

ЭКСИТОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ

(СИСТЕМА $Zn_x Cd_{1-x} Se$, $0 < x < 1$)А.С.Насибов, Л.Г.Суслина, Д.Л.Федоров,
Ю.В.Коростелин, П.В.Шапкин, Л.С.Марков

Проведены исследования концентрационной и температурной зависимости экситонных спектров излучения $Zn_x Cd_{1-x} Se$. Результаты свидетельствуют о большой эффективности процессов через локализованные крупномасштабными флуктуациями состава экситоны, непрерывном характере плотности состояний дна зоны и имеют общее значение для идеальных твердых растворов.

Твердые растворы полупроводников (ТРП) $Zn_x Cd_{1-x} Se$ образуются при любом соотношении компонент, и их электронные характеристики (ширина запрещенной зоны, энергии расщепления валентной зоны) плавно меняются с составом. Такие ТРП относятся к слабо неупорядоченным системам, в которых беспорядок связан с флуктуациями состава из-за статистического распределения замещающих атомов по узлам соответствующей подрешетки (идеальные твердые растворы). Для ТРП $A^2 B^6$ из-за большого радиуса экситона наиболее вероятным является взаимодействие с крупномасштабными флуктуациями состава, что приводит как к локализации экситонов с образованием хвоста плотности локализованных экситонных состояний (ЛЭС), так и к рассеянию делокализованных экситонных состояний (ДЭС)^{1, 2}. В ТРП $A^2 B^6$ флуктуационный беспорядок вызывает зависящее от концентрации уширение экситонных спектров отражения³ и линий излучения экситонных комплексов (ЭК)⁴, появление при низких температурах нового канала излучения ЛЭС⁵.

В данной работе на основании исследований оптических спектров кристаллов $Zn_x Cd_{1-x} Se$ ($0 < x < 1$) удалось установить общие закономерности излучательной рекомбинации с участием экситонов в идеальных твердых растворах. Полученные результаты имеют значение в связи с использованием $Zn_x Cd_{1-x} Se$ как активных элементов, излучающих во всем видимом диапазоне⁶.

Кристаллы $Zn_x Cd_{1-x} Se$ были выращены методом свободного роста⁶ и обладали кубической ($0,7 < x < 1,0$), гексагональной ($0 < x < 0,5$) структурой и промежуточным типом структуры ($0,5 < x < 0,7$)⁷. Исследование спектров отражения и излучения проведено фотоэлектрическим методом. Возбуждение спектров люминесценции осуществлялось линиями $\lambda = 441,6$ нм He – Cd- и $\lambda = 514,5$ нм Ar-лазеров.

В спектрах излучения кристаллов ZnSe ($x = 1$) и CdSe ($x = 0$) при $T = 2$ К превалируют линии I_2 , I_1 ЭК экситонов, связанных на нейтральных донорах и акцепторах. Собственная экситонная люминесценция этих кристаллов оказывается очень слабой, а соответствующая узкая линия находится в области дисперсионной кривой отражения (рис. 1). Линии излучения ЭК присутствуют и в спектрах кристаллов $Zn_x Cd_{1-x} Se$ ^{6, 8}. По мере увеличения x они заметно уширяются и образуют одну широкую полосу $I_{1,2}$, которая (из-за разных соотношений интенсивностей линий I_2 и I_1 для различных кристаллов) может существенно изменять свое положение и форму (рис. 1). Быстрое уширение линий излучения ЭК с концентрацией x в спектрах ТРП свидетельствует о флуктуационном характере неоднородного размытия этих состояний⁴.

Наиболее важные изменения в спектре излучения кристаллов $Zn_x Cd_{1-x} Se$ происходят в экситонной области спектра. Соответствующая самая коротковолновая линия излучения I_L обнаруживает следующие закономерности. Во-первых, она испытывает сильное возгорание с увеличением степени неупорядоченности (изменении x). Если для небольших x (или $1 - x$) ее интенсивность меньше интенсивности линий излучения ЭК, то при промежуточ-

ных составах x I_L доминирует в спектре люминесценции при 2 К (рис. 1). Во-вторых, по своему положению она находится в области дисперсионной структуры линии отражения (вблизи максимума этой структуры рис. 1), что свидетельствует о ее экситонной природе. В-третьих, она достаточно узка, ее полуширина составляет $2 \div 4$ мэВ, что меньше, чем ширина линии отражения (расстояние между максимумом и минимумом структуры отражения), которая для средних составов составляет $5 \div 7$ мэВ (рис. 1). В-четвертых, линия I_L испытывает плавное уширение по мере повышения температуры кристалла. Так, в интервале $2 \div 40$ К она уширяется примерно вдвое, и ее полуширина становится близкой полуширине линии отражения (рис. 2). В этой связи отметим, что для бинарных совершенных кристаллов A^2B^6 (например, CdS, CdSe, ZnSe и др.) линия экситонной люминесценции демонстрирует совершенно иное поведение: она ослабляется с ухудшением качества кристалла и в температурном интервале $2 \div 40$ К не испытывает заметного уширения.

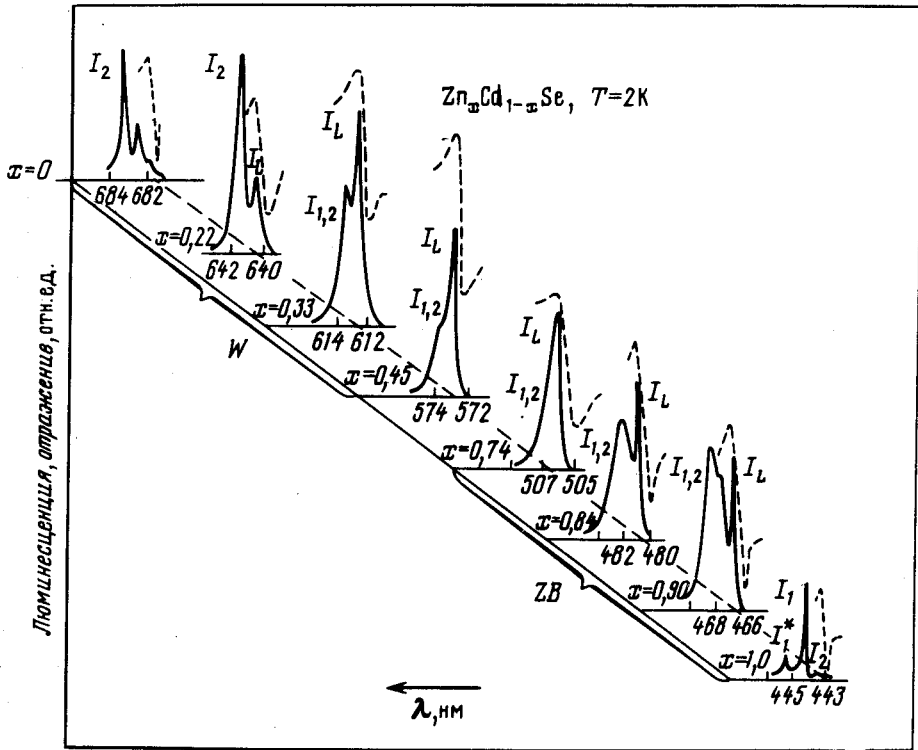


Рис. 1. Спектры люминесценции (сплошные линии) и отражения (пунктир) твердых растворов $Zn_xCd_{1-x}Se$ ($0 < x < 1$), $T = 2$ К. I_L — линия излучения локализованных крупномасштабными флуктуациями состава экситонов; $I_{1,2}$ — линии экситонных комплексов

Обнаруженные особенности экситонной люминесценции в ТРП $Zn_xCd_{1-x}Se$ отражают их специфику как неупорядоченных систем и свидетельствуют о появлении нового эффективного канала излучения ЛЭС при низких температурах и процессах миграции возбуждений. 1. Сильный рост интенсивности линии I_L с увеличением степени беспорядка, а также ее малая полуширина находят свое разумное объяснение, если считать, что при низких температурах высвечиваются не все состояния дна зоны, а лишь состояния низкоэнергетического хвоста плотности ЛЭС, для которых характерна гигантская сила осциллятора⁹ и плотность которых экспоненциально растет с x ^{1, 2}. 2. Наблюдаемому температурному уширению линии излучения I_L за счет коротковолновой добавки следует сопоставить процессы миграции возбуждений ЛЭС (туннелирование электронных возбуждений из отдель-

ных флукуационных ям в менее глубокие соседние ямы с поглощением акустических фононов решетки ^{5, 10}). Процессы пространственной миграции в этом случае сопровождаются процессами спектральной миграции. При более высоких температурах, когда kT превышает полуширину неоднородного контура ЛЭС, излучательные процессы протекают с участием ДЭС. Так, при температурах выше 40 К (в интервале $40 \div 70$ К) после завершения диссоциации ЭК линия излучения $I_{\text{ЭК}}$, которую формируют все состояния дна экситонной зоны, полностью доминирует в спектре (рис. 2), при этом ее интенсивность примерно на два порядка слабее, чем при $T = 2$ К. Последнее обстоятельство связано с тем, что в процессе излучения, в основном, принимают участие ДЭС, для которых становятся актуальными безызлучательные процессы, и сила осциллятора которых на три порядка ниже, чем для ЛЭС ⁹. Температура, таким образом, является тем фактором, который позволяет провести селекцию различных экситонных состояний в процессе излучения: при низких температурах — это ЛЭС, а при более высоких — это, в основном, ДЭС дна зоны.

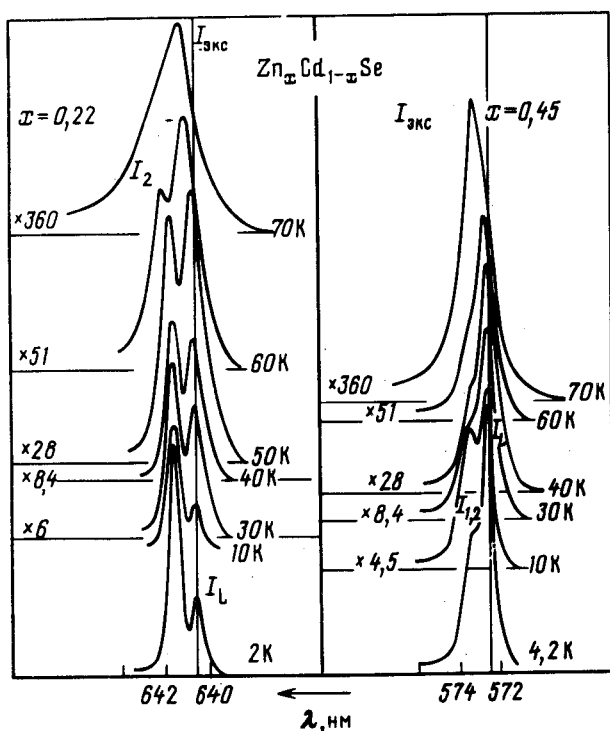


Рис. 2. Спектры излучения кристаллов $Zn_{0,22}Cd_{0,78}Se$ и $Zn_{0,45}Cd_{0,55}Se$ при различных температурах

Проведенные исследования концентрационной и температурной зависимости спектра излучения этой системы ТРП свидетельствуют о большой эффективности излучательного канала ЛЭС и об отсутствии энергетической щели между ЛЭС и дном экситонной зоны, т. е. непрерывном характере распределения состояний. Отметим, что обнаруженные закономерности спектра экситонной люминесценции в кристаллах $Zn_xCd_{1-x}Se$ ($0 < x < 1$) имеют близкое соответствие с теми, что наблюдались для другой системы ТРП с катионным замещением ($Zn_xCd_{1-x}S$ с $0 < x < 0,15$ ⁵), что указывает на их общий характер. Они являются прямым доказательством флукуационного размытия дна экситонной зоны, которое, согласно теоретическим представлениям ^{1, 2}, характерно для идеальных твердых растворов.

Литература

1. Барановский С.Д., Эфрос А.Л. ФТП, 1978, 12, 2233.
2. Аблязов Н.Н., Райх М.Э., Эфрос А.Л. ФТТ, 1983, 25, 353.

3. Суслина Л.Г., Плюхин А.Г., Федоров Д.Л., Арешкин А.Г. ФТП, 1978, 12, 2238.
4. Sustina L.G., Plyukhin A.G., Goede O., Hennig D. Phys. Stat. Sol. (b), 1979, 94, 185.
5. Арешкин А.Г., Суслина Л.Г., Федоров Д.Л. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 427.
6. Ахекян А.М., Козловский В.И. и др. КЭ, 1985, 12, 1113.
7. Арешкин А.Г., Пекарь Г.С., Полисский Г.Н. и др. ФТТ, 1986, 28, 3743.
8. Коростелин Ю.В., Шапкин П.В., Суслина Л.Г. и др. Краткие сообщения по физике. ФИАН, 1988, № 4, 12.
9. Рашба Э.И. ФТП, 1974, 8, 1241.
10. Агранович В.М., Галанин М.Д. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. М.: Наука, 1978, с. 383.

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

Ленинградский механический институт им. Д.Ф.Устинова

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
22 февраля 1988 г.