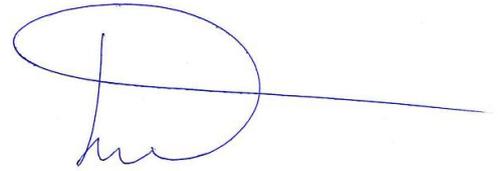


На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'D' followed by a horizontal line extending to the right and some smaller, less distinct characters below.

БАРАНОВ Денис Григорьевич

**ПОГЛОЩЕНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ СВЕТА В ПЛАЗМОННЫХ
КОМПОЗИТАХ**

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (Государственный университет)»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Института теоретической и прикладной
электродинамики РАН
Виноградов Алексей Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
кафедры физической химии Института новых
материалов и нанотехнологий НИТУ «МИСиС»
Капуткина Наталия Ефимовна

кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник сектора теоретических
основ микроэлектроники Физико-технического
института им. А.Ф. Иоффе РАН
Богданов Андрей Андреевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт спектроскопии
Российской академии наук

Защита состоится "___" _____ 2016 г. в __ ч. __ мин. на заседании Диссертационного совета ДМ 002.262.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН при участии Объединенного института высоких температур РАН по адресу: г. Москва, ул. Ижорская, 13, экспозал ОИВТ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института высоких температур РАН.

Автореферат разослан "___" _____ 2016 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

К.И. Кугель

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Разработка методов управления электромагнитным излучением на наномасштабе, в том числе поглощения и генерации излучения – актуальная задача, которую сегодня решает нанофотоника. Поглощение электромагнитного излучения является одной из ключевых проблем в целом ряде прикладных задач нанофотоники. К ним относятся фотовольтаика и термофотовольтаика [1], фотодетектирование [2], генерация горячих электронов [3] и термоплазмоника [4]. Нет необходимости подчеркивать, что увеличение доли поглощаемого фотовольтаическим устройством света увеличивает количество вырабатываемой энергии. Электромагнитное поглощение играет важнейшую роль в процессе фотодетектирования – электронный сигнал, снимаемый с фотодетектора, пропорционален энергии поглощенного света. В термоплазмонике усиленное поглощение света резонансными наночастицами превращает кластеры частиц в нано-источники тепла, что находит применения в медицине и нано-химии. Кроме того, поглощение света металлической частицей приводит к образованию так называемых «горячих электронов» – возбужденных носителей заряда с энергией превосходящей энергию Ферми. Образование горячих электронов позволяет значительно увеличивать скорость протекания некоторых химических реакций, в частности, диссоциации молекулярного водорода и расщепления воды в жидкой фазе. В свете упомянутых практических применений, понимание процессов поглощения электромагнитного излучения является чрезвычайно важным для оптимизации поглощения в существующих системах и разработки совершенно новых подходов к поглощению электромагнитной энергии, в том числе с использованием метаматериалов и анизотропных сред.

Другой актуальной задачей нанофотоники сегодня является разработка и создание нанолазеров - оптических устройств, позволяющих создавать когерентное электромагнитное поле, локализованное на субволновом масштабе [5]. Минитюаризация лазеров до субволнового масштаба является крайне перспективным направлением в свете различных прикладных применений. В их число входит создание оптических каналов связи между электронными компонентами вычислительной схемы [6]. Другой потенциальной областью применения нанолазеров может стать томография биологических тканей и отдельных клеток, в том случае, если такие нанолазеры станут био-совместимыми и внедряемыми [7]. Субволновая локализация

электромагнитного поля лазерной моды может быть достигнута при использовании плазмонного резонатора – наночастицы, выполненной из плазмонного металла. Тем не менее, создание нанолазеров и демонстрация лазерной генерации на субволновом масштабе затрудняются крайне высоким уровнем омических потерь в плазмонных наночастицах [8], что приводит к увеличению порога лазерной генерации. По этой причине, актуальной является задача разработки нанолазеров с низким порогом генерации, что позволило бы получить субволновую лазерную генерацию при комнатных температурах.

Крайне интересный способ управления излучением и взаимодействием излучения с веществом на наномасштабе предполагает использование так называемых суперосцилляций – особых распределений электромагнитного поля, которые демонстрирует быстрые осцилляции в некоторой пространственной области, несмотря на ограниченность пространственного спектра [9]. С помощью таких полей можно добиваться субволновой фокусировки электромагнитной энергии без использования ближнепольных компонент.

Благодаря развитию нанофотоники и методов производства оптических наноструктур, открываются возможности по созданию совершенно новых электромагнитных поглотителей и нанолазеров. Поведение наноструктурированных электромагнитных систем может значительно отличаться от закономерностей, известных для классических поглотителей и лазеров. Поэтому исследование процессов полного поглощения электромагнитного излучения и лазерной генерации на субволновом масштабе чрезвычайно актуально. Диссертация посвящена именно этим задачам.

Целью диссертационной работы является исследование процессов полного поглощения, лазерной генерации света в различных композитных и нанофотонных системах и формирования суперосциллирующих сигналов на наномасштабах.

В рамках диссертации решались следующие **задачи**:

1. Исследование полного поглощения света полубесконечным гиперболическим поглощающим материалом.
2. Исследование лазерной генерации в спазере и взаимодействия лазерной моды с падающим излучением.
3. Исследование лазерной генерации в оптических нанорезонаторах, содержащих частицы из материалов с высоким показателем преломления.
4. Исследование лазерной генерации и распространения света в системах, одновременно содержащих усиливающую и магнито-оптическую среды.

5. Исследование возможности возбуждения квантового источника низкочастотным сигналом.
6. Исследование генерации суперосциллирующего сигнала нелинейными системами при их возбуждении гармоническим колебанием.

Научная новизна

1. Изучено распространение поверхностных плазмонов по поглощающей гиперболической (индефинитной) среде. Показано, что для определенных параметров одноосной среды длины пробега плазмона может неограниченно возрастать, несмотря на наличие поглощения в одноосном материале.
2. Исследована теоретически и экспериментально (совместная работа с Университетом штата Канзас и Исследовательской лабораторией военно-морского флота США) возможность полного поглощения падающей р-поляризованной электромагнитной волны полубесконечным слоем одноосной поглощающей среды – Ван дер Ваальсовским кристаллом (гексагональным нитридом бора hBN)
3. Представлена модель, позволяющая в рамках классической нелинейной электродинамики аналитически описать поведение спазера выше порога лазерной генерации.
4. Предложено устройство магнито-оптического спазера – субволнового источника ближнего когерентного, циркулярно-поляризованного электромагнитного поля.
5. Исследовано распространение собственных мод по плазмонной магнито-оптической цепочке. Предсказано сильное увеличение магнито-оптических свойств такой системы, в том числе, фарадеевского вращения поляризации, по сравнению с однородной магнито-оптической средой, и обсуждена возможность компенсации омических потерь путем добавления в систему усиливающей среды.
6. Показано, что сферическая наночастица из материала с высоким показателем преломления (кремния) может служить резонатором для реализации субволнового лазера, не содержащего плазмонные металлы.
7. Продемонстрирована возможность возбуждения двухуровневой системы суперосциллирующим полем, все спектральные компоненты которого лежат ниже резонансной частоты перехода квантового излучателя.
8. Предложен метод получения суперосциллирующих во времени электромагнитных колебаний на выходе нелинейной безинерционной системы, на вход которой подается низкочастотный гармонический сигнал.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается совпадением теоретических результатов с результатами экспериментов и результатами численного моделирования. Результаты были доложены и одобрены на международных конференциях, а также опубликованы в ведущих мировых научных журналах.

Научная и практическая значимость работы

Результаты данной диссертационной работы посвящены широко обсуждаемым научным проблемам поглощения и генерации электромагнитного излучения в нанооптике. В частности, полное (максимально возможное) поглощение электромагнитного излучения чрезвычайно важно в таких приложениях, как создание радиопоглощающих покрытий, фотодетектирование, фотовольтаика и термофотовольтаика. Как правило, полное поглощение достигается посредством деструктивной интерференции волн, последовательно отраженных от поглощающей структуры [10, 11]. В диссертации предложен новый подход к полному поглощению излучения, не предполагающий деструктивной интерференции отраженного света. Эффект экспериментально верифицирован в инфракрасном диапазоне с использованием образца Ван дер Ваальсовского кристалла – нитрида бора. Предлагаемый подход интересен с фундаментальной точки зрения, и в то же время он предлагает новый способ достижения полного поглощения электромагнитной энергии.

Нанолазеры в перспективе могут стать важным связующим звеном между электронными и оптическими компонентами вычислительных устройств нового поколения. Кроме того, использование нанолазеров в медицине откроет новые пути к томографии тканей и диагностике различных заболеваний [7]. В рамках данной диссертационной работы предложен дизайн магнито-оптического спазера – ближнепольного источника когерентного циркулярно-поляризованного поля. Было продемонстрировано, что использование МО спазера позволяет усилить эффект Фарадея в цепочках плазмонных частиц. Также в диссертации предложена схема диэлектрического нанолазера – лазера, позволяющего получить когерентное поле на субволновом масштабе без использования высоко-диссипативных плазмонных материалов. Вместо них, резонатором выступает наночастица, выполненная из диэлектрика с высоким показателем преломления, обладающая резонансом Ми при субволновом размере.

Помимо поглощения излучения планарными системами, рассмотрена проблема поглощения фотонов одиночными атомами. В диссертации

исследована возможность возбуждения двухуровневой квантовой системы из основного состояния при помощи нерезонансного суперосциллирующего электрического поля, все спектральные компоненты которого лежат ниже резонансной частоты перехода атома. Данный эффект может быть важным для разработки новых методов когерентного контроля атомных состояний.

Положения, выносимые на защиту

1. По границе одноосной однородной поглощающей среды с вакуумом может распространяться поверхностный плазмон, длина пробега которого может быть неограниченно большой, несмотря на наличие поглощения. На граничной частоте плазмон трансформируется в однородную волну, без отражения падающую на поглощающую среду.
2. Плоская р-поляризованная электромагнитная волна может быть полностью поглощена полубесконечным слоем одноосной диссипативной среды без использования механизма деструктивной интерференции отраженного света.
3. Поведение плазмонного нанолазера выше порога лазерной генерации может быть аналитически описано в рамках классической нелинейной электродинамической модели. Подход позволяет описать как амплитуду лазерной моды в зависимости от накачки активной среды, так и отклик нанолазера на внешнее осциллирующее поле, в том числе предсказать подпороговую компенсацию потерь и синхронизацию лазерных осцилляций внешним полем.
4. Включение магнито-оптического материала в дизайн спазера образует магнито-оптический спазер – нанолазер, обладающий двумя лазерными модами с циркулярной поляризацией дипольного момента и отличающимися порогами и частотами генерации.
5. Периодическая цепочка плазмонных наночастиц, погруженных в магнито-оптическую среду, обладает спектром собственных мод с циркулярной поляризацией дипольного момента. Распространение возбуждения по такой цепочке сопровождается фарадеевским вращением поляризации, величина которого в несколько раз превосходит вращение в соответствующей однородной среде. Джоулевы потери могут быть скомпенсированы путем включения в систему усиливающей среды. Практически полная компенсация потерь достижима при использовании квантовых точек.
6. Субволновая лазерная генерация может происходить в наноструктурах, не содержащих плазмонных металлов – сферических наночастицах, выполненных из диэлектриков с высоким показателем преломления, покрытых слоем из усиливающей среды. Лазерные моды таких структур

связаны с полюсами коэффициентов Ми. Порог генерации диэлектрического нанолазера значительно ниже порога плазмонного нанолазера.

7. Двухуровневую квантовую систему с электро-дипольным переходом можно перевести из основного состояния в состояние с инверсной заселенностью при помощи суперосциллирующего импульса внешнего электромагнитного поля, спектральные компоненты которого лежат ниже резонансной частоты двухуровневой системы. Процесс происходит в режиме сильной связи квантовой системы и поля и не может объясняться многофотонными процессами.
8. При возбуждении нелинейной безинерционной системы низкочастотным гармоническим сигналом может наблюдаться генерация суперосциллирующего сигнала при надлежащем выборе функции отклика нелинейной системы.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на следующих российских и международных конференциях:

- 55-я, 56-я, 57-я научные конференции МФТИ, Долгопрудный, Россия, 2012-2014;
- 12-я, 13-я, 14-я ежегодные конференции ИТПЭ РАН, Москва, Россия, 2011-2013;
- 5-я Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 2011;
- Всероссийская молодежная конференция «Наноматериалы и нанотехнологии», Москва, Россия, 2012;
- Международная конференция «Дни дифракции», Санкт-Петербург, Россия, 2012;
- 9-я и 10-я Всероссийские конференции «Молодые ученые», Москва, Россия, 2013-2014;
- International conference on theoretical and computational nanophotonics TaCoNa-2012, Bad Honnef, Germany;
- The 5th International Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials (Nanometa), Tirol, Austria, 2013;
- Donostia International Conference on Nanomagnetism and Applications, San Sebastian, Spain, 2013;
- The 14th Trends in Nanotechnology International Conference, Seville, Spain, 2013;
- International Conference META'14, Singapore, 2014;
- International Conference Photon14, London, UK, 2014;
- Surface Plasmon Photonics 7 International Conference, Jerusalem, Israel, 2015.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 11 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и других изданиях, включенных в список ВАК.

Личный вклад соискателя

Все изложенные в диссертации оригинальные результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в выборе объектов исследования, постановке задач, разработке теоретических подходов, численном моделировании, анализе экспериментальных данных и обсуждении полученных результатов. Непосредственно автором была выдвинута гипотеза о возможности нерезонансного возбуждения квантового источника суперосциллирующим полем и о возможности полного поглощения света в гексагональном нитриде бора.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 219 наименований. Общий объем 124 страницы, в том числе 51 рисунок.

Краткое содержание работы

Во **введении** обсуждается актуальность темы работы, научная новизна; обозначены цели работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В этой главе дан обзор электромагнитных поглотителей, нанолазеров и явления суперосцилляций.

Во **второй главе** исследуются свойства одноосных поглощающих сред. Глава состоит из двух частей. В **первой части** исследуется задача о распространении поверхностного плазмона по одноосному поглощающему материалу. Показано, что по поверхности полупространства, заполненного гиперболическим метаматериалом (Рис. 1а), может распространяться плазмон, такой, что его длина пробега может неограниченно возрастать при приближении к определенной критической частоте, зависящей от параметров одноосного материала. Возрастание длины пробега происходит, несмотря на конечную величину омических потерь внутри метаматериала. Существование этого плазмона приводит к новому явлению - существованию действительного угла Брюстера при падении ТМ-поляризованной волны на поглощающий материал – иначе говоря, полному поглощению падающей волны на полубесконечный слой материала без использования явления деструктивной интерференции отраженного света. Как известно, в случае изотропных сред добавление потерь в систему приводит к нарушению явления Брюстера – падение волны на полубесконечный слой всегда сопровождается отражением

[12]. Наличие сильной анизотропии у рассматриваемого метаматериала позволяет добиться режима, в котором отраженная волна отсутствует. Рассмотрено распространение поверхностного плазмона по тонкой плоскопараллельной пластинке из рассматриваемого материала и обнаружены те же закономерности, которые имеют место для полубесконечного кристалла.

Во второй части главы представлено экспериментальное подтверждение полного поглощения *p*-поляризованной волны полубесконечным слоем одноосного поглощающего материала без использования явления деструктивной интерференции отраженного света. Механизм полного поглощения связан с равенством импедансов воздуха и одноосной среды. Концепция однопроходного поглотителя была экспериментально продемонстрирована в инфракрасном диапазоне с использованием гексагонального нитрида бора (hBN) – Ван-дер-Ваальсовского кристалла, состоящего из атомарных слоев, образованных атомами азота и бора и удерживаемых между собой только силами ван дер Ваальса [13]. Благодаря анизотропии кристаллической решетки, диэлектрическая проницаемость hBN является сильно анизотропной на частотах, соответствующих фонон-поляритонным резонансам материала. Для экспериментальной верификации явления, был выращен оптически толстый слой гексагонального нитрида бора на металлической подложке (Рис. 1б). При параметрах падающей волны, предсказанных аналитическими методами, наблюдается сильное подавление интенсивности отраженной волны до уровня 10^{-6} , что подтверждает возможность полного поглощения в отсутствие деструктивной интерференции.

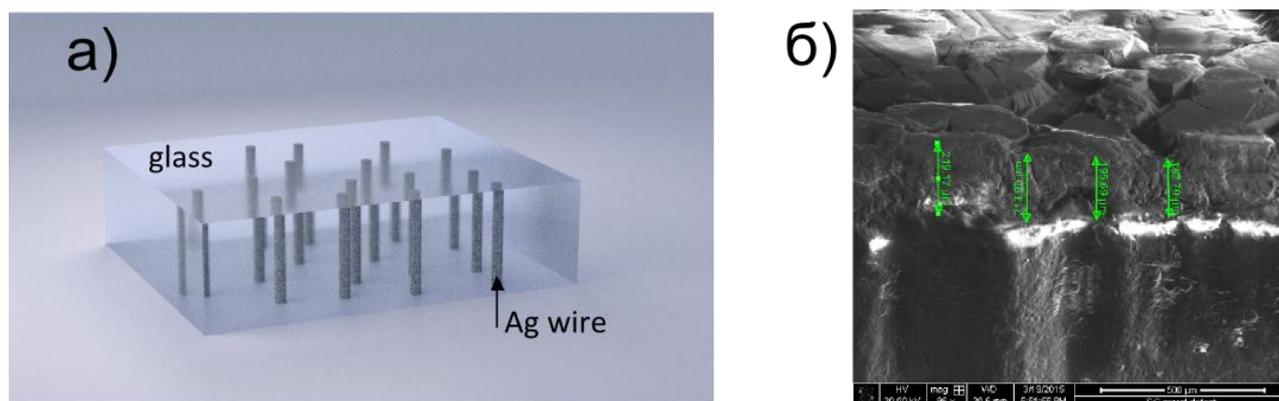


Рис. 1. (а) Схематичное изображение анизотропного метаматериала, образованного металлическими нанопроволочками, помещенными в стеклянную матрицу. (б) Микроскопическое изображение толстого слоя (200 мкм) гексагонального нитрида бора на металлической подложке.

Третья глава посвящена исследованию нанолазеров. В **первой части главы** представлена «игрушечная», точно решаемая модель спазера. Рассматриваемый спазер представляет собой субволновую слоистую частицу, состоящую из усиливающего ядра и плазмонной оболочки. Наличие плазмонной оболочки сдвигает частоту генерации в область плазмонного резонанса, позволяя уменьшить размер системы до нескольких десятков нанометров. Благодаря размещению усиливающей среды в сферическом ядре структуры, система обладает решением с однородным электрическим полем внутри усиливающего участка. Такое пространственное распределение поля позволяет в рамках электродинамики решить нелинейную задачу аналитически выше порога лазерной генерации, там, где необходим учет нелинейности усиливающей среды. Разработанная модель позволяет описать амплитуду лазерной моды в надпороговом режиме, предсказывая известный линейный рост интенсивности с увеличением накачки [14]. Кроме того, игрушечная модель описывает отклик спазера на внешнее электромагнитное поле. В том числе, она позволяет установить области синхронизации спазера внешним полем – так называемый язык Арнольда и предсказывает возможность компенсации омических потерь ниже порога лазерной генерации (Рис. 2а).

Во **второй части главы** анализируется диэлектрический нанолазер – субволновая сферическая частица, выполненная из материала с высоким значением показателя преломления (полупроводника) и покрытая слоем усиливающей среды (Рис. 2б). Полупроводниковые материалы с относительно

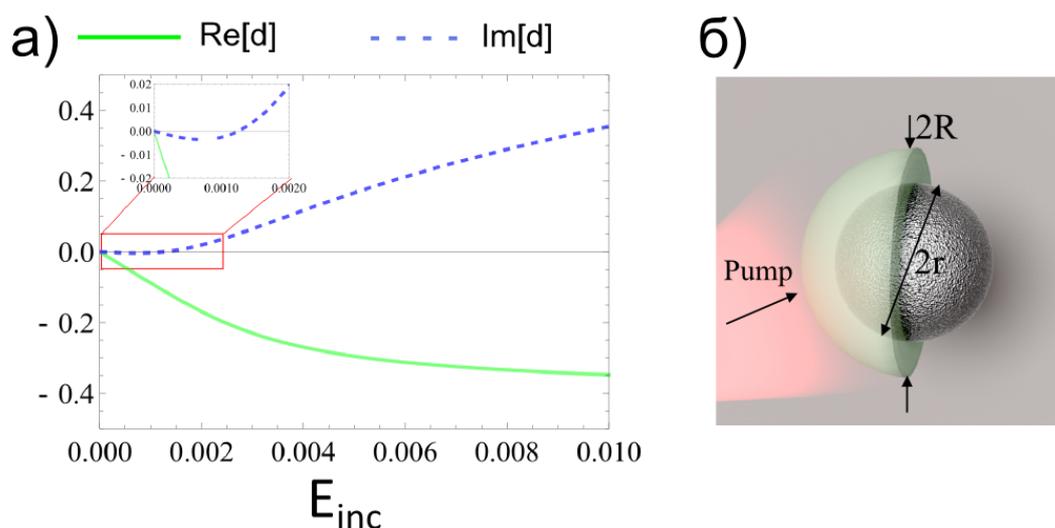


Рис. 2. (а) Зависимость действительной и мнимой части дипольного момента спазера от величины внешнего поля ниже порога генерации. (б) Условное изображение диэлектрического нанолазера.

высоким показателем преломления в оптическом диапазоне, такие как кремний, германий и арсенид галлия, позволяют реализовать сферические нанорезонаторы на оптических частотах без использования плазмонных металлов [15]. Резонансы в таких частицах – это резонансы Ми низкого порядка. Данные резонансы следует отличать от резонансов шепчущей галереи, которые происходят в частицах, имеющих размеры много большие, чем длина волны в вакууме. Такой высокодобротный резонатор может являться платформой для создания нанолазеров, не содержащих плазмонных металлов. Лазерные моды такой структуры отыскиваются в виде решений уравнений Максвелла в отсутствие падающего на систему поля. Оказывается, что все лазерные моды сферического нанолазера соответствуют полюсам коэффициентов Ми. В задаче с падающим полем эти коэффициенты определяют рассеянные наночастицей поля. В системе без усиления, эти полюса лежат в нижней полуплоскости комплексной плоскости частот $\text{Im}\omega < 0$, что соответствует затуханию моды со временем. С увеличением накачки полюс может достигнуть оси действительных частот – это соответствует возникновению у системы незатухающего решения без падающего поля, т.е. лазерированию. Мы установили значения частот и порогов лазерной генерации для частицы из кремния радиуса $r = 180$ нм, покрытой усиливающей оболочкой толщиной $0.8r$ и сравнили их с порогом генерации спазера, образованного плазмонной наночастицей. Порог для квадрупольной электрической и магнитной моды оказался значительно ниже порога генерации плазмонного спазера; требуемое значение усиления достижимо при использовании квантовых точек в качестве усиливающей среды при комнатной температуре.

В четвертой главе рассмотрены вопросы распространения и лазерной генерации в системах, содержащих одновременно усиливающую и магнито-

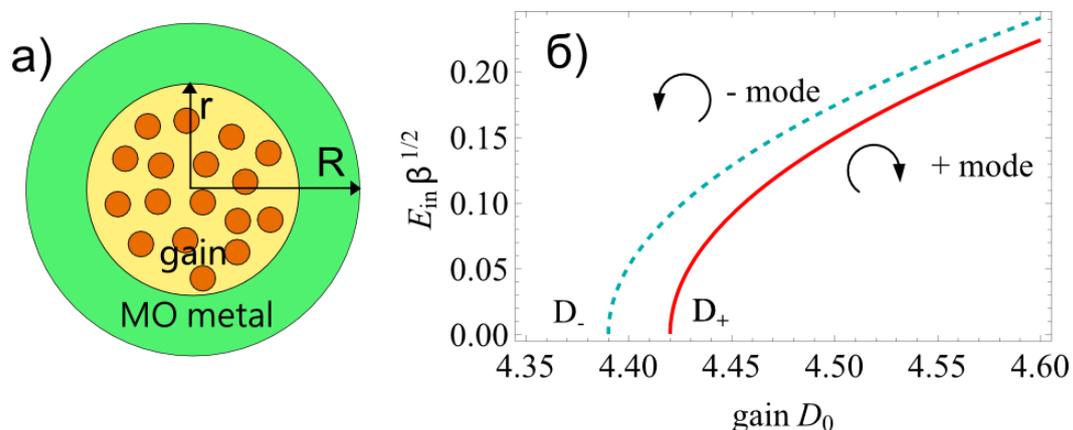


Рис. 3. (а) Схематичное изображение МО спазера. (б). Зависимость амплитуды двух циркулярно-поляризованных лазерных мод МО спазера от накачки.

оптическую (МО) среды. **В первой части главы** предложен дизайн нового оптического устройства – магнито-оптического спазера. МО спазер представляет собой субволновой источник когерентного циркулярно-поляризованного электромагнитного поля. МО спазер состоит из сферического ядра из активной среды (молекул красителя или квантовых точек), покрытого металлической оболочкой, проявляющей МО отклик. В качестве МО материала использовался кобальт. Вся структура имеет субволновой размер. Активная среда моделируется как ансамбль идентичных двухуровневых систем, распределенных в матрице. Отклик активной среды описывается эффективной диэлектрической проницаемостью с отрицательной мнимой частью. Далее отыскивались лазерные моды МО спазера. В квазистатическом приближении МО спазер обладает двумя лазерными модами, для которых дипольный момент частицы лежит в плоскости гиротропии (перпендикулярно вектору намагниченности МО среды). Лазерные моды имеют различные частоты и порог генерации, рис. 3а. Существует интервал значений накачки, при котором существует только одна циркулярно-поляризованная лазерная мода с меньшим порогом генерации.

Во второй части главы исследовано распространение электромагнитного возбуждения по одномерной периодической плазмонной магнито-оптической цепочке (Рис. 4а). Хорошо известно, что в МО системах, содержащих металлические наночастицы, плазмонный резонанс позволяет существенно усилить МО эффекты [16], в частности, фарадеевское вращение. Вблизи частоты плазмонного резонанса по цепочке могут распространяться две моды с правой и левой циркулярной поляризацией и различной величиной волнового

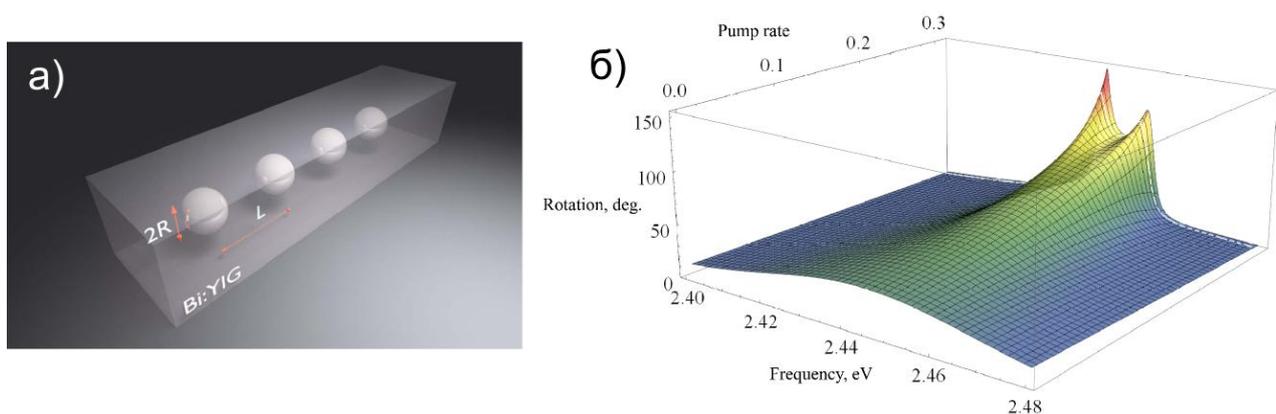


Рис. 4. (а) Схематическое изображение периодической МО цепочки плазмонных наночастиц, погруженных в МО среду. (б) Величина Фарадеевского вращения в МО цепочке как функция частоты и накачки активной среды.

вектора. Как следствие, распространение возбуждения, созданного линейной поляризацией, сопровождается эффектом Фарадея. Низкий уровень омических потерь критически важен для усиления вращения: при наличии потерь величина фарадеевского вращения сильно падает. Длина пробега моды по цепочке с потерями составляет порядка периода цепочки, что крайне недостаточно для применения такой волноводной системы на практике. Таким образом, возникает вопрос о возможности компенсации омических потерь. Чтобы исследовать этот вопрос, рассматривается цепочка, образованная композитными слоистыми частицами, содержащими усиливающие слои (как для МО спазера). Комбинация усиливающей среды и плазмонного резонатора ведет к образованию лазерной системы – МО спазера. На рис. 4б приведена зависимость величины фарадеевского вращения от частоты и накачки активной среды. Увеличение накачки ведет к тому, что величина вращения поляризации МО цепочкой растет внутри разрешенной зоны собственных мод. При накачке близкой к $D_0 = 0.3$ становится различима тонкая структура, состоящая из двух пиков вблизи границы разрешенной зоны. Кроме того, возрастает длина пробега моды и, как следствие, коэффициент пропускания конечной цепочки.

Пятая глава освещает задачи взаимодействия суперосциллирующих сигналов с физическими системами. Суперосциллирующей называется функция, которая в некоторой области осциллирует быстрее, чем самая быстрая компонента в спектре этой функции [17]. **В первой части главы** рассматривается задача о динамике двухуровневой квантовой системы с

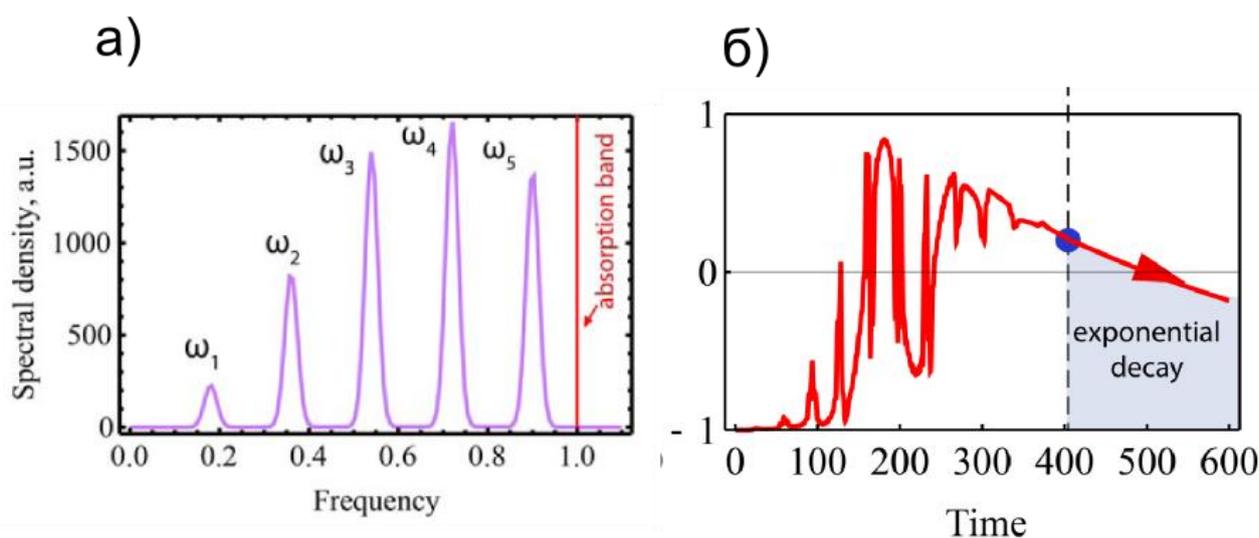


Рис. 5. (а) Спектр суперосциллирующего сигнала, взаимодействующего с двухуровневой системой. (б) Динамика инверсии заселенности двухуровневой системы, взаимодействующей с импульсом поля, спектр которого изображен на рисунке (а).

электрическим дипольным моментом перехода, взаимодействующей с внешним электромагнитным полем, которое является суперосциллирующим во времени. Принято считать, что квантовый излучатель может быть возбужден на верхний энергетический уровень, если частота падающего света лежит в узкой линии поглощения $\omega_0 - \Gamma < \omega < \omega_0 + \Gamma$. В контексте явления суперосцилляций возникает вопрос: можно ли возбудить ДУС СО электрическим полем, все спектральные компоненты которого лежат вне полосы поглощения ДУС? Для ответа на этот вопрос была промоделирована временная динамика двухуровневой системы, помещенной в переменное электрическое поле. Путем подбора амплитуд гармонических колебаний была построена функция, задающая зависимость электрического поля от времени такая, что в определенные моменты времени частота осцилляций была равна частоте перехода квантовой системы, несмотря на то, что в спектре функции эти гармоники отсутствовали (Рис. 5а). При достаточно большой амплитуде электрического поля после окончания действия падающего импульса двухуровневая система находится в состоянии с инверсной заселенностью, рис. 5б. Было показано, что данное поведение квантового источника не вызвано уширением спектра внешнего импульса и что оно сильно зависит от суперосциллирующего поведения поля. **Во второй части главы** изучается отклик нелинейной безынерционной системы на осциллирующий входной сигнал. Предложен метод нелинейного синтеза суперосциллирующего сигнала из низкочастотного гармонического сигнала.

В заключении обобщены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. Исследовано распространение поверхностных плазмонов по поглощающей гиперболической среде. Показано, что для определенных параметров одноосной среды длины пробега плазмона может неограниченно возрастать, несмотря на наличие поглощения в одноосном материале.
2. Предсказана теоретически возможность полного поглощения падающей р-поляризованной волны полубесконечным слоем Ван дер Ваальсовского кристалла – гексагонального нитрида бора. Явление продемонстрировано экспериментально в оптически толстом слое материала.
3. Развита «игрушечная» модель, позволяющая в рамках классической электродинамики описать поведение спазера выше порога генерации. В рамках модели показана возможность компенсации потерь спазером ниже порога генерации и синхронизации лазерных осцилляций внешним электромагнитным полем.

4. Исследованы лазерные моды магнито-оптического спазера. Получены выражения для порога и частоты генерации двух мод с правой и левой циркулярно поляризацией дипольного момента наночастицы.
5. Исследован спектр собственных мод плазмонной магнито-оптической периодической цепочки. Предсказано резонансное увеличение эффекта Фарадея по сравнению с однородной магнито-оптической средой, продемонстрирована возможность компенсации потерь, вызванных поглощением в плазмонном металле, путем добавления в систему усиливающей среды.
6. Исследованы лазерные моды системы «диэлектрическая частица из материала с высоким показателем преломления – усиливающая среда». Установлена связь лазерных мод с полюсами коэффициентов Ми, получено выражение, определяющее частоту и порог генерации мод диэлектрического нанолазера.
7. Исследована численно временная эволюция электродипольного перехода взаимодействующего с внешним суперосциллирующим электрическим полем. Предсказана возможность нерезонансного возбуждения двухуровневой системы суперосциллирующим полем, все спектральные компоненты которого лежат ниже резонансной частоты перехода системы.
8. Показано, что при возбуждении нелинейной безынерционной системы гармоническим низкочастотным сигналом может происходить генерация суперосциллирующего сигнала на выходе системы, частоты которого на порядок превосходит частоту падающего сигнала.

Список публикаций

Основные результаты диссертации представлены в 12 печатных работах, включая 11 статей *в реферируемых научных журналах из списка ВАК*:

- 1) Баранов Д.Г., Виноградов А.П., Симовский К.Р., Нефедов И.С., и Третьяков С.А. К электродинамике поглощающей одноосной неположительно определенной (индефинитной) среды // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2012. – Т. 114. – С. 650.
- 2) Baranov D.G., Vinogradov A.P., and Simovski C.R. Perfect absorption at Zenneck wave to plane wave transition // *Metamaterials*. – 2012. – Vol. 6. – P. 70.
- 3) Baranov D.G., Vinogradov A.P., and Simovski C.R., Perfect absorption by semi-infinite indefinite medium // *Days on Diffraction, 2012*. – IEEE, 2012. – P. 32.
- 4) Baranov D.G., Andrianov E.S., Vinogradov A.P., and Lisyansky A.A. Exactly Solvable Toy Model for SPASER // *AIP Conference Proceedings*. – 2012. – Vol. 1475. – P. 110.
- 5) Baranov D.G., Andrianov E.S., Vinogradov A.P., and Lisyansky A.A. Exactly

solvable toy model for surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21. – P. 10779.

6) Baranov D.G., Vinogradov A.P., Lisyansky A.A., Strelniker Y.M., and Bergman D.J. Magneto-optical spaser // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38. – P. 2002.

7) Baranov D.G., Vinogradov A.P., and Lisyansky A.A. Abrupt Rabi oscillations in a superoscillating electric field // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39. – P. 6316.

8) Baranov D.G., Vinogradov A.P., and Lisyansky A.A. Magneto-optics enhancement with gain-assisted plasmonic subdiffraction chains // *Journal of Optical Society of America B*. – 2015. – Vol. 32. – P. 281.

9) Baranov D.G., Zyablovsky A.A., Dorofeenko A.V., Vinogradov A.P., and Lisyansky A.A. Comment on “Counterintuitive Dispersion Violating Kramers-Kronig Relations in Gain Slabs” // *Physical Review Letters*. – 2015. – Vol. 114. – P. 089301.

10) Baranov D.G., Vinogradov A.P., and Lisyansky A.A. Superoscillating response of a nonlinear system on a harmonic signal // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2015. – Vol. 121. – P. 209.

11) Baranov D.G., Edgar J.H., Hoffman T., Bassim N., and Caldwell J.D. Perfect interferenceless absorption at infrared frequencies by a van der Waals crystal // *Physical Review B*. – 2015. – Vol. 92. – P. 201405(R).

Цитированная литература

1. Atwater H.A. and Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices // *Nature Materials*. – 2010. – Vol. 9. – P. 205.
2. Knight M.W., Sobhani H., Nordlander P., and Halas N.J. Photodetection with active optical antennas // *Science (New York, N.Y.)*. – 2011. – Vol. 332. – P. 702.
3. Brongersma M.L., Halas N.J., and Nordlander P. Plasmon-induced hot carrier science and technology // *Nature Publishing Group*. – 2015. – Vol. 10. – P. 25-34.
4. Baffou G. and Quidant R. Thermo-plasmonics: using metallic nanostructures as nano-sources of heat // *Laser & Photonics Reviews*. – 2013. – Vol. 7. – P. 171-187.
5. Hill M.T. and Gather M.C. Advances in small lasers // *Nature Photonics*. – 2014. – Vol. 8. – P. 908.
6. Leuthold J. Plasmonic communications: Light on a wire // *Opt. Photon. News*. – 2013. – Vol. 24. – P. 28.
7. Gather M.C. and Yun S.H. Single-cell biological lasers // *Nature Photonics*. – 2011. – Vol. 5. – P. 406-410.

8. Khurgin J.B. and Sun G. Comparative analysis of spasers, vertical-cavity surface-emitting lasers and surface-plasmon-emitting diodes // *Nature Photonics*. – 2014. – Vol. 8. – P. 468.
9. Kempf A. Black holes, bandwidths and Beethoven // *Journal of Mathematical Physics*. – 2000. – Vol. 41. – P. 2360.
10. Luo J., Li S., Hou B., and Lai Y. A unified theory for perfect absorption in ultra-thin absorptive films with reflectors // *Physical Review B*. – 2014. – Vol. 165128. – P. 1-18.
11. Kats M.a., Blanchard R., Genevet P., and Capasso F. Nanometre optical coatings based on strong interference effects in highly absorbing media // *Nature Materials*. – 2013. – Vol. 12. – P. 20.
12. Born M. and Wolf E. *Principles of Optics*. – Cambridge University Press, 1999.
13. Geim A.K. and Grigorieva I.V. Van der Waals heterostructures // *Nature*. – 2013. – Vol. 499. – P. 419-425.
14. Haken H. *Laser Light Dynamics*. – North-Holland, 1986.
15. Kuznetsov A.I., Mirosnichenko A.E., Fu Y.H., Zhang J., and Luk'yanchuk B. Magnetic light // *Sci. Rep.* – 2012. – Vol. 2. – P. 492.
16. Belotelov V.I., Akimov I.A., Pohl M., Kotov V.A., Vengurlekar A.S., Gopal A.V., Yakovlev D.R., Zvezdin A.K., and Bayer M. Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals // *Nat. Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 6. – P. 370-376.
17. Berry M.V. Evanescent and real waves in quantum billiards and Gaussian beams // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – 1994. – Vol. 27. – P. 391-398.

БАРАНОВ Денис Григорьевич

**ПОГЛОЩЕНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ СВЕТА В ПЛАЗМОННЫХ
КОМПОЗИТАХ**

Автореферат