**Введение**

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию линейных и нелинейно-оптических эффектов в плазмонных наноструктурах на основе благородных металлов и оптически-активных веществ и практическим приложениям таких наноструктур. В работе демонстрируются наноструктуры, изготовленные на основе 2D решетки из наночастиц и пленки железо-иттриевого граната; структуры, на основе 1D решетки из золотых полосок и пленки пермаллоя, а также структуры на основе 2D решетки нанодисков и люминесцирующего слоя. Были изучены оптические особенности, наблюдаемые в спектрах пропускания/отражения с помощью экспериментальных исследований и численных моделей.

За последние десятилетия развитие технологий привело к возможности создавать функциональные наноструктуры, имеющие различную геометрию и обладающими принципиально новыми оптическими свойствами, наличие которых невозможно в случае объемных материалов. Электронная нанолитография, используемая для изготовления экспериментальных структур позволила получить образцы из 1D золотых нанополосок имеющие такие же свойства, как и численная модель. Для исследования магнитооптических эффектов, железо-иттриевый гранат напылялся электронным пучком и подвергался нагреву до температуры выше 700 градусов, что позволило получить магнитооптические пленки со значительным магнитооптическим откликом (см. главу 3). Изучение свойств люминесцентных сред требовало изготовление сплошного равномерного слоя красителей и квантовых точек. В результате была выработана методика нанесения, позволяющая получать равномерные люминесцирующие слои поливинилового спирта и родамина 101 толщиной 2мкм, а также равномерный слой квантовых точек толщиной порядка 100 нм.

Исследуемые в работе структуры уже нашли применение в следующих приложениях: управление характеристиками оптического излучения на пространственных масштабах меньше чем длина волны света, детектирование биомаркеров низкой концентрации, управление такими параметрами люминесцирующих среда, как время жизни и интенсивность люминесценции и увеличение сигнала второй гармоники за счет плазмонной структуры.

В плазмонных структурах различают следующие поверхностные моды: "поверхностный плазмон-поляритон" и "локализованный плазмон". Рассмотрим данные моды подробнее.

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) – поверхностные электромагнитные волны, распространяющие вдоль границы двух сред. В качестве одной из сред выступает металл или полупроводник, как источник электронной плазмы. В качестве другой среды выступает диэлектрик - для того, чтобы связать электронную плазму с электромагнитным полем, Связанное состояние возможно только при условии выполнения фазового синхронизма, которое достигается при пересечении дисперсионных кривых (зависимость частоты волны от ее длины), объемной световой волны и ППП.

Локализованный плазмон - колебания электронов проводимости как в уединенных наноразмерных объектах (наночастицах), так и в их разупорядоченных и периодических массивах. Спектральное положение локализованного плазмона (ЛП) сильно зависит от окружающей частицу среды, формы и размера наночастицы, симметрии массива наночастиц. Высокая “настраиваемость” спектрального положения ЛП, а также миниатюрность плазмонных систем вызывает прикладной интерес к таким структурам поскольку позволяет изготавливать компактные устройства оптоэлектроники.

В ряде работ демонстрируется, что свойствами плазмонных структур можно управлять с помощью воздействия внешними полями. Например, магнитное поле приложенное к магнитооптическим плазмонным структурам позволяет эффективно менять магнитооптический отклик (см. главу 2). Такой способ управления позволяет применять плазмонные наноструктуры в оптических устройствах, где требуется быстрое управление оптическими свойствами изменение свойств на наносекундном масштабе.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование взаимодействия света с плазмонными структурами, изучение особенностей линейного и нелинейного магнитоиндуцированного отклика плазмонных структур, демонстрация зависимости плазмонных резонансов на динамику люминесценции красителей и квантовых точек, находящихся в составе плазмонных структур, исследование плазмонных структур в качестве оптического биосенсора и детектирование с их помощью биомаркеров заболеваний сердечно-сосудистой системы.

Актуальность работы обусловлена огромным интересом физики к эффективному управлению светом на наноразмерных объектах. Исследование плазмонных структур с магнитным оптическим слоем или с матрицей из красителей, квантовых точек имеет широкие перспективы по практическому использованию в твердотельной электронике, значительному повышению функциональности существующих приборов и их миниатюризации.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Показано, что нелинейный отклик магнитооптической наноструктуры объясняется с помощью разного спектрального поведения амплитуд и фаз резонансного и нерезонансного вкладов в генерацию второй гармоники, а не за счет магнитоиндуцированного изменения диэлектрической проницаемости граната.

2. Впервые экспериментально продемонстрировано, что положение решеточного плазмонного резонанса определяется взаимной ориентацией решетки рассеивателей и поляризацией падающего излучения. Предложена простая модель для описания спектрального сдвига решеточного плазмонного резонанса.

3. Проведено численное моделирование 1D наноструктур, используемых для детектирования биомолекулярных реакций. Дана исчерпывающая интерпретация наблюдаемых спектральных особенностей и найдены оптимальные условия для увеличения чувствительности биосенсоров. Численно продемонстрированы способы для увеличения чувствительности сенсоров

Практическая значимость диссертационной работы

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть применены для создания миниатюрных устройств оптоэлектроники, а также для повышения чувствительности биосенсоров.

На защиту выносятся следующие положения:

1. В структурах, состоящих из 2D решетки наночастиц и слоя железо-иттриевого граната наблюдается линейный по намагниченности интенсивностный эффект в проходящем свете, обусловленный выраженной ассиметрией границ раздела слоя железо-иттриевого граната

2. Взаимная ориентация решетки наночастиц и поляризации падающего излучения определяет спектральное положение решеточного поверхностного плазмонного резонанса.

3. Интенсивность генерации второй гармоники (ВГ) резонансно возрастает при возбуждении решеточного плазмона в структуре, состоящей из золотых наночастиц и слоя Bi:YIG. Маг-нитоиндуцированный спектральный сдвиг максимума интенсивности ВГ не может быть следствием магнитоиндуцированного изменения диэлектрической проницаемости граната Наблюдаемые эффекты объясняются с помощью разного спектрального поведения амплитуд и фаз резонансного и нерезонансного вкладов в генерацию ВГ.

4. Усиление магнитооптического отклика можно добиться путем варьирования эффективного показателя преломления

5. Показано, что оптимизация геометрии 1D решетки нанополосок способствует добиться высокого уровня чувствительности к целевым молекулам. Проведенные численные расчеты показали, что чувствительность может быть улучшена при измерении магнитооптического отклика плазмонной 1D наноструктуры, изготовленной из благородного металла и магнитооптического материала

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, при этом вклад диссертанта был определяющим.

Достоверность результатов обусловлена адекватностью использованных физических моделей и математических методов, выбранных для решения поставленных задач, корректностью использованных приближений, а также с соответствием результатов численных расчетов и экспериментальных данных. Все используемые в экспериментах измерительные приборы были протестированы и откалиброваны, их инструментальная погрешность определялась независимо в ходе тестовых экспериментов с заведомо предсказуемыми результатами. Эксперименты выполнялись многократно с повторяемыми результатами. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, обсуждены на международных конференциях.

Структура, объем и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой

литературы. Работа содержит страницы, включает рисунков, таблицы и библиографических ссылок.

Основная часть работы имеет следующую структуру:

Глава 1 представляет собой обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных общим свойствам поверхностных плазмон-поляритонов и локализованных плазмонов в наночастице. Также глава посвящена методам активного управления, их характеристиками. Приведены способы усиления оптического, нелинейно-оптического и магнитооптического отклика структурированных материалов, изготовленных на основе периодической решетки наночастиц и магнитооптического или люминесцирующего слоя.

В главе 2 рассматриваются особенности магнитооптических отклика магнитооптических плазмонных структур. В первой части главы исследуется линейный магнитооптический отклик 2D решетки из золотых наночастиц в слое железо-иттриевого граната и 1D решетки нанополосок, покрытых слоем пермаллоя. Приводится объяснение механизма усиления магнитооптического отклика, а также численные расчеты, способствующие дальнейшему усилению магнитооптического отклика. В заключительной части главы приводится механизм усиления магнитоиндуцированной второй гармоники 2D решетки из золотых наночастиц в слое железо-иттриевого граната.

Глава 3 посвящена исследованию аномалии Вуда в приложении к плазмонным наноструктурам. Приведены способы увеличения чувствительности биосенсоров с помощью оптимизации геометрии сенсоров, а также измерением магнитооптического отклика в магнитооптических плазмонных сенсорах. Рассматриваются возможные механизмы усиления сигнала комбинационного рассеяния в окрестности аномалии Вуда.

В главе 4 обсуждаются результаты исследования люминесцирующих плазмонных наноструктур. Проведено исследование пленок с красителями и квантовыми точками на предмет определения коэффициента оптического усиления. Показано, что время затухания люминесценции в 2D решетке из золотых нанодисков с пленкой активной среды может как уменьшаться в результате тушения, так и увеличиваться в результате взаимодействия света с "темными" плазмонными модами.

В заключении сформулированы выводы диссертационной работы.

Публикации

Основные результаты исследований отражены в печатных работах, из них

3 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ведущих периодических изданий ВАК

Апробация диссертационной работы

Результаты работы представлены на 4 докладах на научных конференциях в

России и за рубежом: XVII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике

(Санкт-Петербург, 2015), Международная конференция по ближнепольной микроскопии, нанофотонике и сопутствующим технологиям «NFO - 14» (Хамамацу, Япония, 2016),

IX Международная конференция "Фундаментальные проблемы оптики"  (Санкт-Петербург, 2016), Международная конференция по прикладной нанотехнологии и нанонауке «ANNIC 2017» (Рим, Италия, 2017)