Об особенностях электрофизических свойств гетероструктур $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$

© А.Г. Белов, А.И. Белогорохов¶, В.М. Лакеенков

Государственный научный центр "Гиредмет",
109017 Москва, Россия

(Получена 15 ноября 2000 г. Принята к печати 18 января 2001 г.)

Проанализированы некоторые особенности электрофизических свойств гетероструктур $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ p-типа проводимости при температуре жидкого азота. Показано, что принятая теоретическая модель удовлетворительно описывает полученные экспериментальные данные. Оценены погрешности определения концентрации и подвижности тяжелых дырок, возникающие, если не учитывать вклады в электрофизические параметры от электронов и легких дырок.

1. Введение

Развитие эпитаксиальных методов получения узкозонных твердых растворов в последние годы выдвинуло гетероструктуры $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ в ряд наиболее перспективных материалов для создания приемников излучения инфракрасного диапазона. Исследуются эти вещества также весьма интенсивно, однако некоторые их свойства изучены явно не достаточно. Так, например, не известно, как именно следует учитывать влияние подложки при анализе данных электрофизических измерений. Кроме того, вопрос о корректном (с учетом всех факторов) определении таких важных параметров материала, как концентрация и подвижность свободных носителей заряда, далек от своего разрешения. Не претендуя на исчерпывающее рассмотрение данной задачи, мы в настоящей работе сделали попытку проанализировать некоторые особенности электрофизических свойств рассматриваемых материалов и влияние ряда факторов на точность определения концентрации и подвижности свободных носителей заряда в образцах p-типа проводимости при температуре жидкого азота.

В работе исследовались эпитаксиальные слои $Cd_xHg_{1-x}Te$ p-типа, выращенные методом жидкофазной эпитаксии на подложках CdTe и $Cd_{1-y}Zn_yTe$ $(0.03 \leqslant y \leqslant 0.06)$ n- и p-типа проводимости.

2. Расчеты и оценки

Принципиальное отличие эпитаксиальных гетероструктур от монокристаллических образцов в плане проведения электрофизических измерений состоит в наличии в таких структурах массивной подложки, толщина которой (500–1000 мкм) заметно превосходит толщину собственно слоя (20–40 мкм). Иначе говоря, подложка может шунтировать эпитаксиальный слой и, следовательно, при анализе данных электрофизических измерений ее влияние необходимо учитывать. В общем случае для системы, состоящей из подложки толщиной d_s и эпитаксиального слоя толщиной d_{ep} $(d = d_s + d_{ep})$, справедливы следующие соотношения [1]:

$$\frac{d}{\rho} = \frac{d_{ep}}{\rho_{ep}} + \frac{d_s}{\rho_s}, \tag{1}$$

$$\frac{Rd}{\rho^2} = \frac{R_s d_s}{\rho_s^2} + \frac{R_{ep} d_{ep}}{\rho_{ep}^2}. \tag{2}$$

Здесь ρ, ρ_s, ρ_{ep} — удельные электрические сопротивления, соответственно, всей гетероструктуры, подложки и слоя; R, R_s, R_{ep} — коэффициенты Холла для всей гетероструктуры, подложки и слоя; e — заряд электрона.

Выберем для оценки следующие значения входящих в формулы (1) и (2) параметров ($T = 77$ K): $\rho_{ep} = 1.0$ Ом · см; $d_{ep} = 20$ мкм; $R_{ep} = 600$ см^3/Кл; $(1/Re = 1.05 \cdot 10^{16}$ см$^{-3})$; $\rho_s = 50$ Ом·см; $d_s = 1000$ мкм; $R_s = 10^4$ см^3/Кл; $(1/Re = 6.25 \cdot 10^{14}$ см$^{-3})$. При этом имеем

$$\frac{d_{ep}}{\rho_{ep}} \Big/ \frac{d_s}{\rho_s} = 1; \quad \frac{R_{ep} d_{ep}}{\rho_{ep}^2} \Big/ \frac{R_s d_s}{\rho_s^2} = 3.$$

Видно, что вклад подложки в удельное сопротивление равен вкладу слоя, а коэффициент Холла составляет приблизительно 1/3, т.е. пренебрежение вкладом подложки может привести к значительной ошибке в определении ρ_{ep} и R_{ep}.

Вместе с тем анализ многочисленных экспериментальных данных, полученных на большом количестве образцов (несколько сотен), не обнаружил каких-либо принципиальных отличий зависимостей коэффициента Холла от индукции магнитного поля, $R(B)$, для эпитаксиальных гетероструктур от аналогичных зависимостей для монокристаллических образцов с близкими электрофизическими параметрами. Влияние подложки "не ощущается", что на первый взгляд представляется странным.

Предпринятое нами специальное исследование, посвященное изучению вклада подложки в электрофизические параметры гетероструктуры, показало, что между слоем и подложкой существует некий потенциальный барьер, "развязывающий" слой и подложку по току, так что эпитаксиальный слой оказывается электрически изолированным от подложки [2]. Иначе говоря, при анализе

¶ E-mail: belog@mig.phys.msu.su
Fax: 7(095)4387664

данных гальваномагнитных измерений гетероструктур $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ влияние подложки можно не учитывать, и все рассуждения, относящиеся к зависимостям коэффициента Холла от индукции магнитного поля, $R(B)$, для монокристаллических образцов, оказываются применимыми к эпитаксиальным слоям. Отметим здесь лишь некоторые принципиальные моменты.

Анализируя электрофизические свойства твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ при $T = 77$ K, мы должны иметь в виду, что в образце присутствуют свободные носители заряда трех типов: электроны n, легкие p_l, и тяжелые p_h дырки. Соотношения между указанными величинами при фиксированных значениях параметров x и T определяются только положением приведенного уровня Ферми ε_F/kT [3]. В этом случае для зависимости коэффициента Холла от магнитного поля $R(B)$, и удельного электрического сопротивления, ρ, справедливы следующие соотношения [4]:

$$R = \frac{1}{e}\frac{A}{E^2 + A^2B^2}, \tag{3}$$

$$A = \frac{p_l\mu_l^2}{1+\mu_l^2B^2} + \frac{p_h\mu_h^2}{1+\mu_h^2B^2} - \frac{n\mu_e^2}{1+\mu_e^2B^2},$$

$$E = \frac{p_l\mu_l}{1+\mu_l^2B^2} + \frac{p_h\mu_h}{1+\mu_h^2B^2} + \frac{n\mu_e}{1+\mu_e^2B^2},$$

$$\frac{1}{\rho} = e(p_l\mu_l + p_h\mu_h + n\mu_e). \tag{4}$$

Для исследованных нами образцов вторым слагаемым в знаменателе формулы (3) можно пренебречь в сравнении с первым при $B \leqslant 1.4$ Тл. Если взять для оценки значения подвижностей $\mu_e = 10^5$ см^2/(В · с), $\mu_l = 10^4$ см^2/(В · с), $\mu_h = 500$ см^2/(В · с), ($\mu_l/\mu_h = 30$ [5]), то получим, что при изменении B от 0.1 до 1.4 Тл множитель $1+\mu_eB^2$ изменяется приблизительно в 100 раз, множитель $1 + \mu_l^2B^2$ изменяется в 5.5 раз, тогда как множитель $1 + \mu_h^2B^2$ остается практически неизменным. Это означает, что электроны вносят вклад в $R(B)$ только при малых магнитных полях ($B \approx 0.1$ Тл), а вклад легких дырок, хотя и уменьшается с ростом B, для максимального используемого поля $B = 1.4$ Тл оказывается сравнимым с вкладом тяжелых дырок. Отсюда следует, что, определяя концентрацию дырок как $1/Re$, мы, на самом деле, получаем некое эффективное значение, совпадающее с p_h только по порядку величины (то же самое относится и к "подвижности", определяемой как $\mu = R/\rho$).

В нашем примере $\rho = 0.87$ Ом · см (формула (4)), и вклад от легких дырок не превышает 3%, поэтому $1/\rho \approx ep_h\mu_h$ с хорошей степенью точности. Таким образом, используя соотношения

$$p_h = \frac{1}{Re}, \tag{5}$$

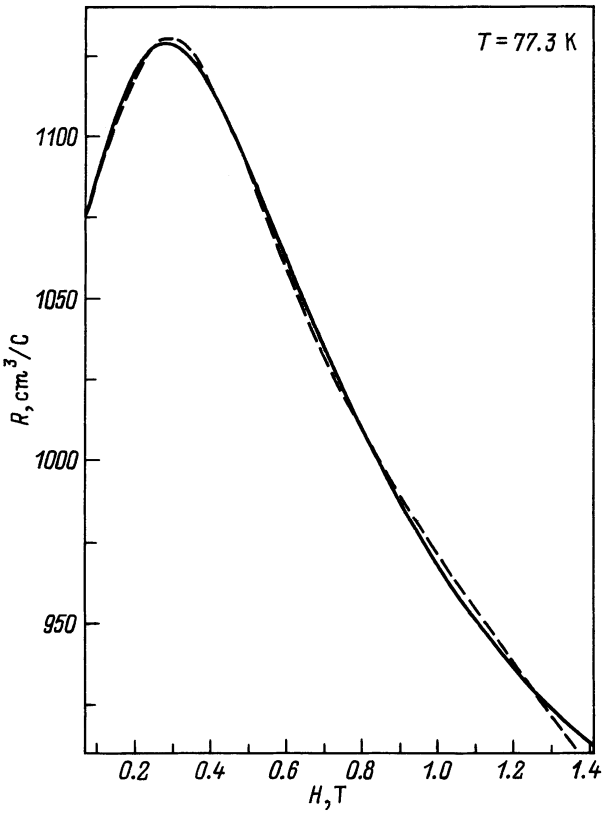
$$\mu_h = \frac{R}{\rho} \tag{6}$$

вместо (3) и (4), мы вносим некую погрешность, точно оценить которую невозможно, так как значения μ_l и μ_h из эксперимента не определяются.

Если с помощью компьютера подогнать теоретическую зависимость $R(B)$ под экспериментальную, используя соотношение (3), то можно определить четыре независимых параметра: одну из концентраций, например p_h (n и p_l однозначно связаны с ней [3]), и 3 подвижности: μ_e, μ_l и μ_h, которые при подгонке должны варьироваться как независимые переменные. Экспериментально измеряются только две величины: $R(B)$ и ρ (при $B = 0$), т.е. мы имеем два уравнения: (3) и (4) и 4 неизвестных: p_h, μ_e, μ_l, μ_h. Такая задача не может быть решена однозначно. Неопределенность в выборе μ_e, μ_l и μ_h сводит на нет все преимущества подгонки и достичь увеличения точности не удается.

3. Экспериментальные результаты

Эпитаксиальные слои $Cd_xHg_{1-x}Te$ были получены методом жидкофазной эпитаксии в запаянной кварцевой ампуле из раствора–расплава на основе теллура. Для уменьшения концентрации дырок эпитаксиальные гетероструктуры подвергались отжигу в насыщенных парах ртути. Толщины эпитаксиальных слоев (определявшиеся методом прямого визуального измерения под микроскопом по сколу) изменялись в пределах 20–40 мкм, толщины подложек — в пределах 500–1000 мкм.



Экспериментальная (сплошная линия) и расчетная (штриховая линия) зависимости коэффициента Холла от индукции магнитного поля, $R(B)$, для образца $Cd_{0.215}Hg_{0.785}Te$ при $T = 77$ K.

Значения параметров эпитаксиального слоя $Cd_{0.215}Hg_{0.785}Te$ ($d_{ep} = 20$ мкм) при $T = 77$ K

Параметр	Экспериментальные данные	Результаты расчета
Удельное сопротивление, ρ, Ом · см	2.05	1.72
Концентрация носителей заряда, см$^{-3}$:		
Электроны, n	–	$8.0 \cdot 10^{10}$
Легкие дырки, p_l	–	$1.5 \cdot 10^{13}$
Тяжелые дырки, p_h	$6.9 \cdot 10^{15}$ ($1/Re$; $B = 1.4$ Тл)	$7.0 \cdot 10^{15}$
Подвижность свободных носителей заряда, см^2/(В · с):		
Электроны, μ_e	–	$3.1 \cdot 10^4$
Легкие дырки, μ_l	–	$1.8 \cdot 10^4$
Тяжелые дырки, μ_h	440 (R/ρ; $B = 1.4$ Тл)	480
μ_l/μ_h	–	38

Готовые образцы имели форму круга диаметром 20 мм. Электрофизические измерения проводились по методу Ван-дер-Пау при комнатной температуре и температуре жидкого азота в диапазоне магнитных полей 0.1–1.4 Тл. Контакты припаивались индием на свежепротравленную поверхность эпитаксиального слоя.

Типичная для исследованных образцов зависимость $R(B)$ при $T = 77$ K представлена на рисунке. Здесь же приведена расчетная кривая $R(B)$, полученная с помощью стандартной процедуры подгонки по методу наименьших квадратов с использованием соотношений (3) и (4). Как видно из рисунка, используемая нами процедура подгонки позволяет достичь удовлетворительного согласия между теоретической и экспериментальной зависимостями. Максимум на кривой $R(B)$ обусловлен влиянием электронов; если в формуле (3) не учитывать электронные слагаемые, то этот максимум воспроизвести не удается. Из рисунка видно также, что в области сильных полей ($B > 1.0$ Тл) кривая $R(B)$ имеет наклон; если бы она шла горизонтально, то это означало бы, что условие $R = 1/p_h e$ выполняется точно в этой области магнитного поля.

Полученные в результате подгонки значения концентраций и подвижностей свободных носителей заряда для того же образца представлены в таблице. Эти данные носят справочный характер: как уже упоминалось выше, используемая нами процедура подгонки не позволяет однозначно определить значения перечисленных параметров. Тем не менее, как видно из таблицы, для рассматриваемого образца экспериментальное значение $1/Re = 6.9 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$ близко к расчетному значению концентрации тяжелых дырок $p_h = 7.0 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$, а значение $R/\rho = 440$ см^2/(В·с) хорошо коррелирует с полученным расчетным значением подвижности тяжелых дырок $\mu_h = 480$ см^2/(В · с). Для других исследованных образцов значения упомянутых параметров, полученные путем подгонки, отличались от соответствующих экспериментальных данных не более чем на 20%. Иначе говоря, использование приближенных формул (5) и (6) для оценки концентрации и подвижности тяжелых дырок в исследованных образцах вместо выражений (3) и (4) вполне оправданно, так как вносит ошибку, не превышающую 20%.

4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали.

1. Вклад подложки в электрофизические параметры гетероструктуры $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ можно не учитывать из-за наличия между эпитаксиальным слоем и подложкой потенциального барьера, изолирующего слой от подложки.

2. При анализе данных гальваномагнитных измерений эпитаксиальных слоев p-типа необходимо принимать во внимание наличие трех типов свободных носителей заряда: электронов, легких и тяжелых дырок.

3. Использование приближенных соотношений (5) и (6) для вычисления концентрации и подвижности тяжелых дырок (без учета вклада электронов и легких дырок) при $B = 1.4$ Тл и $T = 77$ K вносит ошибку, не превышающую 20%.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 00-02-17104.

Список литературы

[1] L.F. Lou, W.H. Frye. J. Appl. Phys., **56**, 2253 (1984).
[2] А.И. Елизаров, В.В. Богобоящий, А.Г. Белов. ФТП, **24**, 923 (1990).
[3] А.И. Белогорохов, А.Г. Белов, Е.А. Виноградов, Е.П. Рашевская. Препринт № 156 ФИАН СССР (М., 1988).
[4] П.С. Киреев. *Физика полупроводников* (М., Высш. шк., 1975).
[5] G.A. Shneider. Phys. St. Sol. (a), **31**, K53 (1975).

Редактор Т.А. Полянская

Several electrical properties of $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ heterostructures

A.G. Belov, A.I. Belogorokhov, V.M. Lakeenkov

State Institution of Rare Metals,
109017 Moscow, Russia

Abstract Some features of electrical properties of p-type $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ heterostructures at liquid nitrogen temperatures have been investigated. The theoretical model accepted is shown to be in satisfactory agreement with experimental data. The errors, revealed due to calculations of carrier concentrations and mobilities, have been evaluated, the electron and light hole contributions to galvanomagnetic parameters being neglected.