

Магнитооптические осцилляции в висмуте при температурах $T \geq 77$ К

© О.В. Кондаков, К.Г. Иванов*

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина,
399700 Елец, Россия

* Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна,
191186 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 18 июля 2002 г. Принята к печати 5 сентября 2002 г.)

Исследованы осцилляции, обусловленные оптическими межзонными переходами электронов в точке L зоны Бриллюэна висмута, в диапазоне температур $T = 77\text{--}280$ К в магнитных полях до $B = 22$ Тл. Показано, что метод моделирования экспериментальной формы линии позволяет не только уточнить зонные параметры исследуемого материала, но и детально выяснить физику явлений, приводящих к особенностям в экспериментальных магнитооптических спектрах.

В работе исследовалось пропускание инфракрасного излучения полосковой линией, представляющей собой две трансляционно-симметричные половинки монокристалла висмута, разделенные зазором порядка длины волны ($\lambda = 10.6$ мкм) [1]. Измерения проводились в импульсных магнитных полях с индукцией до $B = 22$ Тл в температурном интервале $T = 77\text{--}280$ К. Направление магнитного поля совпадало с бинарной осью монокристалла висмута ($\mathbf{B} \parallel c$).

Температура изменялась смонтированным в стенках держателя образца нагревателем и стабилизировалась с точностью до 1.0 К, что позволило избавиться от неконтролируемого изменения температуры и ее градиента в ходе проведения эксперимента (см. [2,3]).

Использование полосковой линии дает возможность в 5–10 раз превысить сигнал, получаемый при однократном отражении от поверхности кристалла [4].

Из рис. 1 видно, что при увеличении температуры уменьшается интенсивность прошедшего сигнала I и число магнитооптических осцилляций, полуширина экстремумов увеличивается и они смещаются в область больших магнитных полей.

Чтобы отразить все особенности экспериментального спектра при его моделировании, было недостаточно учесть только вклад в диэлектрическую проницаемость межзонных и внутризонных переходов на уровнях Ландау [3,4], необходимо было ввести комплексную величину, которая учитывает вклад электронов других зон. В результате удается получить совпадение формы линии экспериментальной и расчетной кривых.

Ранее полная диэлектрическая проницаемость ϵ_l определялась в работах [5,6], но без учета магнитного квантования. Сопоставление с расчетом результатов экспериментов по исследованию магнитоотражения в работах [4–6], так же как и результатов наших экспериментов, приводит к значительному превышению действительной части диэлектрической проницаемости ϵ'_l над мнимой ϵ''_l (табл. 1).

Моделирование формы линии магнитооптического эксперимента, при котором учитывается влияние электронов других зон на функцию диэлектрической прони-

цаемости, приводит к более точным значениям E_g/m_c^* (табл. 2) по сравнению с данными работ [3,4].

Наличие набора ярко выраженных осцилляций в магнитооптическом эксперименте для широкого диапазона температур (рис. 1) позволяет исследовать температурную, ориентационную, полевую и концентрационную зависимости времени релаксации.

В работе [3] показано, что время релаксации с увеличением температуры растет линейно от обратной температуры при 110 К и выше, что объясняется фотонной природой роста частоты столкновений носителей заряда с рассеивающими центрами.

Анализ динамики изменения относительной интенсивности, полуширины на полувысоте и формы магнитооптических осцилляций в полученных нами экспериментальных спектрах, позволяет сделать вывод о том, что интенсивность осцилляций I с увеличением магнитного поля растет быстрее, чем предсказывает теория в предположении постоянного времени релаксации τ (рис. 2).

Объяснить это расхождение теории и эксперимента удастся введением времени релаксации, зависящего от величины магнитного поля. Действительно, рассеяние носителей заряда на фонах может происходить только в том случае, когда имеются свободные конечные состояния. Эксперимент проводится в условиях магнит-

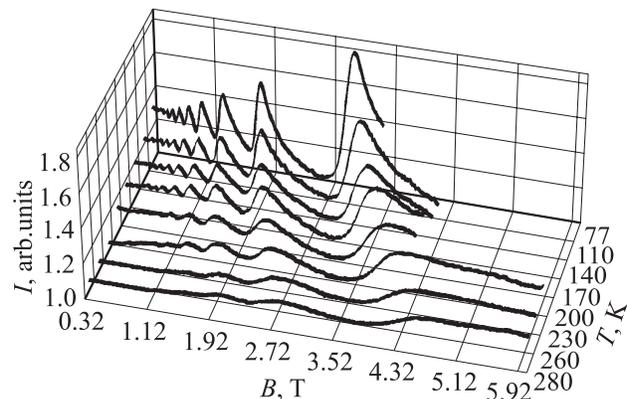


Рис. 1. Зависимость интенсивности магнитооптических осцилляций от величины магнитного поля при разных температурах.

Таблица 1. Значения действительной ϵ'_l и мнимой ϵ''_l частей диэлектрической проницаемости ϵ_l

T, K	ϵ'_l	ϵ''_l
77	60	60
110	60	50
140	63	50
170	63	32
200	63	32
230	63	1
260	63	1
280	63	1

Таблица 2. Значения параметров E_g/m_c^* при $\mathbf{B} \parallel c$ для висмута при различных температурах

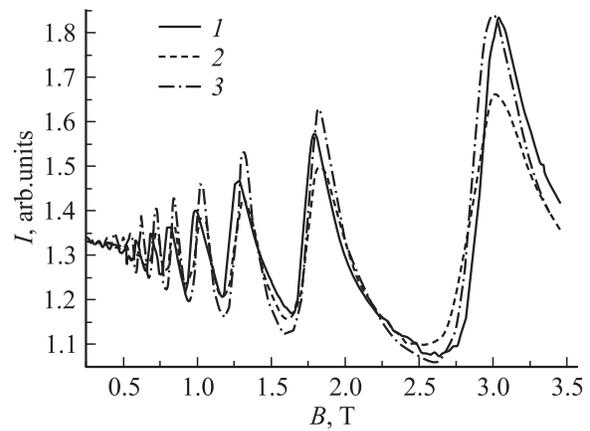
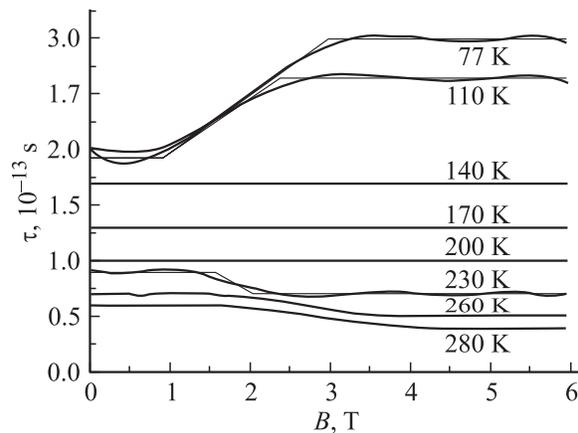
T, K	E_g/m_c^*		
	Моделирование формы линии (данная работа)	Аппроксимация полиномом [3]	Аппроксимация полиномом [4]
77	6.13	6.56	6.68
110	5.83	6.22	6.37
140	5.46	5.90	6.03
170	5.27	5.57	5.65
200	4.97	5.23	5.23
230	4.88	4.88	4.76
260	4.60	4.52	4.24
280	4.38	4.28	3.87

Примечание. E_g — ширина запрещенной зоны в эВ, m_c^* — циклотронная эффективная масса электрона в единицах m_0 (m_0 — масса свободного электрона).

ного квантования, когда свободные состояния в зоне проводимости отделены от занятых энергетическим зазором, равным расстоянию между соседними уровнями Ландау. С увеличением магнитного поля энергетическое расстояние между уровнями Ландау возрастает и при некотором значении магнитного поля, зависящего от величины эффективной электронной циклотронной массы m_c^* , становится вначале равно энергии фонона, а затем превосходит ее. Это приводит к резкому уменьшению вероятности электрон-фононного рассеяния, что и проявляется в увеличении относительной интенсивности (а также в уменьшении полуширины на полувысоте) особенностей магнитопропускания, и интерпретируется как увеличение времени релаксации с ростом магнитного поля. На рис. 3 представлены зависимости времени релаксации от величины магнитного поля для случая, когда вектор индукции магнитного поля параллелен бинарной оси кристаллической решетки висмута. Зависимости, представленные на рис. 3, можно связать с особенностями фононного спектра висмута. Действительно, наличие разделенных значительным энергетическим промежутком акустической и оптической ветвей колебаний, возможность двухфононных процессов —

все это должно приводить к сложному механизму взаимодействия носителей заряда с фононной подсистемой.

При $T = 77 K$ в соответствии с данными [7,8] эффективно возбуждаются только акустические фононы. Характерные энергии акустических фононов лежат в диапазоне 3.7–6.5 мэВ [7,8]. В полях до 1 Тл расстояния между соседними уровнями Ландау не превышают 6.5 мэВ. В полях $B > 1$ Тл оптические переходы носителей заряда происходят на уровнях с главными квантовыми числами $j = 1, 2, 3, 4$, энергетические расстояния между которыми значительно превышают величину энергии акустического фонона, поэтому время релаксации возрастает. Рассеяние теперь определяется либо двухфононными процессами на акустических фононах, либо процессами с участием оптических фононов, характерная температура которых 130 К. И те и другие процессы рассеяния маловероятны при температуре $T = 77 K$.

**Рис. 2.** Зависимости интенсивности магнитооптических осцилляций от величины магнитного поля: 1 — эксперимент; 2 — расчет, $\tau = 2 \cdot 10^{-13}$ с; 3 — расчет, $\tau = 3 \cdot 10^{-13}$ с.**Рис. 3.** Зависимости времени релаксации от магнитного поля, использованные для моделирования формы линии магнитооптического спектра при различных температурах. Тонкая линия — модельная зависимость с двумя значениями времени релаксации (для малых и больших магнитных полей); толстая линия — модельный полином.

При повышении температуры до $T = 110$ К изменяется величина E_g/m_c^* (табл. 1), максимумы немного сдвигаются в сторону больших магнитных полей (рис. 1). Однако более существенным оказывается то, что становятся возможны процессы рассеяния на двух акустических фононах, да и вклад оптических фононов в процессы рассеяния уже значителен. Это приводит к заметному уменьшению времени релаксации в полях $B > 2$ Тл.

При $T = 140$ К, когда достигнута температура Дебая, оптические фононы с энергиями 11–13 мэВ включаются в процессы рассеяния. Это приводит к тому, что спектр во всем диапазоне по магнитному полю описывается единым временем релаксации. Такая ситуация наблюдается до температур $T = 230$ К, когда становится существен вклад двухфононных процессов рассеяния на оптических фононах, реализующихся в достаточно высоких магнитных полях (расстояния между соседними уровнями Ландау сравнимы с удвоенной энергией оптического фонона). При дальнейшем увеличении температуры до $T = 280$ К описанная ситуация сохраняется, и спектры так же характеризуются двумя временами релаксации.

В полях $B = 6$ –22 Тл время релаксации остается постоянной величиной. Отсутствие полевой зависимости времени релаксации в ультраквантовом пределе магнитных полей подтверждает предложенный механизм зависимости $\tau(B)$.

Таким образом, величина циклотронной массы электрона, от которой зависит энергетическое расстояние между соседними уровнями Ландау, и наличие акустических и оптических фононов разной энергии в висмуте определяют зависимость времени релаксации от магнитного поля.

Экспериментальный метод полосковой линии дает возможность наблюдать все особенности взаимодействия излучения с намагниченной плазмой твердого тела в широком температурном интервале. Методика моделирования формы линии позволяет объяснить наблюдаемые особенности поведения параметров, определяющих основные свойства исследуемого материала.

Список литературы

- [1] К.Г. Иванов, О.В. Кондаков. ФТТ, **32** (1), 290 (1990).
- [2] К.Г. Иванов, О.В. Кондаков, В.М. Грабов. *Электрическая релаксация и кинетические эффекты в твердых телах* (Сочи, 1991) с. 3.
- [3] К.Г. Иванов, О.В. Кондаков, С.В. Бровко, А.А. Зайцев. ФТП, **30** (9), 1585 (1996).
- [4] M.P. Vecchi, J.R. Pereira, M.S. Dresselhaus. Phys. Rev. B, **4** (2), 298 (1976).
- [5] В.Г. Голубев, В.Н. Евсеев, К.Г. Иванов, В.И. Иванов-Омский. ЖТФ, **50**, 1992 (1980).
- [6] S. Kanada, M. Nakayama, M. Tsuji. J. Phys. Soc. Japan., **41**, 1954 (1976).
- [7] A.A. Lopez. Phys. Rev., **175** (3), 823 (1968).
- [8] F.E. Macfarlane. J. Phys. Chem. Sol., Suppl., **32** (1), 989 (1971).

Редактор Л.В. Шаронова

Magneto-optical oscillations in bismuth at $T \geq 77$ K

O.V. Kondakov, K.G. Ivanov*

Elets State University,
399700 Elets, Russia

* St. Petersburg State University
of Technologies and Design,
191186 St. Petersburg, Russia

Abstract The oscillations, conditioned by optical interband transitions of electrons in a point L of the Brillouin zone of bismuth, are investigated in the temperature range $T = 77$ –280 K and in magnetic fields up to $B_{\max} = 22$ T. The method of the experimental line-shape simulating allows not only to update band parameters of the material investigated, but also to elucidate in detail physics of the phenomena bound with features of magneto-optical experimental spectra.