

## ДИСПЕРСИЯ ВРЕМЕН ЖИЗНИ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ЭКСИТОНОВ В ТВЕРДОМ РАСТВОРЕ $CdS_{1-x}Se_x$

*С.А.Пермогоров, А.Н.Резницкий, С.Ю.Вербин,  
В.А.Бонч-Бруевич*

Установлено, что времена жизни локализованных экситонов в системе  $CdS_{1-x}Se_x$  сильно зависят от глубины локализации. Эта зависимость отражает дисперсию излучательных времен для мелких локализованных состояний.

При оптическом возбуждении в области собственного поглощения спектры фотолюминесценции (ФЛ) полупроводниковых твердых растворов  $CdS_{1-x}Se_x$  при гелиевых температурах содержат интенсивную полосу, расположенную в непосредственной близости к линиям экситонного отражения, а также ее фононные повторения с энергией  $LO$  фонона. В работах <sup>1-3</sup> было показано, что это излучение обусловлено локализованными экситонами. Локализация экситонов осуществляется в ямах потенциального рельефа, образованного статистическими флуктуациями состава твердого раствора <sup>4</sup>. В соответствии с общими представлениями теории неупорядоченных систем в экситонном спектре полупроводниковых твердых растворов должны сосуществовать локализованные и делокализованные состояния, раз-

деленные порогом подвижности. Для растворов  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$  положение такого порога в энергетическом спектре было определено экспериментально<sup>5</sup> по спектрам возбуждения поляризации.

Результаты работ<sup>1-3, 5</sup> показывают, что основной вклад в излучательную рекомбинацию  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$  дают состояния локализованных экситонов, расположенные ниже порога подвижности. Делокализованные состояния имеют малое время жизни, ограниченное быстрой локализацией в достаточно глубоких потенциальных ямах. Пространственная локализация экситонов существенно уменьшает вероятность их безызлучательной гибели. Это обстоятельство, а также отсутствие процессов оже-рекомбинации для локализованных экситонов,

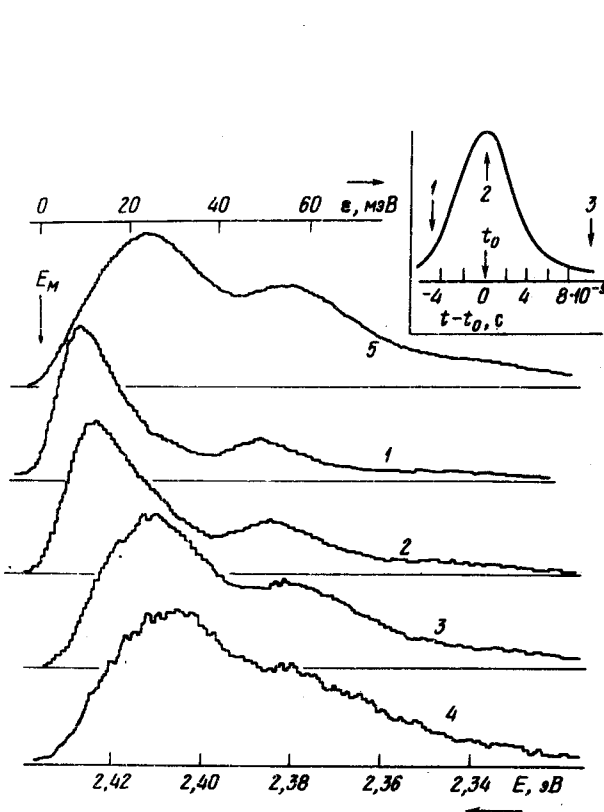


Рис.1

Рис.1. Спектры ФЛ твердого раствора  $\text{Cd}_{0,88}\text{Se}_{0,12}$  в различные моменты времени  $(t - t_0)$  при импульсном (кривые 1 - 4) и непрерывном (5) возбуждении.  $T = 2 \text{ K}$ . На вставке показана форма импульса возбуждения

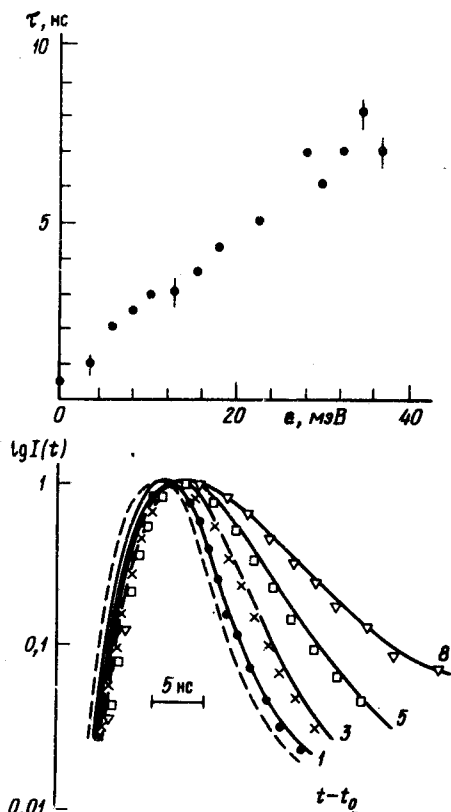


Рис.2

Рис.2. Форма импульсов ФЛ локализованных экситонов с различной энергией локализации (экспериментальные точки). Сплошные линии – результат вычисления  $I(t)$  по формуле (1), пунктир – лазерный импульс  $I_0(t)$ . Вверху – измеренная зависимость  $\tau(\epsilon)$ . Результаты для образца  $x = 0,12$

приводит к тому, что при самых низких температурах их время жизни может определяться излучательными процессами. При этом „гигантская” сила осциллятора мелких локализованных состояний<sup>6</sup> может привести к временам жизни порядка  $10^{-9}$  с. Кроме того, должно наблюдаться существенное увеличение времени жизни с ростом энергии локализации  $\epsilon$ , описываемое на начальном участке законом  $\tau \sim \epsilon^{3/2}$ <sup>6</sup>.

Мы провели прямое исследование зависимости времени жизни локализованных экситонов от энергии локализации  $\epsilon$ . Время жизни измерялось по затуханию спектрально-разложенной ФЛ. Для возбуждения ФЛ использован импульсный азотный лазер. Максимальная плотность

возбуждения не превышала  $10^{22} \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , при этом форма спектра ФЛ не зависела от интенсивности возбуждения. Используемая методика измерений с разрешением по времени описана в <sup>7</sup>.

На рис.1 представлены спектры ФЛ образца  $\text{CdS}_{0,88}\text{Se}_{0,12}$  при регистрации в различные моменты времени. Кривая 1 получена за 5 нс до максимума импульса возбуждения, кривая 2 — в максимуме импульса, кривая 3 и 4 — через 10 и 20 нс после максимума возбуждения, кривая 5 — спектр ФЛ при непрерывном возбуждении. Как видно из рисунка, с течением времени максимум самой коротковолновой (бесфоновой) полосы излучения заметно смещается в сторону меньших энергий. Аналогичные результаты были получены и для образцов других составов.

Наблюдаемое смещение могло бы отражать миграцию энергии между отдельными локализованными состояниями. Однако, поскольку это смещение происходит в области энергий существенно ниже порога подвижности (стрелка  $E_M$  на рис.1, положение определено по результатам работы <sup>5</sup>), более естественным представляется интерпретировать наблюдаемую эволюцию спектров излучения во времени как проявление зависимости излучательного времени жизни экситонов от глубины их локализации  $\epsilon = E_M - E$ .

Исследование кривых затухания ФЛ при фиксированной частоте излучения (рис.2) показало, что состояния с разными энергиями локализации могут быть охарактеризованы разными временами затухания  $\tau$ . Точки разного типа на рис.2 показывают экспериментальные результаты для разных значений  $\epsilon$ , пунктир — экспериментально измеренная форма импульса  $I_0(t)$  возбуждающего лазера, сплошные кривые  $I(t)$  — результат сверки формы лазерного импульса с экспонентой  $\exp(-t/\tau)$  по формуле:

$$I(t) = \int_0^t I_0(t') \exp[-(t - t')/\tau] dt' \quad (1)$$

Цифры около каждой кривой показывают величину  $\tau$  (в нс), использованную для получения свертки. В верхней части рисунка представлена полученная зависимость  $\tau(\epsilon)$ . Из рисунка видно, что использованное нами предположение о простом экспоненциальном законе затухания позволяет хорошо описать форму спадающих участков импульсов ФЛ. Оказалось, что в рамках такого предположения величина  $\tau$  может быть определена с точностью не хуже  $\pm 0,5$  нс. Отличие вычисленных кривых от экспериментальных точек в области переднего фронта импульсов указывает, что процесс заселения состояний локализованных экситонов происходит не мгновенно, а требует времени порядка  $1 \div 3$  нс.

Мы считаем, что наблюдаемые времена жизни локализованных экситонов определяются в основном излучательной рекомбинацией. Основным безизлучательным процессом для локализованных экситонов при гелиевых температурах являются туннельные переходы в более глубокие состояния. Однако исследование формы спектров ФЛ при селективном возбуждении <sup>2</sup> показывает, что такие переходы могут влиять на время жизни только для очень мелких состояний в области  $\epsilon < 5 \div 10$  мэВ. Полученные нами значения времен жизни близки к излучательным временам экситонно-примесных комплексов в кристаллах CdS, измеренным фазометрическим методом в спектрах ФЛ <sup>8</sup> и оцененным по спектрам поглощения <sup>9</sup>. Зависимость времени  $\tau$  от энергии локализации  $\epsilon$  в целом согласуется с выводами работы <sup>6</sup> для излучательных времен мелких локализованных состояний.

Следует отметить, что измеренная нами зависимость  $\tau(\epsilon)$  имеет некоторую систематическую неточность. Как показано в <sup>2</sup>, при неселективном возбуждении в излучение на фиксированной частоте вносят вклад состояния с различными энергиями локализации, поэтому каждой энергии в спектре ФЛ соответствует время затухания  $\tau$ , усредненное по некоторому интервалу  $\epsilon$ . Уточнение зависимости  $\tau(\epsilon)$  в опытах с селективным резонансным возбужде-

нием ФЛ может дать на основании теории <sup>6</sup> информацию о связи между энергией локализации и размерами области локализации, что очень важно для излучения природы локализованных экситонных состояний в полупроводниковых твердых растворах.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность А.А.Каплянскому и Э.И.Рашба за обсуждение результатов этой работы.

### Литература

1. *Permogorov S., Reznitsky A., Travnikov V., Verbin S., G.Muller G.O., Flögel P., Nikiforova M.* Phys. Stat. Sol., 1981, (b)106, K 57.
2. *Permogorov S., Reznitsky A., Verbin S., Muller G.O., Flögel P., Nikiforova M.* Phys. Stat. Sol., 1982, (b)113, 589.
3. *Cohen E., Sturge M.D.* Phys. Rev., 1982, B25, 3828.
4. *Барановский С.Д., Эфрос А.Л.* ФТП, 1978, 12, 2233.
5. *Пермогоров С.А., Резницкий А.Н., Вербин С.Ю., Лысенко В.Г.* Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 390.
6. *Рашба Э.И.* ФТП, 1974, 8, 1241.
7. *Бонч-Бруевич В.А., Игнатьев И.В., Овсянник В.В.* Оптика и спектроскопия, 1978, 44, 734.
8. *Henry C.H., Nassau K.* Phys. Rev., 1970, B1, 1628.
9. *Тимофеев В.Б., Яловец Т.Н.* ФТТ, 1972, 14, 481.

Физический институт им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
30 мая 1983 г.