

УДК 539.2

©1995

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ТРЕХКАТИОННОМ РАЗБАВЛЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ $Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$

В.Ф. Агекян, Л.К. Гриднева, С.В. Карпов, А.Ю. Серов

Санкт-Петербургский государственный университет

Поступила в Редакцию 12 июля 1994 г.

На основании исследования комбинационного рассеяния (КР) света в четверных соединениях $Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$ определены и интерпретированы LO и TO частоты, характеризующие компоненты $CdTe$, $MnTe$, $MgTe$ в смешанном кристалле. Спектры КР проявляют сильную зависимость частоты LO -фононов, связанных с компонентой, $MgTe$, от концентрации атомов Mg в твердом растворе $Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$, тогда как TO -компонента от концентрации Mg не зависит. На основании полученных результатов можно заключить, что фоновый спектр $Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$ относится к трехмодовому типу. Спектр рассеяния в области низких частот интерпретируется как взаимодействие квазилокальных колебаний с акустическим континуумом.

Разбавленные магнитные полупроводники (РМП) типа II-VI, содержащие элементы группы железа, характеризуются некоторыми особыми свойствами, в частности сильным обменным взаимодействием локализованных магнитных моментов атомов группы железа со спинами носителей, ведущим к гигантским магнитооптическим эффектам, таким как зеemannовское расщепление и фарадеевское вращение, а также к образованию магнитного полярона. Благодаря своим специфическим свойствам двухкатионные твердые растворы (тройные соединения) $Cd_{1-x}Mn_xTe$ применяются как барьерный материал в сверхрешетках (СР) и структурах с квантовыми ямами (СКЯ) $CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe$ [1,2].

В тройных соединениях $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ширина запрещенной зоны и концентрация магнитных моментов определяются одним и тем же параметром — величиной x .

Исследование более сложных трехкатионных растворов (четверных соединений), таких как $Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$, представляет особый интерес благодаря возможности независимого изменения магнитных свойств, зависящих только от x , и ширины запрещенной зоны, зависящей от x и y . Применение четверных соединений типа $Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$ в СР и СКЯ как барьерного материала дает дополнительную возможность изменять параметры этих структур.

Важными аспектами изучения свойств четверных соединений являются исследование комбинационного рассеяния (КР) света и сравнение их фоновых спектров со спектрами более простых тройных соединений.

В нашей работе исследование КР света в четверных соединениях $Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$ с различными значениями x и y . Установлено, что фоновый спектр, зависящий от соотношения силовых констант межатомных связей и статистических зарядов различных катионов, относится к трехмодовому типу.

1. Методика эксперимента

Твердые растворы $Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$ с концентрациями $0 < x < 0.4$ и $0 < y < 0.5$ были выращены методом Бриджмена. Образцы для исследований выкальвывались из слитков и ориентировались по методу Лауэ.

Для исследования КР света нами был отобран ряд образцов с различными относительными концентрациями катионных компонентов. Кристаллы были отшлифованы и затем окончательно отполированы алмазной пастой с диаметром зерна $2 \mu m$. Спектры рассеяния возбуждались He-Ne-лазером с длиной волны 6328 \AA и мощностью 20 mW и анализировались с помощью спектрометра ДФС-24 в геометрии рассеяния под прямым углом при комнатной температуре.

2. Результаты и обсуждение

Твердые растворы $Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$ кристаллизуются в структуре сфалерита при относительной концентрации атомов Cd $(1 - x - y) > 0.4$ и в структуре вюрцита при $(1 - x - y) < 0.4$. Следует иметь в виду, что в этих твердых растворах могут проявляться эффекты двойникования, что может привести к некоторой деполяризации спектров [3].

Кристаллы со структурой сфалерита относятся к пространственной группе $T_d^2(F\bar{4}3m)$ с $z = 4$ в элементарной ячейке (примитивная ячейка этого кристалла содержит две формульные единицы). Правила отбора для КР в кристаллах сфалерита таковы, что активными в рассеянии являются фононы типа F_2 , для которых вид производной тензора поляризуемости следующий:

$$F_2(x, y, z) : \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d \\ 0 & d & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & d \\ 0 & 0 & 0 \\ d & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & d & 0 \\ d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

В кристаллах сфалерита полное механическое представление для всех фононов имеет вид $\Gamma = 4F_2(x, y, z)$, так что фоновый спектр содержит три оптические ветви и одну акустическую. F_2 — мода активна в КР и ИК поглощении, т.е. является полярной модой, с которой связано продольное макроскопическое электрическое поле, приводящее к расщеплению $LO-TO$. Поэтому в спектре КР можно ожидать проявления трех пар линий.

Кристаллы со структурой вюрцита являются одноосными и принадлежат к пространственной группе $C_{6v}^4(P6_3mc)$, они содержат две формульные единицы в элементарной ячейке. Оптические фононы из центра зоны Бриллюэна относятся к полному представлению

$$\Gamma = A_1(z) + 2B_2 + E_1(x, y) + 2E_2,$$

где моды $A_1(z)$ и $E_1(x, y)$ активны в КР и в ИК поглощении, мода E_2 активна только в КР, а мода B_2 не активна ни в ИК поглощении, ни в КР. Моды A_1 и E_1 полярные, и поэтому должны расщепляться на продольную (LO) и поперечную (TO) компоненты. Вид произвольной тензора поляризуемости в этом случае следующий:

$$A_1(z) : \begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad E_1(y) : \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c \\ 0 & c & 0 \end{pmatrix}, \quad E_1(-x) : \begin{pmatrix} 0 & 0 & -c \\ 0 & 0 & 0 \\ -c & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$E_2 : \begin{pmatrix} 0 & d & 0 \\ d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} d & 0 & 0 \\ 0 & -d & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Неприводимые представления для структур сфалерита и вюрцита записаны в различных системах координат. Система координат, где $x \parallel [100]$, $y \parallel [010]$, $z \parallel [001]$, используется для описания структуры сфалерита, тогда как в структуре вюрцита ось z соответствует направлению $[111]$ структуры сфалерита.

На рис. 1, a, b, c приведены спектры КР кристалла $Cd_{0.5}Mn_{0.3}Mg_{0.2}Te$ в области $0-350 \text{ см}^{-1}$. Используемые геометрии рассеяния — $x(zy)z$, $x(zx)z$ и $x(yu)z$, где ось z параллельна оси шестого порядка, а ось x параллельна одной из плоскостей σ_v . В этих геометриях могут наблюдаться все фононы из центра зоны Бриллюэна ($q \approx 0$) с симметриями A_1 , E_1 , E_2 .

По этим спектрам можно заключить, что три линии на рис. 1, c около частот $144, 190, 246 \text{ см}^{-1}$ являются поперечными модами $E_1(TO)$, тогда как на рис. 1, b три линии около $156, 200, 260 \text{ см}^{-1}$ являются продольными $E_1(LO)$. Проведенные ранее исследования колебательных спектров твердых растворов II-VI $[4-6]$ показывают, что двухкатионные твердые растворы $Cd_{1-x}Mn_xTe$ обнаруживают двухмодовое поведение фононных спектров и содержат две пары линий. Три пары линий на рис. 1, относящиеся к продольным и поперечным колебаниям, характеризуют связи Cd-Te, Mn-Te и Mg-Te в смешанном кристалле. Для надежной интерпретации спектров твердых растворов $Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$ мы также исследовали спектры тройных соединений $Cd_{1-x}Mn_xTe$ и $Cd_{1-x}Mg_xTe$. Спектры КР $Cd_{0.6}Mn_{0.4}Te$, $Cd_{0.6}Mn_{0.2}Mg_{0.2}Te$ и $Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$ приведены на рис. 2, a, b, c соответственно.

В колебательном спектре $Cd_{0.6}Mn_{0.4}Te$ (рис. 2, a) наблюдались две пары LO и TO линий на частотах 141 и 156 см^{-1} и 186 и 200 см^{-1} , которые интерпретируются как $LO-TO$ -колебания, характеризующие связи Cd-Te и Mn-Te.

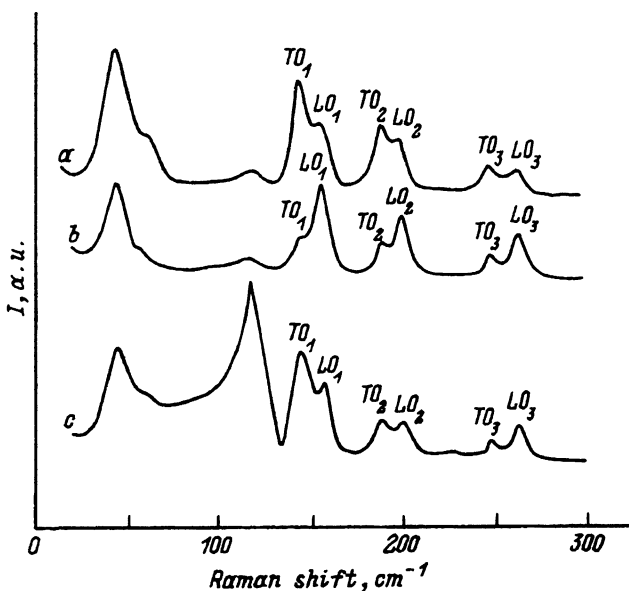


Рис. 1. Поляризованные спектры КР света в кристалле $\text{Cd}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Mg}_{0.2}\text{Te}$ при комнатной температуре в следующих геометриях рассеяния: $x(zy)z$ (a), $x(xz)z$ (b), $x(yz)z$ (c).

Оси x, y, z ориентированы вдоль направлений $[100], [010], [001]$ соответственно. Пары компонент характеризуют продольные и поперечные моды связей Cd-Te, Mn-Te, Mg-Te. Здесь и далее по оси ординат I — интенсивность.

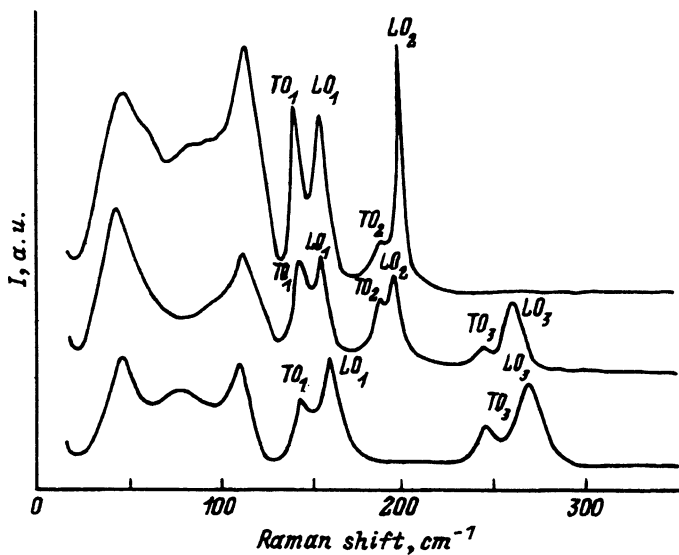


Рис. 2. Спектры КР света в кристаллах $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ (a), $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Mg}_{0.2}\text{Te}$ (b), $\text{Cd}_{0.6}\text{Mg}_{0.4}\text{Te}$ (c).

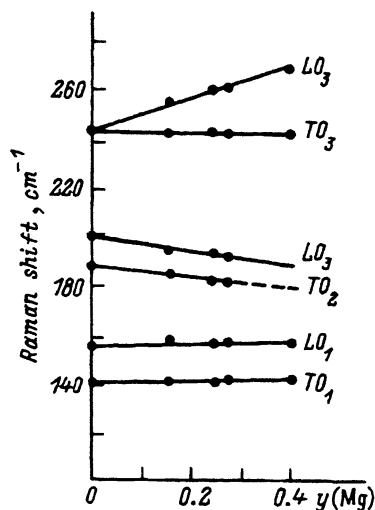


Рис. 3. Зависимость частот оптических фононов LO - и TO -типа от относительной концентрации атомов Mg в $Cd_{1-x}Mn_xMg_yTe$ ($x = 0.4$).

В колебательном спектре четверного соединения $Cd_{0.6}Mn_{0.2}Mg_{0.2}Te$ (рис. 2, *b*) проявляется еще одна пара линий на частотах 244 и 263 cm^{-1} , которую по аналогии с $Cd_{1-x}Mn_xTe$ можно приписать LO и TO -колебаниям $Mg-Te$ в четверном соединении. В пользу этого свидетельствует и тот факт, что в спектре КР кристалла $Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te$ отсутствовала пара $LO-TO$ линий, характеризующая связь $Mn-Te$, но наблюдалась пара линий с частотами $240-270\text{ cm}^{-1}$, соответствующая колебанию $Mg-Te$ (рис. 2, *c*).

Зависимость частот оптических фононов LO - и TO -типа от относительной концентрации атомов Mg в $Cd_{1-x}Mn_xMg_yTe$ приведена на рис. 3. График показывает достоверное изменение частоты, связанной с LO -колебанием компоненты $MgTe$ в смешанном кристалле при изменении концентрации атомов Mg . Это обстоятельство указывает на из-

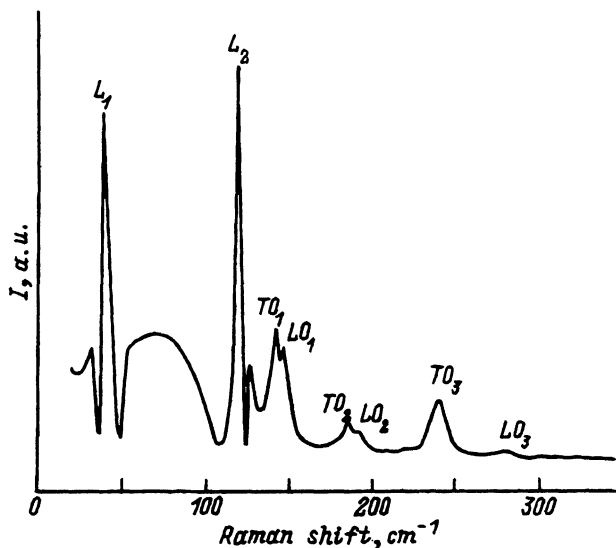


Рис. 4. Спектр КР света в кристалле $Cd_{0.25}Mn_{0.25}Mg_{0.50}Te$. Пики L_1 и L_2 предположительно относятся к квазилокальным модам.

менение эффективной силы соответствующего осциллятора при изменении концентрации атомов Mg, т.е. на изменение величины продольного электрического поля, вызывающего $LO-TO$ расщепление. Постоянство частоты TO -фонона указывает на неизменность механической силовой константы.

Во всех полученных нами спектрах КР в дополнение к вышеуказанным парам $LO-TO$ линий наблюдался интенсивный спектр в области $20-120\text{ см}^{-1}$, включающий интенсивные линии на частотах 44 и 116 см^{-1} (рис. 1).

Подобные полосы с максимумами 42 и 112 см^{-1} наблюдались в спектре $Cd_{1-x}Mn_xTe$ и интерпретировались как проявление плотности состояний TA - и LA -фононов, что подтверждается результатами неупругого рассеяния нейтронов в $CdTe$ [5,7]. Распределение интенсивности в полосе с максимумом около 112 см^{-1} не позволило, однако, авторам сделать вывод о том, что эта полоса является только проявлением LA -фононной плотности состояний.

В кристалле $Cd_{0.25}Mn_{0.25}Mg_{0.50}Te$ со структурой вюрцита мы обнаружили в спектрах рассеяния резкие особенности на частотах 42 и 120 см^{-1} (рис. 4). Интерпретация КР этой области спектра только в рамках TA - и LA -фононной плотности состояний, на наш взгляд, недостаточно убедительна, так как не позволяет объяснить наличие в спектрах таких резких особенностей.

Возможно, эти линии связаны с проявлением квазилокального колебания, попадающего в область акустических ветвей. Эту интерпретацию подтверждают малая полуширина линий и сложная форма спектра рассеяния, проявляющаяся в форме резонанса типа Фано как результата интерференции дискретной квазилокальной моды с континуумом состояний акустических ветвей. Предположение авторов [6], основанное на анализе формы линии 112 см^{-1} , также подтверждает нашу интерпретацию спектра.

На основании вышеизложенных результатов можно сделать предположение, что наблюдаемые нами в спектрах КР четверных соединений особенности с максимумами 42 и 120 см^{-1} (рис. 2) и аналогичные особенности в спектрах тройных соединений относятся к проявлениям квазилокальных мод, которые размываются благодаря сильному затуханию в многокомпонентных твердых растворах с большой концентрацией собственных дефектов. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Авторы благодарят О.Э. Ботова за помощь в постановке эксперимента.

Список литературы

- [1] Goede O., Heimbrodt W. // Phys. Stat. Sol. (b). 1988. V. 146. N 1. P. 671-674.
- [2] Nicholas R.J. // Physica B. 1993. V. 191. N 2. P. 156-170.
- [3] Вайполин А.А. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 3. С. 789-794.
- [4] Peterson D.L., Petrou A., Giriat W., Ramdas A.K., Rodrigues S. // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. N 2. P. 1160-1165.
- [5] Eunsoo Oh., Alonso R.G., Miotkowski I., Ramdas A.K. // Phys. Rev. B. 1992. V. 45. N 19. P. 10934-10942.
- [6] Venugopalan S., Petrou A., Galaska R.R., Ramdas A.K., Rodrigues S. // Phys. Rev. B. 1982. V. 25. N 4. P. 2681-2695.
- [7] Rowe J.M., Nicklow R.M., Price D.L., Zanio K. // Phys. Rev. B. 1974. V. 10. N 1. P. 671-674.