

## СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ПОДВИЖНОСТИ ЭКСИТОНОВ В $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$

С.А.Пермогоров, А.Н.Резницкий, С.Ю.Вербин,  
В.Г.Лысенко

Обнаружено, что поляризация люминесценции экситонов, локализованных флуктуациями концентрации компонент твердого раствора  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$  зависит от частоты возбуждающего света. Изучение этой зависимости позволило обнаружить границу подвижности экситонов и определить ее положение в энергетическом спектре исследованного твердого раствора.

В работе <sup>1</sup> была предложена модель локализации экситонов в потенциальных ямах, образованных флуктуациями состава в твердых растворах полупроводников. Исследования, выполненные в последние годы, показали, что при гелиевых температурах основной вклад в излучательную рекомбинацию твердого раствора  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$  дают состояния локализованных экситонов <sup>2,3</sup>. Хорошо известно, что спектр люминесценции полупроводника в значительной степени определяется кинетическими свойствами экситонов, в частности, их возможностью перемещаться по кристаллу. Это дало нам основание надеяться, что именно исследование таких спектров позволит обнаружить границу, отделяющую локализованные и делокализованные экситонные состояния.

В работах <sup>2,4</sup> было показано, что при резонансном возбуждении линейно поляризованным светом в область локализованных состояний люминесценция имеет высокую степень линейной поляризации. В настоящей работе мы исследовали зависимость степени поляризации люминесценции локализованных экситонов от частоты возбуждающего света. Образцы помещались непосредственно в откачанный жидкий гелий и возбуждались поляризованным излучением  $\text{Ar}^+$ -лазера или лазера на красителе Кумарин 152. Изучалось излучение граней скола или граней роста перпендикулярных оптической оси гексагональных кристаллов  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ . Степень поляризации излучения определялась соотношением

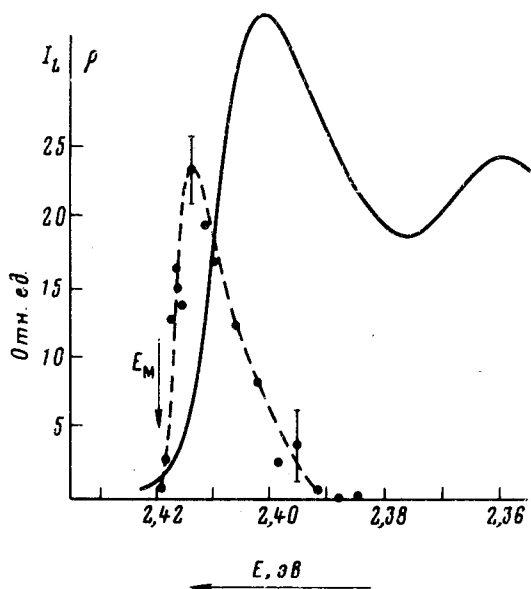
$$\rho = (I_{\parallel} - I_{\perp}) / (I_{\parallel} + I_{\perp}),$$

где  $I_{\parallel}$  и  $I_{\perp}$  — интенсивности люминесценции в поляризации, соответственно, параллельно и перпендикулярно поляризации возбуждающего света. Для измерения степени поляризации  $\rho$  использовались два метода. Один заключался в последовательной регистрации спектров  $I_{\parallel}$  и  $I_{\perp}$  с помощью оптического многоканального анализатора ОМА-2 с последующей численной обработкой результатов с помощью микропроцессора. Второй метод основан на одновременной регистрации спектров  $I_{\parallel}$  и  $I_{\perp}$  с помощью двухканальной системы в режиме счета фотонов. В этом случае необходимая обработка спектров также проводилась с помощью мини-ЭВМ.

Изучая поляризацию люминесценции локализованных экситонов, мы обнаружили, что величина степени поляризации излучения зависит от частоты возбуждающего света. Результаты измерения этой зависимости для одного из образцов с концентрацией  $\text{Se } x = 0,1$  представлены на рисунке черными кружками. При возбуждении в области собственного поглощения поляризация люминесценции отсутствует. Поляризация возникает при уменьшении частоты возбуждающего света ниже определенной энергии  $E_m$ , быстро достигает максимума в области коротковолнового края полосы излучения, а затем уменьшается до нуля при дальнейшем уменьшении частоты возбуждающего света. Аналогичные результаты были получены и для образцов с другими концентрациями.

Как показано в работе <sup>4</sup>, поляризация люминесценции связана с тем, что локализирующие экситон потенциальные ямы анизотропны и ориентированы хаотически (так называемая

„скрытая анизотропия”<sup>5</sup>). В этом случае поляризация спектра будет наблюдаться, если анизотропия достаточно велика, чтобы расщепить  $\Gamma_5$  уровень экситона, а перенос возбуждения между разными ямами отсутствует<sup>4</sup>.



Зависимость степени поляризации излучения локализованных экситонов  $\rho$  от энергии квантов возбуждающего света  $E$  (черные кружки). Сплошная кривая — спектр люминесценции

Резкий коротковолновый спад степени поляризации мы приписали началу подвижности в системе локализованных экситонов, поскольку переход возбуждения с изначально возбужденного уровня на уровень в другой яме должен полностью деполяризовать излучение. Увеличению вероятности миграции при повышении частоты возбуждающего света способствует рост плотности экситонных состояний вблизи дна невозмущенной экситонной зоны<sup>1</sup>. Этот рост должен вести прежде всего к увеличению перекрытия волновых функций локализованных экситонов, а при достаточно высоких энергиях — к образованию делокализованных состояний. Коротковолновая граница спектра возбуждения поляризации как раз и соответствует таким энергетическим состояниям экситона, с которых возбуждение за время жизни практически со стопроцентной вероятностью уйдет в более глубокие ямы. Мы полагаем, что эту границу можно считать порогом подвижности экситонов в твердом растворе  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ .

Из приведенного рисунка видно, что порог подвижности совпадает по энергии с началом резкого коротковолнового подъема интенсивности люминесценции, возникающей при возбуждении в глубину собственного поглощения (сплошная линия на рисунке). Отсюда можно заключить, что при низких температурах главный вклад в излучательную рекомбинацию в твердом растворе  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$  дают локализованные состояния. Экситоны в состояниях с энергиями выше границы подвижности из-за быстрой локализации имеют очень короткое время жизни и практически не вносят вклада в излучение.

Уменьшение степени поляризации в длинноволновой части спектра возбуждения поляризации, очевидно, не может объясняться миграцией экситонов. Возможно, что это уменьшение вызвано уменьшением анизотропии потенциальных ям с увеличением глубины локализации. В настоящее время можно предложить по крайней мере два объяснения этого эффекта.

Предположим, что анизотропия возникает в результате взаимодействия близко расположенных ям. Тогда, с ростом энергии локализации, вследствие уменьшения размера потенциальных ям и увеличения расстояния между ними, вероятность взаимодействия между ямами понижается и, следовательно, растет вклад изолированных почти изотропных ям.

Вторая возможность связана с тем фактом, что при увеличении глубины локализации в глубоких потенциальных ямах малого радиуса локализуется только дырка<sup>6</sup>. В этом слу-

че радиус орбиты электрона, связанного с дыркой кулоновским взаимодействием, будет значительно превышать размер флуктуации и своим движением электрон будет усреднять ее анизотропию.

В обоих случаях можно ожидать уменьшения расщепления экситонного уровня  $\Gamma_5$  в анизотропном поле до значений, меньших его однородной ширины, следствием чего и будет про падание поляризации излучения.

Несомненно, что связь степени анизотропии состояний локализованных экситонов с глубиной их локализации заслуживает внимательного теоретического рассмотрения. В этой связи представляет интерес работа <sup>7</sup>, в которой показано, что в случае вырожденной валентной зоны хвосты плотности состояний формируются за счет сильно анизотропных флуктуаций. Неясно, однако, в какой мере результаты этой работы применимы к гексагональным твердым растворам, в которых валентная зона расщеплена кристаллическим полем.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Е.Л.Ивченко, Г.Е.Пикусу, Э.И.Рашба и В.Б.Тимофееву за обсуждение результатов настоящей работы.

#### Литература

1. Барановский С.Д., Эфрос А.Л. ФТП, 1978, 12, 2233.
2. *Pertogorov S., Reznitsky A., Travnikov V., Verbin S., Müller G.O., Flögel P., Nikiforova M.* J. Lum., 1981, 24/25, 409.
3. *Cohen E., Sturge M.D.* Phys. Rev., В 1982, 25, 3828.
4. *Вербин С.Ю., Пермогоров С.А., Резницкий А.Н.* ФТТ, 1983, 25, 346.
5. *Феофилов П.П., Каплянский А.А.* УФН, 1962, 76, 201.
6. *Pertogorov S., Reznitsky A., Verbin S., Müller G.O., Flögel P., Nikiforova M.* Phys. Stat. Sol. (b) 1982, 113, 589.
7. *Кусмарцев Ф.В., Рашба Э.И.* Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 106.