

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКИ ДЕЛОКАЛИЗОВАННЫХ ЭКСИТОНОВ В ТВЕРДОМ РАСТВОРЕ $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$

Агекян В. Ф., Александров Б. Г., Степанов Ю. А.

По спектрам люминесценции твердых растворов $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ определены температурные интервалы, в которых сосуществуют свободные экситоны и экситоны, связанные на флуктуациях потенциала решетки. Установлено, что этот интервал значителен при $0.03 < x < 0.3$, но далее он сужается и доходит до нуля при $x=0.7$. Исследована кинетика люминесценции в полосе экситона и обнаружено, что в отличие от бинарных соединений сильная зависимость времен затухания по контуру полосы экситона сохраняется по крайней мере до $T=80$ К.

Вопросы, относящиеся к локализации электронных возбуждений, в частности экситонов на флуктуациях потенциала решетки полупроводниковых твердых растворов (ТР), интенсивно исследуются в последние годы теоретически и экспериментально. В ТР $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ спектры излучения экситонов, взаимодействующих с этими флуктуациями («флуктуационные» экситоны — ФЭ), изучались в условиях межзонного и селективного возбуждений [1, 2]. Значительное внимание было уделено спектральной диффузии и изменению времен затухания люминесценции τ по контуру полосы излучения ФЭ при гелиевых температурах [3]. Полученные результаты интерпретировались в рамках модели Рашбы [4] ($\tau \sim E_x^{3/2}$, где E_x — энергия локализации), а также как переходы в более глубокие состояния с генерацией акустических фононов через переизлучение или туннелирование. Эти причины приводят к увеличению τ в полосе экситона по мере уменьшения энергии квантов излучения. В ТР $\text{CdS}_{0,9}\text{Se}_{0,1}$, где при гелиевых температурах наблюдаются только ФЭ и его LO -фононные повторения, при повышении температуры спектр трансформируется: полоса ФЭ деградирует и разгорается люминесценция свободных экситонов (СЭ).

В настоящей работе исследованы температурные изменения люминесценции ТР $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ в зависимости от относительных концентраций широкозонной (S) и узкозонной (Se) компонент ТР в интервале $T=2\div 77$ К и временные характеристики экситонного излучения при 77 К.

Температурная зависимость люминесценции в $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$. Межзонное возбуждение

На рис. 1 приведены спектры экситонного излучения для $\text{CdS}_{0,9}\text{Se}_{0,1}$ и при различных температурах. Температурная трансформация спектров имеет следующие характерные свойства: 1) с ростом температуры экситоны переходят из локализованного состояния в свободное, причем для значений $x \leq 0.6$ существует температурный интервал, в котором наблюдаются обе полосы (ФЭ и СЭ); 2) при изменении x от значения 0.25 в обе стороны этот интервал сдвигается в область низких температур, причем в сторону больших x он еще и сужается, так что для $x \geq 0.7$ ни при какой температуре не удается разделить полосы ФЭ и СЭ; 3) температура, при которой наблюдается переход от ФЭ к СЭ, приблизительно соответствует энергетическому расстоянию ΔE от максимума полосы поглощения СЭ до максимума полосы излучения ФЭ в $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ при 2 К.

Указанные особенности демонстрирует зависимость температуры делокализации ФЭ от концентрации ТР (рис. 2). Эти результаты уместно сравнить с температурной зависимостью излучения экситонов в ТР $A^{IV}B^{VI}$ с анионным замещением, например $Cd_{1-x}Mn_xTe$ при $x=0.3$. При нагревании $Cd_{0.7}Mn_{0.3}Te$ экситонная полоса ФЭ сдвигается в длинноволновую сторону вследствие уменьшения ширины запрещенной зоны. В интервале $15 \div 25$ К знак температурного

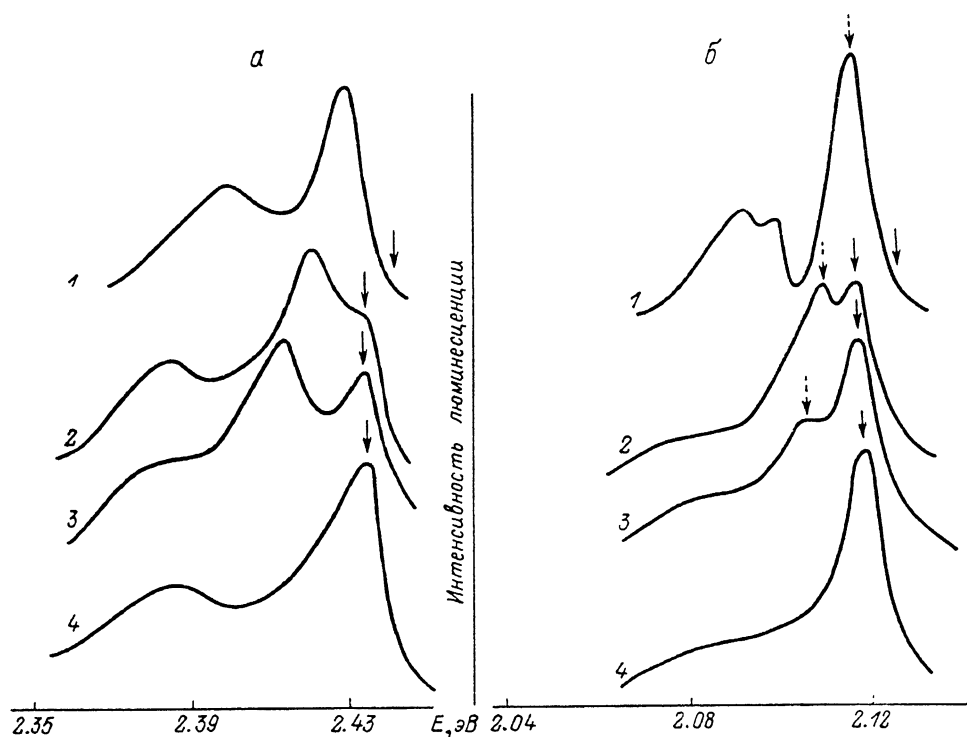


Рис.1. Спектры экситонной люминесценции ТР $CdS_{0.9}Se_{0.1}$ (а) и $CdS_{0.55}Se_{0.45}$ (б) при различных температурах.

Т, К: а) 1 — 5, 2 — 50, 3 — 60, 4 — 70; б) 1 — 5, 2 — 45, 3 — 50, 4 — 60. Сплошная стрелка — положение линии свободного экситона в спектрах отражения, штриховая — максимум бесфоновной полосы излучения «флуктуационного» экситона.

сдвига максимума меняется, поскольку в этой области он определяется переходом от ФЭ к СЭ с постоянным уменьшением ΔE почти до нуля.¹ Таким образом, «одномодовый» переход от ФЭ к СЭ характерен для ТР $A^{IV}B^{VI}$ с катионным замещением, а также для ТР $A^{IV}B^{VI}$ с анионным замещением при достаточно большой концентрации анионной компоненты, т. е. в обоих случаях трансформация происходит без разделения спектра на полосу ФЭ и полосу СЭ.

С е л е к т и в н о е в о з б у ж д е н и е

В условиях селективного возбуждения в контур полосы ФЭ при 2 К на коротковолновом краю LO -фонных повторений наблюдается узкий пикочок, соответствующий излучению ФЭ с нулевой спектральной диффузией [2]. Температурное ослабление пикочка и его исчезновение при 8 К соответствуют сокращению времени жизни ФЭ в резонансно-возбужденном состоянии. С ростом температуры LO -фонные повторения симметризируются [6], при $50 \div 60$ К в спектре люминесценции ТР $CdS_{0.3}Se_{0.7}$, возбужденной вблизи максимума полосы ФЭ

¹ Температурные и концентрационные изменения интервала между максимумами полос поглощения и излучения экситона в $Cd_{1-x}Mn_xTe$ исследованы в [5], там же показано, что при $T > 25$ К движение экситонов носит квазисвободный характер.

(т. е. ниже полосы поглощения СЭ), появляется новая полоса, соответствующая, по нашему мнению, LO -фононному повторению СЭ, бесфоновое излучение которого находится в антистоксовской области (одnofотонное возбуждение антистоксовской люминесценции в пределах $k_B T$ от возбуждающей лазерной линии). Температурное усиление миграции электронного возбуждения проявляется не только оптически: во внешнем электрическом поле при достижении 15 К в системе ФЭ происходит электротепловой пробой, сопровождающийся резким скачком

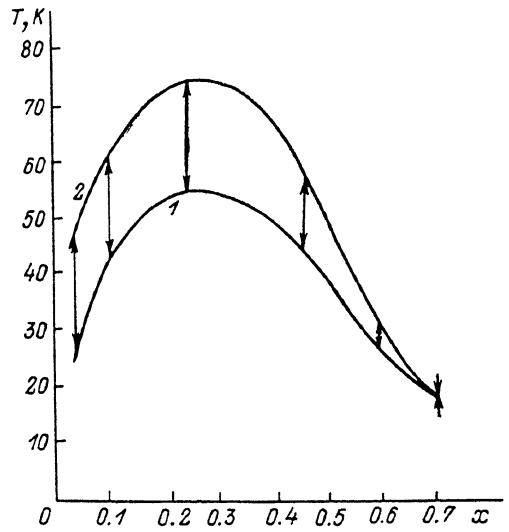


Рис. 2. Концентрационные зависимости температурного появления полосы свободного экситона (1) и гашения люминесценции локализованных экситонных состояний (2).

Стрелками указаны температурные интервалы одновременного существования в спектре люминесценции полос «флуктуационного» и свободного экситонов для конкретных исследованных образцов.

ком температуры. В отличие от бинарных соединений $A^{IV}B^{VI}$ пробой в ТР происходит в существенно меньших электрических полях, что связано с большой плотностью локализованных экситонных состояний в исследуемых ТР.

Времена затухания люминесценции в контуре полосы экситонов

Бесфоновая полоса излучения экситонов в $CdS_{1-x}Se_x$ при 77 К совпадает по энергии с полосой экситонного поглощения, что дает основание отнести ее к люминесценции СЭ. Мы, однако, обнаружили существенное различие в экс-

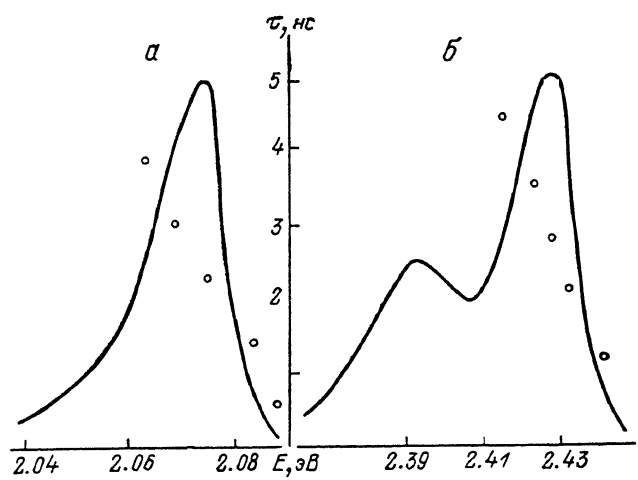


Рис. 3. Спектры люминесценции ТР $CdS_{1-x}Se_x$ при 77 К.

Точками показаны времена затухания люминесценции по контуру полосы экситона в $CdS_{0.6}Se_{0.4}$ (а) и $CdS_{0.3}Se_{0.1}$ (б).

тонной люминесценции в ТР и в соответствующих бинарных соединениях: при азотных температурах τ заметно меняется по контуру полосы (рис. 3). Существование спектра времен затухания экситонной люминесценции позволяет утверждать, что определенная связь между энергией экситона и степенью его

взаимодействия с флуктуациями сохраняется в ТР даже после температурной делокализации экситонного возбуждения. Возможно, следует говорить о делокализованном ФЭ в ТР $A^{IV}B^{VI}$, подчеркивая тем самым отличие его свойств от свойств СЭ при тех же высоких температурах в бинарном соединении $A^{IV}B^{IV}$ где отсутствуют флуктуации потенциала решетки собственного происхождения.

В заключение отметим, что необходимо обратить внимание на исследование случая ТР $CdS_{1-x}Se_x$ с преобладанием узкозонной компоненты ($x > 0.7$), поскольку в этой ситуации свойства электронных возбуждений оказываются более сложными, чем для $CdS_{1-x}Se_x$ с $x < 0.7$, где определяющую роль играет локализация экситонов и свободных носителей на кластерах Se.

Список литературы

- [1] Cohen E., Sturge M. D. // Phys. Rev. B. 1982. V. 25. N 6. P. 3828—3840.
- [2] Permogorov S., Reznifskü, Verbin S. et al. // Phys. St. Sol. (b). 1982. V. 113. N 2. P. 589—600.
- [3] Agekyan V., Bindemann R., Schwabe R., Stepanov Y., Streit I. // Phys. St. Sol. (b). 1983. V. 116. N 1. P. K43—K46.
- [4] Рашба Э. И. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 7. С. 1241—1256.
- [5] Агекий В. Ф., Фан Зунг // ФТП. 1984. Т. 18. В. 10. С. 1859—1861.
- [6] Агекий В. Ф., Васильев Н. Н., Малов А. В., Степанов Ю. А. // ЖПС. 1984. № 3. С. 429—434.

Ленинградский государственный
университет

Получена 6.06.1989
Принята к печати 9.06.1989