

УДК 539.292.539.2

СЕЛЕКТИВНО ВОЗБУЖДЕННАЯ МАГНИТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ПОЛУМАГНИТНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $Cd_{1-x}Mn_xTe$

В. Ф. Агекян, Фан Зунг

Исследовано влияние магнитного поля до 5.4 Тл на спектр излучения смешанных кристаллов $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0.25\div 0.50$) при гелиевых температурах в случае селективного возбуждения в контур флукуационных экситонов и в полосу 2 эВ марганца. Установлено, что включение магнитного поля приводит к возгоранию люминесценции, возбужденной однофотонным способом ($x=0.25, 0.30$), и тушению люминесценции, возбужденной двухступенчатым способом ($x=0.3, 0.4$). Поведение люминесценции в поле объясняется ранее предложенной схемой энергетических уровней $Cd_{1-x}Mn_xTe$.

Полупроводниковые твердые растворы группы A_2B_6 с магнитными компонентами, и в особенности $Cd_{1-x}Mn_xTe$, в последнее время привлекают большое внимание; их свойства подробно рассмотрены в работах [1-4].

Селективно возбужденная люминесценция (СВЛ) $Cd_{1-x}Mn_xTe$ исследовалась в работах [5-8], в настоящем исследовании рассмотрена зависимость спектра вторичного свечения $Cd_{1-x}Mn_xTe$ с $x=0.25\div 0.50$ от энергии квантов возбуждения в магнитном поле до 5.4 Тл при гелиевых температурах.

1. Эксперимент

Измерения проводились в фарадеевской геометрии. Для возбуждения люминесценции использовались газопые лазеры и перестраиваемый лазер Spectraphysics (модель 375) с красителем родамин 6G, что позволило возбуждать кристалл $Cd_{1-x}Mn_xTe$ в области межзонных переходов в полосу люминесценции экситонов, связанных на флукуациях решетки твердого раствора (флукуационные экситоны (ФЭ)) [5], и в полосу 2 эВ, относящуюся к излучению ионов марганца.

В случае межзонного возбуждения (рис. 1, а) полоса люминесценции ФЭ в $Cd_{0.75}Mn_{0.25}Te$ сдвигается при изменении H от 0 до 5.4 Тл на 30 мэВ в длинноволновую область и сужается на 6 мэВ. Если возбуждение производится в контур полосы ФЭ в нулевом поле (рис. 1, б), то включение поля сдвигает максимум спектра люминесценции и сильно увеличивает его интенсивность. С ростом H от 0 до 5.4 Тл максимум люминесценции сначала сдвигается в высокоэнергетическую сторону, затем — низкоэнергетическую.

На рис. 2 показаны спектры излучения $Cd_{0.7}Mn_{0.3}Te$ в магнитном поле. При межзонном возбуждении поведение полосы ФЭ качественно то же, что и при $x=0.25$, однако при селективном возбуждении ниже контура полосы ФЭ есть существенное отличие — наблюдается люминесценция ФЭ в антистоксовской области. Необходимый для этого двухступенчатый процесс возбуждения легко осуществляется в концентрационном интервале $0.3 < x < 0.6$ при 4 К; для $x > 0.6$ его эффективность заметно уменьшается. При увеличении H антистоксовая полоса сдвигается в низкоэнергетическую область и ослабляется, в то время как стоксовая полоса сдвигается в вы-

сокоэнергетическую область (величина сдвига доходит до 14 мэВ при $H=4$ Т) и сильно разгорается.

Спектры СВЛ $Cd_{0,6}Mn_{0,4}Te$ в нулевом поле аналогичны полученным при межзонном возбуждении. При уменьшении энергии кванта возбуждения происходит низкоэнергетический сдвиг максимумов полос, сужение полосы ФЭ и ее некоторое усиление относительно полосы 2 эВ.

В случае межзонного возбуждения увеличение поля от 0 до 5 Т усиливает полосу люминесценции ФЭ в $Cd_{0,6}Mn_{0,4}Te$ почти на порядок, тогда как полоса 2 эВ не претерпевает заметных изменений (рис. 3, а). Результат действия магнитного поля на полосу ФЭ зависит резонансно от кон-

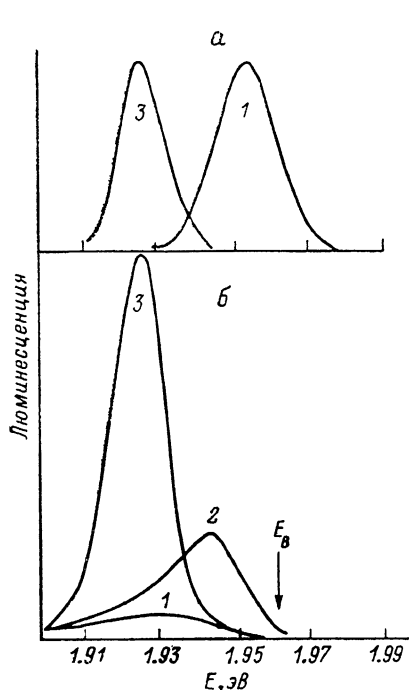


Рис. 1. Спектры люминесценции $Cd_{0,75}Mn_{0,25}Te$ при межзонном (а) и селективном (б) возбуждении с энергиями квантов $E_B=2.8$ и 1.96 эВ (спектр а нормирован). $H=0$ (1), 2.6 (2), 5.4 Т (3).

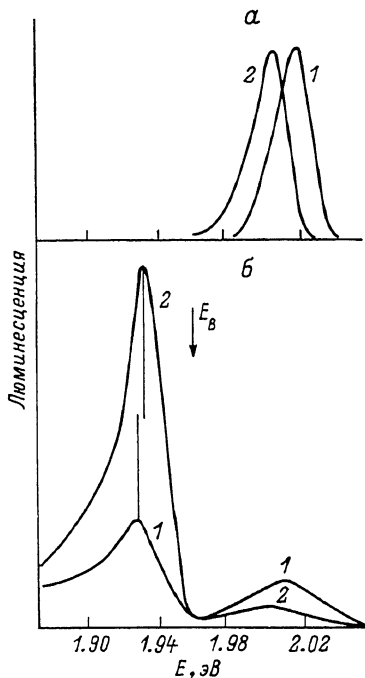


Рис. 2. Спектры люминесценции $Cd_{0,7}Mn_{0,3}Te$ при межзонном (а) и селективном (б) возбуждении. $H=0$ (1) и 2.6 Т (2); 2 К.

центрационного состава твердого раствора: для значений x , отличающихся от 0.4 (например, для $x=0.3$ и 0.5), интенсивность полосы слабо зависит от H . При двухступенчатом возбуждении включение магнитного поля ослабляет полосу 2 эВ и усиливает люминесценцию ФЭ, но значительно слабее, чем при межзонном возбуждении (рис. 3, б, в).

2. Обсуждение результатов

Влияние способа возбуждения и магнитного поля на люминесценцию $Cd_{1-x}Mn_xTe$ может быть объяснено на основе энергетической схемы, предложенной в работе [6]. Согласно этой модели, энергетическая зона $3d$ -электронов Mn^{2+} , отщепляющаяся от зоны проводимости $Cd_{1-x}Mn_xTe$ при $x \approx 0.35$, является реальным промежуточным состоянием для двухступенчатого возбуждения, вследствие чего при $x > 0.3$ наблюдается антистоксовское излучение ФЭ. Свойства зоны $3d$ -электронов меняются при увеличении концентрации марганца, что проявляется на примере концентраций $x=0.3$ и 0.4 (рис. 3). При $x=0.3$ стоксовское излучение возбуждается главным образом однофотонно, тогда как при $0.4 < x < 0.6$

во всех компонентах спектра преобладает двухступенчатое возбуждение. Уменьшение эффективности двухступенчатого возбуждения при значении x , приближающемся к 0.7, по-видимому, связано с переходом кристалла от состояния спинового стекла к антиферромагнитному.

Поскольку зона $3d$ -электронов марганца образована состояниями с некомпенсированными магнитными моментами, сильное влияние магнитного поля на ее свойства представляется естественным. Оно выражается, во-первых, в магнитном усилении полосы люминесценции ФЭ в $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ (рис. 3, а) и, во-вторых, в уменьшении эффективности двухступенчатых процессов (рис. 2, б; 3, а, б).

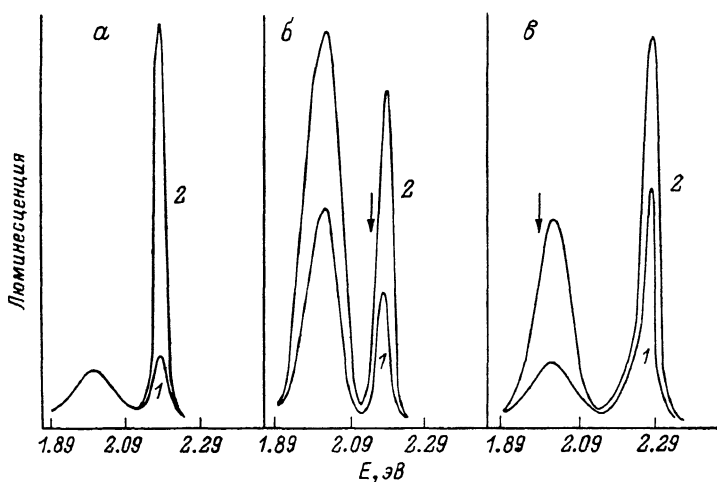


Рис. 3. Спектры люминесценции $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ при межзонном (а) и селективном (б, в) возбуждении, нормированные по максимальной интенсивности. $H=0$ (1) и 5 Т (2).

Стрелками указаны энергии $E_{\text{в}}$ для селективного возбуждения.

Резонансное по концентрации ($x=0.4$) разгорание люминесценции в магнитном поле проще всего было бы объяснить следующим образом. Концентрация $x=0.4$ соответствует близким энергиям уровней Mn^{2+} и ФЭ, и магнитное поле, понижая уровни ФЭ относительно уровней Mn^{2+} , перераспределяет излучение в пользу ФЭ. Однако отсутствие сколь-нибудь заметного ослабления полосы марганца в магнитном поле при интенсивности светового возбуждения, далекой от насыщения этой полосы, указывает на упрощенность такой интерпретации. В то же время, если бы возгорание люминесценции в поле было бы следствием обычного магнитного усиления локализации, оно наблюдалось бы в широком интервале концентраций. По-видимому, в рассматриваемой системе близость энергий ФЭ и порога возбуждения Mn^{2+} является необходимым условием сильного влияния ориентации магнитных моментов Mn в поле на усиление люминесценции ФЭ, но выяснение конкретного механизма требует специального рассмотрения.

Уменьшение эффективности двухступенчатого возбуждения в магнитном поле приводит к деградации антистоксовского излучения в $\text{Cd}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{Te}$ (рис. 2, б), ослаблению возгорания полосы ФЭ и уменьшению интенсивности полосы 2 эВ в $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$. Можно прийти к выводу, что магнитное поле ослабляет локализацию и уменьшает время жизни электронов на промежуточных уровнях, куда они попадают в результате первого акта поглощения, и, таким образом, уменьшается вероятность перехода с этих уровней в зону проводимости при поглощении второго кванта.

Проведенный нами эксперимент показал, что полосы ФЭ в поле H сдвигаются в длинноволновую область спектра и существует корреляция между зависимостями от концентрации Mn магнитного сдвига полосы ФЭ

в $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ и намагниченности образца, измеренной в [9]. Вследствие сдвига уровней экситонов при фиксированной энергии кванта возбуждения E_v плотность состояний в области E_v увеличивается пропорционально намагниченности. Этим и можно объяснить возгорание стоксовского излучения в магнитном поле (рис. 1, 2) и уменьшение степени этого возгорания при изменении x от 0.25 до 0.5.

Немонотонность энергетического сдвига стоксовского излучения в магнитном поле (рис. 1, б; 2, б) становится понятной, если учесть, что при селективном способе возбуждения в контур излучения ФЭ существуют два конкурирующих вклада в магнитный сдвиг, которые определяются уменьшением энергии актуальных экситонных уровней.

Естественно, что длинноволновый магнитный сдвиг экситонов должен приводить к низкоэнергетическому смещению стоксовского излучения ФЭ. Однако следует рассмотреть одну особенность, возникающую вследствие неоднородности твердого раствора. При длинноволновом сдвиге уровней и неизменном значении E_v увеличивается вклад в стоксовское излучение областей твердого раствора с более высоким содержанием широкозонного компонента — Mn, что должно смещать максимум ФЭ в коротковолновую сторону.

Если $E_v > E_g$, то второй вклад несуществен и наблюдается длинноволновое смещение (рис. 1, а; 2, а). Если E_v близко к энергии ФЭ $E_{\text{ФЭ}}$, то при росте H сначала может преобладать вклад от областей с высоким содержанием Mn (коротковолновый сдвиг), и лишь при достижении определенного значения H знак сдвига изменится (рис. 1, б). Если $E_v < E_{\text{ФЭ}}$, то значение H , при котором меняется знак сдвига, оказывается большим (рис. 2, б).

Л и т е р а т у р а

- [1] Gaj J. A. J. Phys. Soc. Jap., 1980, vol. 49, Suppl. A, p. 797—806.
- [2] Furdyna J. K. J. Appl. Phys., 1982, vol. 53, N 11, pt II, p. 7637—7643.
- [3] Рябченко С. М., Семенов Ю. Г. В сб.: Спектроскопия кристаллов. Л.: Наука, 1983, с. 206—225.
- [4] Brandt N. B., Moshchalkov V. V. Adv. Phys., 1984, vol. 33, N 3, p. 193—256.
- [5] Агекян В. Ф., Фан Зунг. ФТП, 1984, т. 18, № 10, с. 1859—1861.
- [6] Агекян В. Ф., Фан Зунг. ФТТ, 1985, т. 27, № 4, с. 1216—1218.
- [7] Агекян В. Ф., Фан Зунг. Тез. докл. X Всес. конф. по физике полупроводников. Минск, 1985, ч. 1, с. 46—47.
- [8] Агекян В. Ф., Фан Зунг. Вестник ЛГУ. Сер. физ., 1984, № 16, с. 6—13.
- [9] Khattak G. D., Twandowski A., Galaska R. R. Phys. St. Sol. (a), 1985, vol. 87, N 1, p. K57—K60.

Ленинградский государственный
университет
Ленинград

Поступило в Редакцию
9 декабря 1987 г.
В окончательной редакции
21 июня 1988 г.