

- [4] Гинзбург В.Л., Коган Ш.М. // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. № 3(9). С. 1177–1180.
 [5] Mrgudich J.M. // Proc. of 21st Annual Power Source Conf. 1967. Transaction of ASME. 1969. V. 69. P. 117–120.
 [6] Gerbstien Yu.M., Chudnovskii F.A. // Solid State Ionics. 1984. V. 21. N 10. P. 817–818.

Физико-технический институт
 им. А. Ф. Иоффе
 Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
 26 февраля 1993 г.

УДК 621.315.592

© Физика твердого тела, том 35, № 7, 1993
 Solid State Physics, vol. 35, N 7, 1993

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА $Cd_{1-x}Mn_xMg_yTe$

Г.К.Аверкиева, В.Ф.Агекян, Л.К.Гриднева, В.Д.Прочухан, А.Ю.Серов

Твердые растворы полупроводников группы II–VI с магнитной компонентой из группы железа (так называемые разбавленные магнитные полупроводники — РМП) [1] обладают рядом особых свойств. При релаксации электронного возбуждения имеет место конкуренция между двумя каналами излучательной рекомбинации — обычным межзонным и внутривещным через уровни незаполненной $3d$ -оболочки ионов группы железа. Сильное обменное взаимодействие между спинами электронов и магнитными моментами ионов группы железа приводит к гигантским магнитооптическим эффектам и образованию магнитного полярона [2,3]. Наиболее изученный РМП $Cd_{1-x}Mn_xTe$ имеет важное применение как барьерное вещество в структурах с квантовыми ямами и в сверхрешетках типа $CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe$ [4,5].

По спектрам экситонного отражения было установлено, что в $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ширина запрещенной зоны E_g зависит от x приблизительно линейно

$$E(x) = 1.594 + 1.55x \quad (T = 77 \text{ K}),$$

$$E(x) = 1.603 + 1.64x \quad (T = 4 \text{ K}).$$

Величина x определяет концентрацию N_s нескомпенсированных магнитных моментов кристаллической решетки, от которой зависят ее магнитные свойства. Максимальное значение N_s соответствует $x = 0.15$, поскольку дальнейшее увеличение x инициирует образование антиферромагнитных пар и кластеров из близко расположенных ионов Mn^{2+} . По этой причине в $Cd_{0.85}Mn_{0.15}Te$ наблюдаются наиболее сильные эффекты Зеемана и Фарадея, причем максимальное значение постоянной Верде соответствует спектральной области, примыкающей к пику экситонного поглощения. Жесткая связь между $E_g(x)$ и $N_s(x)$ может рассматриваться в ряде случаев как недостаток $Cd_{1-x}Mn_xTe$ и его аналогов. Более сложные РМП, которые содержат трикатионные компоненты, свободны от этого ограничения. Настоящая работа является первым исследованием свойств РМП $Cd_{1-x}Mn_xMg_yTe$ в широком диапазоне относительных концентраций катионов ($0.05 < x < 0.65$, $0.05 < y < 0.50$). Отметим, что использование щелочноземельных элементов позволяет резко расширить разнообразие твердых растворов на основе кристаллов группы II–VI.

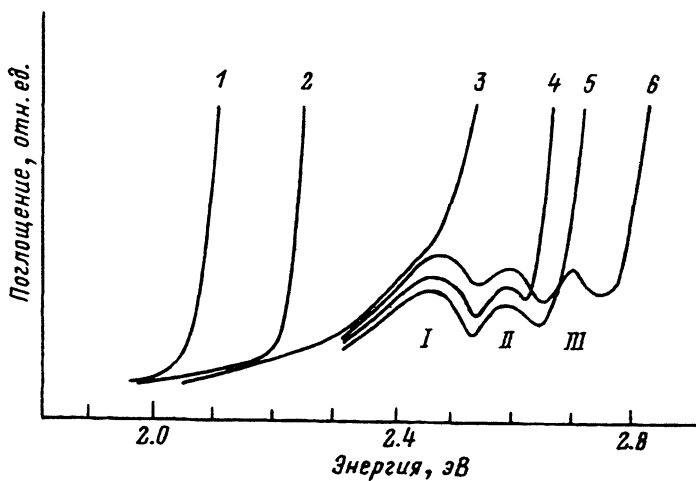


Рис. 1. Спектр поглощения твердых растворов $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{Te}$ при $T = 77$ К. x, y : 1 — 0.15, 0.18; 2 — 0.25, 0.15; 3 — 0.30, 0.30; 4 — 0.50, 0.25; 5 — 0.25, 0.50; 6 — 0.65, 0.25. I–III — полосы поглощения, соответствующие внутрицентровым переходам в ионе Mn^{2+} .

Твердые растворы РМП $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{Te}$ были впервые получены авторами [6]. Показано, что в системе CdTe-MnTe-MgTe существует широкая область твердых растворов со структурой цинковой обманки. Для выращивания монокристаллов применялся метод направленной кристаллизации расплава в тиглях из стеклогуглерода. В отличие от [6] для очистки Mn мы использовали кристаллизацию MnTe_2 из избытка Te, что позволяет осуществить очистку в более разбавленных растворах и при более низких температурах.

На рис. 1 приведены спектры поглощения полученных веществ. Межзонный переход в $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{Te}$ относится к типу прямых разрешенных, край поглощения сдвигается с ростом x и y в коротковолновую область. Кроме межзонного поглощения при достаточно больших значениях $x + y$ наблюдается и более слабая структура, относящаяся к внутрицентровым переходам в $3d$ -оболочке Mn^{2+} . Две полосы аналогичны наблюдавшимся в $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ и соответствуют переходам $6A_1(S) \rightarrow 4T_2(G)$ и $6A_1(S) \rightarrow 4E(G)$ [7]; третья, более коротковолновую полосу следует отнести к переходу $6A_1(S) \rightarrow 4T_2(D)$. Эта полоса в $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ не наблюдалась, так как даже при предельном значении $x = 0.7$ значение $E_g(x)$ недостаточно велико.

На рис. 2 приведены спектры люминесценции исследуемых РМП. В люминесценции $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{Te}$ присутствуют широкие полосы, самая сильная из которых с максимумом около 2.03 эВ является, по-видимому, излучательным переходом в $3d$ -оболочке Mn^{2+} : $4T_2(G) \rightarrow 6A_1(S)$. Относительно слабая высокоэнергетическая полоса соответствует излучению экситона, локализованного на флуктуациях потенциала решетки твердого раствора ($T = 4$ К), или свободного ($T = 77$ К). Экситонное излучение становится сравнительно сильным при импульсном возбуждении N_2 лазером, так как примесные и внутрицентровые переходы при этом насыщаются [8].

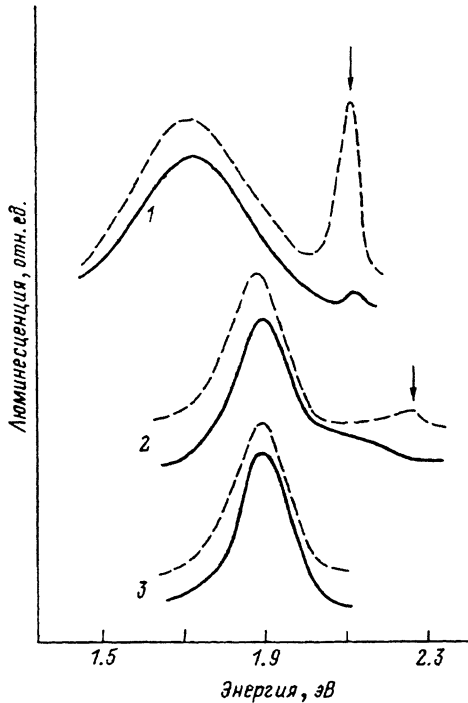


Рис. 2. Спектры люминесценции кристаллов $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{Te}$ при $T = 77 \text{ K}$ (экситонные пики обозначены стрелками).

x, y : 1 — 0.25, 0.15; 2 — 0.25, 0.25; 3 — 0.30, 0.30. Штриховые линии — возбуждение импульсным N_2 лазером, уровень возбуждения $W_0 = 10^2 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; сплошные линии — возбуждение непрерывным Ag^+ лазером, $W_0 = 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$.

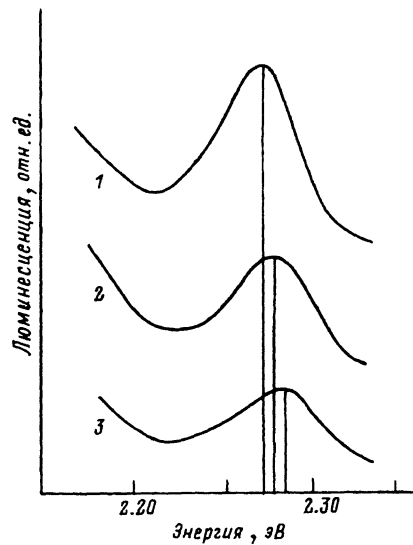


Рис. 3. Экситонная люминесценция в $\text{Cd}_{0.58}\text{Mn}_{0.17}\text{Mg}_{0.25}\text{Te}$ в магнитном поле H .

H (Тл): 1 — 0, 2 — 3, 3 — 5.

Из анализа данных по поглощению и люминесценции мы получили следующую концентрационную зависимость ширины запрещенной зоны в $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{Te}$:

$$E_g(x, y) = 1.594 + 1.54x + 1.80y \quad (T = 77 \text{ K}).$$

Видно, что $E_g(x, y)$ резко зависит от концентрации магния, что неудивительно, принимая во внимание малый ионный радиус Mg^{2+} .

Экситонная люминесценция усиливается во внешнем магнитном поле H (рис. 3) вследствие сжатия экситонной волновой функции. В отличие от $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ и $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ не наблюдается заметного сужения контура полосы экситонного излучения с ростом H [8,9]. Этот результат может быть следствием не только сильного неоднородного уширения, но и ослабления магнитного поляронного эффекта. Это предположение подтверждается сравнительно слабым магнитным сдвигом полосы излучения экситона, составляющим $3 \text{ мэВ} \cdot \text{T}^{-1}$. Такое ослабление магнитных эффектов может быть следствием более низкого значения N_s при том же значении x

по сравнению с $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, поскольку введение Mg уменьшает среднее значение постоянной решеткой и благоприятствует антиферромагнетизму марганцевой компоненты. Кроме того, в сложном четырехкомпонентном твердом растворе возможна более сильная кластеризация компонент по техническим причинам. Наконец, следует в дальнейшем рассмотреть и более фундаментальную причину — отсутствие $3d$ -оболочки у атомов Mg может в принципе повлиять на формирование энергетических зон и обменное взаимодействие электронов с ионами Mn^{2+} .

В заключение следует указать, что использование подобных трехкатионных РМП, содержащих S -элементы, в сверхрешетках и структурах с квантовыми ямами в качестве барьерного широкозонного материала расширяет возможности по контролю и минимизации напряжений на гетерограницах, и с этой точки зрения изучение их оптических, магнитных и эластических свойств, а также параметров решетки представляется важным. РМП с тремя катионами перспективны также для фарадеевских ячеек, так как в них можно, зафиксировав оптимальную концентрацию ионов Mn^{2+} $x = 0.15$, менять спектральное положение максимума постоянной Верде.

Список литературы

- [1] Lay K.Y., Neff H., Bachman K.J. // Phys. Stat. Sol. (a). 1985. V. 92. P. 567.
- [2] Furdina J.K. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. P. R29.
- [3] Golnik A., Ginter J., Gaj J. // J. Phys. C. 1983. V. 16. P. 6070.
- [4] Amschalom D.D., Freeman M.R. // J. Lumin. 1989. V. 44. P. 299.
- [5] Yakovlev D.R., Uraltsev I.N., Ossau W., Landwehr G., Bicknell-Tassins R.N., Waag A., Schmeusser S. // Surf. Sci. 1992. V. 22. P. 485.
- [6] Аверкиева Г.К., Бойко М.Е., Константинова Н.Н., Попова Т.Б., Прочухан В.Д., Рудь Ю.В. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 7. С. 2284–2286.
- [7] Goede O., Heimbrod W. // Phys. Stat. Sol. (b). 1984. V. 146. P. 11.
- [8] Агекян В.Ф., Фан Зунг // Вестник ЛГУ. Сер. физ. 1988. № 16. С. 6.
- [9] Агекян В.Ф., Фан Зунг, Погарев С.В. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 8. С. 3312.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
2 марта 1993 г.