

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Барышева Александра Валерьевича «Магнитооптические эффекты в магнитных и плазмонных наноструктурах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Барышева Александра Валерьевича посвящена экспериментальному изучению магнитофотонных кристаллов и плазмонных магнитооптических материалов, которые привлекают внимание исследователей, как своими необычными оптическими свойствами, так и широким практическим применением в различных технических устройствах. Известно, что современное развитие экспериментальной и прикладной фотоники связано с растущим потенциалом технологии роста искусственных материалов, в том числе технологии изготовления композитов и периодических структур с характеристическими размерами меньше длины электромагнитных волн. Магнитофотонные кристаллы (МФК) и плазмонные магнитооптические материалы являются материалами, в которых внешнее магнитное поле управляет как поляризационным состоянием, так и амплитудой проходящего света. В частности, слабая локализация света в слоистых структурах из граната и диоксида кремния приводит к увеличению угла Фарадеевского вращения по сравнению с углом вращения в обычной пленке граната. Максимальное усиление вращения плоскости поляризации наблюдалось также в одномерных МФК со структурой Фабри-Перо резонатора с магнитооптическим (МО) дефектом. Увеличение угла фарадеевского вращения в этих кристаллах происходит благодаря многократному прохождению света внутри оптически невзаимного материала. В плазмонных магнитооптических материалах угол МО вращения также увеличивается (или модифицируется) и существует возможность управления оптическим сигналом, если внутри или на поверхности МО материала поместить плазмонный материал, то есть создать структуры типа магнитный металл/благородный металл или гранат/благородный металл. В обоих случаях композитный материал может характеризоваться усилением вращения плоскости поляризации и особенностями в оптических и магнитооптических спектрах, обусловленными возбуждениями локализованных плазмонов. Однако механизм этих явлений был далек от полного понимания. Оставался дискуссионным вопрос – связаны эти явления с взаимным эффектом от плазмонов или с увеличенным спин-орбитальным взаимодействием и большой силой осциллятора электронных переходов за счет большого ближнего поля на границе

МО материал/плазмонная частица. Возросший интерес к физике активных материалов, таких как магнитооптические, к изучению наноструктур, в том числе и с плазмонной подсистемой из благородных металлов, а также вероятность наблюдения новых волновых эффектов в таких МО наноструктурах стимулировал проведение дальнейших исследований. Возможность значительного увеличения МО отклика, а также управления поляризационным состоянием и направлением распространения волны в магнитооптических структурах предопределяла их широкое практическое использование в твердотельной электронике, значительное повышение функциональности существующих приборов и их миниатюризацию.

Из выше сказанного следует, что выбранное Барышевым А.В. направление диссертационного исследования, посвященное экспериментальному изучению взаимодействия поляризованного света с одномерными 1D, двумерными (2D) и трехмерными (3D) магнитофотонными кристаллами, обладающими различными кристаллическими решетками, а также особенностей магнитооптических спектров золото-гранат композитных пленок и планарных 2D золото/гранат структур является актуальным.

Диссертация содержит 194 страницы и 91 рисунок, состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. **Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель исследований, обоснована научная новизна полученных результатов, показана практическая значимость наблюдаемых явлений, изложены основные положения работы, выносимые на защиту. **Первая глава** содержит обзор литературы. Описаны основы макроскопической и микроскопической природы МО эффектов и методов их теоретического расчета, проведен анализ литературных данных о возможности повышения МО отклика висмут-замещенного железоиттриевого граната $\text{Bi}_x\text{Y}_{1-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (Bi:YIG), описаны основные теоретические и экспериментальные результаты исследований магнитофотонных кристаллов и плазмонных МО структур, полученные до выполнения данной диссертационной работы. Кроме того, подробно обсуждаются технологические методики, использованные для изготовления магнитофотонных кристаллов и плазмонных МО структур, приведены схемы проведенных экспериментов.

Во второй главе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования 1D магнитофотонных кристаллов с различной структурой, приготовленные с помощью метода электронно-лучевого или

магнетронного напыления с элементарной ячейкой из четвертьволновых слоев SiO_2 и Bi:YIG . Полученные образцы исследовались или как уединенные МФК или как составные элементы более сложного кристалла.

Третья глава посвящена исследованию оптических и магнитооптических свойств различных 2D магнитофотонных кристаллов. Диссертантом был развит метод изготовления 2D структур на основе Bi:YIG и изучено влияние 2D периодичности на МО отклик кристаллов. Основным методом изготовления 2D МФК была технология клонирования поверхности подложки, отличительной особенностью которой была возможность отображения симметрии подложки в симметрию напыляемой структуры. Были изготовлены и изучены следующие образцы 2D МФК: 1 – планарный магнитофотонный кристалл из YIG , выращенный на подложке из галлий-гадолиниевого граната с 2D массивом платиновых дисков, 2 – 2D структурированная пленка Bi:YIG , выращенная на поверхности пленки искусственного опала, 3 – объемный 2D МФК, выращенный на 1D решетке из полимера.

В четвертой главе представлены результаты исследования взаимодействия линейно-поляризованного света с фотонными кристаллами на основе тонкопленочных и объемных синтетических опалов, сформированных из сферических частиц аморфного SiO_2 . Для изготовления 3D магнитофотонных кристаллов на основе опалов было использовано свойство опаловой матрицы, заключающееся в том, что опалы обладают непрерывной сетью пустот между сферическими частицами. В результате матрица опалов является контейнером для магнитооптических жидкостей и твердых материалов (Bi:YIG , магнетит и др.). Показано, что синтез ферромагнитных и парамагнитных материалов внутри опаловой матрицы определяется типом магнетизма введенного в опал материала.

Пятая глава посвящена исследованию плазмонных 1D фотонных и магнитофотонных кристаллов. Впервые предложена структура для одновременного возбуждения резонансов различной природы, в частности, оптических резонансов, связанных с периодичностью фотонных кристаллов и поверхностного плазмонного резонанса в металлическом слое структуры образцов.

В шестой главе приведены результаты исследований свойств субволновых композитных пленок на основе частиц золота, внедренных в пленку Bi:YIG . Были изготовлены и изучены о планарные пленки Bi:YIG-Au двух типов толщиной 100 нм: 1 – неупорядоченный массив золотых частиц с латеральными размерами в диапазоне 10-100 нм, полученный с помощью многократного напыления и

расплава 5-нм протяженной Au пленки и внедренный в пленку Bi:YIG ; 2 – 2D квадратная или прямоугольная решетка 100-нм золотых частиц, внедренная в пленку Bi:YIG . Проведенное в этой главе численное моделирование систем позволило впервые дать исчерпывающее объяснение механизма увеличения угла магнитооптического вращения при возбуждении локализованного плазмона, а также дать интерпретацию наблюдаемых спектров и определить параметры для плазмонного магнитооптического переключателя.

Все решаемые в диссертационной работе задачи являются **новыми**. Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание проблемы взаимодействия поляризованного света с одномерными (1D), двухмерными (2D) и трехмерными (3D) магнитофотонными кристаллами, а также особенностей магнитооптических спектров золото-гранат композитных пленок и планарных 2D золото/гранат структур.

Наиболее важными новыми результатами, имеющими наибольшую научную и практическую значимость являются следующие.

1. Экспериментальное наблюдение благодаря оптическому эффекту Боррманна увеличения угла поворота поляризации за счет снижения групповой скорости волны, распространяющейся в 1D магнитофотонном кристалле. При этом рост амплитуды электрического поля излучения с длиной волны, соответствующей коротковолновому/длинноволновому краю полосы пропускания, происходит в слоях с меньшим/большим показателем преломления. Рост величины угла фарадеевского вращения благодаря эффекту Боррманна на обоих краях фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) в ограниченных кристаллах, изготовленных из SiO_2 и Bi:YIG .
2. Обнаружение увеличения фарадеевского вращения в двойных микрорезонаторах Фабри-Перо на основе 1D магнитофотонного кристалла. Экспериментальное наблюдение для указанного образца дублетной структуры спектра фарадеевского вращения, свидетельствующей о наличии взаимодействующих микрорезонаторов.
3. Влияние множественной брэгговской дифракции на магнитооптические спектры 2D магнитофотонных кристаллов, выращенных с использованием технологии клонирования подложки. Наблюдение особенностей в оптических спектрах 2D магнитофотонных кристаллов, обусловленных сильной анизотропией пропускания поляризованного света. Значительный рост угла

- поворота плоскости поляризации и изменение знака вращения поляризации на противоположный в режиме пересечения фотонных стоп-зон. Увеличение МО отклика для дифрагированного света в режиме фотонной суперпризмы.
4. Обнаружение в пленках Bi:YIG толщиной порядка 100 нм, выращенных на поверхности опаловых пленок, 2D периодической структуры и спектральных полос, связанных с дифракцией на 2D решетке Bi:YIG . Значительное влияние анизотропии оптических свойств структурированных Bi:YIG пленок на их магнитооптический отклик.
 5. Синтезирование на основе искусственных тонкопленочных и объемных образцов опалов 3D магнитофотонных кристаллов. Обнаружение изменений магнитных свойств композитов (опал/магнитное вещество) в зависимости от магнитных свойств и объема введенного в опал магнитного вещества. Наблюдение резонанса Фабри-Перо и соответствующее ему усиление фарадеевского вращения в структурах опал/ Bi:YIG /опал.
 6. Обнаружение в плазмонных магнитооптических нанокompозитах и периодических структурах на основе золота и Bi:YIG (плазмонная частица в магнитооптической матрице) усиления магнитооптического отклика, наблюдающегося при однократном прохождении света через образцы, на частотах локализованных плазмонных резонансов.
 7. Теоретическое моделирование спектров 2D структур на основе экспериментальных данных по исследованию плазмонных магнитооптических структур, позволившего установить связь между параметрами плазмонной решетки и гигантскими углами вращения плоскости поляризации. Обнаружение эффектов конвертации линейно-поляризованного света в эллиптически-поляризованный с возможностью переключения циркулярности поляризации, которые могут быть использованы для сверхтонкой перестраиваемой ближнепольной пластинки.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания.

1. В первой главе утверждается, что магнитооптические эффекты могут быть разделены на две группы, отличающиеся взаимной ориентацией волнового вектора \mathbf{k} и вектора магнитного поля \mathbf{H} (или намагниченности вещества \mathbf{M}), то есть существует продольная геометрия Фарадея ($\mathbf{k} \parallel \mathbf{H}$) и перпендикулярная геометрия Фогта ($\mathbf{k} \perp \mathbf{H}$). Следовало бы указать, что в данном случае не рассматриваются магнитооптические эффекты отражения (эффекты Керра).

2. На стр. 35 указывается, что при рассмотрении свойств магнитооптических материалов используется тензор «вращающий плоскость поляризации» волны. Речь идет о тензоре диэлектрической проницаемости $\langle \epsilon \rangle$. Использование термина «вращающий плоскость поляризации» некорректно, поскольку при расчете всех магнитооптических эффектов, включая эффекты отражения и, в частности, экваториального эффекта Керра используется тензор $\langle \epsilon \rangle$. Кроме того, целесообразно дать информацию о тензоре магнитной проницаемости.

3. В работе не обсуждается ошибка проводимых магнитооптических измерений. Вместе с тем, например, на стр. 50 приводится следующая информация: «... для образца 1, угол вращения θ_K менялся в узком спектральном диапазоне ... с +1.16 град. до -0.82 град., а это изменение для образца 2 составляло от +1.36град. до -1.26 град». Возникает вопрос, насколько правомерно записывать изменения угла вращения с точностью до второго знака после запятой.

4. На стр. 89 обсуждаются магнитные свойства композитов опал- Fe_3O_4 с увеличением объемной доли Fe_3O_4 внутри опала. Утверждается, что магнитные свойства синтезируемых образцов менялись от парамагнитного характера к ферромагнитному. Целесообразно обсудить также возможность суперпарамагнитного характера композитов при малом объеме Fe_3O_4 внутри опала.

5. При описании экспериментальных результатов изучения одномерных плазмонных фотонных кристаллов, поддерживающих поверхностные волны, схема Кречманна не конкретизирована. По крайней мере, необходимо было указать ограничения на действительные компоненты диэлектрических проницаемостей граничащих сред.

6. Существует ряд стилистических ошибок, например, «...увеличивается температура Кюри, кубическая магнитная анизотропия и магнитострикция» вместо «увеличиваются температура..., кубическая магнитная анизотропия и...»; «...амплитуда стоячей волны может приходиться *на либо атом, либо на промежуток...*», «...что *внутри* ненамагниченной структуры» и т.д. Во многих случаях отсутствуют запятые, соседние слова написаны слитно. Стр.6: вместо Рис.5 надо писать Рис.6; на стр. 80 вместо Рис. 5 надо писать Рис. 39.

Указанные недостатки не снижают ценность работы и не затрагивают основного содержания диссертации.

Резюмируя сказанное, можно констатировать, что диссертационная работа Барышева А.В. выполнена на высоком научном уровне, и представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение

важных практических и научных задач. В частности, осуществлена отработка технологии и изготовления 1D, 2D и 3D магнитофотонных кристаллов на основе Vi:YIG и других магнитооптических материалов. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование оптических и магнитооптических спектров МФК, наблюдение и исследование оптических резонансов и явлений (таммовского состояния, эффекта Боррманна, эффект суперпризмы, моды двойного микрорезонатора Фабри-Перо и соответствующих проявлений этих резонансов и эффектов в магнитооптических спектрах МФК). Диссертационный материал подается автором в логической последовательности, продиктованной поставленной целью и раскрывающими ее задачами. Диссертационная работа Барышева А.В. является завершенным научным исследованием, которое может быть квалифицировано как новое достижение в области физики конденсированного состояния.

Автореферат диссертации и публикации автора в высоко рейтинговых научных изданиях полностью отражают научную новизну и содержание работы.

Диссертационная работа «Магнитооптические эффекты в магнитных и плазмонных наноструктурах» отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Барышев Александр Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,

Главный научный сотрудник

Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Шалыгина Е.Е.

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора Шалыгиной Елены Евгеньевны удостоверяю.

ДЕКАН

Физического факультета МГУ имени М.В.

Профессор

Н.Н. Сысоев