**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 литография, используемая для изготовления экспериментальных структур позволила получить образцы из 1D золотых нанополосок имеющие такие же спектры 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 …… Чуть больше написать про технологию использованных металлов, граната, квантовых точек и люминесцентных сред (спросить Петра)…

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. Успех применения плазмонных структур обусловлен тем, что в таких структурах существуют следующие моды: "поверхностный плазмон-поляритон" и "локализованный плазмон".

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 между положением плазмонных резонансов и динамики 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 нп 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)