

# Особенности спектров отражения в дальней инфракрасной области полумагнитных полупроводников $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$

© А.И. Белогорохов, В.А. Кульбачинский, П.Д. Марьянчук, И.А. Чурилов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119899 Москва, Россия

(Получена 11 августа 1997 г. Принята к печати 16 октября 1997 г.)

Исследованы спектры отражения в дальней инфракрасной области ( $10\text{--}600\text{ см}^{-1}$ ) монокристаллов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  ( $0.01 < x < 0.14$ ,  $y = 0.01$ ) при 300 и 77 К. Кроме продольных и поперечных мод, соответствующих тройному соединению, обнаружен ряд новых фононных мод.

## 1. Введение.

Полумагнитные полупроводники, или разбавленные магнитные полупроводники, представляют собой твердые растворы, в которых одна из компонент замещается на атом переходного элемента М с некомпенсированным магнитным моментом. В настоящее время хорошо изучены магнитные и транспортные свойства многих полумагнитных полупроводников, среди которых находятся  $\text{A}_{1-x}^{\text{II}}\text{M}_x\text{B}^{\text{VI}}$  — полумагнитные полупроводники типа  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ,  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$  [1–3]. Известно, что  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$  имеет  $n$ -тип проводимости, в то время как  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  обычно имеет  $p$ -тип проводимости. Можно ожидать, что при добавлении Se в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  произойдет компенсация дефектов и можно будет регулировать тип проводимости и концентрацию дефектов.

Значительно меньшее количество работ посвящено изучению оптических свойств полумагнитных полупроводников типа  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ,  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ . В основном изучалась магнитооптика [1–3]. Имеются также данные по влиянию концентрации носителей тока на инфракрасные спектры  $\text{HgTe}$ ,  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  и  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$  [4–7].

Представлялось интересным синтезировать и изучить оптические свойства полумагнитного полупроводника  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ . В настоящей работе нами исследованы спектры отражения в дальней инфракрасной области узкощелевого полумагнитного полупроводника  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ .

## 2. Методика эксперимента.

Монокристаллы  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  выращивались методом Бриджмена из химически чистых компонент. Для измерений из слитков электроэрозионным методом вырезались образцы с характерными размерами  $6 \times 6 \times 0.2\text{ мм}^3$ . Содержание марганца уточнялось с помощью измерений абсолютной величины магнитной восприимчивости при комнатной температуре. Рентгеновским, микронзондовым анализом и магнитными измерениями установлено отсутствие в образцах включений других фаз и их гомогенность. Однородность образцов контролировалась также по измерениям коэффициента Холла  $R_H$  по длине образцов. (Разница значений  $R_H$  не превышала нескольких процентов, что свидетельствует о высокой однородности исследуемых образцов).

**Таблица 1.** Концентрации электронов  $n$  и дырок  $p_1$  и  $p_2$ , подвижности электронов  $\mu_c$  и дырок  $\mu_{p1}$ ,  $\mu_{p2}$  для исследованных образцов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  при  $T = 4.2\text{ К}$

$N$ образца	$x$	$n, 10^{20}\text{ м}^{-3}$	$\mu_c, \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$p_1, 10^{23}\text{ м}^{-3}$	$\mu_{p1}, \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$p_2, 10^{21}\text{ м}^{-3}$	$\mu_{p2}, \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
1	0.01	0.1	–5.0	3.0	0.09	0.6	0.10
2	0.03	5.9	–1.6	1.8	0.10	0.53	0.13
3	0.05	5.3	–1.5	2.8	0.0715	7.2	0.20
4	0.14	0.3	–6.0	2.7	0.082	9.0	0.3

**Таблица 2.** Спектральное положение решеточных мод  $A_i$  ( $\text{см}^{-1}$ ) для  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  при комнатной температуре (в скобках при температуре жидкого азота)

$N$ образца	$x$	$y$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$
1	0.01	0.01	– (254)	– (–)	156 (152.8)	125.0 (125.3)	97.5 (–)	72.8 (75.0)	60.9 (59.4)	43.8 (41.3)
2	0.03	0.01	261 (–)	192.8 (186.6)	156.0 (153.1)	123.0 (122.5)	97.5 (105.6)	75.6 (–)	59.4 (55.6)	46.9 (38.1)
3	0.05	0.01	265 (254)	189 (185.9)	156.0 (153.8)	122.5 (126.3)	101.0 (106.6)	75.5 (71.9)	60.0 (54.4)	47.8 (–)
4	0.14	0.01	265.6 (256.2)	190.6 (185.9)	156.0 (154.0)	124.4 (124.4)	103.1 (108.1)	76.6 (72.5)	56.3 (53.8)	45.3 (23.4)

Исследованные образцы имели зеркально отполированную поверхность. Исследовались образцы состава  $y = 0.01$  и  $x = 0.01, 0.03, 0.05, 0.14$ . Концентрации и подвижности носителей тока для исследованных монокристаллов приведены в табл. 1. Транспортные свойства  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$  определяются как электронами, так и двумя группами дырок, в отличие от  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ , где достаточно учета электронов и дырок примесной акцепторной зоны, или  $Hg_{1-x}Mn_xSe$ , где существуют лишь электроны. Одни из дырок в  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$ , по видимому, являются дырками примесной акцепторной зоны, что характерно и для веществ типа  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ , а другие — зонными [8].

Известно, что на электрические и гальваномагнитные свойства полупроводниковых твердых растворов на основе теллурида ртути существенное влияние оказывает приповерхностная область [9]. С целью исключения этого эффекта образцы непосредственно перед измерением подвергались химико-механической полировке с дальнейшим химическим травлением. Специальные исследования показали, что выдержка протравленных образцов на воздухе в течение нескольких дней не изменяет их свойств, т.е. приповерхностная область не влияла на полученные результаты.

Оптические спектры регистрировались с помощью фурье-спектрометра IFS-113v (Bruker) в диапазоне волновых чисел ( $10-600$ )  $cm^{-1}$  при комнатной температуре и температуре жидкого азота. При этом разрешение по волновым числам составляло  $0.5 cm^{-1}$  во всем спектральном интервале.

3. Спектры отражения.

На рис. 1 показаны спектры отражения образцов 1-4, при комнатной температуре. Буквами показаны характерные положения решеточных мод. Глубокий размытый

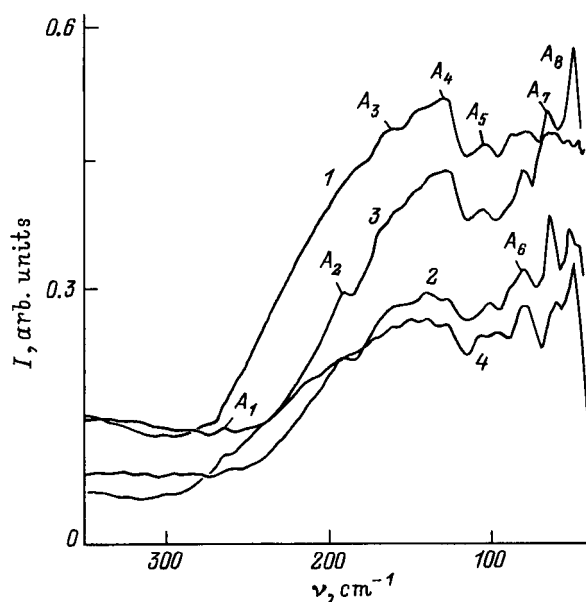


Рис. 1. Спектры отражения образцов 1-4  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$ , полученные при комнатной температуре.

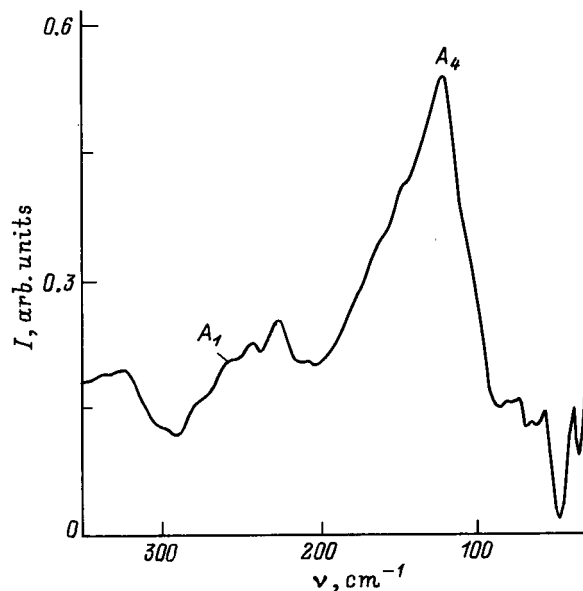


Рис. 2. Спектр отражения образца 1, при температуре жидкого азота.

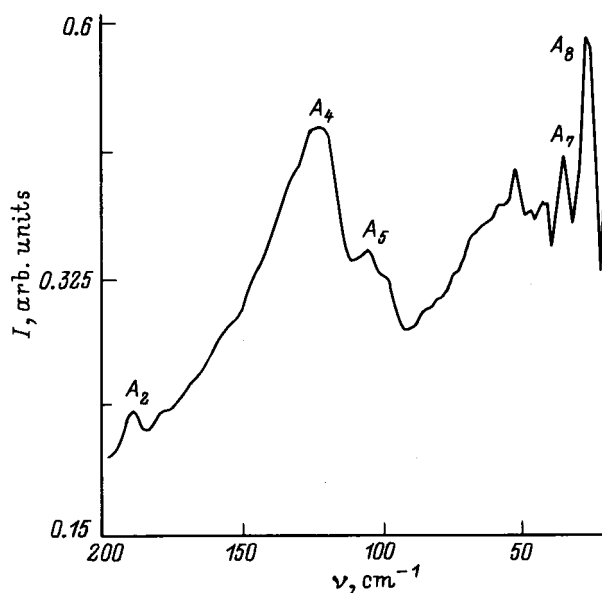


Рис. 3. Спектр отражения образца 2, полученный при температуре жидкого азота.

минимум в высокочастотной области спектра (около  $280 cm^{-1}$ ) соответствует спектральному положению смешанной плазмон-фононной моды. Данная мода возникает благодаря высокой концентрации свободных носителей заряда в исследованных образцах. Точное спектральное положение наблюдаемых решеточных мод приведено в табл. 2. В табл. 2 также приведены значения волновых чисел, соответствующих этим модам, при температуре жидкого азота.

Из сравнения приведенных при двух температурах данных видно, что моды  $A_1-A_3, A_7$  сместились в длинно-

волновую часть спектра при понижении температуры, в то время как положение мод  $A_4$ ,  $A_6$  не изменилось. В то же время мода  $A_5$  сместилась в коротковолновую часть спектра.

На рис. 2 и 3 приведены спектры отражения для образцов 1 и 2 соответственно при температуре жидкого азота. На рис. 2 и 3 видно, что при понижении температуры форма спектров изменяется: плазмон-фононный минимум сдвигается в область малых волновых чисел, что связано с уменьшением концентрации свободных носителей заряда. В связи с этим имеет место более четкий рельеф спектра в области объемных решеточных колебаний.

Мода  $A_1$ , положение которой зависит от температуры и от состава, не наблюдалась ранее в тройном соединении  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  [4], и поэтому может быть приписана локальной моде селена в решетке исследованного четверного соединения  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$ .

Моды  $A_2$  и  $A_3$  соответствуют поперечным ( $TO$ ) и продольным ( $LO$ ) оптическим фононам, что следует из сравнения полученных данных с результатами работы [4,5]. Моды  $A_2$  и  $A_3$  практически не изменяются при изменении состава и незначительно смещаются в область меньших энергий при понижении температуры.  $TO$  мода  $A_2$  может соответствовать колебаниям бинарной компоненты  $MnTe$  в кристаллической решетке исследованного соединения. То же можно утверждать и для моды  $A_4$  (см. [4]).

Мода  $A_5$  по разным источникам соответствует в одном случае локальной дефектной моде [5], в другом случае  $LO$ -фононам [4]. Четырехкомпонентные кристаллы  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$  обладают характерными для  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  дефектами: вакансиями ртути, селена, теллура, междоузельной ртутью и т.д. Атомы  $Se$  заполняют вакансии и возникают новые кластеры или изменяются размеры существующих. Изменение размеров кластеров приводит к изменению спектров колебаний в  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$ , мода  $A_5$ , например, смещается в область больших энергий при увеличении содержания  $Mn$ .

**4. Особенности спектров отражения в области малых волновых векторов.**

Обращает на себя внимание хорошее разрешение мод  $A_6$ – $A_8$ , присутствующих в спектрах отражения практически всех образцов. При понижении температуры амплитуда колебаний данных мод возрастает. Причиной поглощения фотонов в этой области спектра могут быть оптические переходы носителей из валентной зоны в примесную зону с участием фононов. Наличие этой зоны в исследованных материалах установлено в работе [8]. Она расположена выше дна зоны проводимости на энергию около 5 мэВ. Эта энергия сравнима с энергией переходов с участием фононов, соответствующих модам  $A_7$ ,  $A_8$ . Хотя, несмотря на однофазность образца, мы все-таки не можем полностью исключить возможность существования в образцах гранулярной структуры. Если бы размер гранул был 20–50 мкм, то это могло бы в

принципе дать локальные колебания  $A_7$ – $A_8$ . Природой таких колебаний могли бы быть объемно-ограниченные акустические фононы.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, гранты N 96-15-96500 и N 96-02-18853.

## Список литературы

- [1] J.K. Furdyna. J. Appl. Phys., **64**, R29 (1988).
- [2] И.И. Ляпилин, И.М. Цидильковский. УФН, **146**, 35 (1985).
- [3] N.B. Brandt, V.V. Moshchalkov. Adv. Phys., **33**, 194 (1984).
- [4] S.W. McKnight, P.M. Amirtharaj, S. Perkowitz. Sol. St. Commun., **25**, 357 (1978).
- [5] M. Grynberg, R. Le Toullec, M. Balkanski. Phys. Rev. B, **9**, 517 (1974).
- [6] G.D. Coguric, Z.V. Popovich, D. Stajanovic, O. Zizic, W. Konig. Sol. St. Commun., **77**, 555 (1991).
- [7] O. Zizic, Z.V. Popovich, A. Milutinovich, V.A. Kulbachinskii. Phys. St. Sol. (b), **168**, k103 (1991).
- [8] V.A. Kulbachinskii, P.D. Maryanchuk, I.A. Churilov, M. Inoue, M. Sasaki, H. Negishi, Y. Hara. Semicond. Sci. Technol., **10**, 463 (1995).
- [9] V.I. Ivanov-Omskii, N.N. Berchenko, A.I. Elizarov. Phys. St. Sol. (a), **103**, 11 (1987).

Редактор В.В. Чалдышев

## Peculiarities of reflectivity in far infrared region in semimagnetic $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$ semiconductors

A.I. Belogorokhov, V.A. Kulbachinskii, P.D. Marianchuk, I.A. Churilov

Moscow State Lomonosov University,  
119899 Moscow, Russia

**Abstract** Reflectivity in the far infrared region ( $10$ – $600$   $cm^{-1}$ ) in  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$  single crystals ( $0.01 < x < 0.14$ ;  $y = 0.01$ ) has been investigated at temperatures 300 K and 77 K. Additional vibrational modes to transverse and longitudinal phonons of the ternary compounds were found.