

# Ширина запрещенной зоны и оптические свойства твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в ультрафиолетовой и видимой области спектра

© А.И. Белогорохов<sup>†</sup>, А.А. Флоренцев, И.А. Белогорохов\*, Н.В. Пашкова, А.В. Елютин

Государственный научный центр „Гиредмет“,  
119017 Москва, Россия

\* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),  
119899 Москва, Россия

(Получена 12 мая 2005 г. Принята к печати 27 мая 2005 г.)

Проведены исследования оптических свойств полупроводникового твердого раствора  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Найдены соотношения, позволяющие по положению особых точек  $E_0$  и  $E_1$  в оптических спектрах оценивать состав  $x$  и  $y$  данного материала. Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов в области составов  $0.09 < x < 0.22$ ,  $0.02 < y < 0.17$ .

PACS: 78.20.Ci, 71.20.Nr

## 1. Введение

Полупроводниковые твердые растворы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  привлекают к себе внимание как перспективные материалы для производства на их основе фотоприемных устройств, работающих в инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн, включая 3–5 и 8–12 мкм — так называемые „окна прозрачности“ атмосферы. В настоящее время для этих нужд в основном используются твердые растворы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , на основе которых созданы приборы высокого качества. Тем не менее существует ряд проблем, связанных с нестабильностью свойств этого материала, обусловленной неконтролируемым частичным перераспределением дефектов решетки и ионов ртути в объеме, особенно в приповерхностной области, этого полупроводника. Постоянное совершенствование технологии получения  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , направленное на улучшение структурного совершенства материала, а также разработка новых конструкций ИК-фотоприемников позволили в большинстве случаев избавиться от этого недостатка. Вместе с тем идет постоянный поиск новых подходов к решению данной проблемы. Введение четвертого компонента в тройной твердый раствор  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  иногда позволяет продвинуться в этом направлении. В большинстве случаев для этого использовались Mn [1–5], Zn [6–11] и Se [12]. Введение одного из этих элементов в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  понижает нестабильность его кристаллической решетки. Так, например, добавление цинка приводит к упрочнению связей в твердом растворе, что влечет за собой улучшение его механических свойств и положительно сказывается на стабильности рабочих характеристик ИК-детекторов. В то же время введение еще одного компонента приводит к необходимости решать проблему точного определения состава твердого раствора. В [8] в приближении виртуального кристалла и когерентного

потенциала изучалось влияние цинка, в [6] — цинка и марганца на ширину запрещенной зоны ( $E_g$ )  $\text{HgCdMnTe}$  и  $\text{CdHgZnTe}$ . Тем не менее, имея одно уравнение и два неизвестных ( $x, y$ ), невозможно однозначно определить состав материала. Требуется привлечение дополнительных экспериментальных методов для решения данной задачи. В частности, в дополнение к регистрации спектров поглощения в области межзонных переходов можно использовать регистрацию спектральных зависимостей коэффициента отражения  $R(\omega)$  в видимом и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах длин волн. В области больших энергий фотонов в спектральных зависимостях  $R(\omega)$  наблюдаются экстремумы, которые обусловлены переходами  $E_1$  из валентной зоны в зону проводимости в направлении [111] ( $\Lambda$ ) зоны Бриллюэна,  $E_1 + \Delta_1$  в том же направлении из зоны, отщепленной за счет спин-орбитального взаимодействия,  $E_2$  — межзонные переходы и т. д. Используется классификация оптических переходов в окрестности особых точек зоны Бриллюэна, принятая для алмазоподобных полупроводников [13]. В настоящее время известны зависимости спектрального положения указанных особенностей от состава для твердых растворов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  [14] и  $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  [15]. Для  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  таких данных нет. Чтобы определить значения  $x$  и  $y$ , можно воспользоваться масс-спектрометрическими методами. По сравнению с ними неразрушающие методы оптической спектроскопии имеют ряд преимуществ, в частности экспрессность, и часто используются для получения информации о дисперсионной зависимости функции диэлектрического отклика гетерополярных полупроводниковых кристаллов, к которым, в частности, относится твердый раствор  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ . Цель работы состояла в исследовании оптических свойств  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  в УФ-, видимом и ИК-диапазонах длин волн, с тем чтобы сопоставить энергии межзонных переходов в области особых точек зоны Бриллюэна с составом твердого раствора.

<sup>†</sup> E-mail: belog@mig.phys.msu.ru

## 2. Образцы и методика эксперимента

Выращивание эпитаксиальных слоев  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  ( $0.09 < x < 0.22$ ,  $0.02 < y < 0.17$ ) проводили методом жидкофазной эпитаксии в запаянной кварцевой ампуле при температуре  $490\text{--}500^\circ\text{C}$  на подложках  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ( $x = 0.03\text{--}0.05$ ) ориентации (111)В. Выращенные слои имели  $p$ -тип проводимости. После отжига образцов в насыщенных парах ртути в течение 4–5 ч концентрация дырок составляла  $(0.8\text{--}1.0) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , подвижность носителей заряда  $\mu > 500 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Плотность дислокаций в эпитаксиальных слоях не превышала значений  $(2\text{--}4) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ .

Спектры отражения и пропускания в видимой и УФ-области длин волн регистрировались на спектрофотометре Hitachi-330 с разрешением по волновым числам 1 нм, в ИК-области с помощью фурье-спектрометра IFS-113v (Bruker) со спектральным разрешением не хуже  $0.2 \text{ см}^{-1}$ . Обработка экспериментальных зависимостей проводилась с использованием соотношений Крамерса–Кронига.

## 3. Результаты и их обсуждение

### 3.1. Область межзонных переходов

Значение  $E_g$  исследованных образцов определялось из оптических спектров в области межзонного поглощения. На рис. 1 представлены спектры пропускания одного из образцов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ , полученные при температуре  $T = 78$  и  $295 \text{ К}$ .

Для определения значений  $x$  и  $y$  необходимо воспользоваться функциональной зависимостью, связывающей состав твердого раствора и энергию межзонного перехода. Если рассматривать  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  как комбинацию трех тройных твердых растворов, как это было предложено в [16], то для нахождения значений ширины запрещенной зоны  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  можно использовать приближение виртуального кристалла и получить следующее соотношение:

$$E_g(x, y) = \frac{(1-x-y)(xE_{12}(z) + yE_{134}(l)) + xyE_{23}(s)}{(1-x-y)(x+y) + xy}, \quad (1)$$

где  $E_{12} = E_g(\text{Cd}_z\text{Hg}_{1-z}\text{Te})$ ,  $E_{23} = E_g(\text{Zn}_s\text{Cd}_{1-s}\text{Te})$ ,  $E_{13} = E_g(\text{Zn}_l\text{Hg}_{1-l}\text{Te})$ ,  $z = (2x+y)/2$ ,  $s = (1-x+y)/2$ ,  $l = (2y+x)/2$ . В работе [17] был предложен значительно более простой метод определения величины  $E_g$  по известным значениям  $x$  и  $y$ . В рамках этого подхода твердый раствор  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  представлен как совокупность не трех, а двух трехкомпонентных твердых растворов. Для вычисления  $E_g$  была предложена следующая формула:

$$E_g(\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}) = 0.5E_g(\text{Cd}_u\text{Hg}_{1-u}\text{Te}) + 0.5E_g(\text{Zn}_w\text{Hg}_{1-w}\text{Te}), \quad (2)$$

где  $u = 2x$ ,  $w = 2y$ . Подстановка в (2) эмпирических соотношений для  $E_g(x)$  твердых растворов

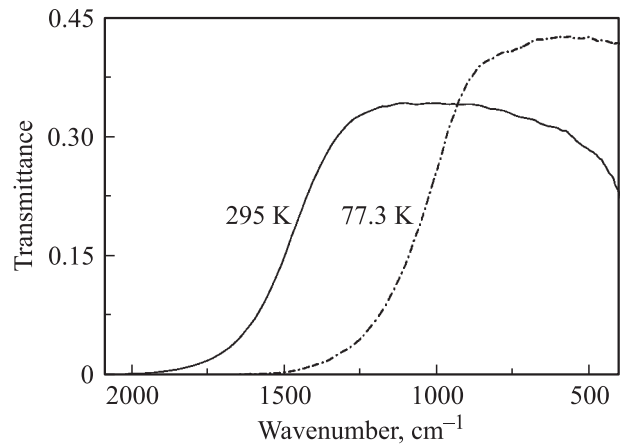
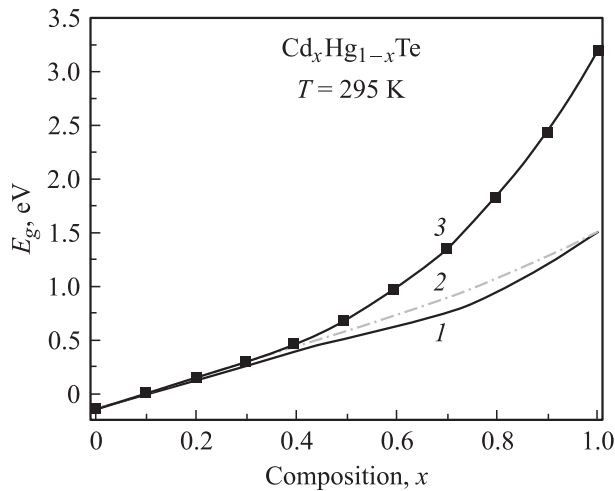


Рис. 1. Экспериментальные спектры пропускания образца  $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.75}\text{Zn}_{0.03}\text{Te}$  при двух температурах измерений.

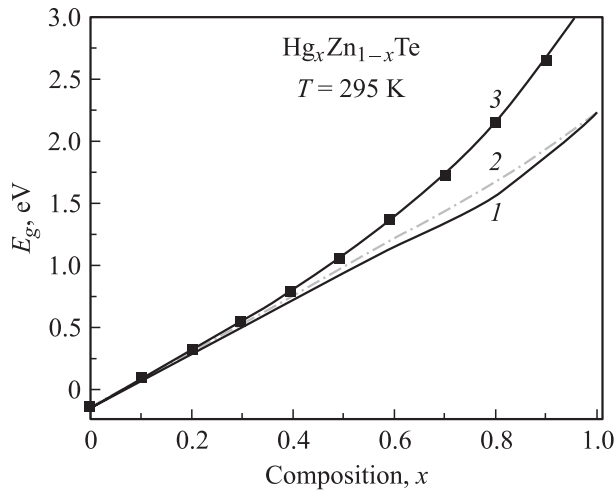
$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  [18] и  $\text{Zn}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$  [19] позволяет получить в явном виде искомую зависимость  $E_g(x, y)$ , которая приведена в [6]. Воспользоваться ею можно только в области небольших  $x$  и  $y$ , так как значения  $E_g(x)$  для тройных твердых растворов  $\text{CdHgTe}$ ,  $\text{ZnHgTe}$  и  $\text{CdZnTe}$ , полученные с ее помощью, а также значения  $E_g$  для крайних бинарных компонентов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  ( $\text{CdTe}$ ,  $\text{HgTe}$ ,  $\text{ZnTe}$ ), рассчитанные согласно (2) [6], значительно отличаются как от экспериментальных данных, так и от результатов, полученных другими исследователями [10,13]. Так, например, при  $T = 300 \text{ К}$ , согласно (2) [6],  $E_g(\text{CdTe}) = 3.18 \text{ эВ}$ ,  $E_g(\text{ZnTe}) = 3.24 \text{ эВ}$ , в то время как эти величины должны быть равными  $1.513 \text{ эВ}$  [20] и  $2.28 \text{ эВ}$  [19,21] соответственно. Удовлетворительное совпадение наблюдается лишь в случае  $\text{HgTe}$  ( $E_g(\text{HgTe}) = -0.14 \text{ эВ}$  [6]). Для того чтобы устранить указанные несоответствия, было составлено новое соотношение (3) для  $E_g(x, y)$   $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  с привлечением методов математического моделирования:

$$E_g(x, y)(\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te})(\text{эВ}) = -0.301 + 2.03x + 5.1 \cdot 10^{-3}y^{1/2} + 2.731y - 3.2x^2 + 5.35 \cdot T \cdot 10^{-4}(1 - 1.5x - 0.35y^{1/2} - 1.28y) + 3.05x^3 - 2.181y^2 + 2.132y^3. \quad (3)$$

Использование выражения (3) позволяет получать корректные значения  $E_g$  для бинарных кристаллов  $\text{CdTe}$ ,  $\text{HgTe}$  и  $\text{ZnTe}$ , а также значительно уменьшить рассогласование с данными других исследователей для тройных твердых растворов  $\text{CdHgTe}$ ,  $\text{ZnHgTe}$  и  $\text{CdZnTe}$ , составляющих  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ , во всем диапазоне составов. Это хорошо видно из рис. 2 и 3, на которых приведены зависимости  $E_g(x)$  для указанных выше материалов, рассчитанные согласно [6], результаты исследований, взятые из работ [18,19], а также результаты расчета по формуле (3). Использование значений температурного коэффициента  $\partial E_g/\partial T$  [6] позволило получить удовлетворительное соответствие между экспериментальными



**Рис. 2.** Зависимость значений ширины запрещенной зоны  $Cd_xHg_{1-x}Te$  от состава  $x$ . 1 — расчет согласно (3), 2 — [18], 3 — [6].



**Рис. 3.** Зависимость значений ширины запрещенной зоны  $Hg_xZn_{1-x}Te$  от состава  $x$ . 1 — расчет согласно (3), 2 — [19], 3 — [6].

и теоретическими результатами при  $T = 77.3$  К. Например, для образца  $Cd_{0.22}Hg_{0.75}Zn_{0.03}Te$ , спектры пропускания которого показаны на рис. 1, значения  $E_g(x, y, T)$ , рассчитанные согласно (3), равны:  $E_g^{300K} = 0.196$  эВ и  $E_g^{78K} = 0.128$  эВ, что, как видно из рис. 1, неплохо согласуется с экспериментальными данными.

Результаты расчетов, а также экспериментальные данные для  $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$  приведены в табл. 1. Можно видеть удовлетворительное совпадение теоретических (3) и экспериментальных данных.

Зная только спектральное положение края основного поглощения  $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$  и имея в своем распоряжении одно уравнение с двумя неизвестными (3), нельзя однозначно определить значения  $x$  и  $y$ . Для этого необходимо построить еще одну функциональную зависимость, связывающую эти величины. Это можно

сделать, анализируя, например, результаты исследований оптических свойств материала  $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$  в видимом и УФ-спектральных диапазонах.

### 3.2. Оптические свойства $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$ в видимом и УФ-диапазонах длин волн

Электромагнитное излучение видимого диапазона длин волн проникает в материал  $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$  на глубину порядка  $50-60 \text{ \AA}$ . Поэтому вид и форма спектральных зависимостей в окрестности особых точек в большой степени зависят от совершенства кристаллической решетки в приповерхностной области образца. Зависимости коэффициента отражения от энергии фотона  $R(E)$  многокомпонентных твердых растворов в области критических точек несколько уширены по сравнению с  $R(E)$  бинарных соединений. Как правило, это происходит вследствие неоднородного распределения потенциального рельефа в объеме твердого раствора. В результате зависимость характерных энергий поглощения квантов света, обусловленных переходами типа  $E_0, E_0 + \Delta_0, E_1, E_1 + \Delta_1$  и других, от состава материала оказывается нелинейной. Для тройных твердых растворов можно определить энергию перехода, воспользовавшись следующим соотношением [13]:

$$E_j(x) = E_j^{AB} + (E_j^{AC} - E_j^{AB})x - C(x)(1 - x), \quad (4)$$

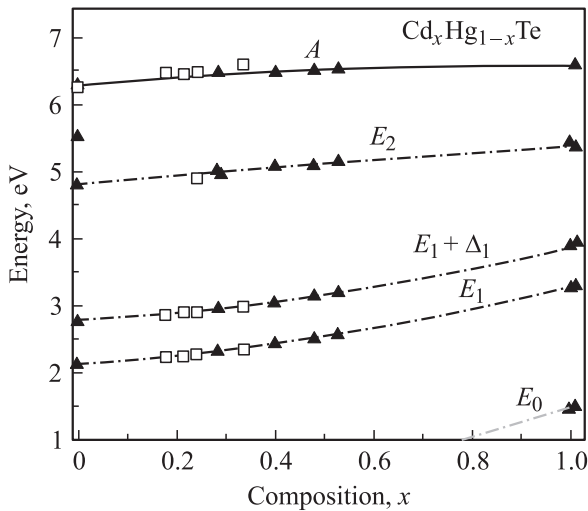
где  $AB$  и  $BC$  — бинарные компоненты кристалла  $AB_{1-x}C_x$ . Для тройных соединений, составляющих  $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$ , значения параметра  $C$  при  $T = 300$  К приведены в табл. 2.

**Таблица 1.** Экспериментальные и теоретические значения  $E_g(x, y)$   $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$  при  $T = 300$  К

Состав		$E_g(x, y)$ , эВ			
$x$	$y$	Расчет [6]	Расчет по формуле (1)	Расчет по формуле (3)	Эксперимент
0.07	0.49	1.131	1.058	0.899	0.81 [10]
0.1	0.1	0.239	0.223	0.226	0.184
0.18	0.39	1.017	0.920	0.843	0.86 [10]
0.18	0.02	0.161	0.170	0.138	0.139
0.22	0.03	0.239	0.251	0.196	0.198
0.10	0.11	0.262	0.256	0.247	0.24 [10]
0.09	0.13	0.294	0.286	0.275	0.275
0.15	0.11	0.330	0.328	0.304	0.295
0.07	0.17	0.355	0.345	0.326	0.334

**Таблица 2.** Значения константы  $C$ , входящей в уравнение (4), для тройных твердых растворов, составляющих  $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$

Тип перехода	Значение константы $C$		
	$Cd_xHg_{1-x}Te$	$Zn_yHg_{1-y}Te$	$Cd_{1-x}Zn_xTe$
$E_1$	0.802	0.693	0.413
$E_1 + \Delta_1$	0.693	0.411	0.373

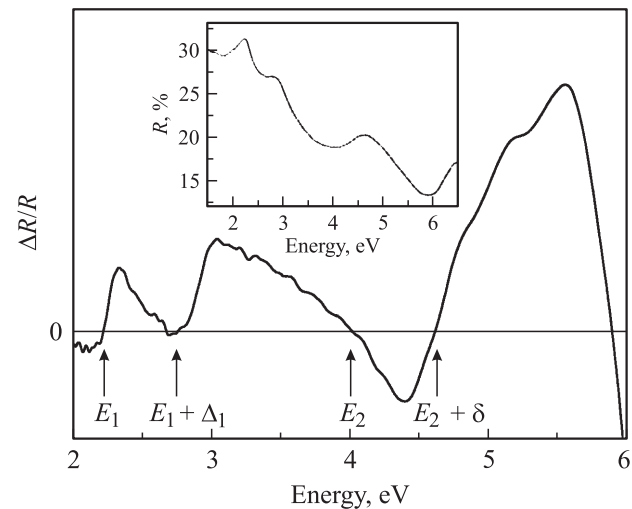


**Рис. 4.** Зависимость значений энергии переходов носителей заряда в области особых точек зоны Бриллюэна в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  от состава  $x$ . Штрихпунктирные кривые — расчет [22], квадраты — результаты работы [14], треугольники — экспериментальные данные.

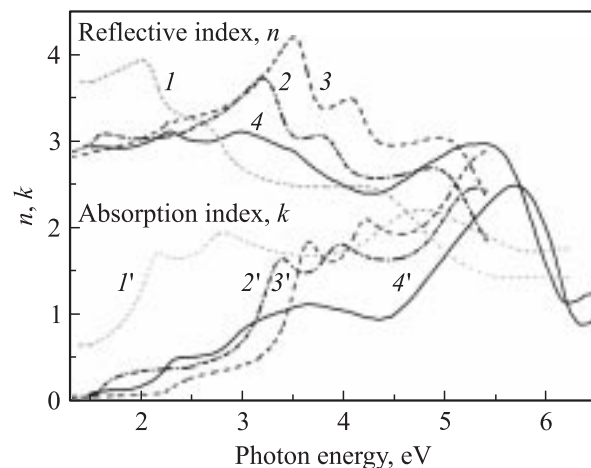
От того, как была подготовлена к проведению измерений поверхность образца, зависит точность определения спектрального положения искомой особенности  $R(E)$  и соответственно его состава. Различная морфология и высота рельефа поверхностного слоя влияют на положение максимумов  $R(E)$ . Например, разница в значениях энергии переходов  $E_1$  в кристаллах  $\text{CdHgTe}$ , поверхность которых была обработана с помощью методов химико-механической полировки и шлифовки, может достигать 0.035 эВ для  $x = 0.215$  и 0.045 эВ для  $x = 0.24$  [14]. По этой причине обработка поверхности исследованных в настоящей работе образцов проводилась с применением первого метода с доводкой до размеров шероховатости поверхности менее 20 нм. На рис. 4 приведены зависимости спектрального положения особых точек  $R(E)$  от состава  $x$  исследованных образцов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , а также результаты работ [14,22]. Обсуждение вопроса о появлении дополнительной особенности в спектрах отражения исследованных образцов, обозначенной на рис. 4 буквой А, выходит за рамки настоящей работы. Аналогичные результаты были получены и для  $\text{CdZnTe}$ . Наблюдаемое хорошее совпадение результатов позволило определиться в выборе метода обработки поверхности образцов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ .

На рис. 5 приведена зависимость  $\Delta R(E)/R(E)$  для  $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.75}\text{Zn}_{0.03}\text{Te}$  при  $T = 295$  К. На вставке к рисунку можно видеть спектр отражения  $R(E)$  того же образца. На рис. 6 приведены экспериментальные спектральные зависимости значений показателей преломления ( $n$ ) и поглощения ( $k$ ) материала  $\text{Cd}_{0.18}\text{Hg}_{0.8}\text{Zn}_{0.02}\text{Te}$ . Для сравнения приведены аналогичные данные для  $\text{CdTe}$ ,  $\text{HgTe}$ ,  $\text{ZnTe}$ . Из рис. 6 видно, что максимумы  $R(E)$   $\text{Cd}_{0.18}\text{Hg}_{0.8}\text{Zn}_{0.02}\text{Te}$  уширены по сравнению с бинарными кристаллами. Тем не менее регистрировать спектраль-

ное положение особых точек спектра  $R(E)$  можно с высокой точностью. Особые точки типа  $E_0$  располагаются в области энергий фотонов 2.28 эВ для  $\text{ZnTe}$  и 1.51 эВ для  $\text{CdTe}$ . Для твердого раствора  $\text{Cd}_{0.18}\text{Hg}_{0.8}\text{Zn}_{0.02}\text{Te}$  подобное значение энергии должно быть равным 0.138 эВ. Как правило, изменение формы спектральных зависимостей  $R(E)$  в области критических точек  $E_0 + \Delta_0$  незначительно, поэтому регистрировать их положение с высокой точностью достаточно сложно. Иная картина наблюдается в случае  $E_1$ . В силу того что она является седловой точкой, в ее окрестности имеет место существенное изменение вида функции плотности состояний, и это обуславливает хорошо выраженный рельеф  $R(E)$  в этой спектральной области. По этой причине представляется вполне естественным остановить свой выбор на  $E_1$  при решении проблемы определения состава твердого раствора  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ .



**Рис. 5.** Зависимость  $\Delta R(E)/R(E)$  для образца  $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.75}\text{Zn}_{0.03}\text{Te}$ . Стрелками отмечено положение особых точек. На вставке показан спектр  $R(E)$ .



**Рис. 6.** Зависимости  $n(E)$  и  $k(E)$  для: (1, 1') —  $\text{HgTe}$ , (2, 2') —  $\text{CdTe}$ , (3, 3') —  $\text{ZnTe}$ , (4, 4') —  $\text{Cd}_{0.18}\text{Hg}_{0.8}\text{Zn}_{0.02}\text{Te}$ .

Использование экспериментальных результатов, полученных в настоящей работе, позволило составить уравнение, связывающее состав  $(x, y)$   $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$  и энергию  $E_1^{300}(x, y)$  (эВ) перехода в окрестности особой точки  $E_1$ :

$$E_1^{300}(x, y) = \frac{(1-x-y)(2.138x + 0.546x^2 - 0.485xy + 2.138y + 1.519y^2 + 0.74x^3 + 0.74x^2y + 0.185xy^2)}{(1-x)(1-y) - (x+y-1)^2} + \frac{xy(3.643 - 0.115x - 0.23y)}{(1-x)(1-y) - (x+y-1)^2}. \quad (5)$$

Выражение (5) было использовано для проведения расчетов спектрального положения перехода типа  $E_1$  в бинарных кристаллах и тройных твердых растворах, составляющих  $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$ . В итоге были получены результаты, которые хорошо согласуются как с экспериментальными результатами, так и с ранее опубликованными данными [14,15,22,23].

Для того чтобы контролировать адекватность проведенных расчетов, решалась обратная задача, т.е. по известным значениям  $n(E)$  и  $k(E)$  рассчитывались зависимости  $\varepsilon_1(E)$  и  $\varepsilon_2(E)$ , которые использовались для моделирования  $R(E)$ . Далее проводилось сравнение экспериментального и восстановленного спектров  $R(E)$ . Для этого использовался следующий подход. Коэффициент преломления света является комплексной величиной:  $n(E) = n_1(E) + in_2(E)$ . Между  $n(E)$  и комплексной диэлектрической функцией существует простая связь:  $n^2(E) = \varepsilon_1(E) + i\varepsilon_2(E)$ ,  $n = \varepsilon^{1/2}$ . Подставляя последнее соотношение в формулу для нахождения коэффициента отражения при условии нормального падения света на отражающую плоскость, можно получить следующее соотношение:

$$R = \left| \frac{\varepsilon^{1/2} - 1}{\varepsilon^{1/2} + 1} \right|^2 = \frac{\varepsilon^{1/2} - 1}{\varepsilon^{1/2} + 1} \cdot \frac{\hat{\varepsilon}^{1/2} - 1}{\hat{\varepsilon}^{1/2} + 1}, \quad (6)$$

где  $\hat{\varepsilon} = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$  есть величина, комплексно сопряженная  $\varepsilon$ . После необходимых преобразований (6) можно привести к следующему виду:

$$R = \frac{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2} - 2\text{Re}(\varepsilon_1 + i\varepsilon_2)^{1/2} + 1}{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2} + 2\text{Re}(\varepsilon_1 + i\varepsilon_2)^{1/2} + 1}. \quad (7)$$

Нетрудно видеть, что реальная часть величины  $(\varepsilon_1 + i\varepsilon_2)^{1/2}$  равна  $n_1$ . Эту зависимость  $n_1 = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ ,  $n_1^4 - \varepsilon_1 n_1^2 - \varepsilon_2^2/4 = 0$  можно использовать, чтобы в явном виде выразить значения средних членов в числителе и знаменателе уравнения (7). В конечном итоге получаем соотношение, которое можно использовать в обратной задаче — построении спектральной зависимости  $R(E)$  по известным значениям мнимой и действительной части диэлектрической проницаемости исследуемого материала [24]:

$$R = \frac{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2} - [2\varepsilon_1 + 2(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2}]^{1/2} + 1}{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2} + [2\varepsilon_1 + 2(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2}]^{1/2} + 1}. \quad (8)$$

Для исследованных образцов  $CdTe$ ,  $ZnTe$ ,  $HgTe$  твердых растворов  $CdHgTe$ ,  $ZnHgTe$ ,  $CdZnTe$  и  $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$  ( $0.9 < x < 0.22$ ,  $0.02 < y < 0.17$ ) экспериментальные и рассчитанные согласно (8) спектральные зависимости  $R(\omega)$  удовлетворительно совпадали друг с другом.

## 4. Заключение

В настоящей работе были проведены исследования оптических свойств полупроводникового твердого раствора  $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$  в УФ-, видимой и ИК-областях спектра. Найдены соотношения, позволяющие по положению особых точек  $E_0$  и  $E_1$  в оптических спектрах оценивать состав  $x$  и  $y$  данного материала. Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов в области составов  $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$   $0.9 < x < 0.22$ ,  $0.02 < y < 0.17$ .

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 03-02-16938 и проекта НШ-1700.2003.3.

## Список литературы

- [1] N.L. Bazhenov, V.I. Ivanov-Omskii, K.E. Mironov, V.F. Movi-le. ФТП, **22**, 1258 (1988).
- [2] K. Takita, N. Uchino, K. Masuda. *Semicond. Sci. Technol.*, **5**, S277 (1990).
- [3] G.G. Tarasov, Yu.I. Mazur, M.P. Lisitsa, S.R. Lavoric, A.S. Rakitin, J.W. Tomm, A.P. Litvinchuk. *Semicond. Sci. Technol.*, **14**, 187 (1999).
- [4] Н.П. Гавалешко, В.В. Тетеркин, Ф.Ф. Сизов, С.Ю. Паран-чич. Неорг. матер., **28**, 2276 (1992).
- [5] S. Takeyama, S. Narita. *J. Phys. Soc. Japan*, **55**, 274 (1986).
- [6] О.А. Боднарук, А.В. Марков, С.Э. Остапов, И.М. Раренко, А.Ф. Слонецкий. ФТП, **34**, 430 (2000).
- [7] А.М. Андрухив, К.Е. Миронов. *Высокочистые вещества*, **2**, 139 (1993).
- [8] S.N. Ekpenuma, C.W. Myles. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **7**, 321 (1989).
- [9] A. Andrukiv, G. Khlyap, M. Andrukiv. *J. Cryst. Growth*, **198/199**, 1162 (1999).
- [10] P. Sydoruk, G. Khlyap, M. Andrukiv. *Cryst. Res. Technol.*, **36**, 361 (2001).
- [11] А.М. Андрухив, О.А. Гадаев, В.И. Иванов-Омский, Э.И. Цидильковский. ФТП, **27**, 348 (1993).
- [12] Y.V. Bezsmolnyu. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **458**, 461 (2001).
- [13] В.А. Тягай, О.В. Снитко, *Электроотражение света в полупроводниках* (Киев, Наук. думка, 1980).
- [14] P. Koppel. *J. Appl. Phys.*, **57**, 1705 (1985).
- [15] T. Toshifumi, S. Adachi, H. Nakanishi, K. Ohtsuka. *Jap. Appl. Phys.*, **32**, 3496 (1993).
- [16] C.K. Williams, T.H. Glisson, J.R. Hauses, M.A. Littlejohn. *J. Electron. Mater.*, **7**, 639 (1978).
- [17] S.E. Ostapov, O.A. Bodnaruk, I.N. Gorbatiuk, I.M. Rarenko. *School-Conf. PPMSS* (Chernivtsi, Ruta, 1995).
- [18] G.L. Hansen, J.L. Schmit, T.N. Casselman. *J. Appl. Phys.*, **53**, 7099 (1982).
- [19] K. Joswikowski, A. Rogalski. *Infrared Phys.*, **28**, 101 (1988).

- [20] J. Lee, N.G. Giles, D. Rajavel, C.J. Summers. Phys. Rev. B, **49**, 668 (1994).
- [21] R. Granger. *Properties of Narrow Gap Semiconductors*, ed. P. Capper (London, INSPEC, IEE, 1994).
- [22] L. Vina, C. Umbach, M. Cardona, L. Vodopyanov. Phys. Rev. B, **29**, 6752 (1984).
- [23] E.M. Larramendi, E. Purón, O. de Melo. Semicond. Sci. Technol., **17**, 8 (2002).
- [24] А.И. Белогорохов, Ю.А. Пусеп. Препринт ИФП СО РАН, № 13, 1 (1987).

*Редактор Л.В. Беляков*

## **Band gap determination and optical properties of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ in UV- and visible spectral region**

*A.I. Belogorokhov, A.A. Florentsev, I.A. Belogorokhov\*, N.V. Pashkova, A.V. Elyutin*

State Research Institute for Rare-Metals Industry,  
119017 Moscow, Russia  
\* Moscow State University,  
119899 Moscow, Russia

**Abstract** Investigation of the optical properties of  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  semiconductor solid solution in UV-, visible and IR-regions has been made. Theoretical relations, obtained in this work, allow to determine the composition  $x$  and  $y$  of  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  dependence of the  $E_0$  and  $E_1$  critical points. Good agreement has been obtained between theoretical and experimental data at  $0.09 < x < 0.22$ ,  $0.02 < y < 0.17$ .