

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 .

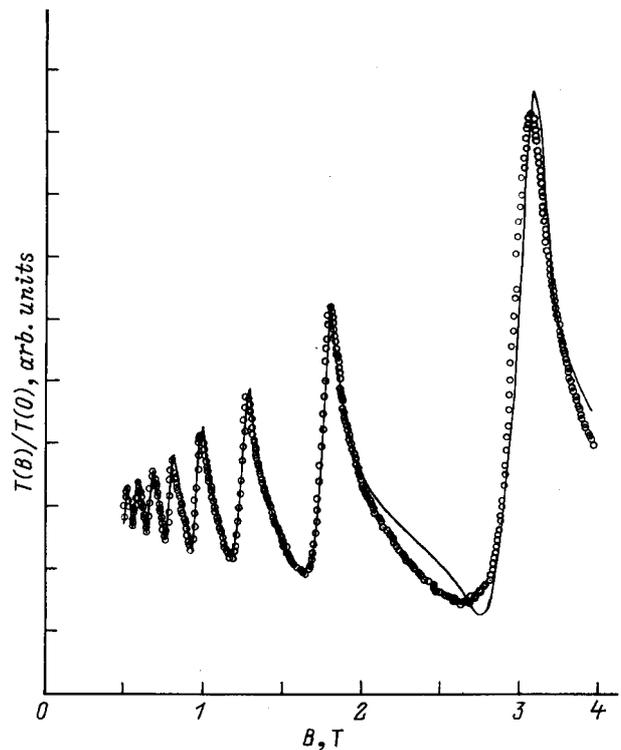


Рис. 1. Пропускание полосковой линии в зависимости от величины магнитного поля B , направленного вдоль бинарной оси C_1 кристаллической решетки висмута. Расстояние между двумя зеркально-симметричными половинками монокристалла висмута $D_z = 25$ мкм; время релаксации, связанное с шириной уровней Ландау, — $\tau = 4 \cdot 10^{-3}$ 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.

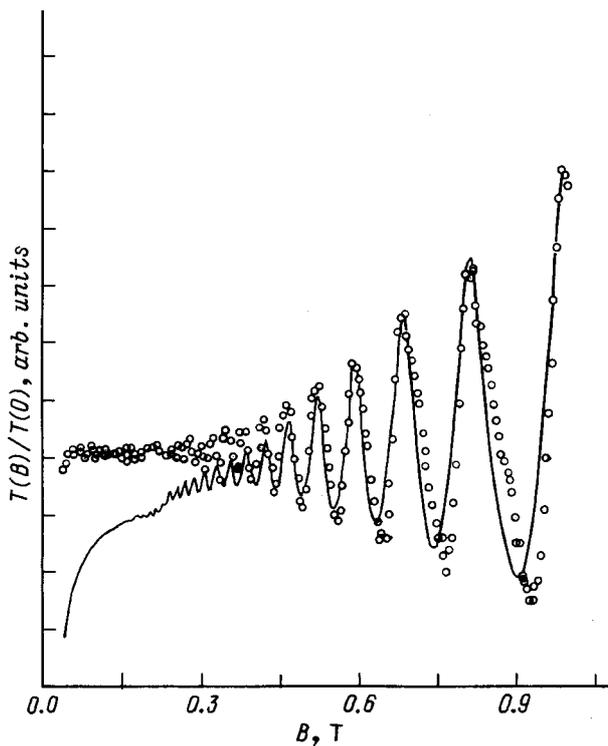


Рис. 2. Пропускание полосковой линии в зависимости от величины магнитного поля \mathbf{B} , направленного вдоль бинарной оси C_1 кристаллической решетки висмута, в интервале полей до 1 Тл. Сплошная линия — расчет, точки — эксперимент. Значения параметров D_z , τ , ξ те же, что и на рис. 1.

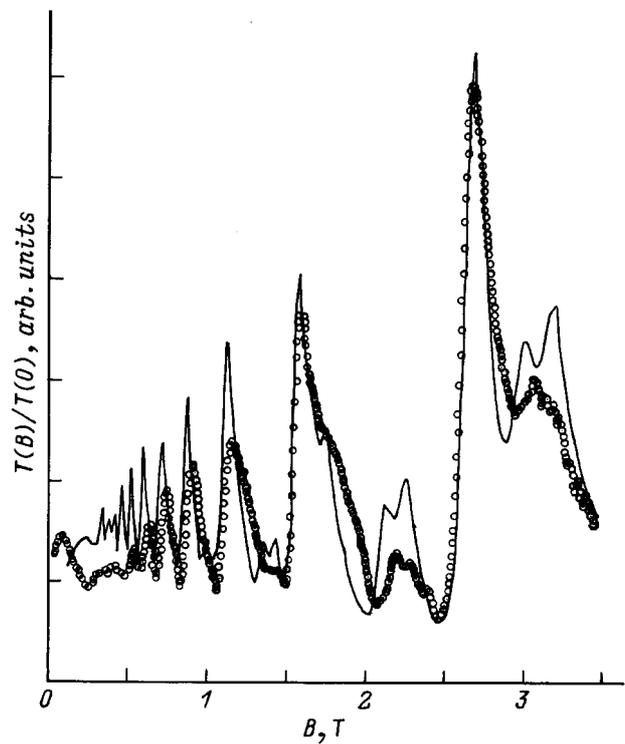


Рис. 3. Пропускание полосковой линии в зависимости от величины магнитного поля \mathbf{B} , направленного под углом в 1° от биссекторной оси в базисной плоскости. Сплошная линия — расчет, точки — эксперимент. Значения параметров D_z , τ , ξ те же, что на рис. 1 и 2.

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 Макклюра 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 Макклюра 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 Макклюра 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

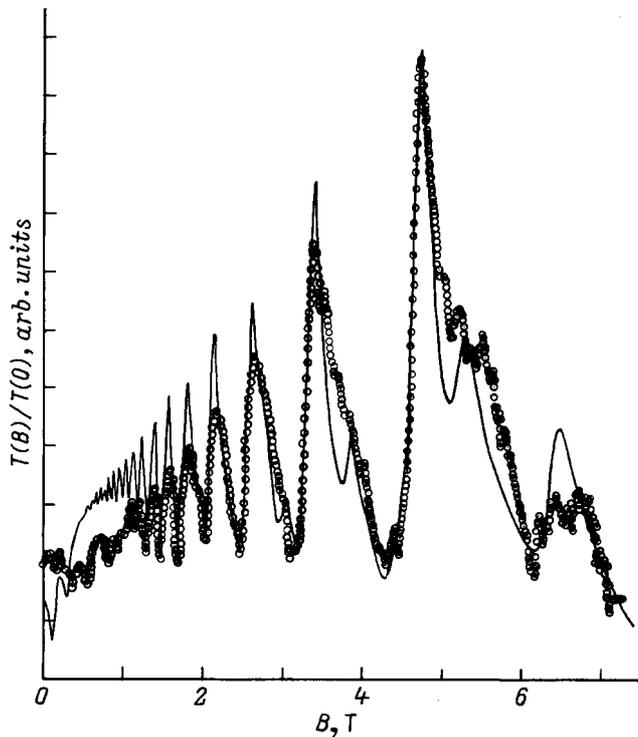


Рис. 4. Пропускание полосковой линии в зависимости от величины магнитного поля \mathbf{B} , направленного под углом в 11.5° от тригональной оси в тригонально-биссекторной плоскости. Сплошная линия — расчет, точки — эксперимент. Значения параметров D_z , τ , ξ те же, что и на рис. 1–3.

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 magneto-optical 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.