

К вопросу о поглощении инфракрасного излучения свободными носителями заряда в $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$

© А.И. Белогорохов, Л.И. Белогорохова*, А.Г. Белов, В.М. Лакеенков, Н.А. Смирнова

Институт редкометаллической промышленности "Гиредмед",
109017 Москва, Россия

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

(Получена 24 июня 1998 г. Принята к печати 28 июля 1998 г.)

Исследовались инфракрасные спектры пропускания монокристаллических образцов $n\text{-CdTe}$ и $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ при 295 и 77 К. Проведен анализ полученных экспериментальных данных в предположении, что наблюдаемые спектральные зависимости коэффициента пропускания обусловлены поглощением инфракрасного излучения свободными носителями заряда. Показано, что результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Значения концентраций и подвижностей электронов, рассчитанные из спектров пропускания, близки к значениям аналогичных параметров, полученных из электрических измерений.

1. Введение

За последние годы интерес к теллуриду кадмия и твердым растворам на его основе $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ заметно возрос, что обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, твердый раствор $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ является наиболее перспективным материалом для подложек при получении эпитаксиальных гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$ и, во-вторых, он имеет ряд преимуществ перед другими полупроводниками при использовании его в качестве материала для создания детекторов ядерного излучения. Однако изучено это соединение явно не достаточно; частично исследованы лишь его оптические свойства. Что касается электрических свойств, то их исследования сопряжены с большими трудностями, особенно при проведении измерений при азотных и гелиевых температурах, т.е. именно в тех случаях, когда можно получить наиболее ценную информацию о концентрациях свободных носителей заряда, энергиях ионизации примесных уровней, соотношении концентраций доноров и акцепторов и т.д.

Анализ имеющихся на сегодняшний день литературных данных показывает, что авторы, как правило, очень скупно излагают результаты электрических измерений и только изредка останавливаются на тех трудностях, с которыми им пришлось столкнуться при проведении низкотемпературных измерений. Создание контактов к теллуриду кадмия–цинка, омических в широком интервале температур, представляет собой сложную техническую задачу, которая пока далека от разрешения.

Если препятствием к проведению холловских измерений является отсутствие омических контактов, то оптические измерения полностью освобождают от этой проблемы. В тех случаях, когда удастся провести оптические и электрические измерения на одних и тех же образцах, ценность получаемой информации заметно возрастает. В настоящей работе мы попытались определить концентрацию свободных носителей заряда в кристаллах $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ n -типа проводимости двумя способами — из

спектров пропускания в инфракрасной (ИК) области и из данных электрических измерений — и сопоставить результаты двух принципиально различных экспериментов.

2. Методика эксперимента. Приготовление образцов

В работе исследовались монокристаллические образцы $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 0.06$) n -типа проводимости (параметры некоторых образцов представлены в таблице). Кристаллы, полученные методом Бриджмена, состояли из 2 ÷ 3 монокристаллических блоков, они были сориентированы в направлении (111) и разрезаны на пластины толщиной 1.4 ÷ 1.6 мм.

Для проведения оптических измерений пластины с двух сторон шлифовались, а затем подвергались химико-механической полировке с использованием полирующего травителя состава $\text{Br}_2 : \text{HBr} : \text{этиленгликоль}$. С помощью этих операций удавалось полностью удалить нарушенный слой и получить поверхность образца, близкую к зеркальной.

Структурное совершенство образцов исследовалось методом металлографии. Для выявления дислокационной структуры на поверхности А(111) образцы обрабатывались селективным травителем, состоящим из 50%-го водного раствора CrO_3 и HF (3:2 объемных частей). В исследованных нами образцах плотность дислокаций составляла $(4 \div 6) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, малоугловые границы и включения второй фазы отсутствовали.

Измерения электрических параметров проводились при комнатной температуре ($T = 295 \text{ К}$) и температуре жидкого азота ($T = 77.3 \text{ К}$) по методу Ван-дер-Пау; коэффициент Холла измерялся при значении индукции магнитного поля $B = 0.5 \text{ Тл}$. Измерения проводились на образцах, форма которых была близка к прямоугольной, с размерами не более $4 \times 10 \text{ мм}^2$. Образец выкальвывался из пластины, контакты припаивались индием к свежим сколам между скалыванием и пайкой контактов проходило не более 5 мин, так что сколы не успевали за-

Параметры исследованных образцов *n*-типа проводимости

№ образца	Материал	Толщина образца <i>d</i> , мм	Температура <i>T</i> , К	Концентрация электронов		Подвижность электронов	
				N_{opt} , см ⁻³	N_{el} , см ⁻³	μ_{opt} , см ² /В·с	μ_{el} , см ² /В·с
1	Cd _{0.96} Zn _{0.04} Te	1.07	295	$6.6 \cdot 10^{16}$	$6.3 \cdot 10^{16}$	770	740
			77.3	$4.0 \cdot 10^{16}$	$3.9 \cdot 10^{16}$	1300	1200
2	Cd _{0.96} Zn _{0.04} Te	1.01	295	$1.9 \cdot 10^{16}$	$2.7 \cdot 10^{16}$	870	810
			77.3	$1.6 \cdot 10^{16}$	$1.3 \cdot 10^{16}$	900	1200
3	Cd _{0.97} Zn _{0.03} Te	0.67	295	$8.2 \cdot 10^{15}$	$8.9 \cdot 10^{15}$	670	630
			77.3	$4.3 \cdot 10^{15}$	$4.5 \cdot 10^{15}$	960	970
4	Cd _{0.94} Zn _{0.06} Te	0.92	295	$1.1 \cdot 10^{15}$	$1.1 \cdot 10^{15}$	970	890
			77.3	$8.2 \cdot 10^{14}$	$8.0 \cdot 10^{14}$	8800	8900
5	CdTe	1.20	295	$1.9 \cdot 10^{14}$	$2.3 \cdot 10^{14}$	960	760
			77.3	$1.3 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^{14}$	5200	5100

грязнятся. Омичность контактов проверялась по вольт-амперным характеристикам. Было установлено, что применяемая нами методика изготовления контактов дает вполне удовлетворительные результаты. При понижении температуры образца наблюдались отклонения вольт-амперных характеристик от линейных зависимостей, особенно для образцов с $n \leq 10^{15}$ см⁻³, однако эти отклонения были незначительными и практически не влияли на результаты электрических измерений. Для образцов с $n > 10^{15}$ см⁻³ контакты были омическими при всех температурах.

Оптические спектры регистрировались на фурье-спектрометре IFS-113v (производство фирмы Brüker, ФРГ) в диапазоне волновых чисел (3000 ÷ 300) см⁻¹. Спектральное разрешение во всем диапазоне составляло 0.5 см⁻¹. Для проведения низкотемпературных измерений использовался проточный гелиевый криостат фирмы Oxford Instruments (Великобритания). Линейные размеры светового пятна не превышали 2 мм.

Математическая обработка полученных спектров пропускания заключалась в подгонке расчетной кривой к экспериментальному спектру по методу наименьших квадратов путем варьирования двух независимых переменных: концентрации (N) и подвижности (μ) свободных носителей заряда. Сущность использованного метода подгонки заключалась в следующем.

Теллурид кадмия представляет собой широкозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны ~ 1.5 эВ, так что для электронного образца влияние дырок из-за их малого количества никак не сказывается. В этом случае (монополярный полупроводник *n*-типа) зависимость коэффициента поглощения α от частоты ω выразится соотношением [1]

$$\alpha = \frac{4\pi e N_{opt} \mu_{opt}}{cn [1 + \omega^2 (m_{opt} \mu_{opt} / e)^2]} \quad (1)$$

Здесь N_{opt} , m_{opt} , μ_{opt} — соответственно концентрация, эффективная масса и подвижность свободных носителей заряда (индекс "opt" означает, что все эти параметры определяются из спектров пропускания); n — показатель

преломления материала; e — заряд электрона; c — скорость света в вакууме.

Если взять минимальное значение волнового числа из рассматриваемого спектрального диапазона ($\nu = 300$ см⁻¹) и типичные для наших образцов значения подвижности ($\mu_{opt} \approx 10^3$ см²/В·с), то второе слагаемое в знаменателе формулы (1) окажется равным 40 (оценка по минимуму). Поэтому единицей в знаменателе можно пренебречь и, учитывая, что $\omega = 2\pi\nu c$, формулу (1) можно представить в виде

$$\alpha = \frac{N_{opt} e^3}{\pi c^3 n \mu_{opt} m_{opt}^2 \nu^2} \quad (2)$$

Эффективная масса электронов определялась из соотношения [2]

$$m_{opt} = \frac{3h^2 E_g}{16\pi^2 P_{cv}^2} \quad (3)$$

Здесь $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, P_{cv} — матричный элемент взаимодействия валентной зоны и зоны проводимости (считается не зависящим от температуры и концентрации цинка и равным $9.0 \cdot 10^{-8}$ эВ·см [3]). Для твердого раствора Cd_{1-x}Zn_xTe ширина запрещенной зоны E_g вычислялась из соотношения, взятого из работы [4] для $T = 5$ К; термический коэффициент изменения запрещенной зоны считался не зависящим от температуры в интервале 5 ÷ 300 К и равным $dE_g/dT = -4.5 \cdot 10^{-4}$ эВ/град [5]. Используя формулу (3) для чистого теллурида кадмия ($x = 0$), получаем: $E_g = 1.468$ эВ, $m_{opt} = 0.103m_0$ при $T = 295$ К и $E_g = 1.566$ эВ, $m_{opt} = 0.110m_0$ при $T = 77.3$ К (m_0 — масса свободного электрона).

Если известно значение α , то значение коэффициента пропускания легко определить из соотношения [1]

$$\tilde{T} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}}, \quad (4)$$

где R — коэффициент однократного отражения,

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}, \quad (5)$$

k — коэффициент экстинкции, $k = \alpha/4\pi\nu$.

Расчетные зависимости $\tilde{T}(\nu)$ были получены с использованием соотношений (2)–(5) путем варьирования параметров N_{opt} и μ_{opt} в формуле (2). Показатель преломления n считался не зависящим от волнового числа и выбирался равным 2.70 при $T = 295$ К и 2.65 при $T = 77.3$ К [6]. Полученные значения N_{opt} и μ_{opt} представлены в таблице, где приведены также значения концентрации N_{el} и подвижности μ_{el} , вычисленные из данных электрических измерений.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Типичные спектры пропускания образцов CdTe и $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ n -типа проводимости при $T = 295$ и 77.3 К приведены на рис. 1. Как видно из рисунка, при понижении температуры образца значение коэффициента пропускания возрастает во всем спектральном интервале. Поскольку рассматриваемый ИК диапазон далек от области собственных переходов (E_g соответствует $\nu \approx 12\,500\text{ см}^{-1}$) и явно выраженные полосы поглощения на спектрах пропускания отсутствуют, мы предположили, что наблюдаемая монотонно возрастающая зависимость $\tilde{T}(\nu)$ (рис. 1) обусловлена поглощением ИК излучения свободными носителями заряда. Применяв вышеописанную процедуру подгонки, мы получили значения N_{opt} и μ_{opt} , которые приведены в таблице.

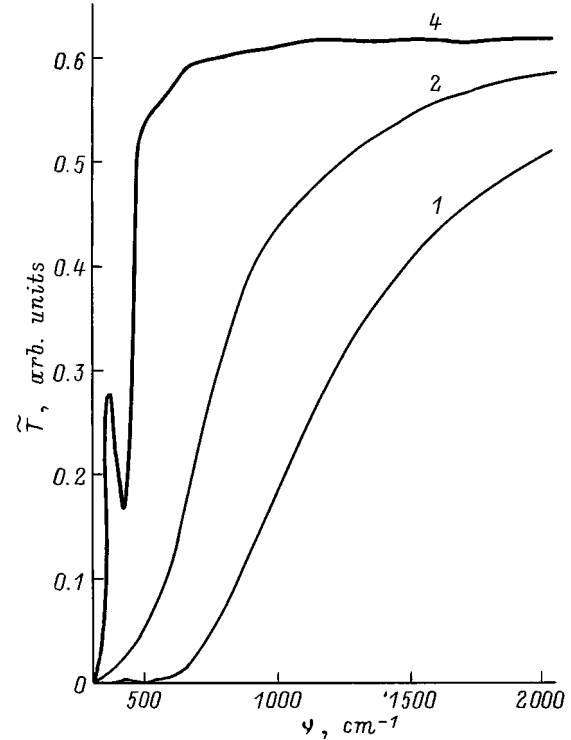


Рис. 2. Спектры пропускания образцов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ с различными концентрациями электронов при $T = 295$ К. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

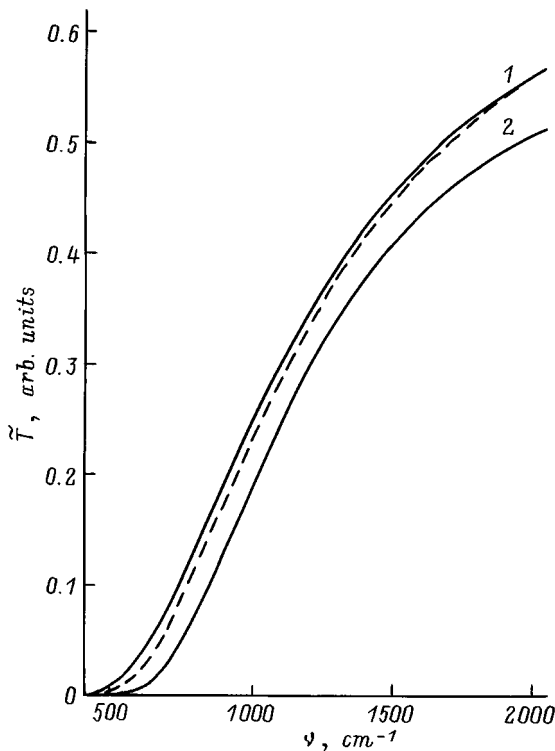


Рис. 1. Типичные экспериментальные спектры пропускания твердого раствора $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ (образец 1) при $T = 77.3$ (1) и 295 К (2). Штриховая линия — расчетный спектр пропускания образца 1 при $T = 77.3$ К.

Насколько близко теоретическая кривая подходит к экспериментальной, можно судить по рис. 1, где приведены расчетный и экспериментальный спектры пропускания образца 1 при $T = 77.3$ К. Как видно из рис. 1, наблюдается вполне удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными данными.

На рис. 2 показано изменение формы спектральной зависимости коэффициента пропускания от концентрации свободных носителей заряда при $T = 295$ К. Видно, что при уменьшении концентрации электронов спектр смещается влево, в область меньших волновых чисел, при этом значения коэффициента пропускания увеличиваются. Кривая 4 соответствует образцу с $N_{\text{opt}} = 1.1 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$, при таких значениях концентраций электронов поглощение ИК излучения свободными носителями заряда сказывается только в длинноволновой части спектра ($\nu \leq 1000\text{ см}^{-1}$); в области $\nu > 1000\text{ см}^{-1}$ коэффициент пропускания практически не зависит от волнового числа. Наблюдаемые на кривой 4 особенности в интервале $\nu < 500\text{ см}^{-1}$ обусловлены многофононными процессами и не связаны с поглощением ИК излучения свободными носителями заряда.

Сопоставление данных оптических и электрических измерений (см. таблицу) показывает, что значения N_{opt} и N_{el} различаются не более чем в 1.5 раза, а значения μ_{opt} и μ_{el} — еще меньше, причем наблюдается различие как в ту, так и в другую сторону (т.е. систематическая ошибка отсутствует).

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о том, что наблюдаемые спектральные зависимости коэффициента пропускания образцов n - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ вполне удовлетворительно описываются механизмом поглощения ИК излучения свободными носителями заряда. В наших образцах включения на основе теллура отсутствовали, поэтому гипотеза о наличии преципитатов теллура [7,8], приводящих к зависимостям $\tilde{T}(\nu)$ вида 1 и 2 (рис. 1), представляется нам ошибочной, так как непонятно, почему при рассеянии излучения на неких неоднородностях материала получают возрастающие зависимости $\tilde{T}(\nu)$; из общих соображений следует, что должна быть обратная ситуация.

Что касается образцов теллурида кадмия–цинка p -типа проводимости, то в них к рассматриваемому механизму поглощения ИК излучения свободными носителями заряда примешивается поглощение, вызванное переходами дырок между валентными подзонами, что затрудняет интерпретацию спектров пропускания. Оба эти механизма поглощения приводят к возрастающей зависимости $\tilde{T}(\nu)$. Изучение оптических и электрофизических свойств материала p -типа проводимости является предметом самостоятельного исследования.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 96-02-18853.

Список литературы

- [1] Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. *Полупроводниковая оптоэлектроника* (М., Мир, 1976) с. 27, 45, 51.
- [2] Б.М. Аскеров. *Кинетические эффекты в полупроводниках* (Л., Наука, 1970) с. 39.
- [3] М. Cardona. *J. Phys. Chem. Sol.*, **24**(4), 1543 (1963).
- [4] M.J.S.H. Brasil, M.C. Tamargo, R.E. Nahory, H.L. Gilchrist, R.J. Martin. *Appl. Phys. Lett.*, **59**(10), 1206 (1991).
- [5] Н.Н. Берченко, В.Е. Кревс, В.Г. Средин. *Полупроводниковые твердые растворы и их применение* (М., Воениздат, 1982) с. 73.
- [6] J. Vaars, F. Sorger. *Sol. St. Commun.*, **10**(9), 875 (1972).
- [7] W.J. Kim, M.J. Park, S.U. Kim, T.S. Lee, J.M. Kim, W.J. Song, S.H. Suh. *J. Cryst. Growth*, **104**(3), 677 (1990).
- [8] B. Li, J. Zhu, X. Zhang, J. Chu. *J. Cryst. Growth*, **181**, 204 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

Free carrier absorption in n -type $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ crystals in the far-infrared region

A.L. Belogorokhov, L.I. Belogorokhova*, A.G. Belov, V.M. Lakeenkov, N.A. Smirnova

Institute of Rare Metals,
109017 Moscow, Russia
* Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

Abstract Infrared transmission spectra of monocrystalline wafers of n -CdTe and n - $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ have been investigated at temperatures 77.3 and 295 K. An analysis of the experimental data has been made, assuming that observed spectral dependencies of transmission coefficient are determined by free carrier absorption. Calculation results are shown to be in satisfactory agreement with experimental data. The electron concentration and mobility values calculated from transmission spectra are close to values obtained from galvanomagnetic measurements.

Fax: (095) 4387664

E-mail: abelog@glas.apc.org