

УДК 539.292

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ $Cd_{1-x}Mn_xTe$ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ МАГНИТНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

В. Ф. Агекян, Фан Зунг

Исследование температурной зависимости селективно возбужденной люминесценции $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0.25$) позволило установить, что при нагревании кристалла от 2 до 27 К происходит делокализация экситонов, взаимодействующих с флуктуациями потенциала решетки твердого раствора. Показано, что температурное тушение люминесценции экситонов в $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0.3$ и 0.4) при двухступенчатом возбуждении происходит при температуре, близкой к переходу парамагнетик—спиновое стекло, а в случае межзонного возбуждения — при значительно более высокой температуре. Причиной этого является связь между параметрами промежуточных уровней в магнитном фазовом переходе.

В последнее время интенсивно изучаются твердые растворы (ТР) группы A^2B^6 с магнитными компонентами, в особенности $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (см., например, обзоры [1, 2] и ссылки на них). Температурные зависимости экситонного отражения и люминесценции полосы 2.0 эВ, наблюдающейся при $x \geq 0.4$ и связанной с $3d$ -оболочками марганца, исследовались в работах [3–6]; в настоящей работе изучена трансформация фотолюминесценции $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($0.25 \leq x \leq 0.5$) при изменении температуры в интервале 2–40 К в условиях межзонного возбуждения с энергией квантов $E_b > E_g$ и при возбуждении с $E_b < E_g$.

Ранее было показано [7–9], что в $Cd_{1-x}Mn_xTe$ с высоким содержанием марганца ($x > 0.15$) полосу излучения у края поглощения можно интерпретировать при гелиевых температурах как излучение экситонов, взаимодействующих с флуктуациями потенциала решетки ТР (флуктуационных экситонов — ФЭ). При межзонном возбуждении зависимости интенсивности излучения от интенсивности возбуждения I_x (I_b) является линейной для ФЭ, тогда как для полосы 2.0 эВ она сублинейна уже при I_b порядка нескольких $Вт \cdot см^{-2}$. В случае двухступенчатого возбуждения I_x (I_b) в обоих случаях сверхлинейна.

Изменение температуры вносит качественные изменения в процесс релаксации электронного возбуждения, когда E_b соответствует области ФЭ (рис. 1). Если селективное возбуждение $Cd_{0.75}Mn_{0.25}Te$ при $T=2$ К производится в максимум полосы ФЭ, наблюдающейся при межзонном возбуждении, то максимум излучения ФЭ $E_{ФЭ}$ отстоит от $E_b=1.96$ эВ на усредненную энергию LO -фононов типа $CdTe$ и $MnTe$. Нагревание кристалла сужает полосу и сдвигает $E_{ФЭ}$ к возбуждающей линии, так что при $T=30$ К $E_{ФЭ}=E_b$ (контуры 2–4 на рис. 1). Эту полосу при $T=2$ К можно интерпретировать как фононные повторения селективно возбужденной люминесценции (СВЛ) ФЭ. Отсутствие разрешенной структуры LO -фононов является, видимо, результатом спектральной диффузии ФЭ с участием акустических фононов, которая может осуществляться двумя способами — «механическим» переходом ФЭ на более глубокие уровни и захватом излучения с образованием более глубоких ФЭ с последующим переизлучением. Второй возможный вклад в уширение полосы — процесс излучения ФЭ с одновременной генерацией оптических и акустических

фононов — в данном случае оценить трудно вследствие того, что вклады в полосу от отдельных LO -фононов не разрешаются. Отметим, что ранее этот вопрос выяснялся для $CdS_{1-x}Se_x$, где по временным изменениям кон-

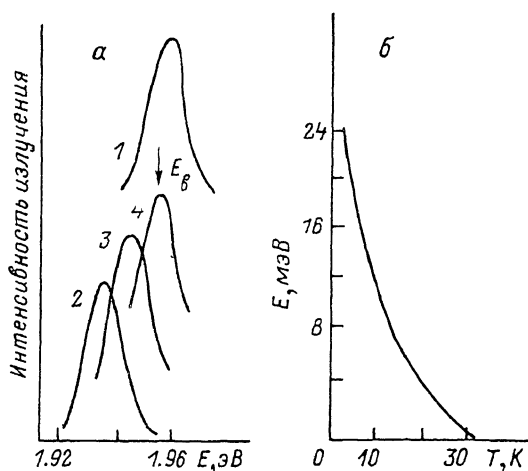


Рис. 1. Температурная зависимость экситонной люминесценции в $Cd_{0.75}Mn_{0.25}Te$.

а — спектры люминесценции при межзонном возбуждении при $T=2\text{ К}$ (1) и селективном возбуждении с $E_B=1.96\text{ эВ}$ при $T=2\text{ К}$ (2), 9 (3) и 30 К (4); б — температурная зависимость энергетического расстояния от максимума полосы селективно возбужденного ФЭ до E_B .

тура СВЛ было установлено, что вклад второго процесса незначителен. Даже при наличии сильной спектральной диффузии следовало ожидать при $T=2\text{ К}$ более резкой коротковолновой границы фоновых повторений

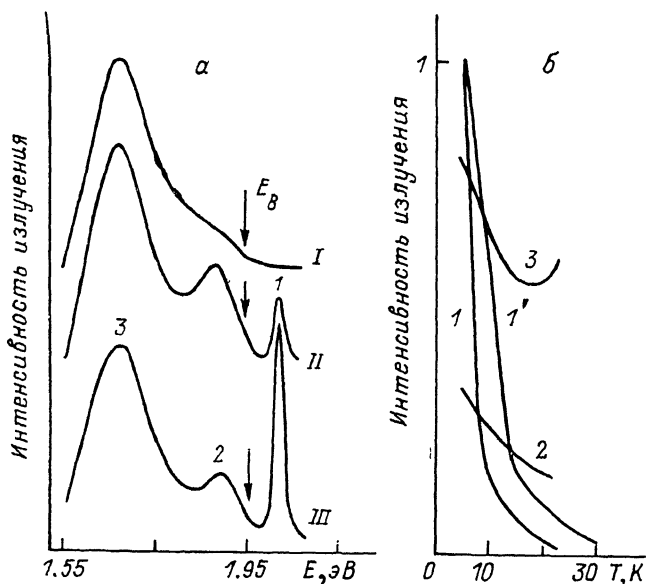


Рис. 2. Температурная зависимость излучения $Cd_{0.7}Mn_{0.3}Te$.

а — спектры при $T=30\text{ К}$ (I), 8 (II) и 6 К (III). 1 — экситон; 2, 3 — примесные полосы; б — интенсивности полос 1—3 в зависимости от температуры. 1' — температурная зависимость люминесценции экситона при межзонном возбуждении. Кривые 1, 1' при $T=4\text{ К}$ нормированы.

Затянутый спад со стороны коротких волн может быть результатом различного относительного вклада процессов с участием нескольких типов LO -фононов (например, коротковолновая часть контура формируется слабым фоновым повторением), а также неучтенных эффектов, в том числе магнитного полярона. Высокоэнергетическое смещение максимума $E_{ФЭ}$

при нагревании демонстрирует увеличение подвижности ФЭ и их переход в квазисвободное состояние — за время жизни по отношению к излучению в системе селективно возбужденных экситонов успевает установиться то же распределение, что и в случае $E_b > E_g$. Подчеркнем, что антистоксова область в контуре 4 на рис. 1, а не является следствием двухступенчатого возбуждения — она появляется за счет установления за время жизни теплового равновесия в энергетическом интервале порядка kT .

На рис. 2, а представлены спектры фотолюминесценции $Cd_{0.7}Mn_{0.3}Te$ при $E_b = 1.96$ эВ ($E_b < E_g$). Самым существенным моментом является то, что при увеличении температуры полоса ФЭ, находящаяся при $E_b = 1.96$ эВ в антистоксовой области, ослабляется гораздо быстрее, чем при $E_b > E_g$ (зависимости 1, 1' на рис. 2, б). В аналогичных условиях был исследован

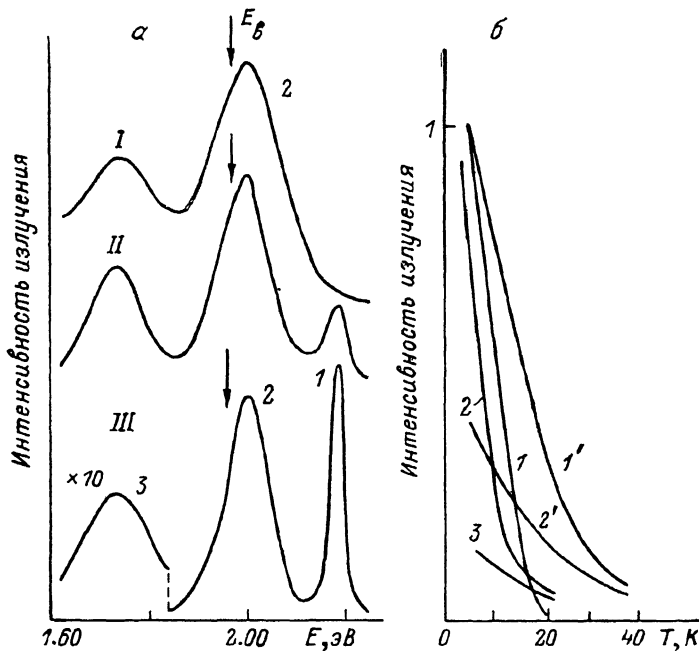


Рис. 3. Температурная зависимость излучения $Cd_{0.6}Mn_{0.4}Te$.

а — спектры при $T=30$ (I), 17 (II) и 6 К (III).

1 — экситон, 2 — полоса марганца, 3 — примесная полоса; б — интенсивности полос 1—3 в зависимости от температуры. 1', 2' — температурные зависимости полос экситона и марганца при межзонном возбуждении. Кривые 1, 1' при $T=4$ К нормированы.

ТР $Cd_{0.6}Mn_{0.4}Te$, в спектре которого наблюдаются две собственные полосы — ФЭ и марганца (рис. 3, а). Из рис. 3, б видно, что температурные ослабления полос излучения $Cd_{0.6}Mn_{0.4}Te$ при селективном и межзонном возбуждениях сильно различаются.

Было высказано мнение [10], что высокая интенсивность антистоксовой люминесценции в $Cd_{1-x}Mn_xTe$ с $x \geq 0.3$ при гелиевых температурах является результатом двухступенчатого возбуждения через реальные промежуточные уровни, образованные марганцем.

Таким образом, из полученных данных следует, что люминесценция, возбужденная двухступенчатым способом, ослабляется с ростом температуры значительно быстрее, чем межзонно возбужденная люминесценция. Тушение антистоксовой люминесценции в столь узком температурном интервале позволяет усмотреть связь сечения двухступенчатого процесса с магнитным фазовым переходом в $Cd_{1-x}Mn_xTe$. Действительно, согласно диаграмме магнитных фаз [11], температура «замерзания» T_s , при которой $Cd_{1-x}Mn_xTe$ превращается из парамагнетика в спиновое стекло, составляет 7 К для $x=0.3$ и 13 К для $x=0.4$. Экстраполяция прямых участков зависимостей 1 на рис. 2, б и 3, б до пересечения с осью темпе-

ратур дает значения, близкие к T_s . Выше этих температур наблюдается остаточная антистоксовская люминесценция с более слабой температурной зависимостью, обусловленная, видимо, теми областями образца, где концентрация марганца и соответственно T_s оказывается выше среднего значения. В одинаковых экспериментальных условиях эффективность двухступенчатого возбуждения люминесценции в $Cd_{0.3}Mn_{0.7}Te$, который является антиферромагнетиком [11], намного меньше, чем в спиновых стеклах с $x=0.4-0.6$. Кроме того, было установлено [12], что включение магнитного поля также ослабляет антистоксову люминесценцию в $Cd_{1-x}Mn_xTe$ при $x > 0.3$, если образцы находятся в состоянии спинового стекла.

Изменение эффективности двухступенчатого возбуждения электронов из валентной зоны $Cd_{1-x}Mn_xTe$ в зону проводимости определяется изменением параметров промежуточных уровней, которые зависят от факторов, влияющих на связь магнитных моментов соседних атомов марганца. В спиновом стекле моменты заморожены хаотично, вследствие чего затруднена миграция возбуждения по ионам марганца. Соответствующие возбужденные состояния оказываются долгоживущими, что способствует довозбуждению электронов в зону проводимости, т. е. высокой эффективности двухступенчатого процесса. Уменьшению эффективности времени жизни возбужденных промежуточных состояний могут способствовать следующие факторы, усиливающие корреляцию магнитных моментов и тем самым миграцию возбуждения к центрам его безызлучательной диссипации: 1) магнитное поле, выстраивающее магнитные моменты; 2) нагревание образца выше T_s (переход спиновое стекло—парамагнетик); 3) повышение концентрации марганца до перехода $Cd_{1-x}Mn_xTe$ в антиферромагнитное состояние.

Таким образом, на примере $Cd_{1-x}Mn_xTe$ удалось установить, что существует связь между свойствами спектра люминесценции, возбужденной двухступенчатым способом, и магнитными фазовыми переходами в полумангнитном полупроводнике как следствие изменения параметров промежуточных состояний, образованных магнитными ионами.

В заключение подчеркнем, что в отличие от структурных переходов магнитный фазовый переход не влияет заметно на процесс однофотонного возбуждения люминесценции в $Cd_{1-x}Mn_xTe$, поскольку в последнем случае чувствительные к магнитным превращениям промежуточные уровни не затрагиваются.

Авторы благодарят И. П. Калмыкову за помощь в эксперименте.

Список литературы

- [1] Brandt N. B., Moshchalkov V. V. // Adv. Phys. 1984. V. 33. N 3. P. 193—256.
- [2] Goede O., Heimbrodt W. // Phys. St. Sol. (b). 1988. V. 146. N 1. P. 11—62.
- [3] Stankiewicz J., Bottka N., Giriat W. // J. Phys. Soc. Jap. 1980. V. 49. Suppl. A. P. 827—830.
- [4] Abren R. A., Giriat W., Vechi M. P. // Phys. Lett. A. 1981. V. 85. N 6—7. P. 399—401.
- [5] Sundersheshu B. S., Kendelewicz T. // Phys. St. Sol. (a). 1982. V. 62. N 2. P. 467—474.
- [6] Moriwaki M. M., Becker W. M., Gebhardt W., Galazka R. R. // Sol. St. Comm. 1981. V. 39. N 2. P. 367—369.
- [7] Агекян В. Ф., Фан Зунг. // Вестник ЛГУ, сер. физ. 1984. В. 16. С. 6—13.
- [8] Агекян В. Ф., Фан Зунг. // ФТП. 1984. Т. 18. № 10. С. 1859—1861.
- [9] Агекян В. Ф., Фан Зунг. // Тез. докл. X Всес. конф. по физике полупроводников. Минск, 1985. Ч. 1. С. 46—47.
- [10] Агекян В. Ф., Фан Зунг // ФТТ. 1985. Т. 27. № 4. С. 1216—1219.
- [11] Galazka R. R., Nagata S., Keesom P. H. // Phys. Rev. B. 1980. V. 22. N 7. P. 3344—3355.
- [12] Агекян В. Ф., Фан Зунг, Погарев С. В. // Тез. докл. XX Всес. съезда по спектроскопии. Киев, 1988. Ч. 2. С. 126.