаллическая пленка *p-CdTe* представляет основным поглощающим слоем. Так, авторами работы [1] изучены спектры НТФЛ слоя *CdTe* гетероструктуры *CdS/CdTe* как фотоэлемент с КПД ~12 % в зависимости от мощности лазерного возбуждения и температуры. Установлено, что люминесценция при слабых мощностях возбуждения сдвигается в красную область доминирующей примесно-дефектной эмиссии, а при более высоких уровнях возбуждения преимущественно занимает вблизи края экситонного излучения. Дуроз К. и др. [2] при тыловом освещении He-Ne лазером поликристаллической солнечной батареи *CdTe/CdS* в спектрах НТФЛ (10 K) обнаружили три характерные области: (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 многократными фононными повторениями в пределах от 1.4 до 1.46 эВ.

Караман И. и др. [3] исследовали спектров НТФЛ (78 K) тонких пленок *CdTe* толщиной 3-7 мкм, неотожженных и отожженных в присутствии *CdCl<sub>2</sub>*, в солнечной батарее *SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/Ni* при возбуждении He-Ne лазером ( $\lambda=0.6328$  мкм) с мощностью потока ~12 кВт/см<sup>2</sup>. Показано, что при освещении как со стороны свободной поверхности *CdTe*, так и через интерфейса (гетероперехода) обнаруживаются широкая примесная полоса на энергии 1.45 эВ и более узкая полоса свободных (1.57-1.58 эВ) и локализованных (1.558 эВ) экситонов, причем экситонное излучение практически отсутствует при возбуждении через интерфейса, что объясняется с высокой концентрацией механических и структурных дефектов последнего. Из анализа фотолюминесценции определены спектр уровней рекомбинации, состав интерфейсного слоя *CdS<sub>x</sub>/CdTe<sub>1-x</sub>* и был оценен  $x=0.06$ .

Интерфейсные излучения наблюдались и в других работах [4-7]. Измерениями НТФЛ [4,5,7] и её модуляции в электрическом поле [6] было доказано существование смешанного кристаллического слоя *CdS<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub>* толщиной ~15 нм с низкой плотности безызлучательных рекомбинационных центров, формированию которого в высокоэффективном пленочном *CdS/CdTe* солнечном элементе в большей степени способствует отжиг в присутствии паров *CdCl<sub>2</sub>*. Широкая линия люминесценции на энергии 1.42 эВ связывают комплексами дефектов с участием вакансии кадмия *V<sub>Cd</sub>*, а узкая линия с максимумом на 1.59 эВ – связанным на нейтральном акцепторе экситоном [5].

Во всех представленных выше работах толщина *h* поликристаллической пленки *CdTe* и размеры зерен  $d_{cr}$  существенно больше по сравнению с длиной волны  $\lambda$  света в спектральном диапазоне исследуемой люминесценции. Однако в последнее время часто говорят о целесообразности изготовления солнечных элементов из тонкопленочных гетероструктур *n-CdS/p-CdTe* с характерными размерами слоев  $h$ ,  $d_{cr} \sim \lambda$  [8,9]. Тогда, естественно тонкая мелкозернистая пленка *CdTe* приобретает свойствами фотонных микрокристаллов, вопросы НТФЛ которых до сих пор практически не исследовались.

**Постановка задачи.** В работе [10] авторов было исследовано механизмы формирования спектров НТФЛ (T=4.2 K) тонких ( $h \approx 0.5-0.8$  мкм) поликристаллических чистых *CdTe* и легированных *CdTe:In* пленок, в зависимости от точечных и структурных дефектов. Показано, что в отличие от монокристаллов и крупноблочных поликристаллов, в спектрах НТФЛ мелкозернистых ( $d_{cr} \leq 1$  мкм) пленок не проявляются каналы излучения экситонов и ДАП. Это, заведомо обусловлено следующими обстоятельствами: во-первых, в рассматриваемом случае размер кристаллических зерен  $d_{cr}$  есть величина по порядку дебаевской длины

экранирования  $\ell_{Di} = (2\epsilon_0\phi_i/e^2|N_D - N_A|)^{1/2}$  (т.е.  $d \approx \ell_{Di}$ , где  $\epsilon$ ,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость и электрическая постоянная,  $e$  – заряд электрона,  $N_D$  и  $N_A$  – концентрации доноров и акцепторов,  $\phi_i$  – высота поверхностного потенциального барьера на границе зерен) и небольшой квазинейтральный объем зерна играет несущественную роль в формировании НТФЛ пленок; во-вторых, приповерхностные потенциальные барьеры кристаллических зерен создают внутренние встроенные электростатические поля в области объемных зарядов (ООЗ), что приводит к пространственному разделению фотогенерированных электронно-дырочных пар в нем и в результате чего генерацию приповерхностного фотонапряжения, а также коррелированной ими собственной люминесценции (межзонной  $e-h$  рекомбинации) горячих фотоносителей при условии

$$\tau_r \leq \tau_0, \tau_M \quad (1)$$

где  $\tau_r$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau_M$  – излучательное, безызлучательное и максвелловское времена жизни. Поскольку полное время жизни неравновесного электрона определяется как

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_0}, \quad \frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{\tau_{ex}} + \frac{1}{\tau_{DA}} + \frac{1}{\tau_M} + \frac{1}{\tau_p} + \dots, \quad (2)$$

где  $\tau_{ex}$ ,  $\tau_{DA}$  – времена ухода электрона из данного энергетического состояния с образованием экситонов и ДАП,  $\tau_\delta$  – время релаксации по импульсу и т.д., то естественно, что при выполнении условия  $\tau_r \ll \tau_{ex}, \tau_{DA}$  (3)

в спектрах НТФЛ в первом приближении будет отсутствовать экситонное и ДАП – каналы излучения, т.е. последние остаются экспериментально не обнаруженными на сильном фоне  $e-h$  люминесценции. Однако при реализации условия

$$\tau_r \geq \tau_M \quad (4)$$

ситуация меняется. Фотоносители уходят в основном безызлучательно, например, за счет электропроводности или поверхностной рекомбинации. Тогда непосредственный мощный вклад в НТФЛ излучательной рекомбинации разделенных ООЗ свободных электронов и дырок ослабляется и, тем самым, появляется возможность обнаружения слабых спектральных линий экситонов и ДАП в мелкозернистых полупроводниковых тонких пленках. Здесь предлагается один из нетривиальных методов реализации такой возможности в пленочной гетероструктуре  $n-CdS/p-CdTe$ .

Целью настоящей работы является изучение механизмов формирования спектра краевой фотолюминесценции тонкого поликристаллического слоя CdTe в пленочной гетероструктуре  $n-CdS/p-CdTe$  (рис.1) и разработка нового опико-фотоэлектрического метода обнаружения слабых каналов излучения экситонов и ДАП, а также исследования состава, структуры интерфейса для неразрушающего контроля свойств фотовольтаических элементов. При этом показано, что с помощью дополнительной подсветки фоторезистивного слоя CdS интенсивностью  $L_{nc} \approx 5 \cdot 10^2$  лк в гетероструктуре  $n-CdS/p-CdTe$  удалось обнаружить линии излучения поляритонов и мелких ДАП слоя CdTe. Полагается, что подсветка CdS уменьшает его шунтирующее CdTe

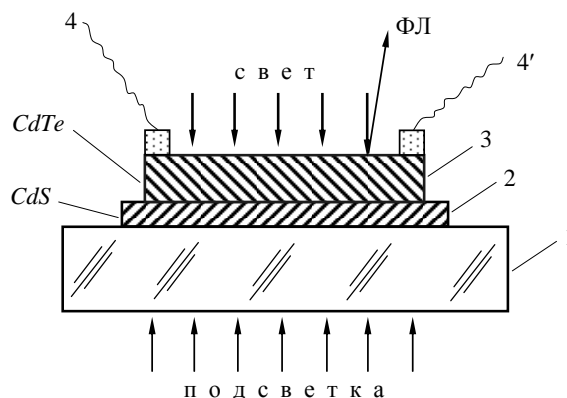


Рис.1. Принципиальная схема возбуждения низкотемпературной ( $T=4,2$  К) фотолюминесценции тонкой пленки CdTe ( $d_{nl}=0.8$  мкм) в пленочной гетероструктуре  $n-CdS/p-CdTe$ : 1 - прозрачная стеклянная подложка, 2 - фоторезистор ( $CdS$ ,  $d_{CdS}=0.3$  мкм), 3 - фотовольтаический слой ( $CdTe$ ). 4, 4' - токосъемные омические контакты.

сопротивление, а значит, и максвелловское времени релаксации  $\tau_M$  разделенных фотоносителей в объеме кристаллического зерна пленки  $CdTe$ , благодаря чему они втягиваются полем гетероперехода за счет продольной фотопроводимости, прежде чем рекомбинировать излучательно ( $\tau_M < \tau_R$ ). Это и приводит к тушению линий излучения, обнаруживаемых без подсветки, и возгоранию линии свободных экситонов и мелких ДАП при дополнительной подсветке фоторезистивной подложки  $CdS$ . Экспериментальная линия ПЛ грубо может быть удовлетворительно описана теоретическим расчетом, проведенным в работе [12].

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Возбуждение собственной люминесценции АФВ слоя  $CdTe$  осуществлялось на длине волне  $\lambda=476.5$  нм светом Ar-лазера, т.е. с переводом электронов из валентной зоны в глубоко зоны проводимости.

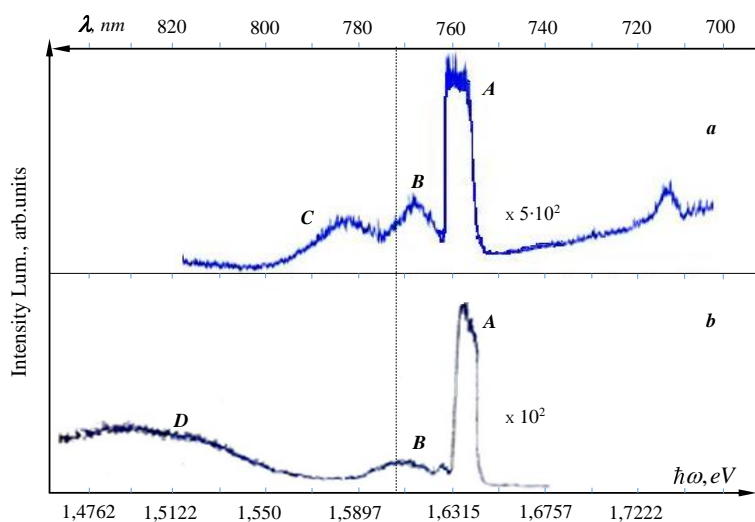


Рис.2. Спектры фотолюминесценции АФВ-слоя  $CdTe$  на стеклянной подложке (а), на фоторезисторе  $CdS$  без подсветки (б).  $T=4.2$  К.

(B- и C-линии).

Спектральный максимум интенсивности A-линии превышает интенсивности B- и C- линии почти на порядок и с частотой меняется как

$$I(\omega) \sim (\hbar\omega - E_g - E_{LO})^{1/2} \exp\left(-\frac{\hbar\omega - E_g - E_{LO}}{kT}\right), (5)$$

что отражает частотные зависимости плотности состояний простой зоны проводимости и степени их заселенности.

Резкая длинноволновая граница  $\lambda=762.1$  нм ( $E_A = \hbar\omega_A = 1.627$  эВ) A-линии собственной люминесценции АФВ слоя  $CdTe$  означает, что, во-первых, поликристаллические зерна как в случае стеклянной, так и фоторезистивной подложках выращивались с достаточно совершенной объемной кристаллической структурой, во-вторых, она лежит выше от дна проводимости на энергии  $E_{LO}$  (при  $T=4.2$  К для  $CdTe E_g=1.606$  эВ [83]). Последнее можно объяснить следующее образом. Под действием интенсивного лазерного облучения возбуждаются электронно-дырочные пары с большими энергиями в соответствующих зонах  $CdTe$ , которые релаксируются по энергии и импульсу в основном на LO-фонах с характерным временем  $\tau_{LO}$ . Для свободных электронов и дырок с кинетическими энергиями  $E_{e,h} \leq E_{LO}$  появляется дополнительный мощный канал безизлучательного ухода ( $\tau_0 \ll \tau_{LO}$ ) на экситонные и примесные состояния. Поэтому в реальных кристаллах  $CdTe$  в основном наблюдаются вышеупомянутые линии излучения с частотой  $\omega < E_g / \hbar$ . Причина появления A-линии

На рис. 2 представлены низкотемпературные ( $T=4.2$  К) спектры люминесценции монослоя (кривая 1) и бислоя без подсветки (2) и с подсветкой  $L_{nc}=500$  лк (3) в окрестности края собственного поглощения  $CdTe$  в геометрии нормального возбуждения и нормального измерения. Из кривых 1 и 2 видно, что соответствующие спектры люминесценции без подсветки в области 750-790 нм качественно совпадают: состоят из основной-сильной линии излучения зона-зона (A-линия) с полушириной  $\Delta\lambda \approx 7.5$  нм и длинноволнового крыла с дублетной тонкой структурой

излучения в поликристаллической пленке обусловлена разделением фотоносителей электрическим полем потенциальных барьеров приповерхностных областей кристаллических зерен (КЗ), т.е. она формируется объемом КЗ и ограничивается, скорее всего, максвелловским временем релаксации  $\tau_M = \varepsilon_0 / \sigma$ . Так, линия А может быть обнаружена только в высокоомных поликристаллических прямозонных полупроводниках, каковым и является исследуемая АФВ пленка *CdTe*.

Дублетные линии излучения В и С также лежат в собственной области поглощения-  $\omega > E_g / \hbar$ . Их максимумы для монослоя *CdTe* находятся на длинах волн 768 нм и 785 нм, а для АФВ слоя на *CdS* - 754 нм и 772 нм, соответственно. Механизм образования этих линий сложный. В случае кривой 1 линии В и С, скорее всего, является *LO* повторениями линии А, хотя в их формировании могут участвовать излучательные переходы *c*-зона-мелкий акцептор, мелкий донор – *v*-зона, зона – поверхностные уровни границы зерен (ГЗ). Для кривой 2 заведомо следует отдать предпочтение переходу зона- ГЗ (линия В) и переходам *e*-*h* или зона - акцептор в случае линии С. При этом особо следует отметить, что, во- первых, спектральные линии А, В и С люминесценции АФВ слоя ранее вообще не наблюдались другими авторами и, во- вторых, они формируются излучениями, идущими из разных глубин и разными структурными частями кристаллических зерен (объем, барьерные области, ГЗ) пленки *CdTe*.

**Спектр *HTFL* слоя *CdTe* без подсветки.** Спектр люминесценции АФВ слоя *CdTe* на *CdS* (рис.2, кривая b), в отличие от СЛ люминесценции монослоя *CdTe* (а), не содержит область горячей люминесценции (ГЛ), зато имеет относительно сильные и широкие линии «краевого» излучения 790-850 нм. Естественно ожидать, что тушение ГЛ и индуцирование линии «краевой» люминесценции в *CdS/CdTe* осуществляется под влиянием вытягивающего свободных носителей «продольного» электрического поля гетероперехода. Излучение донорно-акцепторных пар в основном формируется из барьерных областей КЗ и из области гетероперехода в части *CdTe*, где происходит разделение фотоносителей и поэтому практически отсутствуют излучательные переходы *e*-*h*. За однородное уширение линии излучения ДАП ответственны потенциальные барьеры ГЗ, межпримесные взаимодействия, а за неоднородное уширение в длинноволновую область спектра- многократное *LO* испускание.

Вкратце обсудим механизма процессов рекомбинации ДАП. Такие пары можно рассматривать как молекулярные примеси, если они занимают соседние ячейки в кристаллической решетке. Естественно кулоновское взаимодействие между донором и акцептором существенно зависит от перекрытия электронной и дырочной волновых функций. Оно увеличивает энергию возбужденного состояния на величину, обратно пропорциональную расстоянию *r* между донором и акцептором. Энергия фотона, излучаемого при донорно-акцепторном переходе, определяется выражением

$$E_n = E_g - (E_D + E_A) + \frac{e^2}{\varepsilon r_n}. \quad (6)$$

Поскольку примесные атомы занимают в решетке вполне определенные места, то величины  $r_n$  и  $E_n$  принимают водородоподобный дискретный ряд значений.

Строго говоря, процессу излучательной рекомбинации электронно-дырочной пары в ДАП соответствуют спектры излучения, состоящие из отдельных линий. Однако спектральные расстояния будут заметными лишь при малых значениях  $r_n$ , а по мере увеличения  $r_n$  они непрерывно сокращаются и близко расположенные линии сливаются в одну сплошную полосу. Поэтому линейчатую структуру в спектрах излучения можно обнаружить только на коротковолновых крыльях полос в виде тонкой структуры донорно-акцепторной излучательной рекомбинации.

Вероятность ДАП переходов определяется степенью перекрытия волновых функций соответствующих состояний и должна резко убывать с увеличением расстояния  $r_n$  между донором и акцептором. Для мелких изолированных водородоподобных примесных центров вероятность переходов можно представить в виде выражения

$$\frac{I}{\tau(r)} = \frac{I}{\tau_0} \exp\left(-\frac{2r}{a_B}\right), (7)$$

где  $a_B$  – боровский радиус мелкой примеси. Хотя электрон, локализованной на донорном уровне, взаимодействует со всеми дырками окружающих его акцепторов, основной вклад в энергию взаимодействия, вносят ближайший к донору акцептор. На него с наибольшей вероятностью и происходит оптический переход электрона.

Так как вероятность донорно-акцепторных переходов зависит от величины  $r$  то числа электронов на донорных и акцепторных уровнях будут функциями  $r$ , интенсивности возбуждающего света, а при нестационарном режиме – и времени  $t$ . Поэтому спектр излучения ДАП деформируется и смещается с увеличением концентрации примеси и интенсивности возбуждающего света. Он смещается также в процессе затухания полосы люминесценции и в зависимости от концентрации других структурных дефектов кристаллической решетки. С возрастанием интенсивности возбуждающего света максимум полосы излучения ДАП смещается в сторону больших энергий. Это происходит потому, что пары, соответствующие большим значениям  $r$  и малым значениям  $h\nu$ , быстрее насыщаются и их излучение перестает увеличиваться с ростом накачки. Поэтому повышается удельный вес излучения близлежащих (короткоживущих) пар, которым соответствуют большие значения  $h\nu$ .

Особо следует отметить, что для точной интерпретации структуры излучения ДАП необходимо принимать во внимание тот факт, что степень перекрытия электронных и дырочных волновых функций модулируется локальными напряжениями, вызванными заменой атомов кристаллической решетки полупроводника чужеродными атомами других размеров. А в случае мелкозернистых поликристаллических структурах следует ожидать существенного влияния встроенных электрических полей ООЗ у границы раздела кристаллических зерен на спектр излучения ДАП.

**Анализ спектров НТФЛ слоя CdTe с подсветкой CdS.** Под действием подсветки CdS с интенсивностью  $L_{nc} = 500$  лк спектр люминесценции (СЛ) АФВ слоя CdTe существенно перестраивается (рис.3, кривая а.). Линии излучения А, В и С практически исчезают. Отчетливо проявляется область 770-790 нм излучения свободных экситонов и область 790,0-820,0 нм излучения ДАП («краевая» люминесценция). Это подтверждается без сомнений спектром отражения (рис.3, кривая б), где видны экситонный резонанс ( $\lambda_{ex} = 782.5$  нм,  $\hbar\omega_{ex} = 1.585$  эВ) и область ДАП 800-812.5 нм.

Дублетная структура экситонной люминесценции (кривые  $P_d$  и  $P_u$ ) хорошо описывается на основе модели поляритонов. Более интенсивным длинноволновым компонентом с максимумом на частоте  $\hbar\omega_H = 1.584$  эВ соответствует излучение поляритонов нижней ветви, а определяющий вклад в менее интенсивные коротковолновые спутники с максимумом на частоте  $\hbar\omega_g = 1.590$  эВ вносят излучение поляритонов верхней ветви (см. также рис 4).

Частота провала  $\hbar\omega_L=1.588$  эВ («продольная частота») определяет минимальную энергию продольных экситонов. Заметим, что аналогичный спектр поляритонной люминесценции наблюдается в кристаллах  $CdTe$  составом, близким к стехиометрическому при температуре  $T \approx 77$  К (т.е. при больших значениях  $\hbar\Gamma$ ), а с понижением температуры относительная интенсивность свободных экситонов уменьшается и при  $T = 4.2 - 20.4$  К доминирует излучение связанных экситонов.

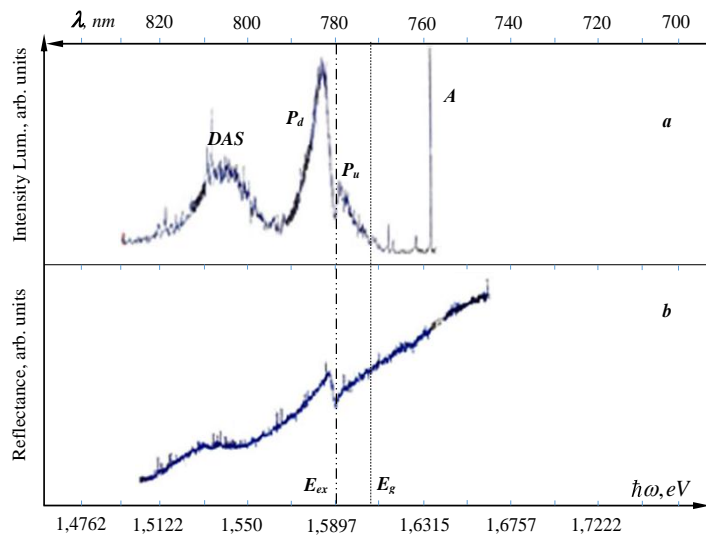


Рис.3. Спектры фотолюминесценции АФВ-слоя  $CdTe$  в гетероструктуре  $n-CdS/p-CdTe$  подсветкой  $CdS$  интенсивностью  $L_{nc}=500$  лк (а) и спектр отражения (б)  $CdTe$ .  $T=4.2$  К.

Симметричный контур «краевой люминесценции» с максимумом на частоте  $\hbar\omega_{DA}=1.540$  эВ ( $\lambda_{DA}=805$  нм, кусок линии с кружками на рис 4) имеет полуширину  $\hbar\Delta\omega_{DA}=33$  мэВ и в отличие от кристаллов, а также от случая без подсветки  $CdS$  (кривая 2), не содержит неоднородного уширения за счет  $LO$  повторений. За данный контур ответственны переходы внутри ДАП, образованной мелким донором и мелким акцептором, энергия активации которой равна  $E_g - \hbar\omega_{DA} = 1.606 - 1.540 = 0.066$  эВ, а за сильное однородное уширение - сильное межпримесное взаимодействие в

поле потенциальных барьеров ГЗ и следовательно, образование кластеров ДАП.

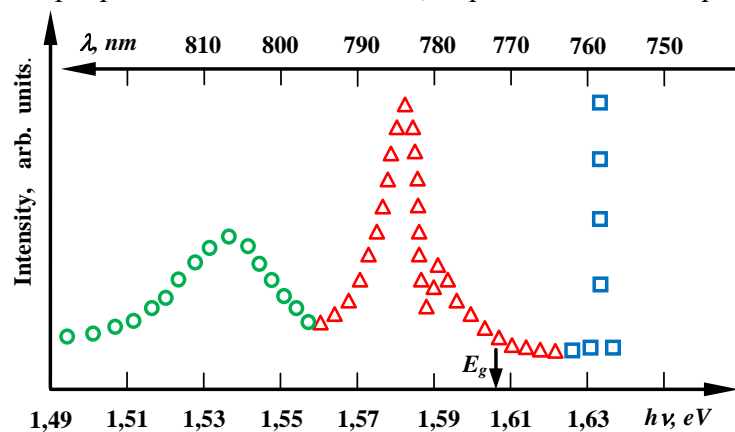


Рис.4. Спектры фотолюминесценции поликристаллического АФВ-слоя  $CdTe$  на фоторезисторе  $CdS$  с подсветкой в области собственного поглощения  $CdS$  интенсивностью  $L_{nc}=500$  лк ( $T=4.2$  К).

### Заключение

Таким образом, с помощью подсветки  $CdS$   $L_{nc} \approx 5 \cdot 10^2$  лк в гетероструктуре  $n-CdS/p-CdTe$  удалось обнаружить линии излучения поляритонов и мелких ДАП АФВ слоя  $CdTe$ . При малых  $L_n \leq 5 \cdot 10^2$  лк их нельзя четко выделить на фоне более сильного излучения «зона-зона» фотоносителей, разделенных внутрикристаллическим энергетическим полем высокоомного поликристалла. Подсветка слоя  $CdS$  уменьшает его шунтирующее АФВ сопротивление, а значит, и максвелловское время релаксации

разделенных фотоносителей в объеме КЗ, 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 ФР.

Таким образом, созданная структура ФР-ФВС из *n-CdS/p-CdTe* открывает новые перспективы не только практического приложения её в качестве фотоприемника, но и для разработки новых методов изучения фотоэлектрических явлений в полупроводниках.

#### Литература:

1. **Tuteja M.** Low temperature photoluminescence spectroscopy studies on sputter deposited CdS/CdTe junctions and solar cells [Текст] / P. Koirala, J. Soares, R. Collins, A. Rockett // Journal of Materials Research Vol.31, Issue 02, 2016 - pp. 186-194.
2. **Durose K.** Physical Characterization of Thin-film Solar Cells [Text] / S.E. Asher, W. Gaegermann, D. Levi and et al. [Text] // Journal: Progress in Photovoltaics Research and Applications. Issue 2-3. Vol.12, 2004 - P. 177-217.
3. **Caraman I.** The luminescence of CdS and CdTe thin films, components of photovoltaic cells [Text] / S.Vatavu, G. Rusu, P. Gasin // Chalcogenide Letters Vol. 3, No.1, January, 2006 - P. 1-7.
4. **Ikhmayies Sh.J.** Interface photoluminescence of the  $SnO_2 : F/CdS : In/CdTe$  thin film solar cells prepared partially by the spray pyrolysis technique [Text] / R. N. Ahmad-Bitar // Journal of Luminescence, Vol.132, Is.2, 2012, -P. 502–506.
5. **Okamoto T.** Characterization of highly efficient CdTe thin film solar cells by low-temperature photoluminescence [Текст] / Y.Matsuzaki, N.Amin // et al. // Japanese Journal of Applied Physics. vol: 37, num: 7, 31 Jan. Phys. Pt 1, 1998 - P.3894-3899, published, JP.
6. **Nakamura K.** Electro modulated Photoluminescence Study of *CdS/CdTe* Thin-Film Solar Cell [Текст] / Gotoh M., Fujihara T., Toyama T. and et al. // Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 40, 2001 - P. 4508-4511.
7. **Potter M.D.** A study of the effects of varying cadmium chloride treatment on the luminescent properties of *CdTe/CdS* thin film solar cells [Текст] / D.P. Halliday, M. Cousins, K. Durose // Thin Solid Films, Vol.361–362, 2000 - P. 248–252.
8. **Косяченко Л.А.** Влияние толщины поглощающего слоя на эффективность солнечного элемента *CdS/CdTe* [Текст] / А.И. Савчук, Е.В. Грушко // ФТП, **43**(8), 2009 - С.1060-1064.
9. **Ильчук Г.А.** Фоточувствительность гетеропереходов *n-CdS/p-CdTe*, полученных химическим поверхностным осаждением *CdS* [Текст] / В.В. Кусьнэж, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, П.Й. Шаповал, Р.Ю. Петрусь // ФТП, **44**(3), 2010 - С. 335-337.
10. **Akhmadaliev B.J.** Correlation Between the Low-Temperature Photoluminescence Spectra and Photovoltaic Properties of Thin Polycrystalline CdTe Films [Текст] / O.M. Mamatov, B.Z. Polvonov, N.Kh. Yuldashev // JAMP (USA), **4**, 2016, - P.391-307.