

Форма линии межзонного магнитооптического поглощения в висмуте

© С.В. Бровко, А.А. Зайцев, К.Г. Иванов, О.В. Кондаков

Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна,
191065 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 13 мая 1996 г. Принята к печати 3 июня 1996 г.)

Приведены результаты исследования пропускания симметричной полосковой (волноводной) линии из висмута при температуре $T = 80$ К на длине волны лазерного излучения $\lambda = 10.6$ мкм в магнитных полях до $B = 8$ Тл. Моделированием формы экспериментальной кривой в рамках модифицированной модели Бараффа получен набор параметров энергетического спектра L -электронов висмута. Из анализа полевых положений максимумов магнитооптических осцилляций найдены значения параметров модели Макклора и Чоя.

В работе проведены исследования в импульсных магнитных полях пропускания излучения 10.6 мкм волноводной линией, собранной из двух прямоугольных половинок монокристалла висмута. Подобная система называется симметричной полосковой линией (СПЛ) [1]. Оптические поверхности монокристаллов готовились химической полировкой. Отношение удельного сопротивления используемых образцов при комнатной температуре к удельному сопротивлению при 4.2 К было более 400. Пропускание СПЛ в магнитном поле при $T = 80$ К носит осцилляционный характер, связанный с оптическими межзонными переходами на уровнях Ландау валентной зоны и зоны проводимости. Чтобы извлечь максимум информации из полученных данных и детальнее разобраться в физике наблюдаемых эффектов, проведен расчет формы линии магнитооптического спектра.

Моделирование проводилось в рамках модифицированной модели Бараффа [2]. Коэффициент пропускания

$$\frac{T(B)}{T(0)} = \frac{\{\text{sh}[a'_0(B)D]/a'_0(B) + \sin[a''_0(B)D]/a''_0(B)\}}{\{\text{sh}[a'_0(0)D]/a'_0(0) + \sin[a''_0(0)D]/a''_0(0)\}} \times \left\{ \left[\frac{[a'_0(0)]^2 + a''_0(0)}{q'_y + q''_y} \right] + 1 \right\} \frac{q'_y}{\text{Re}[k_0^2/q_y(0)]} e^{2L[q'_y(B) - q'_y(0)]}, \quad (1)$$

(где D — величина зазора между двумя зеркально-симметричными половинками монокристалла, $a'_0(B)$, $a''_0(B)$ — значения действительной и мнимой частей a_0 при некотором значении магнитного поля B , $a_0 = \pm \sqrt{q_y^2 - k_0^2}$, $q_y = (q'_y, q''_y)$ — комплексный волновой вектор электромагнитной волны, $k_0 = \omega/c$, ω — круговая частота электромагнитной волны, c — скорость света в вакууме, L — длина исследуемого кристалла) находился численным решением дисперсионного уравнения волны, распространяющейся в зазоре между двумя зеркально-симметричными половинками монокристаллов,

$$C_2 \left(a_2 + a_0 \text{th} \frac{a_0 D}{2} \right) \left(a_0 L_1 \text{th} \frac{a_0 D}{2} - k_0^2 B_1 \right) - C_1 \left(a_1 + a_0 \text{th} \frac{a_0 D}{2} \right) \left(a_0 L_2 \text{th} \frac{a_0 D}{2} - k_0^2 B_2 \right) = 0, \quad (2)$$

где $C_n = k_0^2 [\varepsilon_{xx} T_n - \varepsilon_{xy} (k_0^2 \varepsilon_{xy} - i a_n q_y)]$, $T_n = k_0^2 - \varepsilon_{yy} + a_n^2$, $L_n = a_n B_n + i q_y A_n$, $B_n = (k_0^2 \varepsilon_{yz} - i a_n q_y) S_n - k_0^4 \varepsilon_{xx} \varepsilon_{yx}$, $S_n = k_0^2 \varepsilon_{xx} - q_y^2 a_n^2$, $A_n = S_n T_n - k_0^4 \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yx}$, $n = 1, 2$.

Уравнение (2) получено решением системы уравнений Максвелла с граничными условиями. Из (2) находятся комплексные корни с положительными действительными частями a_1 и a_2 .

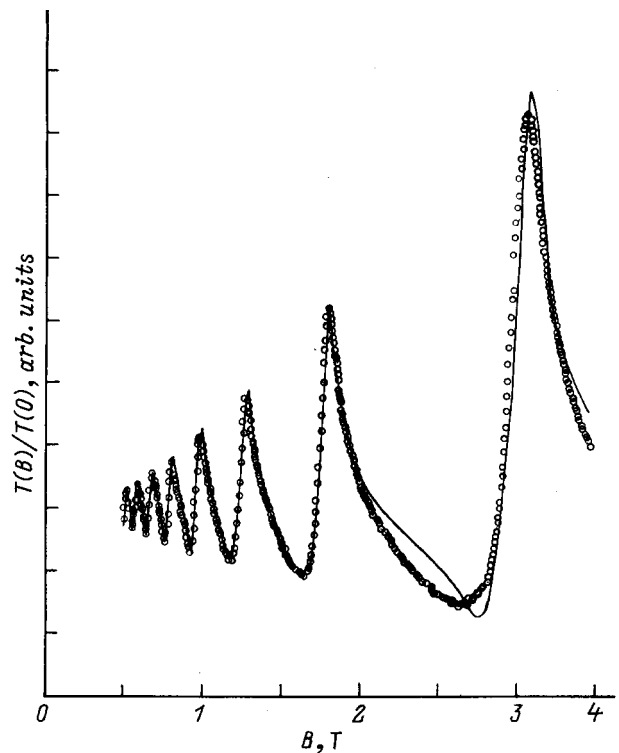


Рис. 1. Пропускание полосковой линии в зависимости от величины магнитного поля B , направленного вдоль бинарной оси C_1 кристаллической решетки висмута. Расстояние между двумя зеркально-симметричными половинками монокристалла висмута $D_z = 25$ мкм; время релаксации, связанное с шириной уровней Ландау, — $\tau = 4 \cdot 10^{-3}$ с; безразмерный волновой вектор в направлении вектора напряженности внешнего магнитного поля — $\xi = \hbar k_z / (\varepsilon m_{\mathbf{B}}^*)^{1/2} = 2$, где \hbar — постоянная Планка, k_z — волновой вектор, параллельный магнитному полю, $\varepsilon = E_g/2$, $m_{\mathbf{B}}^*$ — эффективная масса вдоль вектора напряженности магнитного поля. Сплошная линия — расчет, точки — эксперимент.

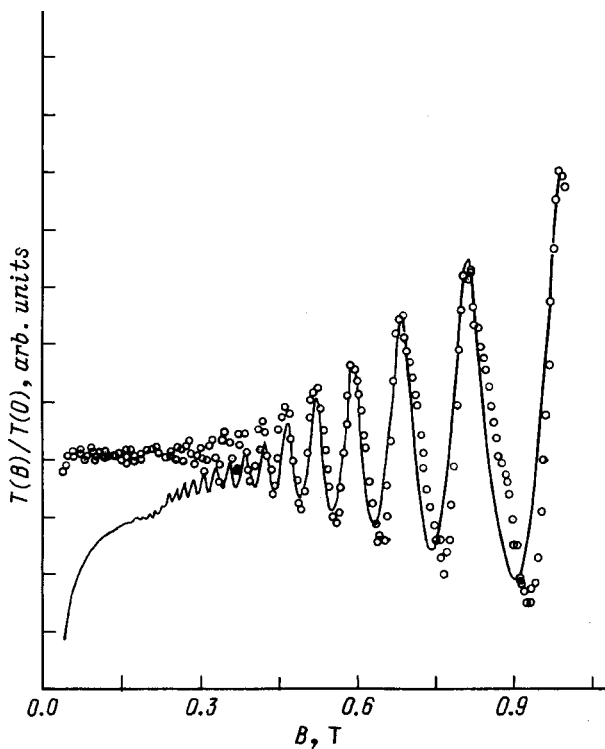


Рис. 2. Пропускание полосковой линии в зависимости от величины магнитного поля \mathbf{B} , направленного вдоль бинарной оси C_1 кристаллической решетки висмута, в интервале полей до 1 Тл. Сплошная линия — расчет, точки — эксперимент. Значения параметров D_z , τ , ξ те же, что и на рис. 1.

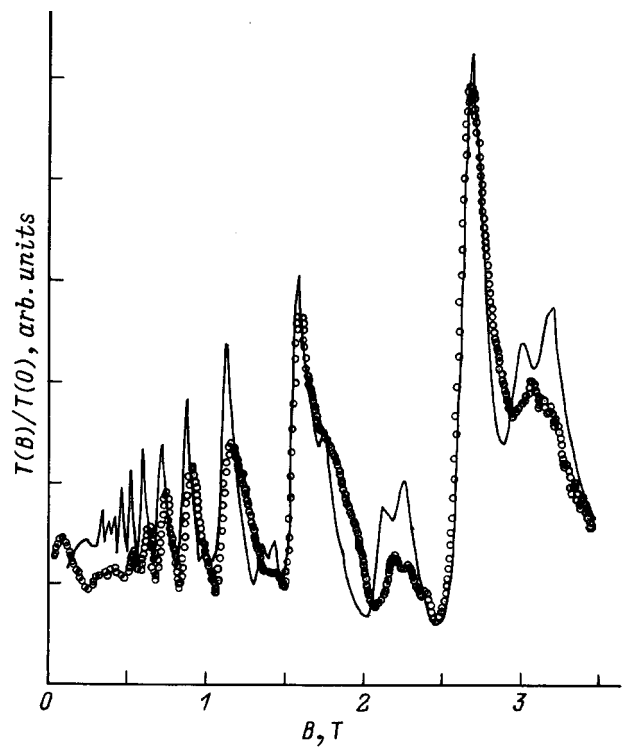


Рис. 3. Пропускание полосковой линии в зависимости от величины магнитного поля \mathbf{B} , направленного под углом в 1° от биссекторной оси в базисной плоскости. Сплошная линия — расчет, точки — эксперимент. Значения параметров D_z , τ , ξ те же, что на рис. 1 и 2.

На рис. 1 и 2 представлены экспериментальные и расчетные значения коэффициента пропускания СПЛ при направлении вектора напряженности магнитного поля параллельно бинарной оси кристаллической решетки висмута. Нормирование спектра осуществлялось по значению интенсивности пропускания в нулевом магнитном поле. В использованной ориентации наблюдалось до 15 осцилляций, соответствующих межзонным переходам на уровнях Ландау с номером $j \geq 1$. Для подгонки расчетной кривой к экспериментальной оказалось необходимым ввести постоянные значения комплексной решеточной проницаемости в направлении, параллельном (ϵ_{yy}) и перпендикулярном ($\epsilon_{xx} = \epsilon_{zz}$) вектору напряженности магнитного поля. Значение ширины запрещенной зоны выбиралось равным $E_g = 15.6$ мэВ [2].

Совпадение экспериментальной и теоретической кривых достигалось при использовании как визуального контроля, так и параметрического автоматизированного метода Нелдера–Мида. Малое увеличение эффективности подгонки формы линии к экспериментальной с применением этого метода объясняется отличием поведения экспериментальной и теоретической кривых на начальном участке магнитных полей. Переходы с уровней $j \geq 19$, не наблюдаемые в эксперименте, вносят существенный вклад в высокочастотную диэлектрическую проницаемость в полях до 0.3 Тл. При увеличении количества расчетных уровней Ландау до $N = 150$ (рис. 1

и 2) модельная кривая поднимается и приближается к экспериментальной.

В рамках рассматриваемой модели оказалось невозможным избавиться от несоответствия поведения кривых в интервале полей от 2 до 2.8 Тл (рис. 1), а также от несколько различного поведения фронтов и спадов магнитооптических осцилляций в полях, меньших 1 Тл. Учет неизбежной в эксперименте разориентации кристалла с направлением вектора напряженности магнитного поля в пределах 0.5° в бинарно-биссекторной плоскости улучшает согласие эксперимента и расчета.

На рис. 3 приведены экспериментальный и расчетный магнитооптические спектры при отклонении магнитного поля на 1° от биссекторного направления в бинарно-биссекторной плоскости. В результате появляются три ряда осцилляций с сопоставимыми амплитудами, что приводит к биениям. В бинарном направлении биения отсутствуют из-за гораздо большего отличия периодов осцилляций, обусловленных легкими и тяжелыми электронами.

Моделирование формы экспериментальной кривой приводит к равным значениям времени релаксации как в бинарном, так и в биссекторном направлениях и различным значениям решеточной диэлектрической проницаемости, что указывает на относительно самостоятельное существование электронных подсистем, связанных с каждым квазиэллипсоидом постоянной энергии.

Таблица 1. Параметры энергетического спектра L -электронов висмута при 80 К, рассчитанные по форме линии в рамках модифицированной модели Бараффа

Компоненты тензора эффективных масс	$m_1 = 0.00174$	$m_2 = 0.1330$	$m_3 = 0.0041$	$m_4 = 0.0147$
Параметр	Ориентация магнитного поля относительно осей кристалла			
	C_1	1° от биссекторной оси в бинарно-биссекторной плоскости	11.5° от тригональной оси в тригонально-биссекторной плоскости	
m_{cA}^*	$1.814 \cdot 10^{-2}$	$2.099 \cdot 10^{-3}$	$6.292 \cdot 10^{-3}$	
E_g/m_{cA}^*	0.86	7.43	2.49	
m_{cB}^*	$2.391 \cdot 10^{-3}$	$4.002 \cdot 10^{-3}$	$1.558 \cdot 10^{-2}$	
E_g/m_{cB}^*	6.52	3.90	1.00	
m_{cC}^*	$2.391 \cdot 10^{-3}$	$4.238 \cdot 10^{-3}$	$1.558 \cdot 10^{-2}$	
E_g/m_{cC}^*	6.52	3.68	1.00	

Примечание. Значения m_{cA}^* , m_{cB}^* , m_{cC}^* циклотронных масс, соответствующих сечениям электронных эллипсоидов A , B , C и компонент тензора эффективных масс m_i , приведены в единицах массы свободного электрона, E_g — в эВ, C_1 — бинарная ось.

Таблица 2. Параметры энергетического спектра L -электронов висмута при 80 К, рассчитанные по положениям максимумов осцилляций в магнитном поле в рамках модели Макклера и Чоя и по работе [3] при 4.2 К

Температура	Q_{11}	Q_{22}	Q_{33}	a_{22}^v	a_{22}^c
80 К	0.429	0.030	0.327	1.1	0.60
4.2 К [3]	0.454	0.034	0.034	1.0	0.63

Параметр	Ориентация магнитного поля относительно осей кристалла		
	C_1	1° от биссекторной оси в бинарно-биссекторной плоскости	11.5° от тригональной оси в тригонально-биссекторной плоскости
E_g/m_{cA}^*	—	7.59	2.45
E_g/m_{cB}^*	6.52	3.93	—
E_g/m_{cC}^*	6.52	3.71	—

Примечание. Значения параметров Q_{ii} и $a_{ii}^{v,c}$ приведены в атомной системе единиц, циклотронные массы m_{cA}^* , m_{cB}^* , m_{cC}^* даны в единицах массы свободного электрона, E_g в эВ, C_1 — бинарная ось.

Результаты моделирования формы линии магнитооптического спектра, когда вектор напряженности магнитного поля располагался в биссекторно-тригональной плоскости под углом 11.5° к тригональной оси, приведены на рис. 4. В соответствии с представлениями о структуре изоэнергетических поверхностей в эксперименте наблюдаются интенсивные осцилляции от одной легкой циклотронной массы и менее интенсивные и раздвоенные от двух более тяжелых циклотронных масс. Раздвоение может быть связано либо с небольшой (порядка 1°) разориентацией кристалла относительно биссекторно-тригональной плоскости, либо с наличием спинового расщепления уровней Ландау. Количественные оценки показывают примерно равные вклады от обоих эффектов. Окончательное заключение возможно сделать из анализа формы линии экспериментальной кривой в рамках модели энергетического спектра Макклера и Чоя, в которой учтена незеркальность зон и введен тензор спиновых параметров валентной зоны и зоны проводимости.

Из описания формы линии получены параметры энергетического спектра L -электронов (табл. 1). Из экспериментальных данных положения по полю максимумов осцилляций в рамках закона дисперсии Макклера и Чоя определены аналогичные и, как видно из табл. 2, близкие по значениям параметры. Сравнение с данными, полученными из осцилляционных эффектов [3] при температуре жидкого гелия (табл. 2), указывает на изменение параметров с температурой.

Благодаря применению методики СПЛ, использованию сравнительно большой энергии кванта и импульсных магнитных полей получены осцилляции, связанные с межзонными оптическими переходами на уровнях Ландау. На основе описания формы линии объяснен ряд наблюдаемых в эксперименте особенностей. Осуществлен расчет зонных параметров висмута при 80 К. Сравнение с известными данными, полученными из осцилляционных эффектов при 4.2 К, указывает на зависимость параметров от температуры. Перечисленные

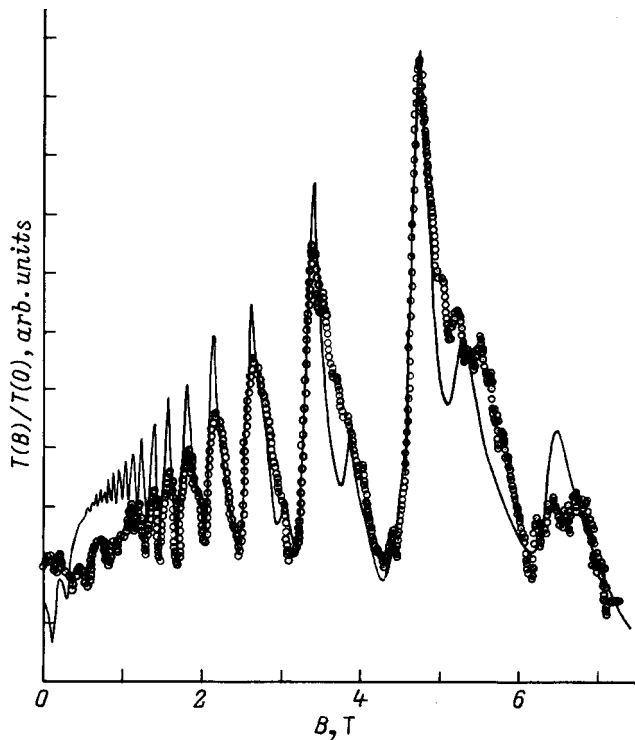


Рис. 4. Пропускание полосковой линии в зависимости от величины магнитного поля \mathbf{B} , направленного под углом в 11.5° от тригональной оси в тригонально-биссекторной плоскости. Сплошная линия — расчет, точки — эксперимент. Значения параметров D_z , τ , ξ те же, что и на рис. 1–3.

выше особенности эксперимента позволяют исследовать не только висмут, но также твердые растворы $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ и узкозонные полупроводники.

Список литературы

- [1] О.В. Конадков, К.Г. Иванов. ФТТ, **32**, 290 (1990).
- [2] M.P. Vecchi, J.R. Pereira, M.S. Dresselhaus. Phys. Rev. B, **14**, 298 (1976).
- [3] Н.Б. Брант, Г.И. Гольшева, Нгуен Мин Тху, М.В. Судаков, К.Н. Каширин, Я.Г. Пономарев. ФНТ, **13**, 1209 (1987).

Редактор Л.В. Шаронова

Line-form of interband magnetooptical absorption in bismuth

S.V. Brovko, A.A. Zaitsev, K.G. Ivanov, O.V. Kondakov
State University of Technology and Design,
191065 St.Petersburg, Russia

Abstract The results of research of bismuth symmetric strip-line transmission are reported. Measurements were made at 80 K and magnetic fields up to $B = 8$ T. The laser light wavelength was $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$. The parameter set of a modified Baraff model was obtained by line-form modeling. Values of McClure and Choi model parameters were found from analysis of magneto-optical oscillation maxima.