

Поглощение света на переходах между подзонами легких и тяжелых дырок в $p\text{-Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

© И.М. Несмелова[¶], Н.С. Барышев, В.А. Андреев

ФНПЦ НПО "Государственный институт прикладной оптики",
420075 Казань, Россия

(Получена 8 мая 2001 г. Принята к печати 30 мая 2001 г.)

Измерены спектры поглощения эпитаксиальных пленок $p\text{-Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x = 0.12\text{--}0.19$ в области длин волн 2–24 мкм при 300 и 80 К. По теории Кейна с учетом влияния отдаленных зон рассчитано поглощение, обусловленное переходами носителей заряда между подзонами легких и тяжелых дырок. Получены значения эффективных масс тяжелых и легких дырок в зависимости от состава твердого раствора и температуры. Проведен анализ низкотемпературных спектров поглощения; оценены энергии ионизации акцепторного уровня.

Преимуществом полумагнитного полупроводника $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (МРТ) по сравнению с широко используемыми твердыми растворами $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) является большая стабильность электрофизических свойств. Наличие Mn в решетке трехкомпонентного материала приводит к упрочнению химической связи Hg–Te, тогда как в КРТ имеет место сильное разрыхление этой связи, приводящее к нестабильности свойств материала. Mn-связь в МРТ в основном обусловлена сцеплением s -состояний металла с p -состояниями теллура при наличии ограниченной d - p -гибридизации.

Основные физические свойства твердых растворов МРТ (как и КРТ) определяются их энергетической структурой вблизи точки Γ (центр зоны Бриллюэна), в $\mathbf{k}p$ -расчетах необходимо учитывать по крайней мере три близко расположенные зоны — Γ_6 , Γ_7 , Γ_8 . Частично заполненной и сильно локализованной $3d^5$ -оболочке ионов Mn^{2+} соответствует уровень (узкая d -зона), расположенный в валентной зоне на ~ 3 эВ ниже ее вершины. Этот уровень не влияет на структуру зон в окрестности точки Γ и, следовательно, на электрофизические свойства материала. Однако ряд особенностей, наблюдающихся в явлениях переноса при сильных магнитных полях и в магнитооптических явлениях при низких температурах ($T < 40$ К), удастся объяснить только при учете обменного взаимодействия зонных носителей заряда с локализованными d -электронами ионов марганца [1].

В то время как электрофизические свойства твердых растворов КРТ изучены достаточно подробно, свойства монокристаллов и слоев МРТ исследованы недостаточно. Необходимо уточнить значения зонных параметров, таких как эффективные массы носителей заряда, механизмы рассеяния свободных носителей заряда, температурные зависимости ряда энергетических зазоров.

Настоящая работа посвящена изучению законов дисперсии дырок в валентной зоне твердых растворов $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, определению значений эффективных масс плотности состояний тяжелых (m_1) и легких (m_2) дырок

в зависимости от состава (от x) и температуры (T). Проведен анализ низкотемпературных спектров поглощения и определены энергии ионизации акцепторного уровня (E_a) в зависимости от x при $T = 80$ К.

Авторы ряда работ [2–4] при теоретической обработке экспериментальных результатов исследований образцов МРТ с $x = 0.08\text{--}0.30$ принимали значения $m_1 = (0.5\text{--}0.55)m_0$, в работе [5] для образцов с $x = 0.20\text{--}0.22$ полагалось $m_1 = 0.4m_0$. Изучались электронные параметры приповерхностной области монокристаллов МРТ с $x = 0.00\text{--}0.19$ [6]; получены значения $m_1 = (0.10\text{--}0.21)m_0$.

Нами исследовались спектры поглощения эпитаксиальных пленок $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ p -типа проводимости с $x = 0.12\text{--}0.19$, полученных жидкофазной эпитаксией из теллурических растворов–расплавов. С целью снижения концентрации дырок слои подвергались длительному отжигу в парах ртути, в результате чего были получены образцы с концентрациями нескомпенсированных акцепторов $p = 10^{15}\text{--}10^{16}\text{ см}^{-3}$ при 300 К. Спектры поглощения измерялись на спектрометре ИКС-21 в области 2–24 мкм при $T = 300$ и 80 К.

В материалах p -типа проводимости с кейновской зонной структурой поглощение с длинноволновой стороны края основной полосы (при энергиях фотонов меньше ширины запрещенной зоны, $h\nu < E_g$) обусловлено в основном переходами дырок между подзонами валентной зоны. В монографии [7] было показано, что для InAs, InSb, CdHgTe это поглощение играет значительную роль. Теоретическая обработка экспериментальных спектров позволяет определить законы дисперсии и эффективные массы как тяжелых, так и легких дырок.

Для исследований были отобраны образцы МРТ p -типа проводимости с $x > 0.12$, так как для этих составов поглощение на переходах носителей заряда между подзонами тяжелых и легких дырок, $V1 \rightarrow V2$, не маскируется краем основной полосы (зона–зона). На рис. 1 представлены спектры коэффициента поглощения (α) одного из образцов с $x = 0.186$, электрические параметры которого приведены в табл. 1. Концентрация

[¶] E-mail: eugene@mi.ru

и подвижность дырок определялась из измерений коэффициента Холла R_H и электропроводности σ методом Ван-дер-Пау, ширина запрещенной зоны E_g и содержание Mn x — из оптических измерений и зависимости $E_g(x, T)$, данной в [2]. Как видно из рис. 1, в области поглощения свободными носителями (при длинах волн $\lambda > 4$ мкм) наблюдается дополнительное поглощение. С понижением температуры поглощение увеличивается и имеет более сложную структуру. Отчасти это связано с тем, что с понижением температуры уменьшается степень ионизации акцепторного уровня и возрастает роль примесного поглощения с участием как зоны проводимости, так и валентных зон.

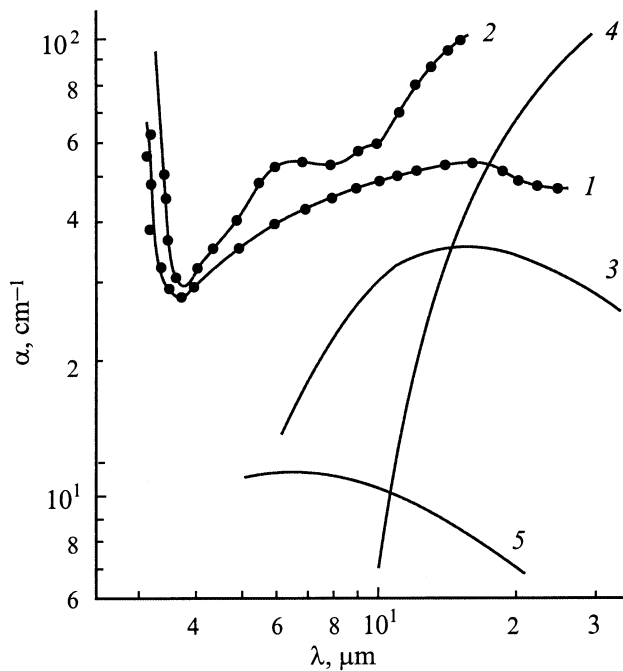


Рис. 1. Спектры поглощения образца $Mn_xHg_{1-x}Te$ p -типа проводимости с $x = 0.186$: 1, 2 — эксперимент; (3–5) — расчет с учетом (3, 4) и без учета (5) высших зон. T, K : 1, 3, 5 — 300; 2, 4 — 80.

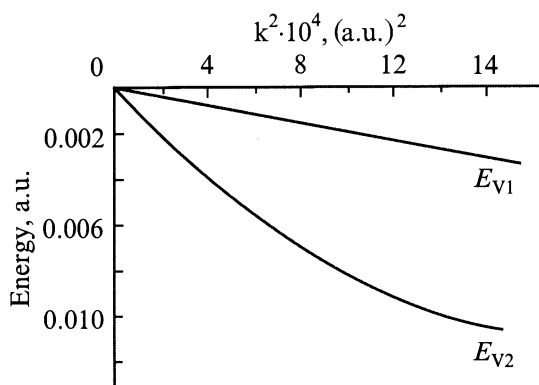


Рис. 2. Структура валентной зоны $Mn_xHg_{1-x}Te$ ($x = 0.186$): E_{V1} — зона тяжелых дырок, E_{V2} — зона легких дырок.

Таблица 1. Электрические параметры образца $p-Mn_xHg_{1-x}Te$

x	T, K	E_g, eV	$1/eR_H, cm^{-3}$	$\sigma R_H, cm^2/V \cdot c$
0.186	300	0.387	$3.6 \cdot 10^{16}$	$2.0 \cdot 10^2$
	77	0.376	$3.3 \cdot 10^{16}$	$1.5 \cdot 10^2$

Таблица 2. Зонные параметры тройных твердых растворов $p-Mn_xHg_{1-x}Te$

x	T, K	m_1/m_0	m_2/m_0	E_g, eV	E_a, eV
0.119	300	0.27	0.0286	0.217	0.062
	80		0.0261	0.175	
0.135	300	0.27	0.0320	0.253	0.073
	80		0.0304	0.228	
0.186	300	0.27	0.0446	0.387	0.128
	80		0.0435	0.376	

Нами были проведены расчеты коэффициента поглощения, обусловленного переходами носителей заряда между подзонами тяжелых и легких дырок $V1 \rightarrow V2$. Вычисления проводились по теории Кейна ($E_g < \Delta$) с учетом непараболичности зоны легких дырок и поправок к законам дисперсии дырок в зонах $V1$ и $V2$, которые учитывают влияние более удаленных зон, расположенных выше зоны проводимости и ниже валентной зоны. Эффекты высших и низших зон оценивались согласно теории возмущения 2-го порядка. Расчеты проводились подобно тому, как представлено в [7,8]. По теории Кейна зона $V2$ непараболична, и величина m_2 определялась как [9]

$$m_2 = \left(\frac{\hbar^3 k}{2\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{E_{V2}} (dE_{V2}/dk^2)} \right)^{2/3},$$

где E_{V2} — закон дисперсии легких дырок, k — абсолютное значение волнового вектора.

Для твердого раствора $Mn_xHg_{1-x}Te$ в литературе даются несколько наборов зонных параметров, которые учитывают влияние отдаленных зон на основные зоны, а также взаимодействие зоны проводимости и валентной зоны через остальные зоны. На основании экспериментальных данных в [10] были определены зонные параметры для $x = 0.005$, в работе [5] — для $x = 0.20-0.22$. В обзоре [1] приведены значения зонных параметров для $x = 0.155$, полученные расчетным путем в [11]: $\gamma_1 = 27.5$, $\gamma_2 = \gamma_3 = 12.5$, $\chi = 15$ (в обозначениях Латтинджера). Расчеты проводились с тремя наборами зонных параметров. Наилучшего согласия теории с экспериментом мы достигли при использовании зонных параметров, приведенных в [1] (рис. 1, кривые 3, 4). Рассчитаны значения эффективных масс плотности состояний тяжелых и легких дырок. Результаты расчетов в окрестности точки Γ для составов с $x = 0.119$, 0.135 , 0.186 при $T = 300$ и 80 К приведены в табл. 2. На

рис. 2 представлены законы дисперсии тяжелых и легких дырок в зависимости от квадрата волнового вектора для твердого раствора МРТ с $x = 0.186$.

Как видно из рис. 1, расчетные спектры при $T = 300$ К для переходов $V1 \rightarrow V2$ удовлетворительно описывают эксперимент. Спектры поглощения при $T = 80$ К в области $\lambda = 5\text{--}10$ мкм имеют особенности, которые не описываются межподзонами переходами $V1 \rightarrow V2$. Мы предположили, что эта структура обусловлена переходами носителей заряда с акцепторного уровня либо в зону проводимости, либо в подзону легких дырок. Анализ низкотемпературных спектров позволил оценить энергию ионизации акцепторного уровня E_a в зависимости от состава (см. табл. 2).

Таким образом, проведен анализ спектров поглощения с длинноволновой стороны края основной полосы эпитаксиальных слоев тройных твердых растворов $p\text{-Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x = 0.12\text{--}0.19$ при 300 и 80 К. Рассчитаны законы дисперсии и значения эффективных масс тяжелых и легких дырок в зависимости от состава и температуры; проведена оценка энергии ионизации акцепторного уровня при $T = 80$ К в зависимости от состава.

Авторы выражают благодарность М.П. Мезенцевой и Т.В. Чугуновой за предоставленные образцы.

Список литературы

- [1] И.И. Ляпилин, И.М. Цидильковский. УФН, **146** (1), 35 (1985).
- [2] J. Kaniewski, A. Mycielski. Sol. St. Commun., **41**, 959 (1982).
- [3] A. Rogalski. Infr. Phys., **31**, 117 (1991).
- [4] P.I. Baranskii, O.P. Gorodnichii, N.V. Shevchenko. Infr. Phys., **30**, 259 (1990).
- [5] Е.И. Георгицэ, В.И. Иванов-Омский, Д.И. Цыпишка. ФТП, **32**, 450 (1998).
- [6] А.М. Бельх, О.В. Романов, Н.Н. Семенов, В.И. Каленик. Матер. II Всесоюзного семинара «Примеси и дефекты в узкозонных полупроводниках» (Павлодар, 1989) ч. I, с. 20.
- [7] И.М. Несмелова. Оптические свойства узкощелевых полупроводников (Новосибирск, Наука, 1992).
- [8] И.М. Несмелова, З.К. Тулвинская, Н.С. Барышев. ЖПС, **50**, 480 (1989).
- [9] О. Маделунг. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп (М., Мир, 1967).
- [10] K. Takita, T. Uchino, T. Gochou, K. Masuda. Sol. St. Commun., **61**, 535 (1987).
- [11] T.R. Gawron, Y. Trylski. Proc 4th Int. Conf. Phys. of Narrow Gap Semicond. (Linz, Austria, 1981) [Lecture Notes in Physics (Springer Verlag, 1982) p. 312].

Редактор Л.В. Шаронова

Light-to-heavy hole absorption in $p\text{-Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

I.M. Nesselova, N.S. Baryshev, V.A. Andreev

State Institute of Applied Optics,
420075 Kazan, Russia

Abstract Optical absorption in epitaxial layers $p\text{-Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0.12\text{--}0.19$) has been measured in the range $2\text{--}24$ μm at the temperatures $T = 300$ and 80 K. Experimental results were interpreted on the basis of the Kane model. The interband transitions of heavy holes from band $V1$ to band $V2$ of light holes were calculated. Effective masses of heavy and light holes as functions of x and T were obtained. On analyzing the spectra absorption at $T = 80$ K, the acceptor level energies were determined.