

ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ЭКСИТОНЫ И МИГРАЦИЯ ИХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

А.Г.Арешкин, Л.Г.Суслина, Д.Л.Федоров

Впервые получено экспериментальное доказательство существования хвоста локализованных экситонных состояний в запрещенной зоне твердых растворов и проявление миграции их возбуждений.

В полупроводниковых растворах замещения из-за флуктуаций концентраций возникает хаотический потенциальный рельеф решетки, ямы которого способны локализовать свободные носители и экситоны. Локализованные экситонные состояния (ЛЭС) распределены непрерывно с длинноволновой стороны от дна зоны $k = 0$ и образуют хвост функции плотности состояний^{1,2}. Обусловленное этим механизмом уширение экситонных состояний в твердых растворах A_2B_6 проявляется в их спектрах экситонного отражения (поглощения)³.

В настоящей работе прямым методом получено экспериментальное подтверждение существования ЛЭС в твердых растворах полупроводников и спектроскопическое проявление миграции их энергий. Эти результаты были получены при анализе спектров люминесценции кристаллов $Zn_xCd_{1-x}S$ и их зависимости от температуры и концентрации твердого раствора.

Исследования спектров люминесценции твердых растворов проводились с использованием He – Cd-лазера с $\lambda = 441,6$ нм в интервале концентраций $0 < x < 0,12$. При низких температурах ($T < 30K$) в спектрах излучения $Zn_xCd_{1-x}S$ преобладают линии люминесцен-

ции связанных экситонов I_1 (комплекс из нейтрального акцептора и экситона) и I_2 (нейтральный донор + экситон) и фоновое повторение I_1 ⁴.

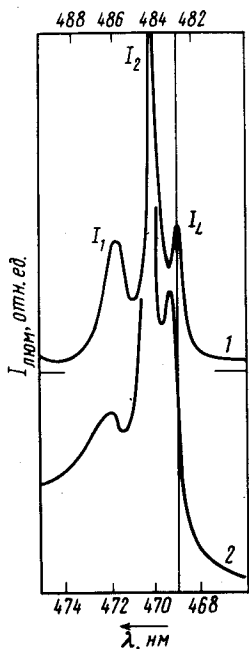


Рис.1

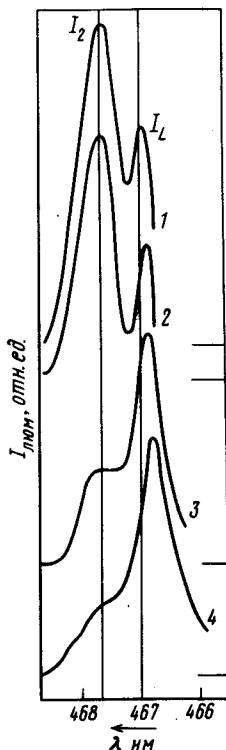


Рис.2

Рис. 1. Зависимость относительного положения линии излучения I_L локализованных экситонов от концентрации твердого раствора $Zn_xCd_{1-x}S$ с $x = 0,03$ (1) и $x = 0,11$ (2), $T = 2K$. Верхняя шкала λ относится к (1), нижняя – к (2)

Рис. 2. Температурная зависимость относительного положения максимума люминесценции локализованных I_L кристаллов $Zn_{0,11}Cd_{0,89}S$. 1, 2, 3, 4 получены при $T = 6$, $T = 20$, $T = 30$ и $T = 45K$, соответственно. Шкала λ (в нм) относится к нижнему спектру

Детальное исследование этих спектров позволило обнаружить в них новую самую коротковолновую линию люминесценции (I_L), для которой характерен ряд особенностей. 1) По своему положению в спектре при $T = 2K$ она располагается между линией экситонного комплекса I_2 и резонансной частотой экситона A (линия A отсутствует в спектре люминесценции этих образцов⁴ и положение резонанса определялось из спектров экситонного отражения³). Ее расстояние от I_2 зависит от концентрации твердого раствора¹). Так для образцов с $x = 0,11$ оно составляет 4 мэВ, а для образцов с малыми концентрациями ($x = 0,03$) – 6 мэВ, и I_L практически совпадает с положением резонансной частоты экситона A (рис.1). 2) Форма линии I_L резко асимметричная, с крутым спадом в коротковолновую сторону и более плавным ходом в длинноволновую сторону спектра, при этом ее ширина увеличивается с увеличением концентрации x твердого раствора (рис. 1). 3) Форма, полуширина и положение максимума линии I_L испытывают существенные изменения с температурой кристалла. По мере повышения температуры, начиная с $T \approx 2K$, положение максимума I_L в спектрах испытывает постепенный сдвиг в коротковолновую сторону до тех пор, пока оно не совпадает с резонансной частотой экситона A . Одновременно с этим происходит уширение этой линии и изменение ее формы: контур линии становится более симметричным (рис. 2). В интервале температур $45 < T < 77K$ в спектре $Zn_{0,11}Cd_{0,89}S$ линии экситонных комплексов исчезают, и в нем превалируют линия люминесценции "свободных" экситонов A и ее фоновые повторения $A = 1LO$ и $A = 2LO$ ⁷.

¹) Линию I_2 можно использовать в качестве реперной линии для определения относительного положения новой линии I_L (а также положения экситонного резонанса) в спектрах различных образцов. Это связано с тем, что энергии связи (E_i) экситонных комплексов I_2 в исходных кристаллах CdS и ZnS близки (6 и 8 – 9 мэВ, соответственно^{5,6}, и для образцов с $0 < x < 0,12$ E_i не должна сильно отличаться от E_i для CdS (6 – 6,3 мэВ).

Анализ указанных особенностей (1 – 3) линии излучения I_L в спектрах твердых растворов $Zn_xCd_{1-x}S$ позволяет прийти к выводу, что она обусловлена ЛЭС¹⁾, а также о миграции их возбуждений по неоднородному контуру, который образует ансамбль состояний с разными энергиями локализации экситонов в неупорядоченной решетке кристалла. В соответствии с предсказаниями теории², хвост плотности ЛЭС располагается с длинноволновой стороны от дна экситонной зоны. Его спад оценивается по характерной энергии локализации E_0 и зависит от концентрации твердого раствора. Положение линии I_L , которая находится с длинноволновой стороны от экситонного резонанса A , позволяет оценить величину E_0 и ее зависимость от x (для $x = 0,11$ $E_0 = 2$ мэВ, для $x = 0,03$ $E_0 < 0,5$ мэВ) – рис. 1. Эти результаты для E_0 находятся в хорошем соответствии с оценками, полученными для E_0 из данных по концентрационному уширению линий экситонного отражения этих кристаллов (2,6 мэВ и 0,05 мэВ, соответственно)³.

Достаточная протяженность хвоста ЛЭС позволяет включить в рассмотрение механизм миграции энергии. Этот процесс, направленный к установлению термодинамически равновесного распределения возбуждений по энергиям, ведет при низких температурах к понижению энергии, что приводит к стоксовскому сдвигу спектра люминесценции относительно спектра поглощения (отражения) в этих кристаллах. В пользу этого механизма свидетельствуют наблюдаемые особенности (1 – 3) спектров излучения твердых растворов. Так, длинноволновое затянутое крыло линии I_L при низких температурах отражает ход функции плотности ЛЭС, при этом все состояния с длинноволновой стороны от максимума являются заполненными ($T = 2K$). По мере повышения температуры кристалла из-за миграции энергии по неоднородному контуру ЛЭС вследствие их взаимодействия в процесс люминесценции включаются все более высокие по энергиям состояния, что приводит к коротковолновому сдвигу максимума (рис. 2) до тех пор, пока в процесс излучения не включаются состояния дна экситонной зоны (при $T > 30K$).

В этой работе впервые экспериментально продемонстрировано наличие хвоста плотности ЛЭС в запрещенной зоне твердых растворов полупроводников, зависимость его протяженности от концентрации твердого раствора, непрерывный характер распределения энергий с переходом в область дна экситонной зоны, что согласуется с теорией². Взаимодействие между ЛЭС сопровождается процессами миграции их возбуждений.

Авторы благодарят А.Л.Эфроса и А.К.Пржевуского за полезные обсуждения и А.А.Каплянского за постоянный интерес к работе.

Литература

1. Алферов Ж.И., Портной Е.Л., Рогачев А.А. ФТП, 1968, 12, 1194.
2. Барановский С.Д., Эфрос А.Л. ФТП, 1978, 12, 2233.
3. Суслина Л.Г., Плюхин А.Г., Федоров Д.Л., Арешкин А.Г. ФТП, 1978, 12, 2238.
4. Suslina L.G., Plyukhina A.G., Goede O., Hennig D. Phys. Stat. Sol., 1979, (b) 94, к185.
5. Thomas D.G., Hopfield J.J. Phys. Rev., 1962, 128, 2135.
6. Гросс Е.Ф., Суслина Л.Г., Шадрин Е.Б. ФТТ, 1968, 10, 97.
7. Suslina L.G., Plyukhina A.G., Fedorov D.L. Proc. Intern. Confer. Phys. Semicond., Rome, 1976, p. 483.
8. Рашба Э.И. ФТП, 1974, 8, 1241.

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

Поступила в редакцию
6 апреля 1982 г.

1) Следует указать на аналогию локализованных экситонов со связанными экситонами в кристаллах полупроводников. Для всех этих состояний, в соответствии с моделью Рашба⁸, характерны гигантские силы осцилляторов, поэтому ЛЭС могут эффективно проявляться в спектрах люминесценции твердых растворов.