

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

Физический факультет

На правах рукописи

Ерохин Сергей Геннадьевич

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
В ОДНОМЕРНЫХ МАГНИТОФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2008

Работа выполнена на кафедре магнетизма физического факультета
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор А. Б. Грановский

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор В. А. Кульбачинский

кандидат физико-математических наук,
ст. н. с. М. Е. Журавлев

Ведущая организация:

Московский государственный институт радиотехники, электроники и
автоматики (технический университет), г. Москва

Защита состоится « 22 » мая 2008 года в 16:00 на заседании
диссертационного совета Д 501.001.70 при Московском государственном
университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, Москва,
Ленинские горы, д.1, стр. 35, конференц-зал Центра коллективного
пользования физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического
факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан « 22 » апреля 2008 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.70
доктор физико-математических наук, профессор

Г.С. Плотников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы значительное внимание уделяется исследованию магнитооптических (МО) свойств искусственно созданных магнитных наноструктур, таких как тонкие пленки на основе ферромагнитных металлов и магнитных полупроводников, нанокompозиты, мультислойные структуры, магнитофотонные кристаллы. Это связано с целым рядом факторов, имеющих как научное, так и прикладное значение. Во-первых, МО методы весьма эффективны для изучения особенностей разнообразных свойств магнитных наноструктур и позволяют изучать процессы перемагничивания и спиновую динамику с рекордным быстродействием, превышающим пикосекундное разрешение. Во-вторых, с помощью МО методик возможно определение спиновой поляризации электронов в создаваемых новых магнитных материалах, таких как ферромагнитных при температурах выше комнатной разбавленных магнитных полупроводниках и оксидах, и перспективных материалах спинтроники. В-третьих, исследование механизмов взаимодействия электромагнитного излучения с ферромагнетиками и целенаправленный поиск усиления МО отклика имеет самостоятельное научное значение и необходимо для создания нового поколения МО устройств оптоэлектроники, систем отображения, хранения и передачи информации, магнитной голографии, магнитных сенсоров и т. д.

Магнитофотонные кристаллы (МФК) – это одно-, двух-, или трёхмерные периодические структуры, период которых сравним с длиной волны электромагнитного излучения и которые состоят как из немагнитных, так и магнитных компонент [1,2]. Отличительной чертой фотонных кристаллов (ФК) является появление запрещённых зон в спектре

электромагнитного излучения, т.е. интервалов длин волн, где свет или не распространяется, или распространяются только определённые его поляризации. Применение магнитных материалов в качестве компонент ФК открыло целый ряд преимуществ, а, именно, позволило как усилить МО эффекты, так и наметить пути к созданию управляемых магнитным полем устройств магнитофотоники [1,2]. Однако, наличие поглощения света в большинстве МО материалах существенно ограничивает возможности их использования в МФК, поэтому нахождение на основе теоретического исследования условий, когда поглощение света в магнетиках не является препятствием для усиления какого-либо конкретного МО эффекта в МФК, является важной задачей, определяющей развитие данного направления магнитофотоники.

Целью работы явилась разработка теории МО эффектов в одномерных МФК и нахождение способов усиления этих эффектов, как за счет использования новых магнитных материалов, так и оптимизации характера распределения электромагнитного поля в МФК при наличии поглощения света. Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**:

- разработка методики и программного обеспечения для расчёта МО отклика многослойных структур с учётом пространственной дисперсии
- нахождение условий усиления МО эффектов Фарадея и Керра в одномерных МФК на основе ферритов-гранатов
- исследование возможности использования в МФК магнитных нанокompозитов и других материалов, характеризующихся поглощением света
- исследование МО эффектов в резонансных МФК на основе экситонных возбуждений в квантовых ямах магнитных полупроводников

Научная новизна и практическая ценность.

Полученные в диссертационной работе результаты расширяют представление о МО явлениях в МФК и наноструктурах. Выявленное сильное влияние особенностей распределения электрического поля в резонаторах типа Фабри-Перо на усиление МО эффектов Фарадея и Керра, магниторефрактивного эффекта (МРЭ) позволяет не только достичь высоких для этих МО эффектов значений, но и дает возможность использования в МФК материалов с поглощением, таких как магнитные нанокompозиты или магнитные полупроводники. Впервые предложена и рассмотрена модель ФК с контрастом на затухании и показано, что коэффициенты прохождения, отражения и поглощения света зависят от периодического или непериодического характера распределения поглощающих свет центров. Предсказана возможность значительного усиления МО эффектов в МФК на основе экситонных возбуждений в квантовых ямах. Выполненные теоретические исследования позволили предложить новый тип управляемых магнитным полем модуляторов света на основе экситонных возбуждений в квантовой яме, существующей в ФК. Результаты работы могут быть использованы для разработки и оптимизации функциональных устройств магнитофотоники на основе МФК.

На защиту выносятся основные результаты, которые можно сформулировать следующим образом:

1. На основе модифицированного метода трансфер-матриц рассчитаны МО эффекты Фарадея и Керра в МФК с дефектом на основе висмут содержащего граната и определены параметры структур, при которых фарадеевское вращение, удельное фарадеевское вращение и МО добротность достигают максимальных значений.

2. Выявлено сильное влияние особенностей распределения электрического поля в резонаторах типа Фабри-Перо на усиление эффектов Фарадея, Керра и МРЭ.
3. Показано, что наличие поглощения света в магнитных нанокompозитах не является принципиальным препятствием для создания МФК на их основе. МРЭ значительно усиливается в МФК, содержащих встроенный слой магнитного нанокompозита, и при этом относительное изменение коэффициента отражения таких структур при приложении магнитного поля может превышать 60%.
4. ФК могут быть построены только на контрасте мнимых компонент диэлектрической проницаемости, при этом найдено, что периодическое расположение поглощающих центров может приводить как к повышению прозрачности, так и к ее понижению.
5. Метод расчёта оптического отклика структур, построенных на основе квантовых ям, обобщён на магнитооптику многослойных систем. Показано, что МО эффект Фарадея значительно усиливается в МФК типа Фабри-Перо, содержащих в качестве дефекта квантовую яму.

Апробация работы. Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

International Conference on Materials for Advanced Technologies 2003, Singapore, 2003; International Workshop on Novel Electromagnetic Functions of Nanoscale Materials, Japan, 2003; International Baikal Scientific Conference "Magnetic Materials" 2003, Russia; 27th ESA Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas, 2004, Spain; MRS Fall Meeting, 2004, USA; XIX и XX Международная школа-семинар "Новые магнитные материалы микроэлектроники", 2004 и 2006, Москва, Россия; EASTMAG-2004, Екатеринбург, Россия; International conference "Functional Materials" 2007,

Crimea, Ukraine; Symposium and summer school "Nano and Giga Challenges in Microelectronics", 2004, Poland; MORIS-2006, Pittsburg, USA; Ежегодная конференция ИТПЭ ОИВТ РАН, 2003, 2004, Россия; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам "Ломоносов - 2003" и "Ломоносов - 2004"; Международная зимняя школа физиков-теоретиков "Коуровка - 2004" и "Коуровка - 2008", Россия; Moscow International Symposium on Magnetism, 2005, Russia.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 28 печатных работ, включая 6 статей, 9 публикаций в материалах конференций и 13 тезисов докладов.

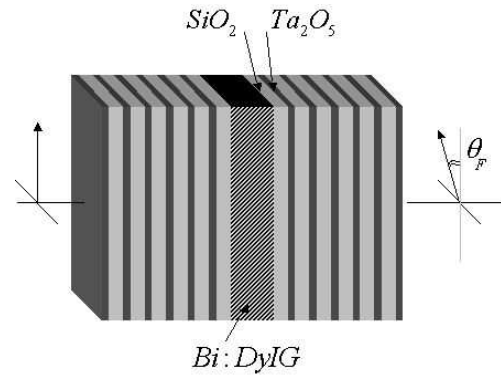
Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из шести глав, заключения и списка литературы. Полный объём работы 115 страниц машинописного текста, включая 40 рисунков, 4 таблицы и 75 библиографических ссылок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертационной работы имеет обзорный характер. В ней изложены основные результаты экспериментальных и теоретических работ, посвящённых физике ФК и МФК, магнитооптике многослойных структур и МО приложениям.

Во второй главе описан метод расчёта МО эффектов в многослойных структурах. Метод расчёта основан на методе трансфер-матриц с обобщением на магнитооптику. Используя эту методику, удаётся получить

точное решение уравнений Максвелла для планарных структур, т.е. появляется возможность учёта квадратичных поправок по недиагональным компонентам диэлектрической проницаемости.



В параграфе 2.1 получены решения *Рис. 1*

волнового уравнения для волн в *Фотонный кристалл типа Фабри-Перо* среде в полярной, меридиональной

и экваториальной геометриях. Конкретный вид тензора диэлектрической проницаемости берётся в зависимости от направления внешнего магнитного поля. В силу того, что вектор электрического смещения \vec{D} всегда перпендикулярен вектору распространения, выберем его в качестве основного. Перепишем волновое уравнение в следующем виде:

$$n^2 \hat{\varepsilon}^{-1} \vec{D} - \vec{n}(\vec{n} \hat{\varepsilon}^{-1} \vec{D}) = \vec{D}.$$

Условие разрешимости этого уравнения определяет вектор рефракции $\vec{n} = \vec{n}(\omega)$, а если найти \vec{D} , то из него легко определить $\vec{E} = \hat{\varepsilon}^{-1} \vec{D}$ и $\vec{H} = [\vec{n} \times \vec{E}]$, что и составляет решение.

В параграфе 2.2 описана методика сшивания решений на границе вакуум-среда путём введения вектора

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

и его приравнивания на границе раздела. M -матрица слоя выражается через матрицы границы A и распространения P [3]

$$M = A \cdot P \cdot A^{-1}.$$

Таким образом, благодаря этому методу была получена возможность расчёта любых МО эффектов в произвольных конечных многослойных структурах при произвольном угле падения света.

В третьей главе проводится исследование различных МО эффектов в одномерных МФК на основе достаточно прозрачных ферромагнетиков, какими являются ферриты-гранаты в соответствующей области спектра.

Параграф 3.1 посвящён исследованию эффекта Фарадея в МФК типа Фабри-Перо. (рис. 1). МФК такого вида состоят из МО слоя, обрамленного диэлектрическими зеркалами, состоящими из нескольких ячеек одномерного ФК, например [4]:

$$(\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5) \times 6 / \text{Bi:DyIG} / (\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2) \times 6$$

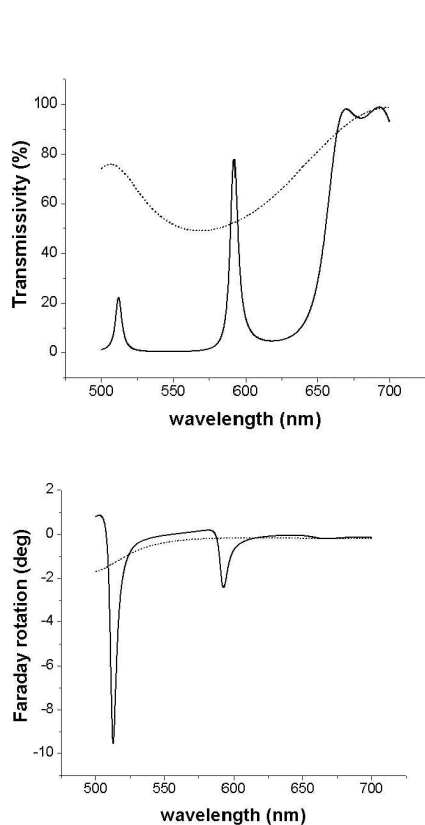


Рис. 2

Резонансные зависимости фарадеевского вращения и прозрачности резонатора Фабри Перо (сплошная линия) в сравнении с одиночным МО-слоем (штрихованная линия).

Фактически образец представляет собой ФК с МО-дефектом. Стрелками обозначены поляризации падающего и прошедшего света. ϑ_F - угол вращения Фарадея. Элементарная ячейка ФК состоит из слоя SiO_2 (толщина 90 нм, коэффициент преломления 1,44) и слоя Ta_2O_5 (толщина 64 нм, коэффициент преломления 2,1).

На рис. 2 приведены, рассчитанные в данной работе, резонансные зависимости фарадеевского вращения и прозрачности приведённой системы типа резонатора Фабри-Перо. На

длине волны 512 нм вращение составляет 9,8 град при коэффициенте прохождения 20%, что более чем в 7 раз превосходит поворот на одном слое Bi:YIG. Так как максимальный МО сигнал наблюдается на частотах, где велики и потери [3], то стремление, изменяя частоту, увеличить угол фарадеевского вращения в однородном веществе, приводит к увеличению потерь и может уменьшить общий эффект усиления в слоистой системе за счет падения добротности резонатора.

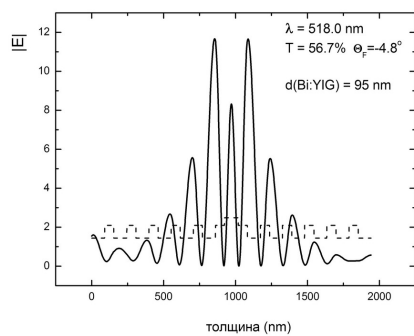


Рис. 3
Распределения поля в резонаторах Фабри-Перо.

Отметим, что угол фарадеевского вращения ϑ_F не является единственным параметром, определяющим эффективность схемы. В работе рассмотрены два других параметра — удельное фарадеевское вращение ϑ_F/d_{MO} (угол поворота, отнесенный к единице толщины МО слоя) и МО добротность $(-2\vartheta_F/\ln T)$ [3].

При нахождении оптимума по этим переменным определяющим фактором оказывается следующая особенность распределения поля в структуре: максимумы поля находятся вне МО слоя (рис. 3). Эти данные показывают, что энергия, запасённая в резонаторе, может быть выведена из зоны диссипации, что повышает добротность, и, как следствие, усилит эффект Фарадея. В данном случае при толщине 295 нм все поле сконцентрировано внутри МО слоя, в то время как при толщине 95 нм существенная часть поля сконцентрирована внутри брэгговских отражателей, где потерь нет. Поэтому добротность резонатора, а как следствие амплитуда поля и удельный угол вращения выше в случае толщины равной 95 нм.

Обратимся теперь ко второму параметру – МО добротности. Для этого при фиксированной толщине МО-слоя будем менять резонансную частоту, изменяя отражательную способность зеркала (брэгговского отражателя). Для описания отражательной способности зеркала (брэгговского отражателя) удобно использовать индекс Ляпунова γ - мнимую часть эффективного волнового вектора волны, распространяющейся по бесконечному кристаллу, полученному при периодическом продолжении рассматриваемого брэгговского отражателя. Действительно, γ характеризует степень ослабления волны при прохождении через брэгговский отражатель, а в бездиссипативной среде и степень отражения. Индекс Ляпунова связан со следом M -матрицы размерности 2:

$$\text{Tr}[M] = 2 \cos(kd) \approx \exp(\gamma d),$$

где d – суммарная толщина брэгговского отражателя, а M -матрица связывает амплитуды падающей и проходящей волн по обе стороны от брэгговского отражателя. Выполненные расчеты показали, что при фиксированной толщине МО-слоя величина γ изменяется при изменении скважности периода, т.е. отношения $d_{\text{SiO}_2} / d_{\text{Ta}_2\text{O}_5}$. В частности, сдвигается частота, на которой индекс Ляпунова γ достигает максимума, тем самым изменяется и резонансная частота рассматриваемого Фабри-Перо резонатора. Таким образом, МО добротностью МФК можно управлять с помощью обрамляющих МО слой брэгговских зеркал.

В параграфах 3.2-3.4 разработанная методика используется для расчета и оптимизации полярного, меридионального и экваториального эффектов Керра. Расчет экваториального эффекта Керра выполнен не только для МФК типа Фабри-Перо, но и для МФК, содержащего конечное число периодически расположенных МО слоев. Выявлен ряд отличий

относительно влияния потерь на эффекты Керра и Фарадея. Выполненные расчеты позволили объяснить имеющиеся экспериментальные данные.

В параграфе 3.5 теоретически исследуется возможность использования тонких магнитных наногранулированных пленок “ферромагнитный металл-диэлектрик”, обладающих магниторефрактивным эффектом (МРЭ), как конструкционных материалов МФК и управляемых полем оптических элементов. МРЭ является новым четным по намагниченности, негиротропным МО эффектом. Этот эффект является частотным аналогом магнитосопротивления и состоит в изменении оптических параметров магнитного магниторезистивного материала под влиянием внешнего магнитного поля [5]. Так как МРЭ не связан со спин-орбитальным взаимодействием, то он может значительно превышать традиционные МО эффекты. Развитая теория МРЭ для однослойных нанокompозитов хорошо описывает имеющиеся экспериментальные данные. МРЭ в нанокompозитах, зависит от их состава, магнитосопротивления, длины волны излучения, и например, в Co-(Al-O), достигает в ближней ИК области спектра более 1% [5]. Относительная прозрачность магнитных нанокompозитов для составов вблизи порога перколяции в сочетании с высокими значениями МРЭ позволяет их использовать в качестве материалов для создания МФК.

В МФК наличие оптимизированной системы зеркал с обеих сторон от магнитного слоя приводит к локализации света в окрестности этого слоя, то есть к многократному прохождению света через этот слой. В результате МРЭ усиливается более, чем на порядок по сравнению с тонкой пленкой на подложке и на два порядка по сравнению с толстыми пленками.

Очевидно, что наличие поглощения в магнитном слое является недостатком нанокompозитов, как конструкционных материалов МФК. Тем не менее, приведенные расчеты показывают, что наличие поглощения

света не является препятствием для усиления МРЭ и создания оптических элементов, управляемых магнитным полем. При этом, если МФК представляет собой периодическую структуру, составленную из магнитного слоя нанокompозита и прозрачного диэлектрика, то усиление МРЭ также имеет место, но выражено в меньшей степени, чем в структуре МФК с одним встроенным слоем. Так как МРЭ в нанокompозитах существует не только в оптическом диапазоне, но и в миллиметровой и микроволновой области спектра, то при соответствующем подборе зеркал возможно на базе МФК создание управляемых магнитным полем СВЧ устройств. Приведенный расчет демонстрирует перспективность использования материалов с МРЭ для создания управляемых полем устройств магнитофотоники. Так как к материалам с МРЭ относятся любые материалы с высокими значениями магнитосопротивления (мультислои, гранулированные пленки, манганиты и др.), то конкретный выбор магнетика для МФК определяется его поглощением в соответствующей области спектра, величиной МРЭ и величиной поля насыщения.

В четвёртой главе предложен и рассмотрен новый тип одномерных ФК, в которых контраст импеданса слоев достигается за счет отличия не действительных, а мнимых частей диэлектрических проницаемостей слоёв. Показано, что в таких структурах запрещенные зоны конечной ширины не образуются, а имеются их признаки (следы), в окрестности которых коэффициент прохождения может быть либо больше, либо меньше, чем в гомогенизированном образце тех же размеров и с тем же суммарным поглощением. Предсказаны значительные отклонения от закона Бугера-Ламберта-Бэра для таких ФК, при определенных параметрах достигающие 4-6%. Показано, что поглощение света существенно зависит от характера распределения поглощающих центров в образце.

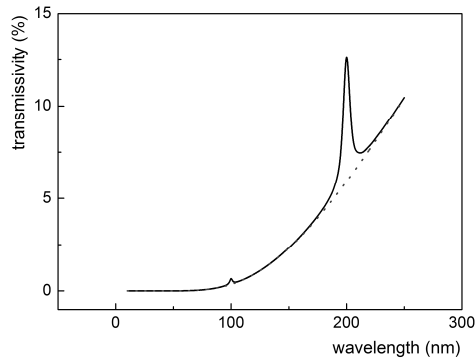


Рис. 4

*Коэффициент прохождение
фотонного кристалла с
контрастом на затухании*

На рис. 4 приводится сравнение коэффициента прохождение таких структур. Основным здесь является вопрос о положении пиков прозрачности. Он решается с помощью решения Рытова [6] для слоистой структуры:

$$\cos k_B d = \cos k_1 d_1 \cos k_2 d_2 - \frac{k_1^2 + k_2^2}{2\sqrt{k_1 k_2}} \sin k_1 d_1 \sin k_2 d_2,$$

где

$$k = \frac{\omega}{c}, \quad d = d_1 + d_2, \quad k_n = k\sqrt{\epsilon_n}.$$

Оказываются, что положения пиков совпадают с особенностями решения Рытова (областями выхода косинуса за единицу), причём два самых значительных пика на длинах волн 100 и 200 нм соответствуют одной и двум оптическим (и физическим) длинам периода соответственно.

В параграфе 4.1 сравниваются две модельные структуры: конечный по толщине образец ФК с контрастом на затухании и гомогенизированный (однородный) слой той же толщины, в среднем с теми же потерями. Во избежание отражения от внешних границ кристалла слои ФК на затухании состоят из материалов с вещественной частью диэлектрической проницаемости равной

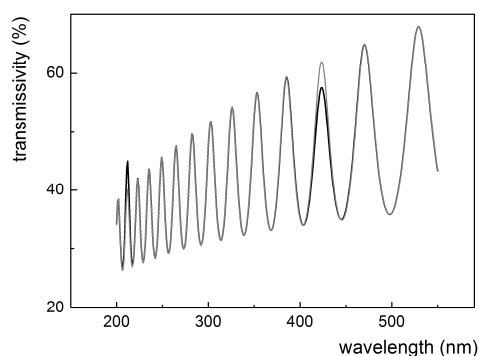


Рис. 5

Коэффициент прохождение фотонного кристалла с контрастом на затухании

Параграф 4.2 содержит анализ схемы с параметрами, которые могут быть реализованы в эксперименте. На рис. 5 несмотря на сильные осцилляции хорошо видны заметные отличия коэффициента прохождения на длинах волн в 212 нм и 424 нм.

В параграфе 4.3 рассматривается случай ФК с накачкой, а не с потерями. Для предложенной модели это соответствует изменению знака мнимой части диэлектрической проницаемости. На приведённых выше длинах волн наблюдается многократное усиление эффекта прохождения.

Таким образом, в построенном на контрасте затухания ФК имеются признаки (следы) запрещенных зон, обусловленных интерференцией волн при периодически модулированном импедансе. Эти признаки проявляются в значительных отклонениях от закона Бугера-Ламберта-Бэра, причем коэффициент прохождения может быть как больше, так и меньше, чем при однородном распределении поглощающих центров. Причиной этих отклонений является перераспределение электрического поля внутри ячейки фотонного кристалла. Прохождение света оказывается зависимым от характера распределения поглощающих центров в образце. Действительно, представим, что в однородный и прозрачный образец, в котором распространяется волна, и поэтому имеются максимумы и минимумы электрического поля, вставлен дельта-слой поглощающих центров. Тогда, если этот дельта-слой расположен в области максимума поля поглощение будет существенно больше, чем когда этот слой будет расположен в области нулевых значений поля. Подобное же происходит в рассмотренных в данной работе ФК. Но вдали

от областей конструктивной интерференции, эти эффекты пренебрежимо малы, и они проявляются только тогда, когда на ширине ячейке ФК укладывается одна или две волны.

Отметим, что рассмотренная ситуация вполне реализуема в эксперименте либо последовательным напылением двух разных материалов с одинаковыми показателями преломления, либо путем создания в однородном материале периодически расположенных центров затухания. Последнее можно достичь имплантацией или фото сенсбилизацией. Интересной могла бы быть структура, содержащая периодическую последовательность квантовых ям с высокой прозрачностью на определенной рабочей длине волны. При облучении такой структуры на длине волны резонанса экситонов квантовых ям, возникло бы затухание в квантовых ямах, что привело бы к изменению прозрачности системы на рабочей длине волны. То есть данная структура могла бы служить основой управляемого светом модулятора излучения.

В пятой главе разработаны методика и комплекс программ для расчёта МО эффектов в произвольных конечных, многослойных структурах квантовых ям при нормальном угле падения света.

Параграф 5.1 представляет собой обзор теоретических и экспериментальных работ по этой тематике.

В параграфе 5.2 описана методика расчёта. Наибольший интерес здесь представляет решение волнового уравнения, являющегося следствием уравнений Максвелла

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{\omega^2}{c^2} (\varepsilon_b \vec{E} + 4\pi \vec{P}_{exc}(z))$$

со следующей нелокальностью

$$4\pi \vec{P}_{exc}(z) = \chi(\omega) \Phi(z) \int \Phi^*(z') \vec{E}(z') dz'.$$

Причём учёт магнитооптики подразумевает следующий вид тензора экситонной восприимчивости:

$$\begin{pmatrix} \chi & i\delta\chi \\ -i\delta\chi & \chi \end{pmatrix}.$$

Оказывается, что по методу, разработанному Е.Л. Ивченко [7], можно получить точное решение даже для МО случая. В нашем случае получаем систему интегральных уравнений,

$$\begin{cases} \frac{d^2 E_x}{dz^2} = -q^2 E_x - q_0^2 4\pi P_x \\ \frac{d^2 E_y}{dz^2} = -q^2 E_y - q_0^2 4\pi P_y \end{cases},$$

которая может быть сведена к линейной с помощью следующих преобразований:

$$\Lambda^x = \int \Phi(z) E_x(z) dz = E_0^x \underbrace{\int \Phi(z) e^{iqz} dz}_{\Lambda_0^x} + i \frac{q_0^2}{2q} \chi \Lambda^x \underbrace{\int dz dz' e^{iq|z-z'|} \Phi(z) \Phi(z')}_F + -\frac{q_0^2}{2q} \delta\chi \Lambda^y F$$

$$\Lambda^y = \dots$$

Отсюда получаем

$$\begin{cases} \Lambda^x = \Lambda_0^x + a\Lambda^x F + b\Lambda^y F \\ \Lambda^y = \Lambda_0^y - b\Lambda^x F + a\Lambda^y F \end{cases}.$$

В наглядной форме решение выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} E_x &= E_0^x e^{iqz} + (\alpha E_0^x + \beta E_0^y) e^{-iqz} \\ E_y &= E_0^y e^{iqz} + (-\beta E_0^x + \alpha E_0^y) e^{-iqz} \end{aligned}$$

В силу пространственной дисперсии невозможно записать матрицу распространения в яме, поэтому для решения этой проблемы необходимо получать матрицу слоя. Данный факт принципиально отличает этот метод от метода расчёта МО отклика многослойных структур без учёта пространственной дисперсии.

В шестой главе проводится теоретическое изучение нового класса МФК, построенных на основе структуры брегговских квантовых ям (Bragg multiple-quantum-well structures). Такие материалы принадлежат к классу

так называемых резонансных ФК, потому что множественное переотражение света на периодической структуре дополняется резонансным взаимодействием с экситонами в квантовых ямах. В этом случае свет распространяется в форме поляритонов, и оптические свойства таких структур очень чувствительны к экситонным характеристикам составляющих материалов [8]. Эти особенности могут служить хорошими предпосылками для создания оптических устройств на основе такого класса структур.

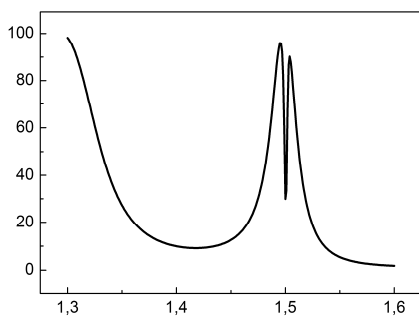


Рис. 6

*Коэффициент прохождения
резонансного фотонного кристалла*

В параграфе 6.1 приводятся описание изучаемой структуры и параметры квантовой ямы. В данном случае для изучения берётся структура Фабри-Перо, где роль дефекта играет квантовая яма.

В параграфе 6.2 приводится расчёт МО отклика такой структуры. Показано, что МО эффекты могут быть усилены на порядок.

Представленная в этой главе структура принципиально отличается от структур, построенных на основе феррит-граната и рассмотренных в третьей главе. В случае квантовых ям имеется дополнительная степень свободы по воздействию на параметры резонансов. Путём подбора параметров зеркал в резонаторе Фабри-Перо можно добиться того, что экситонный резонанс будет совмещён с дефект-модой ФК. Но в общем случае экситонный резонанс может совпадать или не совпадать с центром резонанса Фабри-Перо, и более того, положение экситонных резонансов изменяется при приложении магнитного поля. В частности, это позволяет предложить схему модулятора излучения с высокой степенью модуляции интенсивности излучения (до 90%), работа которого основана на смещении частоты экситонного резонанса в магнитном поле (Рис. 6).

Системы, построенные на основе квантовых ям, могут быть управляемы не только магнитным, но и электрическим полем. С появлением нового класса магнитных полупроводников, работающих при комнатных температурах, структуры, построенные на основе квантовых ям, могут быть использованы для создания новых функциональных устройств магнитофотоники.

Основные результаты и выводы работы:

1. Проведено теоретическое исследование МО эффектов в одномерных МФК. На основе модифицированного метода трансфер-матриц рассчитаны распределение электрического поля, коэффициенты пропускания и отражения света, МО эффекты Фарадея, полярного и экваториального Керра в МФК типа МО микрорезонатора Фабри-Перо с дефектом на основе висмут содержащего граната. Найдены условия, определяющие резонансное усиление МО эффектов. Определены параметры структур, при которых фарадеевское вращение, удельное фарадеевское вращение и МО добротность достигают максимальных значений.
2. Показано, что при наличии диссипации в МО слоях распределение электрического поля в МФК типа Фабри-Перо оказывает значительное влияние на усиление эффектов Фарадея, Керра и магниторефрактивный эффект. Путем изменения условий отражений от брэгговских зеркал ФК возможен вывод максимумов электрического поля световой волны из области расположения магнитного слоя и концентрация поля вне области диссипации.
3. Рассчитан магниторефрактивный эффект в МФК типа Фабри-Перо, содержащем в качестве дефекта слой магнитного нанокompозита, и в одномерных МФК, содержащих несколько магнитных слоев. В силу многократного прохождения света в МФК через магнитный слой

магниторефрактивный эффект значительно усиливается, и относительное изменение коэффициента отражения при приложении магнитного поля может превышать 60% при коэффициенте отражения 5%. Показано, что наличие поглощения света в магнитных нанокompозитах (или других магнитных материалах) не является принципиальным препятствием для создания МФК на их основе.

4. Выполнено теоретическое исследование оптических свойств ФК, построенного на контрасте мнимых компонент диэлектрической проницаемости. Для такого ФК запрещенные зоны конечной ширины не образуются, но при определенных частотах, соответствующих признакам (следам) запрещенных зон, коэффициент прохождения может значительно отличаться от соответствующего коэффициента гомогенизированного образца тех же размеров и с тем же суммарным поглощением. Периодическое расположение поглощающих центров может приводить как к повышению, так и уменьшению прозрачности образца.
6. Метод расчёта оптического отклика структур, построенных на основе квантовых ям, обобщён на магнитооптику многослойных систем с квантовыми ямами, характеризующимися пространственной дисперсией.
7. Проведено теоретическое исследование МО эффекта Фарадея в МФК типа Фабри-Перо, содержащих в качестве дефекта квантовую яму. Показано, что когда частота экситонного резонанса в такой структуре расположена в области резонанса дефектной моды МО отклик может быть усилен в несколько раз.
8. Предложен модулятор излучения на основе смещения частоты экситонов в приложенном магнитном поле относительно резонансной частоты дефектной моды МФК типа Фабри-Перо.

Публикации по теме диссертации.

1. А.П. Виноградов, **С.Г. Ерохин**, А.Б. Грановский, М. Инуе, Исследование эффекта Фарадея в многослойных одномерных системах, Радиотехника и электроника, **49**, 96 (2004).
2. А.П. Виноградов, **С.Г. Ерохин**, А.Б. Грановский, М. Инуе, Полярный эффект Керра в многослойных системах (магнитофотонных кристаллах), Радиотехника и электроника, **49**, 726 (2004).
3. **S. Erokhin**, Yu. Boriskina, A. Vinogradov, M. Inoue, D. Kobayashi, A. Fedyanin, M. Kochneva, E. Gan'shina, A. Granovsky, Transverse Kerr effect in one-dimensional magnetophotonic crystals: experiment and theory, JMMM, **300**, e257 (2006).
4. Ю.В. Борискина, **С.Г.Ерохин**, А.Б.Грановский, А.П.Виноградов, М.Инуе, Усиление магниторефрактивного эффекта в магнитофотонных кристаллах, ФТТ, **48**, 674 (2006).
5. **С.Г. Ерохин**, А.П.Виноградов, А.Б Грановский, М.Инуе, Распределение поля световой волны в окрестности магнитного дефекта в одномерных фотонных кристаллах, ФТТ, **49**, 477 (2007).
6. А.Б. Грановский, Е.А. Ганьшина, А.Н. Юрасов, Ю.В. Борискина, **С.Г. Ерохин**, А.Б. Ханикаев, М. Иноуе, А.П. Виноградов и Ю.П. Сухоруков, Магниторефрактивный эффект в наноструктурах, манганитах и магнитофотонных кристаллах, Радиотехника и электроника **52**, 1152 (2007)
7. **S. G. Erokhin**, Y. V. Boriskina, A. B. Granovsky, A. P. Vinogradov, X.S. Zhao and M. Inoue, Magnetorefractive effect in magnetophotonic crystals, Mater.Res.Soc.Symp.Proc. **834**, J5.3 (2005).
8. А.Р. Vinogradov, **S.G. Erokhin**, А.В. Granovsky, М. Inoue, А. Lisyansky and А. М. Merzlikin, On electrodynamics of one-dimensional

- random systems and related magneto-optical phenomena, Electromagnetic Materials, Proceedings of the Symposium F, ICMAT 2003, p.21-23, SUNTEC, Singapore, 7 - 12 December 2003
9. A.Granovsky, M.Inoue, A.Vinogradov, and **S.Erokhin**, Recent results on magnetorefractive effect in nanocomposites and magneto-optics in *magnetophotonic crystals*, Proceedings of International Workshop on Novel Electromagnetic Functions of Nanoscale Materials, Toyohashi University of Technology, Japan, p.60-64, 2003
10. A.P.Vinogradov, **S.G.Erokhin**, A.B.Granovsky, M.Inoue, A.M.Merzlikin, Electromagnetic band gap theory of light localization with application in magnetophotonics, Proceedings of 27th ESA Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas, p. 222-224, March 2004, Spain
11. А.Б.Ханикаев, А.М.Мерзликин, **С.Г. Ерохин**, Ю.В. Борискина, А.П.Виноградов, М. Инуе, А.Б.Грановский, *Магнитооптика одномерных, двумерных и трехмерных магнитофотонных кристаллов*, Сборник трудов НМММ-20, Юбилейная XX Международная школа-семинар "Новые магнитные материалы микроэлектроники", БС-1, 12-16 июня 2006, Россия, Москва
12. **С.Г. Ерохин**, А.П. Виноградов, А.Б. Грановский, *Магнитооптические эффекты на отражении в магнитофотонных кристаллах*, Сборник трудов XIX Международной школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники" 28 июня - 2 июля, 2004, Москва, с.619-620
13. **С.Г. Ерохин**, А.П. Виноградов, А.Б. Грановский, *Магниторефрактивный эффект в магнитофотонных кристаллах*, Сборник трудов XIX Международной школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники" 28 июня - 2 июля, 2004, Москва, с.621-622

14.М.В. Вашук, Е.А. Ганьшина, **С.Г. Ерохин**, А.П. Виноградов, *Метод определения компонент тензора диэлектрической проницаемости прозрачных магнитооптических материалов*, Сборник трудов XIX Международной школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники" 28 июня - 2 июля, 2004, Москва, с.623-624

Список цитируемой литературы.

- [1] Inoue M. Fujikawa R., Baryshev A. et al, Magnetophotonic crystals, J. Phys. D: Appl. Phys. **39** (2006) R151
- [2] Inoue M., Granovsky A., Aksipetrov O. et al, Chapter: Magnetophotonic crystals, Springer-Verlag Magnetic nanostructures (2007)
- [3] Звездин А. К., Котов В. А. Магнитооптика тонких плёнок. М.: Наука (1988)
- [4] Inoue M., Arai K., Fujii T., Abe M., One-dimensional magnetophotonic crystals, J. Appl. Phys. 85 (1999) 5768
- [5] Грановский А. Б., Ганьшина Е.А., Юрасов А. Н. и др., Магниторефрактивный эффект в наноструктурах, манганитах и магнитофотонных кристаллах, Радиотехника и электроника **52** (2007) 1152
- [6] Бреховских Л. М., Волны в слоистых средах, М.: Наука (1973)
- [7] Ivchenko E. L., Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures, Alpha Science International, Ltd (2005)
- [8] Ivchenko E. L., Voronov M. M., Erementchouk et al, Multiple-quantum-well-based photonic crystals with simple and compound elementary supercells, Phys. Rev. B **70** (2004) 195106