

тальных исследований, проект 23/328, и государственных научно-технических программ, проект 07.01/140-92.

-
1. П.Н.Букивский, Ю.П.Гнатенко, А.Х.Рожко, ФТТ **30**, 683 (1988).
 2. J.Spalek and J.Kossut, *Solid. State Commun.* **61**, 483 (1987).
 3. Ю.Г.Семенов, В.А.Стефанович, ЖЭТФ **101**, 1024 (1992).
 4. D.Heiman, P.A.Wolf, and J.Warnock, *Phys. Rev.* **B27**, 4848 (1983).
 5. D.Heiman, P.Becla, R.Kershow et al., *Phys. Rev.* **B34**, 3961 (1986).
 6. K.S.Wolg, W.Hayes, J.F.Ryan, and A.K.Ramdas, *J. Phys.* **C19**, 1829 (1986).
 7. A.V.Nurmiko, *J. of Lumin.* **30**, 355 (1985).
 8. M.Bugaiski, P.Becla, P.A.Wolf et al., *Phys. Rev.* **B38**, 10512 (1988).
 9. A.Golnik, J.Ginter, and J.A.Gaj, *J. Phys.* **C16**, 6073 (1983).
 10. Yu.P.Gnatenko, P.N.Bukivsky, A.Kh.Rozhko, and O.A.Shigiltchov, *Abstracts of Intern. Workshop on Semimagnetic Semiconductors, 1994, Linz*, p.142.
 11. Н.Н.Аблязов, М.Э.Райх, А.Л.Эфрос, ФТТ **25**, 353 (1983).
 12. S.M.Bhagat and H.A.Sayadian, *J. of Magn. and Magnetic Mater.* **61**, 151 (1986).
 13. D.R.Jacovlev, *Abstracts of Intern. Workshop on Semimagnetic Semiconductors, 1994, Linz*, p.42.
 14. Ю.Г.Кусраев, А.В.Кудинов, ФТТ **36**, 2088 (1994).
 15. T.Giebultowiesz, B.Lebeck, B.Buras et al., *J. Appl. Phys.* **55**, 2305 (1984).
 16. D.Heiman, J.Warnock, and P.A.Wolf, *Solid State Commun.* **52**, 909 (1984).

флуктуациях потенциала кристаллического поля в областях кристалла, где указанные поля отсутствуют. Области кристалла с внутренними магнитными полями, как показано в [15], представляют собой кластеры размером около 3 нм. Повышение температуры в интервале 1,8–4,5 К приводит к изменению соотношения между различными областями кристалла и, как следствие, к перераспределению интенсивности между двумя компонентами $M^{\circ}X$ -линии в пользу более коротковолновой компоненты.

В области $4,5 \leq T \leq 15$ $M^{\circ}X$ -линия излучения, в основном, обусловлена излучением экситонов, локализованных на флуктуациях кристаллического поля. При $T > 20$ К проявляется сильная коротковолновая асимметрия $M^{\circ}X$ -линии излучения, связанная с участием в процессе излучения делокализованных экситонных состояний.

Помещение кристалла в слабое внешнее магнитное поле ($H = 0,35$ Тл, см. рис.3) приводит к смещению спектра фотолюминесценции в сторону меньших энергий, отличиям в частотном положении и форме спектров, наблюдаемых при ортогональных положениях поляризатора ($E \parallel H$ и $E \perp H$). Кроме того, имеет место расщепление полосы экситонного отражения на компоненты, наблюдаемые в различных поляризациях. Это является свидетельством влияния внешнего магнитного поля как на локализованные, так и на свободные экситоны.

Так, положения максимумов $M^{\circ}X$ -линии излучения для двух поляризаций относительно соответствующих компонент в спектре экситонного отражения отличаются (рис.3). В случае $E \parallel H$ $M^{\circ}X$ -линия находится на большем расстоянии, то есть глубина локализации экситонных состояний для такой поляризации больше, чем в случае $E \perp H$, и практически совпадает со значением, найденным для данного кристалла в отсутствие внешнего магнитного поля. Такие изменения проявляются также и в форме $M^{\circ}X$ -линии при $T = 1,8$ К: для поляризации $E \parallel H$, аналогично случаю $H = 0$, на коротковолновом крыле линии наблюдается небольшой перегиб, обусловленный излучением экситонов, локализованных на флуктуациях потенциала кристаллического поля. В случае $E \perp H$ форма $M^{\circ}X$ -линии близка к той, что характерна для $H = 0$ при $T = 2,5$ К.

Таким образом, в слабом магнитном поле для поляризации $E \perp H$ происходит уменьшение глубины локализации экситонных состояний. Следует полагать, что в данном случае это связано с уменьшением величины внутренних магнитных полей. Возникновение анизотропии локализации экситонных состояний для поляризаций $E \parallel H$ и $E \perp H$, очевидно, обусловлено ориентацией магнитных поляронов в магнитном поле $H \sim 0,5$ Тл ранее наблюдалось для кристаллов $Cd_{1-x}Mn_xSe$ [16]. Как отмечено выше, при $T = 1,8$ К для поляризации $E \parallel H$ внешнее магнитное поле практически не приводит к изменению глубины локализации экситонных состояний по сравнению с $H = 0$. Поэтому можно предположить, что в нулевом магнитном поле при $T = 1,8$ К для кристаллов $Cd_{0,873}Mn_{0,127}Te$ имеет место насыщение спиновой ориентации носителей экситонов и локализованных магнитных моментов.

Исследования, описанные в данной работе, были осуществлены частично при поддержке Международного научного фонда, грант UB1000, Государственного комитета Украины по вопросам науки и технологий: Фондов фундамен-

стекла $T_{SG} = 1,2\text{ K}$ [12]. Флуктуации намагниченности в области температур $T > T_{SG}$ обуславливают возникновение случайных внутренних магнитных полей (H_i), величина которых определяется соотношением [12]

$$H_i(T) = [A/(T + B)] \exp(T/T_0), \quad (1)$$

где для исследуемых в работе кристаллов ($x \sim 0,15$) $A = 0,2\text{ Тл}$, $B = 1\text{ К}$, $T_0 = 3,0\text{ К}$. Согласно (1), значение $H_i(1,8) = 0,04\text{ Тл}$.

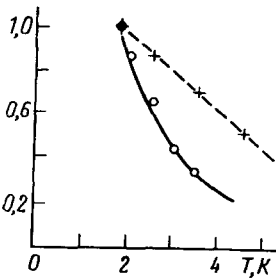


Рис.2. Температурные зависимости $H_i(T)/H_i(1,8)$ – сплошная кривая, $\delta(T)/\delta(1,8)$ – о и $\Delta(T)/\Delta(1,8)$ – +

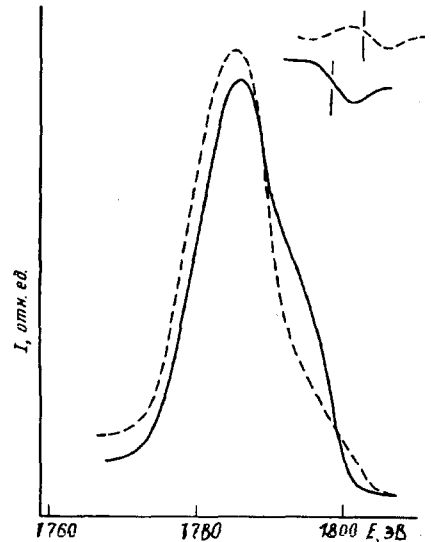


Рис.3

Рис.3. Спектры излучения локализованных экситонов в магнитном поле $H = 0,35\text{ Тл}$ при $T = 1,8\text{ К}$ (сплошная кривая – $E \perp H$, пунктирная – $E \parallel H$)

На рис.2 сплошной кривой показана построенная согласно соотношению (1) зависимость от температуры значений H_i , нормированных на $H_i(1,8)$. Точками и пунктиром показаны температурные зависимости энергетических расстояний между компонентами $M^\circ X$ -линии (δ) и между длинноволновой компонентой $M^\circ X$ -линии и положением свободного экситона (Δ), нормированные на соответствующие величины при $T = 1,8\text{ К}$. Как видно из рис.2, температурная зависимость величины δ достаточно хорошо описывается изменением с температурой величины $H_i(T)/H(1,8)$. В случае Δ такая корреляция с величиной $H_i(T)/H(1,8)$ отсутствует. Этот результат свидетельствует о том, что локализация экситонов на флуктуациях намагниченности происходит после их локализации на флуктуациях потенциала кристаллического поля. О важной роли предварительной локализации экситонов в формировании магнитного полярона как в случае парамагнитной фазы, так и в состоянии спинового стекла кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ отмечено в работах [13], [14].

Анализ полученных результатов, представленных на рис.2, позволяет сделать вывод о том, что длинноволновая компонента $M^\circ X$ -линии связана с излучением экситонов, локализованных в областях кристалла, содержащих внутренние локальные магнитные поля. Возникновение коротковолновой компоненты $M^\circ X$ -линии обусловлено излучением экситонов, локализованных на

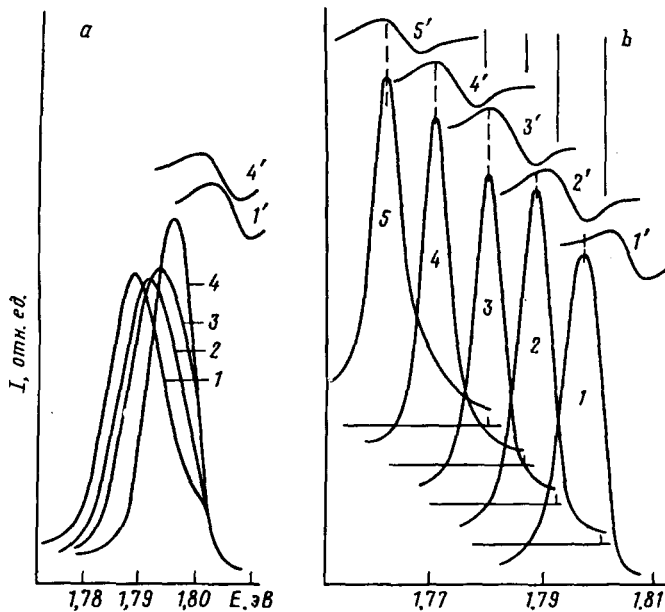


Рис.1. Спектры фотолюминесценции локализованных экситонов и экситонного отражения кристаллов $\text{Cd}_{0,873}\text{Mn}_{0,127}\text{Te}$ при следующих температурах: а - кривые 1-4 - $T = 1,75; 2,5; 3,5; 4,5$ К, соответственно; б - кривые 1-5 - $T = 7,0; 15,0; 20,0; 30,0; 50,0$; кривые 1'-5' - спектры экситонного отражения при соответствующих температурах

которая, как показывает проведенный в [1] анализ, связана с излучением экситонов, локализованных на флуктуациях кристаллического поля. Заметим, что в отличие от кристаллов с $x < 0,05$, глубина локализации экситонов в исследуемых кристаллах превышает рассчитанную, согласно работе [11], на величину, определяемую обменным взаимодействием между носителями экситонов и d -электронами ионов Mn. При температуре 1,8 К (рис.1а) в спектре фотолюминесценции на коротковолновом крыле $M^{\circ}X$ -линии наблюдается перегиб, то есть $M^{\circ}X$ -линия обнаруживает структуру. При повышении температуры интенсивность коротковолновой компоненты линии возрастает, в то время как длинноволновой - уменьшается. Кроме того, максимум длинноволновой компоненты смещается в сторону больших энергий и при $T = 4,5$ К в спектре фотолюминесценции практически наблюдается лишь коротковолновая компонента $M^{\circ}X$ -линии, энергетическое положение которой соответствует положению перегиба, наблюдаемому при $T = 1,8$ К. В промежуточной области температур ($1,8 < T < 4,5$ К) спектр фотолюминесценции заметно уширен (максимальная ширина наблюдается при $T = 3$ К), что обусловлено вкладом в излучение двух компонент $M^{\circ}X$ -линии примерно равной интенсивности. Проявления сложной структуры $M^{\circ}X$ -линии, обусловленной наложением двух компонент, свидетельствует об участии в процессе излучения экситонных состояний, отличающихся характером их локализации. Эффективность локализации экситонов, связанная с проявлением в спектре фотолюминесценции длинноволновой компоненты $M^{\circ}X$ -линии, резко уменьшается с повышением температуры. Как отмечалось в работах [6-9], для ПМП $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ возможна локализация экситонов как на флуктуациях кристаллического поля, так и на флуктуациях намагнитченности. Роль последних особенно существенна в области температур, несколько превышающих температуру фазового перехода в состояние спинового стекла. При значениях $x > 0,1$ такой переход возможен в области низких температур ($T \geq 1,0$ К). Так, для $x = 0,15$ температура перехода в состояние спинового

ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ НА ЛОКАЛИЗАЦИЮ ЭКСИТОНОВ В ПОЛУМАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ $Cd_{1-x}Mn_xTe$

П.Н.Букивский, Ю.П.Гнатенко, А.Х.Рожко

*Институт физики Национальной Академии наук Украины
252650 ГСП, Киев-22, Украина*

Поступила в редакцию 13 января 1995 г.

На примере кристаллов $Cd_{0,873}Mn_{0,127}Te$ для полумагнитных полупроводников показано, что форма линии излучения локализованных экситонов ($M^\circ X$ -линия) определяется вкладами в излучение экситонов, локализованных как на флуктуациях потенциала кристаллического поля, так и на флуктуациях намагниченности кристалла. Последний вклад практически определяет излучение при $T = 1,8 K$ и обусловлен наличием для данных кристаллов локальных внутренних магнитных полей в области температур, близких к температуре фазового перехода в состояние спинового стекла.

Для полумагнитных полупроводников (ПМП), как и для обычных твердых растворов замещения на основе полупроводниковых кристаллов A^2B^6 , имеет место локализация экситонов на флуктуациях кристаллического поля. Наряду с этим, в ПМП проявляются эффекты магнитного полярона, обусловленные обменным взаимодействием связанных в экситоны электронов и дырок с d -электронами магнитных ионов решетки. Это приводит к дополнительной локализации экситонов, как связанных на точечных дефектах, так и локализованных на флуктуациях кристаллического поля [1]. В настоящее время уделяется значительное внимание теоретическому [2,3] и экспериментальному [4-7] исследованиям эффектов магнитного полярона в ПМП. Следует отметить, что при концентрациях магнитных ионов $x > 0,10$ важным становится локализация экситонов не только на флуктуациях потенциала кристаллического поля, но и на флуктуациях намагниченности кристалла. О возможном проявлении последней - локализации экситонов в низкотемпературных спектрах люминесценции ПМП - указано в работах [6-9]. Экспериментальное обнаружение излучения экситонов, локализованных на флуктуациях намагниченности ПМП, представлено в [10].

В настоящей работе на примере кристаллов $Cd_{1-x}Mn_xTe$ впервые для ПМП обнаружено и исследовано излучение экситонов, локализованных на флуктуациях намагниченности, при температурах несколько превышающих температуру фазового перехода в состояние спинового стекла. Изучено влияние температуры и слабого магнитного поля на локализацию экситонов, обусловленную данным механизмом.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Исследования выполнены на кристаллах $Cd_{0,873}Mn_{0,127}Te$, выращенных методом Бриджмена. Измерения спектров экситонного отражения и фотolumинесценции выполнены при помощи спектрометра СДЛ-1. Возбуждение люминесценции осуществлялось аргоновым лазером ЛГН-404А ($\lambda = 514,5 \text{ нм}$).

На рис.1 приведены спектры фотolumинесценции кристаллов $Cd_{0,873}Mn_{0,127}Te$, полученные при различных температурах. При температурах $T > 4,5 K$ (рис.1б) в спектре фотolumинесценции наблюдается $M^\circ X$ -линия,