

На правах рукописи

**Караштин Евгений Анатольевич**

**Оптические свойства магнитных систем  
с неколлинеарным распределением  
намагниченности**

01.04.07 — физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород — 2013

**Работа выполнена** в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Фраерман Андрей Александрович,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики  
микроструктур Российской академии наук,  
заместитель директора

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Белотелов Владимир Игоревич,  
Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова, физический факультет, доцент

доктор физико-математических наук  
Жаров Александр Александрович,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики  
микроструктур Российской академии наук,  
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт общей физики  
им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Защита состоится «14» ноября 2013 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук по адресу: 607680, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики микроструктур Российской академии наук.

Автореферат разослан «14» октября 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Гайкович К.П.

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы исследования

Исследование транспортных и оптических свойств систем, имеющих магнитную структуру, является в настоящее время одним из активно развивающихся направлений физики твердого тела. Эта активность обусловлена перспективностью использования магнитных систем для создания новых приборов электроники, имеющих более высокое быстродействие, повышенную надежность (радиационная стойкость, износостойкость при многократной перезаписи) или обладающих меньшим энергопотреблением. Возможность создания новых приборов основана на связи орбитальных и спиновых степеней свободы носителей тока, ответственных за транспортные и оптические свойства в магнитных материалах. Такая связь может осуществляться посредством двух механизмов: обменного и спин-орбитального взаимодействия. Спин-орбитальное взаимодействие является релятивистским эффектом и довольно хорошо изучено [1]. Благодаря этому взаимодействию возникают, в частности, эффекты Фарадея и Керра [2]. Природа обменного взаимодействия — кулоновское взаимодействие. Поэтому оно доминирует над спин-орбитальным в большинстве магнитных материалов. В частности, именно обменное взаимодействие приводит к возникновению ферромагнитного состояния. Эффект гигантского магнитосопротивления и магниторефрактивный эффект, наблюдаемые в многослойных ферромагнитных структурах [3–5], также возникают благодаря обменному взаимодействию. Как правило, эффекты, связанные с обменным и спин-орбитальным взаимодействием, изучаются в случае однородной или коллинеарной неоднородной магнитной структуры.

В настоящее время известно большое количество примеров естественных и искусственных структур, в которых может наблюдаться неоднородное и, в частности, неколлинеарное и некомпланарное магнитное упорядочение. Среди естественных материалов можно отметить «тяжелые» редкоземельные элементы (Er, Dy, Ho, Tb), демонстрирующие неоднородную магнитную структуру в определенном диапазоне температур [6], а также соединения (MnSi, FeGe), обладающие интересными магнитными свойствами. Искусственные структуры интересны тем, что в них можно достичь существенно меньшего масштаба пространственного изменения магнитного момента, чем в естественных средах. При этом неоднородное распределение намагниченности наблюдается при комнатной температуре в отличие, например, от редкоземельных металлов. К таким структурам можно отнести гранулированные магнитные пленки (например, Fe-Cr [5]), многослойные магнитные структуры, в которых может реализовываться

как неколлинеарное [4, 5], так и некопланарное [7] магнитное упорядочение, а также ферромагнитные наночастицы, в которых наблюдается неоднородное (например, вихревое) распределение намагниченности. Недавно было показано, что можно создать массив частиц с одинаковым направлением завихренности магнитных вихрей с помощью однородного внешнего магнитного поля, если частицы имеют, например, треугольную форму [8]. Оптические свойства таких объектов ранее не изучались.

Среды с неколлинеарным магнитным упорядочением имеют ряд особенностей, отличающих их от сред с коллинеарным распределением намагниченности. Для того, чтобы понять их суть, ограничимся s-d моделью Вонсовского [9], в которой считается, что электроны проводимости взаимодействуют обменным образом с локализованными электронами, обладающими собственным магнитным моментом и определяющими магнитную структуру материала. В рамках указанного приближения нетрудно показать, что спиновая и координатная части волновой функции электронов проводимости, ответственных за транспортные и оптические свойства указанных сред, в случае неколлинеарного распределения намагниченности не могут быть отделены друг от друга. Если же магнитная структура среды некопланарна, то уравнение Шредингера для электронов проводимости, кроме того, перестает быть симметричным относительно операции обращения времени [10], что приводит к асимметрии их спектра [11, 12]. Перечисленные особенности сред с неколлинеарным и некопланарным распределением магнитного момента могут проявляться в их необычных оптических свойствах. Исследованию оптических свойств в указанных средах посвящена данная работа. Рассмотрены как естественные, так и искусственные среды.

## **Степень разработанности темы исследования**

Неколлинеарные системы в настоящее время привлекают внимание исследователей. В частности, активно изучается воздействие носителей тока, обладающих спином, на магнитный момент среды. Эффект перемагничивания таких сред спин-поляризованным электрическим током [13] может найти применение в качестве механизма записи в новом типе магнитной памяти. Также обсуждается возможность создания генераторов СВЧ-излучения, основанных на этом эффекте. Однако здесь есть ряд нерешенных проблем, таких, например, как слишком высокая плотность тока, необходимая для перемагничивания структур.

Предметом же настоящей работы является воздействие магнитной структуры среды на носители тока, которые определяют ее оптические свойства. Такое воздействие, проявляющееся в транспортных свойствах магнитных систем, давно исследуется. Например, в многослойных магнитных структурах обнару-

жен и хорошо изучен эффект гигантского магнитосопротивления (ГМС) [3, 4]. Суть его заключается в том, что сопротивление многослойных структур магнитный металл / немагнитный металл зависит от взаимной ориентации магнитных моментов ферромагнитных слоев. Магнитные моменты слоев здесь могут быть ориентированы коллинеарно (ферромагнитное или антиферромагнитное упорядочение), а также неколлинеарно. Среды, обладающие некопланарной магнитной структурой, в последнее время также привлекают внимание исследователей. Экспериментально обнаружен и описан теоретически «топологический» эффект Холла, возникающий только в некопланарных магнитных системах [14, 15]. Недавно теоретически изучались эффект выпрямления электрического тока (диодный эффект) [11] и фотогальванический эффект [12], также возникающие только в системах с некопланарным распределением намагниченности, но являющиеся более слабыми по сравнению с «топологическим» эффектом Холла.

Оптические свойства магнитных систем также привлекают внимание исследователей. В инфракрасном диапазоне частот обнаружен высокочастотный аналог эффекта ГМС — магниторефрактивный эффект (МРЭ). Большое количество экспериментальных исследований подтверждает наличие корреляции между МРЭ и эффектом ГМС [5]. Однако, как правило, изучается зависимость этого эффекта от частоты в коллинеарном случае. Кроме того, зависимость МРЭ от частоты и магнитной структуры образца недостаточно хорошо изучена в области высоких частот, где межзонные переходы начинают играть важную роль (вблизи частот спинового расщепления, т.е. оптический диапазон для Со и Fe и ближний ИК-диапазон для Ni). Оптические исследования систем с неколлинеарным магнитным упорядочением носят эпизодический характер. Например, были проведены экспериментальные исследования высокочастотной проводимости гольмия, вычисляемой по коэффициенту отражения от него света, в широком диапазоне частот [16]. Однако результаты этих исследований не получили должного теоретического обоснования. Таким образом, оптические свойства естественных и искусственных сред с неколлинеарным и некопланарным распределением магнитного момента в настоящее время изучены недостаточно.

## **Цель и задачи работы**

Целью данной работы является изучение оптических свойств естественных и искусственных ферромагнитных систем, обладающих неоднородным (неколлинеарным или некопланарным) распределением намагниченности. Особенности оптических свойств таких сред проявляются в появлении дополнительных слагаемых в тензоре высокочастотной диэлектрической проницаемости (проводимости). Кроме того, необычными свойствами обладает и взаимодей-

ствие электромагнитного излучения с веществом, тензор диэлектрической проницаемости которого является локально гиротропным (не имеет дополнительных вкладов), но при этом зависит от координат в силу зависимости от координат вектора намагниченности среды.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Расчет компоненты высокочастотной проводимости сред с неколлинеарной магнитной структурой (геликоидальное распределение намагниченности, плоско-слоистая магнитная структура), связанной с переходами электронов из одной спиновой подзоны в другую под действием высокочастотного электрического поля.
2. Исследование особенностей пространственной дисперсии в средах с некопланарной магнитной структурой. Расчет высокочастотной диэлектрической проницаемости среды с геликоидальным распределением намагниченности.
3. Расчет интенсивности рассеяния электромагнитной волны вихревой магнитной частицей и сопоставление результатов с экспериментальными данными.

## **Научная новизна**

1. Впервые рассчитана компонента высокочастотной проводимости сред с неколлинеарной магнитной структурой, связанная с переходами электронов из одной спиновой подзоны в другую под действием высокочастотного электрического поля. Показано, в частности, что существование такого механизма качественно объясняет экспериментальные зависимости от частоты и внешнего магнитного поля коэффициента отражения электромагнитной волны от объемного образца гольмия.
2. Теоретически исследованы особенности пространственной дисперсии высокочастотной диэлектрической проницаемости среды с некопланарной геликоидальной магнитной структурой. Показано, что возникает линейный по волновому вектору распространяющейся волны вклад, обусловленный двумя механизмами: асимметрией спектра электронов проводимости и асимметрией рассеяния их на немагнитных примесях.
3. Показано, что интенсивность рассеяния электромагнитной волны вихревой магнитной частицей содержит вклад, линейный по тороидному моменту, характеризующему указанное распределение намагниченности. Механизмом его возникновения является возбуждение линейных по намагниченно-

сти компонент наведенных электрических и магнитных моментов частицы. Рассмотренная теоретическая задача дает качественное объяснение экспериментальных результатов.

## **Теоретическая и практическая значимость**

Полученные в диссертации результаты расширяют понимание особенностей взаимодействия электромагнитного излучения с пространственно-неоднородными ферромагнетиками. Перспектива практического применения результатов данной работы лежит в области создания новых приборов спиновой электроники, предназначенных для работы с электромагнитным излучением. Также результаты работы могут в перспективе быть применены для изучения некоторых особенностей распределения намагниченности ферромагнитных материалов и искусственных структур, что открывает новые возможности спектроскопии пространственно неоднородных ферромагнетиков.

## **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных задач были применены стандартные теоретические подходы:

- феноменологический подход, основанный на симметрии физических величин по отношению к операциям обращения времени и пространственной инверсии;
- формула Кубо и ее феноменологическое обобщение, учитывающее наличие немагнитных примесей в среде;
- кинетическое уравнение Больцмана;
- Борновское приближение для уравнений Максвелла;
- решение уравнений Максвелла в рамках теории возмущений при малых размерах рассеивающего центра по сравнению с длиной рассеиваемой волны.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. В среде с неколлинеарной магнитной структурой возникает дополнительная компонента высокочастотной проводимости, связанная с переходами электронов из одной спиновой подзоны в другую под действием электрического

поля волны. Максимум проводимости, связанный с этим механизмом, наблюдается при частотах, соответствующих спиновому расщеплению зоны проводимости.

2. В среде, обладающей некопланарной магнитной структурой, возникает линейная по волновому вектору распространяющейся электромагнитной волны поправка к тензору диэлектрической проницаемости. Эта поправка обусловлена двумя механизмами: асимметрией спектра электронов проводимости и асимметрией рассеяния их на немагнитных примесях. В геликоидальной магнитной структуре эти механизмы вызывают появление поправки к диагональной компоненте тензора диэлектрической проницаемости, что приводит к изменению показателя преломления среды при обращении волнового вектора электромагнитной волны.
3. Рассеяние электромагнитной волны частицей, обладающей вихревым распределением намагниченности, а также двумерной дифракционной решеткой треугольных магнитных частиц, имеющих вихревую магнитную структуру, неважно. Этот эффект обусловлен возникновением линейных по намагниченности компонент наведенных электрических и магнитных моментов частицы.

## **Степень достоверности и апробация результатов**

Результаты работы опубликованы в отечественных и зарубежных журналах: Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики [A1, A2]; Physical Review B [A3, A4].

Также результаты докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях: XIII-XVII международные симпозиумы «Нанофизика и наноэлектроника» (Н.Новгород, 2009-2012 годы); международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Москва, 2009 год); International Symposium Spin Waves 2011 (St. Petersburg); Moscow international symposium on magnetism, 2011.

Кроме того, по результатам данной работы были проведены семинары в следующих организациях: Институт физики микроструктур РАН; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

## **Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы основные цели и задачи, аргументированы научная новизна исследований и

практическая значимость полученных результатов, а также приведен обзор литературы по теме диссертации.

**Глава 1** посвящена вычислению высокочастотной проводимости систем с неколлинеарным распределением намагниченности. Такие системы интересны в связи с тем, что спиновая и координатная части волновых функций электронов проводимости в них не отделяются друг от друга с учетом только обменного взаимодействия между ними и локализованными магнитными моментами. Это приводит к возможности появления дополнительного вклада в высокочастотную проводимость указанных структур, связанного с переходами между спиновыми подзонами, который отсутствует в электродипольном приближении в случае, когда распределение намагниченности коллинеарно, и поэтому легко может быть выделен экспериментально.

В **разделе 1.1** описывается используемый метод расчета высокочастотной проводимости, основанный на s-d модели Вонсовского [9] и феноменологическом обобщении формулы Кубо на случай присутствия столкновений электронов с немагнитными примесями.

В **разделе 1.2** приведен расчет поправки к высокочастотной проводимости среды, распределение намагниченности в которой имеет геликоидальную структуру. Показано, что такая поправка зависит от поляризации электромагнитной волны: в случае, когда электрическое поле волны направлено вдоль оси геликоида, появляется поправка к диагональной компоненте проводимости, связанная с переходами между спиновыми подзонами. Поскольку данная поправка связана с неоднородностью магнитной структуры в среде, она исчезает при приложении сильного внешнего магнитного поля.

Геликоидальным магнитным моментом обладает гольмий — при температуре ниже температуры Нееля, равной 133К, в нем наблюдается компланарное спиральное распределение намагниченности, а при температуре меньше температуры Кюри, равной 20К,— некопланарное [6]. Высокочастотная проводимость этого материала измерялась экспериментально [16] посредством измерения коэффициента отражения излучения от его границы и последующего расчета с использованием соотношения Крамерса-Кронига. При этом в случае, когда излучение поляризовано таким образом, что электрическое поле направлено вдоль оси спирали, наблюдается увеличение проводимости. Было проведено сравнение построенной теории с известными экспериментальными данными для гольмия (см. рис. 1).

**Раздел 1.3** посвящен исследованию дополнительного вклада в высокочастотную проводимость искусственной многослойной магнитной структуры, обусловленного наличием в ней неколлинеарного распределения намагниченности. Рассмотрена периодическая структура, период ее равен двум магнитным слоям,

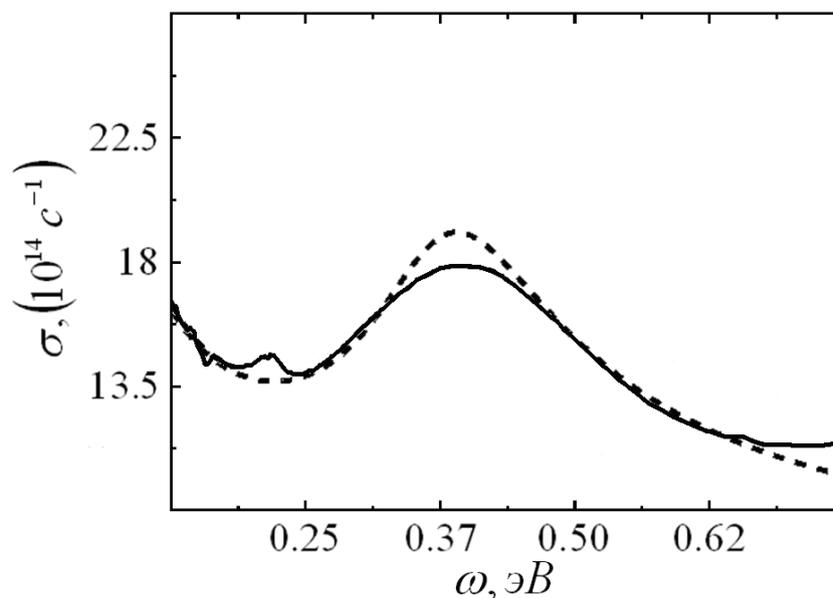


Рис. 1: Проводимость гольмия в зависимости от частоты при температуре 5К. Электрическое поле волны поляризовано вдоль оси геликоида. Сплошная линия — эксперимент [16], штриховая — результат расчета.

которые разделены металлическими или диэлектрическими прослойками. Изучена зависимость вклада в проводимость от типа прослоек и взаимной ориентации намагниченностей слоев в структуре. Показано, что при неколлинеарном распределении намагниченности на фоне пиков зависимости проводимости от частоты электромагнитной волны, связанных с переходами между минизонами, возникающими из-за периодичности системы, без изменения спинового состояния, появляется дополнительный пик, связанный с переходами электронов с изменением спинового состояния. В отличие от пиков, возникающих из-за периодичности решетки, положение данного пика не зависит от наличия или отсутствия спин-независимого потенциала, создаваемого прослойками между магнитными слоями, и определяется только обменной константой и средней намагниченностью в системе. Рассмотрена возможность экспериментального наблюдения дополнительного вклада в проводимость, связанного с неколлинеарностью магнитной структуры в системе. В частности, подбирая толщину и материал немагнитных прослоек (и соответственно, параметры спин-независимого потенциала), можно добиться разделения пиков, связанных с различными механизмами поглощения, по частоте.

В главе 2 рассмотрена возможность возникновения эффекта, аналогичного известному эффекту оптической активности [17], в среде с некопланарной магнитной структурой, в которой симметрия по отношению к операции инверсии нарушается только за счет неоднородного распределения намагниченности.

В разделе 2.1 изложены симметричные соображения, позволяющие понять, что в среде с неоднородным распределением намагниченности возможно возникновение данного явления, и установить необходимые для возникновения явления свойства этого распределения. Показано, что диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{ij}$  может содержать вклад, вызванный пространственной дисперсией, вида

$$\alpha_{ijklsmn} k_l \left( \mathbf{M} \left[ \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x_s} \times \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial x_m \partial x_n} \right] \right),$$

который связан с наличием обменного взаимодействия в среде. Здесь  $k_l$  — декартовы компоненты волнового вектора электромагнитной волны,  $\mathbf{M}$  — вектор намагниченности среды,  $x_{s,m,n}$  — декартовы координаты, по повторяющимся индексам предполагается суммирование. Нетрудно видеть, что такой вклад обращается в ноль для компланарного распределения намагниченности.

Далее приведена простая микроскопическая модель, основанная на классических уравнениях движения заряженной частицы (электрона) с собственным магнитным моментом в неоднородном магнитном поле, впервые предложенная в [14]. Такая модель показывает, что возникновение линейной по волновому вектору поправки к диэлектрической проницаемости обусловлено, с одной стороны, наличием поправки к эффективной массе электрона, зависящей от направления его движения, и, с другой стороны, сдвигом частоты внешнего поля в системе координат, связанной с электроном (эффектом Доплера). Однако эта модель не позволяет провести корректный учет рассеяния электронов на примесях, которое является, вообще говоря, асимметричным [11, 12].

В разделе 2.2 приведен квантово-механический расчет поправок к диэлектрической проницаемости для случая некомпланарного геликоидального распределения намагниченности, основанный на решении уравнения Шредингера для электронов проводимости в s-d модели Вонсовского и последующем решении уравнения Больцмана для нахождения функции распределения электронов проводимости при воздействии на среду электрического поля электромагнитной волны. Дополнительный вклад в диэлектрическую проницаемость имеет вид

$$\epsilon_{zz}^{OA} = -\epsilon_0^2 \left( \alpha_1 \left( \frac{J}{\epsilon_f} \right)^2 + \alpha_2 \frac{1}{i(\omega - i/\tau)\tau} \right) \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i/\tau)^2} m_z (1 - m_z^2) \beta^3 v_f k_z,$$

здесь декартова ось  $z$  выбрана вдоль оси геликоида,  $m_z$  — компонента намагниченности, нормированной на единицу, вдоль оси геликоида,  $J$  — обменная константа,  $\omega$  — частота электромагнитной волны,  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты порядка единицы,  $\epsilon_0$  — часть диэлектрической проницаемости, не зависящая от волнового вектора электромагнитной волны,  $1/\tau$  имеет смысл эффективной частоты соударения электронов и примесей,  $v_f$  — скорость, определяемая энергией

Ферми  $\varepsilon_f$  и массой электронов проводимости,  $\omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 N}{m_e}$  — плазменная частота,  $N$  — усреднённая по двум спиновым веткам концентрация электронов,  $\beta$  — параметр адиабатичности, равный отношению периода прецессии магнитного момента электрона вокруг локального магнитного поля к характерному периоду вращения магнитного поля в системе координат, связанной с электроном. Два слагаемых в приведенной формуле отражают два существующих механизма возникновения эффекта: асимметрию спектра электронов и асимметрию рассеяния электронов на немагнитных примесях. Проведен анализ вкладов в диэлектрическую проницаемость, обусловленных асимметрией спектра электронов и асимметрией их рассеяния на немагнитных примесях, в зависимости от частоты электромагнитного излучения и эффективной частоты соударения электронов и примесей. Оценки вычисленной поправки для параметров гольмия показывают, что для частоты волны, близкой к плазменной,  $|\epsilon_{zz}^{OA}| \approx 3.8 \cdot 10^{-5}$ .

**Глава 3** посвящена изучению невзаимных магнитооптических эффектов, возникающих при рассеянии электромагнитной волны ферромагнитными частицами, среднее по объему значение намагниченности в которых обращается в ноль. Теоретически и экспериментально рассматривается частный случай распределения намагниченности — вихревая магнитная частица.

В **разделе 3.1** приводятся симметричные соображения, показывающие, что дифференциальное сечение рассеяния неполяризованного света  $\sigma$  системой, в которой отличен от нуля магнитный тороидный момент  $\mathbf{T} = \langle [\mathbf{r} \times (\mathbf{M} - \langle \mathbf{M} \rangle)] \rangle$  (угловые скобки означают усреднение по пространственным координатам), содержит «невзаимное» слагаемое, меняющее знак при изменении направления распространения света вдоль траектории или обращении всех магнитных моментов рассеивающей системы, вида

$$\sigma(\mathbf{k}, \mathbf{k}', \mathbf{M}) = \dots + (\mathbf{k} + \mathbf{k}') \cdot \mathbf{T} + \dots,$$

здесь  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{k}'$  — волновые векторы падающей и рассеянной волн.

В **разделе 3.2** изложены результаты экспериментального наблюдения рассеяния электромагнитного излучения двумерной дифракционной решеткой магнитных частиц треугольной формы, в которых в отсутствие внешнего магнитного поля наблюдается вихревое распределение намагниченности. Геометрия эксперимента приведена на рис. 2(а). Форма частиц позволяет управлять направлением завихренности их магнитного момента посредством приложения и последующего выключения однородного внешнего магнитного поля вдоль стороны треугольников. Частицы изготавливались из Co и CoFe. Экспериментальные измерения зависимости интенсивности рассеянного света от приложенного внешнего магнитного поля подтверждают наличие предсказанного невзаимного эффекта (гистерезис на рис. 2(б)). При этом относительная величина эффекта

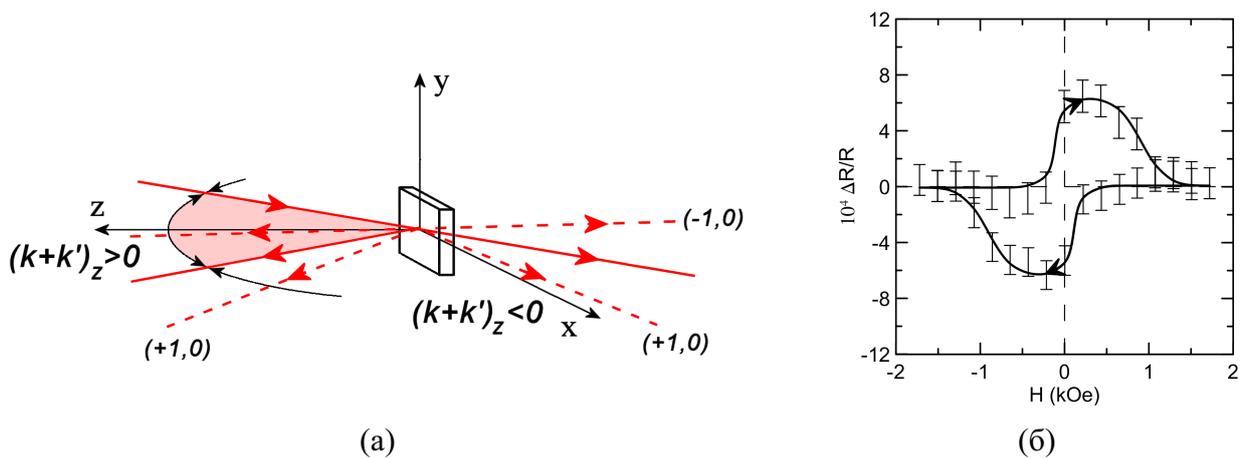


Рис. 2: (а) Геометрия эксперимента. Сплошными линиями показаны траектории падающей, прошедшей и зеркально отраженной волн; пунктирными линиями — дифрагированные волны. Закрашенный сегмент плоскости  $xz$  соответствует направлениям, для которых  $(\mathbf{k} + \mathbf{k}')_z > 0$ . (б) Относительное изменение интенсивности света, дифрагированного в  $(-1, 0)_{\text{tr}}$  максимум, в зависимости от приложенного магнитного поля. Угол падения равен  $5^\circ$ . Поле направлено вдоль стороны треугольников, падающая волна имеет s поляризацию. Экспериментальные данные представлены в виде отрезков, отражающих погрешность измерений. Стрелки указывают направление обхода петель гистерезиса.

близка для обеих взаимно ортогональных линейных поляризаций падающего излучения.

Теоретическому анализу, раскрывающему микроскопические причины наблюдаемого в эксперименте невзаимного эффекта, посвящен **раздел 3.3**. Решена задача о рассеянии электромагнитного излучения сферической частицей, обладающей вихревым магнитным моментом, проведено сопоставление расчетов с экспериментальными данными. Предполагается, что невзаимный эффект не связан с коллективными явлениями (многократным рассеянием) в решетке магнитных вихрей. Поэтому рассматривается рассеяние на одной вихревой частице. Кроме того, рассматривается для простоты частица сферической формы. При этом используется приближение малости радиуса частицы по сравнению с длиной электромагнитной волны и проводится разложение по этому малому параметру до первого порядка: учитываются электрический дипольный, магнитный дипольный и электрический квадрупольный вклады в рассеяние. Кроме того, задача решается в линейном по намагниченности приближении, поскольку невзаимный эффект должен быть обусловлен вкладом нечетного порядка по намагниченности, а наличие магнитного момента в оптике дает малый вклад в рассеяние. Поэтому нет необходимости учитывать кубические по намагниченности эффекты и эффекты высших порядков. Важным допущением является использование локального гиротропного тензора диэлектрической проницаемо-

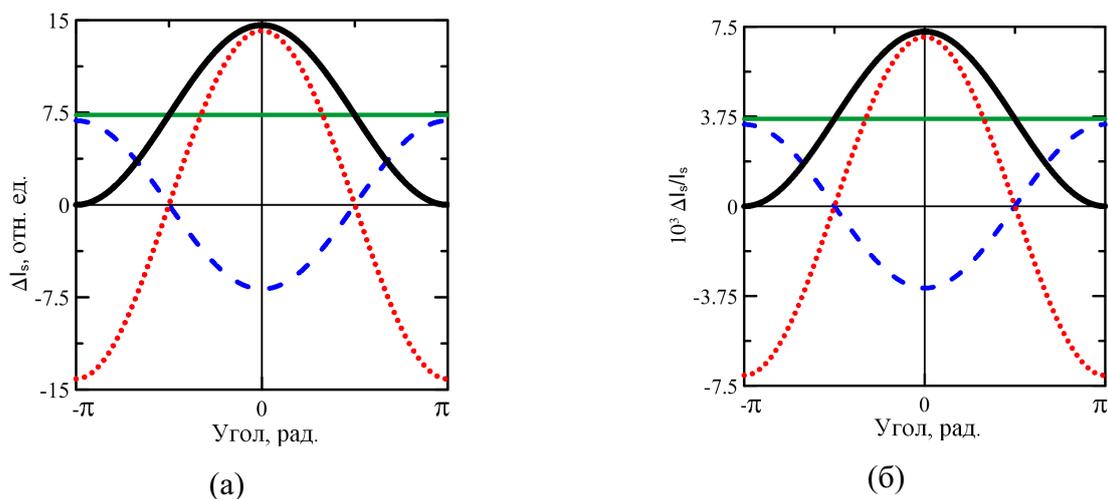


Рис. 3: Зависимость (а) абсолютной и (б) относительной величины невзаимности от угла между  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{k}'$ . Падающая волна s-поляризована. Жирная сплошная линия показывает общую величину эффекта, тонкая сплошная линия соответствует электродипольному вкладу, штриховая линия обозначает электроквадрольный вклад, пунктирная линия — магнитодипольный вклад.

сти, который зависит от координат в силу зависимости от координат магнитного момента среды.

С учетом всех изложенных выше аппроксимаций, задача решается вначале в простом приближении, в рамках которого предполагается, что тензор диэлектрической проницаемости слабо отличается от единичного. В таком приближении невзаимный вклад присутствует только в случае, когда падающая волна имеет р-поляризацию, и отсутствует для s-поляризованной волны (s- и р-поляризованные волны определены по отношению к плоскости, образованной волновым вектором падающей волны и осью вихря, а в случае их коллинеарности — осью вихря и волновым вектором рассеянной волны). Несмотря на качественное отличие результатов от экспериментальных, данная теория показывает наличие невзаимного эффекта; она может быть применена, например, для исследования аналогичного явления в рентгеновском диапазоне частот.

Затем приводится более общее решение задачи в первом порядке теории возмущений по отношению радиуса частицы к длине волны излучения, а также по намагниченности частицы. Здесь не предполагается, что диэлектрическая проницаемость близка к единице. В рамках построенной теории показано, что в соответствии с экспериментальными данными величина невзаимного вклада в интенсивность рассеянного излучения имеет один порядок для s- и р-поляризованного падающего излучения. Оценки для параметров, соответствующих эксперименту, дают относительную величину эффекта  $7 \cdot 10^{-3}$ , что соответствует результатам измерений по порядку величины. Проводится анализ зависимости этого вклада от радиуса рассеивающей частицы и диагональной

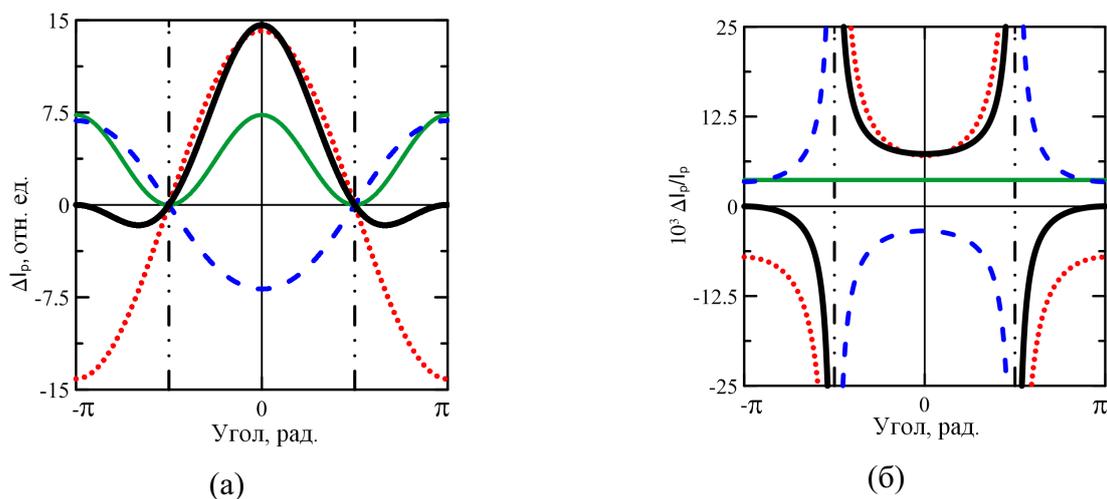


Рис. 4: Зависимость (а) абсолютной и (б) относительной величины невязности от угла между  $k$  и  $k'$ . Падающая волна р-поляризована. Жирная сплошная линия показывает общую величину эффекта, тонкая сплошная линия соответствует электродипольному вкладу, штриховая линия обозначает электроквадрольный вклад, пунктирная линия — магнитодипольный вклад. Штрихпунктирная линия обозначает асимптоты в  $\pm\pi/2$ .

компоненты диэлектрической проницаемости частицы. Зависимость электродипольного, электроквадрольного и магнитодипольного вклада от угла между волновыми векторами падающей и рассеянной волн для s- и р-поляризованного падающего излучения приведена на рис. 3, 4 соответственно. Возникновение расхождения относительной величины эффекта при угле Брюстера  $\pm\pi/2$  для р-поляризации падающего излучения объясняется тем, что как интенсивность, так и поправка к интенсивности при этом угле обращается в ноль.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В приложении А** приводится способ усреднения интенсивности рассеянного излучения по поляризации падающей на рассеивающий центр электромагнитной волны.

**В приложении В** изложена методика вычисления дипольного и квадрольного моментов шара в случае, когда распределение поля внутри шара определяется потенциалом, который может быть разложен по сферическим функциям (в системе координат с началом в центре шара; с соответствующей радиальной частью, конечной в начале координат).

## Основные результаты работы

1. Рассчитан дополнительный вклад в высокочастотную проводимость сред с неколлинеарной магнитной структурой, связанный с переходами электронов из одной спиновой подзоны в другую под действием электрического поля волны. Показано, в частности, что существование указанного меха-

низма качественно объясняет экспериментальные зависимости высокочастотной проводимости гольмия от частоты и внешнего магнитного поля.

2. Проведено теоретическое исследование особенностей пространственной дисперсии высокочастотной диэлектрической проницаемости среды с некомпланарной геликоидальной магнитной структурой. Показано, что возникает линейный по волновому вектору распространяющейся волны вклад, обусловленный двумя механизмами: асимметрией спектра электронов проводимости и асимметрией рассеяния их на немагнитных примесях.
3. Рассчитана интенсивность света, рассеянного магнитной частицей, обладающей вихревым распределением намагниченности. Показано, что интенсивность содержит вклад, линейный по тороидному моменту, характеризующему указанное распределение намагниченности. Механизмом его возникновения является возбуждение линейных по намагниченности компонент наведенных электрических и магнитных моментов частицы. Рассмотренная теоретическая задача дает качественное объяснение экспериментальных результатов.

## **Список публикаций автора по теме диссертации**

- [A1] Караштин, Е. А. Поглощение электромагнитного излучения системами с неколлинеарным распределением намагниченности [Текст] / Е. А. Караштин, О. Г. Удалов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2011. — Т. 140, № 6. — С. 1134.
- [A2] Караштин, Е. А. Оптическая активности в средах с некомпланарным распределением намагниченности [Текст] / Е. А. Караштин, О. Г. Удалов, А. А. Фраерман // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2009. — Т. 136, № 6. — С. 1127.
- [A3] Udalov, O. G. Nonreciprocal light diffraction by a lattice of magnetic vortices [Text] / O. G. Udalov, M. V. Sapozhnikov, E. A. Karashtin [et al.] // Phys. Rev. B. — 2012. — Vol. 86. — P. 094416.
- [A4] Karashtin, E. A. Nonreciprocal light diffraction by a vortex magnetic particle of spherical shape [Text] / E. A. Karashtin // Phys. Rev. B. — 2013. — Vol. 87. — P. 094418.

## Список цитированной литературы

- [1] Ансельм, А. И. Введение в теорию полупроводников [Текст] / А. И. Ансельм. — Москва : Наука, 1978.
- [2] Кринчик, Г. С. Физика магнитных явлений [Текст] / Г. С. Кринчик. — Москва : Издательство московского университета, 1976.
- [3] Baibich, M. N. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices [Text] / M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1988. — Vol. 61. — P. 2472.
- [4] Fert, Albert. Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics [Text] / Albert Fert // Rev. Mod. Phys. — 2008. — Vol. 80. — P. 1517–1530.
- [5] Лобов, И. Д. Магниторефрактивный эффект и гигантское магнитосопротивление в сверхрешетках Fe( $t_x$ )/Cr [Текст] / И. Д. Лобов, М. М. Кириллова, Л. Н. Ромашев [и др.] // Физика твердого тела. — 2009. — Т. 51, № 12. — С. 2337.
- [6] Koehler, W. C. Magnetic Properties of Rare-Earth Metals and Alloys [Text] / W. C. Koehler // J. Appl. Phys. — 1965. — Vol. 36. — P. 1078.
- [7] Fraerman, A. A. Magnetic force microscopy of helical states in multilayer nanomagnets [Text] / A. A. Fraerman, B. A. Gribkov, S. A. Gusev [et al.] // J. Appl. Phys. — 2008. — Vol. 103. — P. 073916.
- [8] Yakata, S. Control of vortex chirality in regular polygonal nanomagnets using in-plane magnetic field [Text] / S. Yakata, M. Miyata, S. Nonoguchi [et al.] // Appl. Phys. Lett. — 2010. — Vol. 97. — P. 222503.
- [9] Вонсовский, С. В. Магнетизм [Текст] / С. В. Вонсовский. — Москва : Наука, 1971. — С. 553.
- [10] Ландау, Л. Д. Теоретическая физика, том 3. Квантовая механика, нерелятивистская теория [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — Москва : Наука, 1989.
- [11] Fraerman, A. A. Diode effect in a medium with helical magnetic structure [Text] / A. A. Fraerman, O. G. Udalov // Phys. Rev. B. — 2008. — Vol. 77. — P. 094401.
- [12] Фраерман, А. А. Фотогальванический эффект в ферромагнетиках с некопланарным распределением намагниченности [Текст] / А. А. Фраерман, О. Г. Удалов // Письма в ЖЭТФ. — 2008. — Т. 87. — С. 187.

- [13] Katine, J. A. Device implications of spin-transfer torque [Text] / J. A. Katine, Eric E. Fullerton // J. Magn. Magn. Mater. — 2008. — Vol. 320. — P. 1217–1226.
- [14] Aharonov, Y. Origin of the geometric forces accompanying Berry's geometric potentials [Text] / Y. Aharonov, A. Stern // Phys. Rev. Lett. — 1992. — Vol. 69. — P. 3593.
- [15] Bruno, P. Topological Hall Effect and Berry Phase in Magnetic Nanostructures [Text] / P. Bruno, V. K. Dugaev, M. Taillefumier // Phys. Rev. Lett. — 2004. — Vol. 93. — P. 096806.
- [16] Weber, P. Effect of magnetic ordering on the infrared spectra of holmium [Text] / P. Weber, M. Dressel // J. Magn. Magn. Mater. — 2004. — Vol. 272–276. — P. E1109.
- [17] Ландау, Л. Д. Теоретическая физика, том 8. Электродинамика сплошных сред [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — Москва : Наука, 1982.

Подписано к печати 26.09.2013 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе в Федеральном государственном бюджетном  
учреждении науки Институте физики микроструктур  
Российской академии наук

607680, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афоново,  
ул. Академическая, д. 7