

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ВИСМУТЕ В УЛЬТРАКВАНТОВОМ ПРЕДЕЛЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Кондаков О. В.,

д.ф.-м.н., проф. университета Додома, Танзания,

Киселёв Е. Г.,

ассистент кафедры физики ЕГУ им. И.А. Бунина

Аннотация. Представлены результаты моделирования формы экспериментальной линии магнитооптического эксперимента в ультраквантовом пределе магнитного поля. Учет в математической модели зависимости энергии уровней Ландау с малыми значениями квантовых чисел от магнитного поля и волнового вектора позволило классифицировать наблюдаемые магнитооптические особенности, определить вклад каждого электронного перехода, появление седловой точки в энергетическом спектре сплавов висмут-сурьма и обосновать наличие наряду с разрешёнными значительного вклада запрещённых переходов в ультраквантовом пределе магнитного поля.

Ключевые слова: Уровни Ландау, ультраквантовый предел, сплавы висмут-сурьма, магнитооптические спектры.

MODELING OF THE MAGNETOOPTICAL PHENOMENA IN BISMUTH IN AN ULTRAQUANTUM LIMIT OF A MAGNETIC FIELD

Kondakov O. V.,

d. of sc., prof. of the University of Dodoma, Tanzania,

Kiselev E. G.,

assistant of the physical department of EGU

Abstract. Results of modeling of the form of an experimental line of magneto optical experiment in extreme quantum limit of a magnetic field are presented. The account in mathematical model of dependence of energy of levels of Landau with small values of quantum numbers from a magnetic field and a wave vector has allowed to classify observable magneto optical features, to define the contribution of each electronic transition, occurrence saddle points in a power spectrum of alloys bismuth-antimony and to prove presence along with resolved the considerable contribution of the forbidden transitions to extreme quantum limit of a magnetic field.

Keywords: Levels of Landau, extreme quantum limit, alloys bismuth-antimony, magneto optical spectra.

Особенностью данной работы является математическое моделирование экспериментальных данных, которые имеют менее выраженную резонансную структуру (рис. 2), по сравнению с предыдущими исследованиями [1-2]. Это приводит к большему произволу в интерпретации экспериментальных данных и тем самым снижает ценность этих экспериментальных исследований и достоверность сделанных выводов.

Моделирование формы зависимости интенсивности полезного сигнала от величины магнитного поля представляет собой сочетание аналитического и численного методов решения поставленной задачи. Аналитическое решение, там, где возможно, позволяет определить функциональные зависимости и структуру решений, а численный расчёт найти параметры модели, соответствующие результатам эксперимента.

Физическое содержание рассматриваемого эффекта требует проводить математическое моделирование с применением математического аппарата, как классической, так и квантовой физики. Электромагнитный процесс в волноводе, возможно, рассматривать в рамках системы уравнений Максвелла, то есть системы дифференциальных уравнений в частных производных. Взаимодействие же электромагнитного излучения с веществом требует включения математических методов квантовой теории возмущений. Следующим весьма интересным моментом в исследовании представляемой модели является учёт анизотропии материала стенок волновода введением тензорных параметров модели. Это приводит к резкому усложнению решаемой аналитической и численной математической задачи как в части реализуемой средствами дифференциальных уравнений в частных производных,

так и в части описываемой кантовомеханической теорией возмущений. С другой стороны, такой подход позволяет реализовать общий метод решения, пригодный для любого анизотропного материала. Всё это определяет актуальность математического моделирования магнитооптического эффекта в планарном волноводе из анизотропного монокристалла висмута и кристаллов висмут-сурьма, помещённых в квантующее магнитное поле.

разом, взаимодействие электромагнитной волны со стенками волновода учитывается средствами макроскопической электродинамики, т.е. классически. Решение задачи описания свойств среды требует существенно квантового рассмотрения. Поэтому в целом моделирование состоит из классической и квантовой части, и, в целом, модель можно рассматривать либо как полуклассическую, либо как полуквантовую.

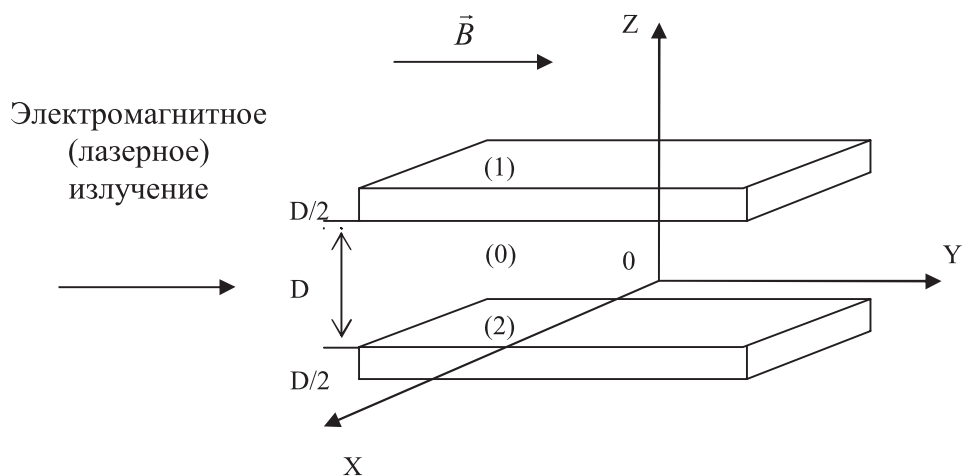


Рис. 1. Взаимное расположение вектора индукции магнитного поля, волнового вектора электромагнитного излучения и исследуемого монокристалла относительно выбранной системы координат.

Целью настоящего исследования являлось создание математической модели магнитооптического эксперимента в ультраквантовом пределе магнитного поля, пригодной для анализа данных, полученных при исследовании кристаллов висмут-сурьма в широком диапазоне концентраций сурьмы. Проведение численного эксперимента по моделированию магнитооптических спектров для проверки эффективности, изучения свойств и особенностей модифицированной модели Бараффа и получения научно значимых достоверных выводов о применимости этой модели для сплавов висмут-сурьма.

Рассматриваемая задача представляет собой решение уравнений Максвелла для особого вида волн – поверхностных волн. Наличие анизотропии резко увеличивает громоздкость вычислений. Таким об-

разом, экспериментально измеряется энергия излучения, прошедшего планарный волновод (рис. 1), то необходимо тем или иным образом рассчитать интенсивность электромагнитной волны на выходе этого волновода. Общий случай требует рассмотрения вещества с тензором диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}$, все девять компонент, которого отличны от нуля. Таким образом, на вид тензора диэлектрической проницаемости не накладываются дополнительные ограничения.

Рассчитывая энергию волны, прошедшую через планарный волновод, как среднее значение y – компоненты вектора Умова – Пойтинга (рис. 1) проинтегрированное по поперечному сечению волновода и определяя коэффициент пропускания планарного

волновода как отношение энергии $W(B)$, переносимой волной при некотором значении магнитного поля B , и энергии $W(0)$, переносимой волной при $B = 0$, получаем выражение для $T(B)$:

$$T(B) = 1,07 \times \exp\{2L[q_y''(B) - q_y''(0)]\}, \quad (1)$$

где q_y – y компонента волнового вектора.

Моделирование диэлектрической проницаемости использует методы квантовой механики. Свойства среды учитывались компонентами тензора диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}$:

$$\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon}_l + \frac{\hat{\sigma}}{i \cdot \omega \cdot \epsilon_0}, \quad (2)$$

где ω – циклическая частота, падающего электромагнитного излучения, ϵ_l – диэлектрическая

проницаемость, обусловленная всеми процессами, за исключением межзонных и внутризонных переходов на уровнях Ландау в точке L зоны Бриллюэна, ϵ_0 – электрическая постоянная, $\hat{\sigma}$ – комплексная удельная электропроводность.

Экспериментальные результаты демонстрируют такое разнообразие структур в ультраквантовом пределе магнитного поля, что для объяснения этого приходится рассматривать модель взаимодействующих между собой уровней Ландау валентной зоны и зоны проводимости с квантовыми числами $j=0$. Это даёт возможность ввести дополнительные степени свободы для осуществления возможности подгонки модельных спектров к экспериментальным. В нашем рассмотрении мы ограничились рассмотрением второго порядка теории возмущений. В результате величины матричных элементов оператора скорости имеют сложную и ярко выраженную зависимость от магнитного поля. Учет в математической модели

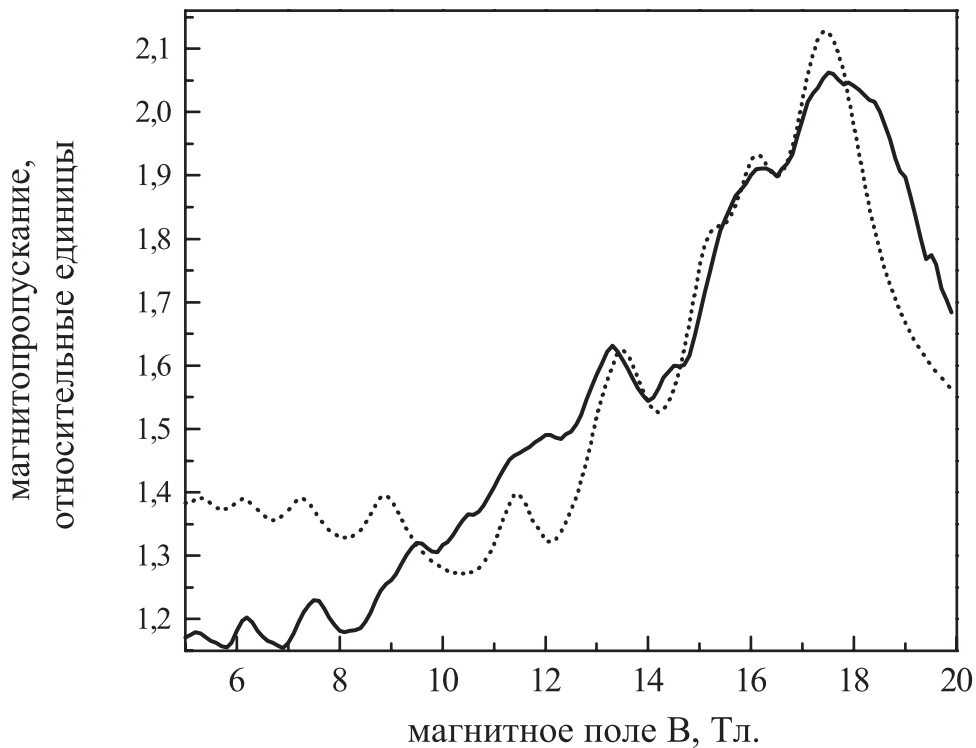


Рис. 2. Зависимость интенсивности прошедшего через полосковую линию излучения от величины магнитного поля, когда $\vec{B} \parallel C_1$. Сплошная линия — эксперимент, пунктирная линия — расчёт.

смешанного характера волновых функций при малых значениях квантовых чисел позволяет в деталях описать форму зависимости интенсивности излучения прошедшего через планарный волновод от величины магнитного поля для полуметалла висмута и сплавов висмут-сурьма.

Численный расчёт зависимости коэффициента пропускания планарного волновода от величины магнитного поля в ультраквантовом пределе магнитного поля для трёх взаимно перпендикулярных ориентаций магнитного поля относительно кристаллической решётки висмута установил адекватность математической модели при сравнении с ранее полученными результатами для параметров энергетического спектра носителей заряда. Зависимость матричных элементов оператора скорости от магнитного поля аналитически объясняется зависимостью энергетического положения уровней Ландау от магнитного поля. Учет в математической модели зависимости энергии уровней Ландау с малыми значениями кван-

товых чисел от магнитного поля и волнового вектора позволило классифицировать наблюдаемые магнитооптические особенности, определить вклад каждого электронного перехода и появление седловой точки в энергетическом спектре сплавов висмут-сурьма.

Оказалось, что учет в математической модели правил отбора для переходов с участием уровней Ландау с $j=0$ при смешанном характере волновых функций позволил определить вклад каждого электронного перехода в структуру магнитооптических спектров висмута и сплавов висмут-сурьма и обосновать наличие наряду с разрешёнными значительного вклада запрещённых переходов в ультраквантовом пределе магнитного поля.

Наконец, в результате математического моделирования магнитооптического эффекта получены новые физические результаты об электронном спектре, тензоре эффективных масс и закономерностях процессов релаксации носителей заряда в кристаллах висмута и сплавах висмут-сурьма.

Список литературы

1. Гладких О.Б., Кондаков О.В., Токарев В.В. Моделирование оптических переходов электронов в сплавах висмут-сурьма в присутствии квантующего магнитного поля // *Материалы V Международной конференции «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов»*. – Воронеж. – 2003. – С. 234–236.
2. Гладких О.Б., Кондаков О.В. Моделирование квантовых процессов рассеяния в условиях магнитного квантования в висмуте // *Материалы второй международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» 07-09 февраля 2006 г.* Санкт-Петербург, Россия.