

На правах рукописи

Носков Роман Евгеньевич

**Оптические свойства
наноструктурированных плазмонных
метаматериалов**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2011

Работа выполнена в *Учреждении Российской академии наук
"Институт физики микроструктур РАН"*.

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук
Жаров Александр Александрович*

Официальные оппоненты: *кандидат физико-математических наук
Белов Павел Александрович
Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург
доктор физико-математических наук,
профессор Смирнов Александр Ильич
Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород*

Ведущая организация: *Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва*

Защита состоится «_____» _____ 2011 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при *Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского*, расположенном по адресу: 603950, *Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420*.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского*.

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н, доцент

Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

По-видимому, исторически термин "метаматериал" впервые был использован в работах [1, 2] применительно к искусственно структурированным средам с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями. В таких средах макроскопические электрическое и магнитное поля в однородной плоской волне образуют левую тройку с волновым вектором (в отличие от обычных сред с положительными диэлектрической и магнитной проницаемостями, в которых соответствующая тройка является правой), откуда следует, что волновой вектор и средняя по времени плотность потока энергии оказываются противоположно направленными, а сами волны обратными. По этой причине среды, поддерживающие обратные волны, чаще всего называются "левыми" или "левосторонними". Возбуждение обратных волн в левых средах приводит к обращению эффектов Доплера и Вавилова-Черенкова, возникновению отрицательной рефракции электромагнитных волн на границе раздела правой и левой сред и ряду других необычных электромагнитных свойств [3, 4], не встречающихся у природных сред, благодаря чему метаматериалами вскоре стал называться целый класс искусственных композитных структур с электромагнитными свойствами, не имеющими аналогов у природных материалов. В отличие от обычных сред, свойства которых определяются атомами и молекулами, из которых они состоят, свойствами метаматериалов можно управлять за счёт подбора и компоновки искусственно создаваемых "метаатомов". Принцип создания макроскопической структуры на основе микроскопических элементов таким образом, что получаемый в итоге материал приобретает качественно новые свойства (отличные от свойств отдельных микрочастей) является краеугольным камнем концепции метаматериалов. В сущности, приставка "мета" (означающая в переводе с греческого, в частности, "над", "за пределами") подчёркивает, что метаматериалы принципиально отличаются от обычных природных сред и в смысле принципа их создания и в смысле их свойств.

Достаточно высокий уровень современных технологий сделал возможным практически полный контроль над формой и размером отдельных метаатомов и над топологией метаматериалов в целом, что позволило не только создать левые среды [5–7], но и реализовать идеи трансформационной электродинамики [8–11] в устройствах, обеспечивающих электромагнитную невидимость [12–15], канализацию и фокусировку электромагнитных волн [16] и др. Другой областью активных исследований стала разработка метаматериалов для передачи распределений электромагнитного поля со сверхразрешением [17–24]. Метаматериалы также продемонстрировали свойства, привлекательные для использования в малых антеннах [25, 26], линиях задержки [27] и сенсорах [28].

Представляемая диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию некоторых вопросов взаимодействия света с наноструктурированными метаматериалами. Существенный интерес к данной области современной электродинамики инициирован, с одной стороны, уникальными электромагнитными свойствами таких структур, недостижимыми у природных сред, с другой стороны, такими важными практическими приложениями, как нанофотоника, ближнепольная оптика, оптическая литография, полностью оптическая обработка информации и т.д. Настоящая работа в значительной мере исходит из потребностей перечисленных приложений, хотя непосредственное рассмотрение какого-либо из них не ставилось её целью. В то же время проведённые исследования представляют самостоятельный интерес с точки зрения фундаментальной физики. В частности, некоторые из предсказанных эффектов весьма неожиданны и не были пока показаны экспериментально, что даёт основание надеяться на то, что сделанные в работе расчёты и оценки помогут в подготовке и проведении будущих экспериментов.

Цели диссертационной работы

Основными целями диссертации являются:

- Разработка дизайна объёмного левостороннего оптического метаматериала и вычисление его эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей.
- Исследование двулучепреломляющих левосторонних линз на основе анизотропного метаматериала, электромагнитные свойства которого описываются тензорами диэлектрической и магнитной проницаемостей специального вида.
- Построение динамической теории формирования субволновых изображений плоской левосторонней суперлинзой.
- Исследование эффекта спонтанного нарушения электродинамической симметрии в геометрически симметричных нелинейных металлических нанодимерах.
- Изучение оптической бистабильности в планарных металло-диэлектрических наноструктурах, представляющих собой периодическую последовательность ультратонких металлических плёнок и слоев диэлектрика с керровским типом нелинейности.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется оригинальностью решённых задач и заключается в следующем:

1. Предложен дизайн изотропного оптического левостороннего метаматериала на основе массива сдвоенных металлических наночастиц (нанодимеров) и в рамках теории Лорентц-Лоренца рассчитаны его эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости. Проанализировано влияние диэлектрического окружения и параметров решётки нанодимеров на частотный диапазон, где метаматериал обладает левосторонними свойствами.
2. Представлена феноменологическая концепция двулучепреломляющей левосторонней линзы на основе анизотропного метаматериала, электромагнитные свойства которого описываются тензорами диэлектрической и магнитной проницаемостей специального вида. Показано, что в отличие от обыкновенной изотропной левосторонней линзы, рассмотренной Веселаго [3] и Пендри [4], двулучепреломляющий левосторонний слой обладает свойством отрицательной рефракции либо для ТЕ-, либо для ТМ-поляризованных волн, либо для обеих поляризаций одновременно, что делает возможным селективную фокусировку и пространственную сепарацию изображений, создаваемых в различных поляризациях.
3. Построена аналитическая теория, описывающая динамику формирования субволновых изображений плоской левосторонней суперлинзой. Рассмотрены примеры стационарного, импульсного, движущегося с постоянной скоростью и осциллирующего в пространстве источников. Для каждого из них рассчитаны фундаментальные пределы разрешения линзы и выяснена их физическая природа.
4. Изучен эффект спонтанного нарушения электродинамической симметрии при рассеянии света на геометрически симметричном нелинейном металлическом нанодимере. Показано, что данный эффект вызван собственной нелинейностью наночастиц, которая приводит к неустойчивости фундаментальных симметричных дипольных мод димера, в результате чего в системе спонтанно возбуждаются антисимметричные квадрупольные моды. Установлено, в частности, что развитие неустойчивости может приводить к спонтанному намагничиванию димера и возникновению периодического автомодуляционного режима рассеяния света.
5. Исследован нелинейный оптический отклик планарных металло-диэлектрических наноструктур, представляющих собой периодическую последовательность ультратонких металлических плёнок и слоев диэлектрика с керровским типом нелинейности. В рамках приближения эффективной среды получено выражение для тензора эффективной нелинейной диэлектрической проницаемости композита. Продемонстрирован гистерезисный тип зависимости компонент тензора проницаемости как

от интенсивности, так и от частоты среднего макроскопического поля, позволяющий скачкообразно изменять условия распространения излучения в рассматриваемых композитных материалах.

Практическая значимость

- Предложенный в диссертации дизайн изотропного оптического левостороннего метаматериала и представленные оценки влияния различных внутренних параметров метаматериала на его левосторонние свойства могут оказаться полезными для практической реализации объёмных оптических левосторонних сред.
- Спектр возможных потенциальных приложений рассмотренных в диссертации двулучепреломляющих левосторонних метаматериалов и совершенных линз значительно шире, чем у изотропных левосторонних метаматериалов. Они могут найти применение в ближнепольной оптике, нанофотонике, литографии, системах записи и чтения информации и др.
- Результаты, полученные на основе динамической теории формирования субволновых изображений в левосторонней совершенной линзе, дают априорную информацию о пределах разрешения и инерционных свойствах таких линз, что важно во многих практических приложениях, где предполагается использование подобных систем.
- Исследованный в работе эффект спонтанного нарушения симметрии в нелинейных металлических нанодимерах может быть использован для создания нового типа перестраиваемых компактных терагерцевых источников с оптической накачкой.
- Результаты исследования нелинейного оптического отклика планарных металло-диэлектрических наноструктур показывают, что такие системы могут стать основой для полностью оптических логических элементов с относительно низкими порогами переключения.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Объёмный оптический левосторонний метаматериал может быть создан на основе кубической решётки металлических нанодимеров. Идея получения одновременно отрицательных диэлектрической и магнитной проницаемостей основана на использовании собственных плазменных мод отдельных димеров. Необходимый электрический отклик композита возникает благодаря резонансному возбуждению дипольных мод в димерах. В свою очередь конечный магнитный отклик связан с возбуждением в димерах антисимметричной квадрупольной моды.

2. Плоский слой двулучепреломляющего левостороннего метаматериала, электромагнитные свойства которого описываются тензорами диэлектрической и магнитной проницаемостей специального вида, не отражает внешнее электромагнитное излучение и может обладать свойством отрицательной рефракции либо для ТЕ-, либо для ТМ-поляризованных волн, либо для обеих поляризаций одновременно, что делает возможным селективную фокусировку и пространственную сепарацию изображений, создаваемых в различных поляризациях. Кроме того, такая двулучепреломляющая линза способна формировать субволновые изображения на расстояниях, превышающих её толщину, что принципиально невозможно для изотропных левосторонних линз.
3. Возможность получения субволновых изображений с помощью левосторонней суперлинзы связана с вырождением спектра собственных поверхностных электромагнитных мод на границах слоя метаматериала, а динамический отклик суперлинзы полностью определяется динамикой соответствующих мод и дисперсионными свойствами метаматериала. Для стационарных источников масштаб разрешения линзы прямо пропорционален толщине слоя левостороннего метаматериала и логарифмически слабо зависит от мнимых частей диэлектрической и магнитной проницаемостей. В результате для реальных изотропных метаматериалов субволновое разрешение может быть достигнуто, фактически, только для слоев с толщиной много меньше длины волны. В случае источника, амплитуда которого зависит от времени, линза будет воспроизводить изображение источника без дополнительных искажений по сравнению со стационарным случаем только когда характерное время изменения амплитуды источника больше времени реконструкции наиболее мелких деталей, которые линза способна восстанавливать. Для движущихся источников дополнительные искажения изображения обусловлены черенковским резонансом, при котором изображение обогащается "фантомами", в виде слабозатухающего квазигармонического "хвоста", следующего за основным изображением.
4. Рассеяние света на геометрически симметричном нелинейном металлическом нанодимере может сопровождаться спонтанным нарушением электродинамической симметрии. Этот эффект вызван собственной нелинейностью наночастиц, которая вызывает неустойчивость собственных симметричных дипольных мод димера, в результате чего в нём спонтанно возбуждаются антисимметричные квадрупольные моды. В частности, развитие неустойчивости может приводить к спонтанному намагничиванию димера и возникновению периодического автомодуляционного режима рассеяния света с терагерцовой модуляционной частотой, которая может перестраиваться в широком диапазоне от единиц до

нескольких десятков терагерц посредством изменения интенсивности и частоты внешнего поля.

5. Для планарных металло-диэлектрических наноструктур, представляющих собой последовательность ультратонких металлических плёнок и слоёв диэлектрика с керровским типом нелинейности, имеет место гистерезисный тип зависимости компонент тензора эффективной диэлектрической проницаемости как от интенсивности, так и от частоты среднего макроскопического поля, позволяющий скачкообразно изменять условия распространения излучения в таких композитах. Природа этой бистабильности тесно связана с нелинейным квазистатическим геометрическим резонансом, возникающим благодаря различным знакам диэлектрических проницаемостей металлических и диэлектрических слоёв, что делает структуру эквивалентной нелинейному LC-осциллятору. Существенное снижение величины среднего макроскопического поля, отвечающего порогам бистабильности в композите, по сравнению с характерными нелинейными полями в диэлектрике и металле обусловлено тем, что при геометрическом резонансе локальные поля в металлических и диэлектрических слоях одновременно достаточно велики и противоположно направлены.

Апробация работы и публикации

По теме диссертации автором опубликовано 21 работа, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, и 14 тезисов в сборниках трудов конференций. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИФМ РАН, СПбГУ ИТМО, Австралийского национального университета, а также на следующих международных и российских конференциях:

- Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO/Europe) and the European Quantum Electronics Conference (EQEC), Munich, Germany, June 12-17, 2005
- 12th International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena, St. Petersburg Electrotechnical University ("LETI"), St. Petersburg, Russia, October 17-19, 2005
- X международный симпозиум "Нанофизика и наноэлектроника", Нижний Новгород, Россия, 13-17 марта, 2006
- XI международный симпозиум "Нанофизика и наноэлектроника", Нижний Новгород, Россия, 10-14 марта, 2007
- SPIE Optics + Optoelectronics 2007, Negative index materials, Prague, Czech Republic, 16-19 April, 2007

- Тринадцатая Всероссийская Научная Конференция Студентов-физиков (ВНКСФ-13), Ростов-на-Дону – Таганрог, Россия, 20-26 апреля, 2007
- Третья летняя межрегиональная школа физиков (ЛМШФ-3), Архангельск, Петрозаводск, Санкт-Петербург, Россия, 23 июля - 9 августа, 2007
- 14th International Student Seminar on Microwave and Optical Applications of Novel Physical Phenomena, Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK, 23-24 August, 2007
- Second International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials 2008), Pamplona, Spain, September 21-26, 2008
- Second European Meeting on Nanophotonics and Metamaterials (Nanometa 2009), Seefeld, Tirol, Austria, January 5-8, 2009
- XII всероссийская школа-семинар "Волны 2009", Пансионат "Университетский", Московская область, 25-30 мая, 2009
- Modern Problems in Optics and Photonics (МРОП 2009), Yerevan, Armenia, 27 August - 2 September, 2009
- International Young Scientist workshop on "Optics, Photonics and Metamaterials - 2009", (ОРАМ 2009), Kharkov, Ukraine, September 25-27, 2009
- Второй международный нанофорум, Москва, Россия, 6-8 Октября, 2009

Личный вклад автора

Во всех выполненных работах автор принимал участие в постановке и решении задач, в обсуждении полученных результатов и их интерпретации. Работы [A2, A3, A4, A10, A11, A12, A13, A14, A15] выполнены в соавторстве с научным руководителем. Вклад автора в исследование эффекта спонтанного нарушения симметрии в нелинейных металлических нанодимерах [A5, A7, A16, A17, A18, A19, A21] был определяющим. Вклад автора в результаты работ [A1, A6, A8, A9, A20] равнозначен вкладу других авторов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка работ по диссертации. Общий объём диссертации составляет 139 страниц, включая 51 рисунок, 1 таблицу, список цитируемой литературы из 150 наименований и список работ по диссертации из 21 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели диссертации, демонстрируется научная новизна, кратко излагается содержание и приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена различным аспектам электродинамики так называемых левосторонних сред.

В п. 1.1 делается краткий обзор современного состояния исследований в области электродинамики левосторонних сред и обосновывается актуальность решаемых в первой главе задач.

В п. 1.2 предложен дизайн изотропного оптического левостороннего метаматериала на основе массива металлических нанодимеров и рассчитан его отклик в рамках теории эффективной среды. В п. 1.2.1 в квазистатическом приближении рассмотрены свойства уединённого металлического нанодимера, представляющего собой пару близкорасположенных идентичных металлических наночастиц сферической формы: найдены частоты собственных мод димера и получены выражения для тензоров его электрической и магнитной поляризуемости. В п. 1.2.2 представлен дизайн объёмного оптического левостороннего метаматериала на основе нанодимеров, вычислены его эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости, оценено влияние на левосторонние свойства различных параметров метаматериала и обсуждаются преимущества предложенного дизайна перед альтернативными на основе кольцевых щелевых резонаторов и кластеров металлических наночастиц в виде ожерелий. В п. 1.2.3 кратко сформулированы основные результаты п. 1.2.

В п. 1.3 представлена феноменологическая концепция двулучепреломляющей плоской левосторонней линзы. В п. 1.3.1 показано, что анизотропный метаматериал, являющийся основой для двулучепреломляющей левосторонней линзы, не отражает внешнее электромагнитное излучение. В п. 1.3.2 продемонстрировано, что плоский слой метаматериала, рассмотренного п. 1.3.1, обладает свойством отрицательной рефракции либо для ТЕ-, либо для ТМ-поляризованных волн, либо для обеих поляризаций одновременно, что делает возможным селективную фокусировку и пространственную сепарацию изображений, создаваемых в различных поляризациях. Обсуждаются поляризационное расщепление пучков и ближнепольная диагностика на субволновых масштабах с помощью двулучепреломляющей линзы. Предложен возможный дизайн метаматериала, обладающего вышеописанными свойствами. В п. 1.3.3 кратко сформулированы основные результаты п. 1.3.

В п. 1.4 построена динамическая теория формирования субволновых изображений плоской левосторонней суперлинзой. В п. 1.4.1 сформулирована постановка задачи. В п. 1.4.2 на основе метода расщепления поля из уравнений Максвелла получены динамические уравнения для медленно меняющихся ам-

плитуд поверхностных электромагнитных волн, резонансно возбуждаемых ближним полем стороннего источника в слое левостороннего метаматериала. В п. 1.4.3 рассмотрен случай стационарного источника. Сформулированы условия, при выполнении которых суперлинза воспроизводит детали субволновой структуры поля источника с учётом индивидуальных особенностей его спектра и наличия либо отсутствия потерь в линзе. Получено выражение для предела латерального разрешения суперлинзы. В п. 1.4.4 рассмотрены случаи импульсных источников: мгновенно включаемого и с плавной временной огибающей. Найдено время реконструкции наиболее мелких деталей изображения, которые суперлинза способна воспроизводить. Показано, что при характерных временах изменения амплитуды поля источника, меньших времени реконструкции наиболее мелких деталей, воспроизводимые суперлинзой изображения испытывают существенные искажения. В п. 1.4.5 рассмотрены случаи движущегося с постоянной скоростью и осциллирующего в пространстве источников. Сформулированы условия черенковского резонанса, при котором изображение обогащается "фантомами", в виде слабозатухающего квазигармонического "хвоста", следующего за основным изображением. Получены выражения для максимальной скорости движения источника (в случае равномерно движущегося источника) и максимальной частоты вибраций (в случае осциллирующего в пространстве источника), при которых линза успевает "отслеживать" изменение положения источника и возможно получение субволнового изображения. В п. 1.4.6 кратко сформулированы основные результаты п. 1.4.

Во второй главе исследуется эффект спонтанного нарушения симметрии в нелинейных металлических нанодимерах.

В п. 2.1 показана научная новизна и актуальность исследуемого во второй главе эффекта, а также обсуждается его практическая значимость.

В п. 2.2 изучен эффект спонтанного нарушения симметрии при рассеянии света на уединённом нелинейном металлическом нанодимере. Этот эффект вызван собственной нелинейностью наночастиц, которая приводит к неустойчивости фундаментальных симметричных дипольных мод димера, в результате чего в системе спонтанно возбуждаются антисимметричные квадрупольные моды. Показано, что различные сценарии развития неустойчивости допускают, в частности, возникновение спонтанной намагниченности в димере и переход системы в автомодуляционный режим рассеяния света с терагерцовой модуляционной частотой. Найдено, что модуляционная частота (частота огибающей рассеянного света) может перестраиваться в широком диапазоне (от единиц до нескольких десятков терагерц) посредством изменения интенсивности и частоты падающего света, что открывает перспективу создания компактных широко перестраиваемых терагерцовых источников нового типа на базе упорядоченных массивов металлических нанодимеров. В п. 2.3 в качестве простейшего примера такого генератора рассмотрена двумер-

ная квадратная решётка нанодимеров. В предположении малости размеров частиц и постоянной решётки по сравнению с длиной волны внешнего излучения, решётка димеров рассматривается как эффективный токовый δ -слой, по которому текут электрический и магнитный поверхностные токи. Найдены коэффициенты отражения и прохождения решётки. Вычислены условия возникновения модуляционной неустойчивости и зависимости модуляционной частоты от параметров внешнего излучения. Обсуждаются преимущества предлагаемого метода генерации терагерцового излучения перед традиционной генерацией разностной частоты с помощью двухцветных лазеров.

В п. 2.3 кратко сформулированы основные результаты второй главы.

Третья глава диссертации посвящена исследованию нелинейного оптического отклика планарных металло-диэлектрических наноструктур.

В п. 3.1 представлен краткий обзор современного состояния исследований в области поиска структур со значительным нелинейным оптическим откликом при относительно низкой интенсивности внешнего излучения, показывается актуальность и научная новизна поставленной задачи.

В п. 3.2 анализируются свойства планарных металло-диэлектрических наноструктур в линейном приближении. В рамках теории эффективной среды получено выражение для тензора эффективной диэлектрической проницаемости. Рассматриваются типы изочастотных поверхностей, отвечающие разным частотным диапазонам, а также вырожденные случаи в условиях плазменного и геометрического резонансов. Показано, что при геометрическом резонансе среднее макроскопическое поле в структуре может быть значительно меньше локальных полей в отдельных слоях, что может быть использовано для усиления эффективного нелинейного отклика композита по сравнению с нелинейным откликом его отдельных компонент.

В п. 3.3 получено выражение для тензора эффективной нелинейной диэлектрической проницаемости композита когда одновременно и металлические и диэлектрические слои обладают нелинейностью керровского типа. Для простоты, но без ограничения общности, рассмотрены 3 случая: 1) линейный металл/нелинейный диэлектрик; 2) нелинейный металл/линейный диэлектрик; 3) нелинейный металл/нелинейный диэлектрик. Продемонстрирован гистерезисный тип зависимости компонент тензора проницаемости от интенсивности среднего поля, позволяющий скачкообразно изменять условия распространения излучения в рассматриваемых композитных материалах. Показана возможность значительного снижения порогов бистабильности в композите по сравнению с характерными нелинейными полями в диэлектрике и металле. Найдены условия, при которых нелинейностью одной из компонент композита можно пренебречь по сравнению с нелинейностью другой компоненты.

В п. 3.4 анализируется влияние нелинейности на вид изочастотных поверхностей. В частности, показано, что скачкообразная смена знака одной из

компонент тензора диэлектрической проницаемости может быть использована не только для управления прозрачностью структуры, но и для пространственной фильтрации излучения.

В п. 3.5 кратко сформулированы основные результаты третьей главы.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложен дизайн объёмного изотропного левостороннего метаматериала для оптического частотного диапазона. Основу дизайна составляет кубическая решётка металлических нанодимеров, обеспечивающая требуемый электрический и магнитный отклики метаматериала. В рамках теории эффективной среды рассчитаны эффективная диэлектрическая и магнитная проницаемости метаматериала и оценено влияние диэлектрической матрицы и фактора заполнения на частотный диапазон, где композит обладает левосторонними свойствами.
2. Исследован новый тип левосторонних сред, обладающих безотражательными и двулучепреломляющими свойствами. Показано, что анизотропный левосторонний слой, характеризующийся тензорами диэлектрической и магнитной проницаемостей специального вида, может демонстрировать отрицательную рефракцию либо для ТЕ-, либо для ТМ-поляризованных волн, либо для обеих поляризаций одновременно, что делает возможным селективную субволновую фокусировку и пространственную сепарацию изображений, создаваемых в различных поляризациях. Установлено, что такая двулучепреломляющая линза способна формировать субволновые изображения на расстояниях, превышающих её толщину, что невозможно для изотропных левосторонних линз.
3. Показано, что возможность получения субволнового разрешения с помощью левосторонней плоской суперлинзы связана с вырождением спектра поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся вдоль границ слоя левостороннего метаматериала и резонансным возбуждением этих поверхностных электромагнитных волн ближними полями стороннего источника. На основе полученной методом расщепления поля динамической системы укороченных уравнений для медленных амплитуд поверхностных волн в условиях их слабого перекрытия, изучены динамические процессы формирования субволновых изображений для стационарного, импульсного, движущегося с постоянной скоростью и осциллирующего в пространстве источников. Для каждого из них рассчитаны фундаментальные пределы разрешения линзы и выяснена фи-

зическая природа возникновения соответствующих пределов разрешения.

4. Показано, что рассеяние света на геометрически симметричном нелинейном металлическом нанодимере может сопровождаться спонтанным нарушением электродинамической симметрии. Этот эффект вызван собственной нелинейностью наночастиц, которая приводит к неустойчивости собственных симметричных дипольных мод димера, в результате чего в нём спонтанно возбуждаются антисимметричные квадрупольные моды. В частности, развитие неустойчивости может приводить к спонтанному намагничиванию димера и возникновению периодического автомодуляционного режима рассеяния света с терагерцовой модуляционной частотой. Вычислены условия существования неустойчивости и обнаружено, что модуляционная частота может перестраиваться в широком диапазоне от единиц до нескольких десятков терагерц посредством изменения интенсивности и частоты внешнего поля, что открывает перспективу создания компактных широко перестраиваемых терагерцовых источников нового типа на базе упорядоченных массивов нелинейных металлических нанодимеров. В качестве простейшего примера такого генератора рассмотрена двумерная решётка металлических нанодимеров. Полученные результаты показывают, что терагерцовые источники этого типа будут обладать рядом преимуществ по сравнению с традиционными генераторами разностной частоты на основе двухцветных лазеров.
5. Исследованы нелинейные оптические свойства планарных металло-диэлектрических наноструктур. Получено выражение для тензора эффективной нелинейной диэлектрической проницаемости композита в общем случае когда одновременно и металлические и диэлектрические слои обладают нелинейностью керровского типа. Продемонстрирован гистерезисный тип зависимости компонент тензора проницаемости как от интенсивности, так и от частоты среднего поля, позволяющий скачкообразно изменять знак одной из компонент и, следовательно, существенным образом влиять на условия распространения излучения в рассматриваемых композитных материалах. Природа этой бистабильности тесно связана с нелинейным квазистатическим геометрическим резонансом, возникающим благодаря различным знакам диэлектрических проницаемостей металлических и диэлектрических слоёв, что делает структуру эквивалентной нелинейному LC-осциллятору. Показана возможность значительного снижения порогов бистабильности в композите по сравнению с характерными нелинейными полями в объёмном диэлектрике и металле. Проанализировано влияние нелинейности слоёв на вид изочастотных поверхностей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ДИССЕРТАЦИИ

- [A1] *Zharov A.A., Zharova N.A., Noskov R.E., Shadrivov I.V. and Kivshar Y.S.* Birefringent left-handed metamaterials and perfect lenses for vectorial fields // *New J. Phys.* — 2005. — Vol. 7. — P. 220.
- [A2] *Noskov R.E. and Zharov A.A.* Optical bistability of planar metal/dielectric nonlinear nanostructures // *Opto-Electron. Rev.* — 2006. — Vol. 14, no. 3. — P. 13.
- [A3] *Жаров А.А., Носков Р.Е.* Резонансные нано и микроструктурированные среды: левосторонние свойства и отрицательная рефракция электромагнитных волн // *Изв. РАН, Серия Физическая.* — 2007. — Т. 71, №. 1. — С. 48.
- [A4] *Zharov A.A., Noskov R.E.* Binary-nanoparticle left-handed metamaterial for optical frequencies // *Proc. of SPIE.* — 2007. — V. 6581.— P. 658106.
- [A5] *Zharov A.A., Noskov R.E. and Tsarev M.V.* Plasmon-induced terahertz radiation generation due to symmetry breaking in a nonlinear metallic nanodimer // *J. Appl. Phys.* — 2009. — V. 106.— P. 073104.
- [A6] *Жаров А.А., Жарова Н.А., Носков Р.Е.* О поверхностно-волновом механизме формирования субволновых изображений в плоской левосторонней суперлинзе // *ЖЭТФ.* — 2009. — Т. 136, №. 5. — С. 853.
- [A7] *Noskov R.E., Zharov A.A. and Tsarev M.V.* Generation of widely tunable continuous-wave terahertz radiation using a two-dimensional lattice of nonlinear metallic nanodimers // *Phys. Rev. B* — 2010. — V. 82.— P. 073404.
- [A8] *Zharov A.A., Zharova N.A., Noskov R.E., Shadrivov I.V. and Kivshar Y.S.* Birefringent left-handed metamaterials and perfect lenses // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO/Europe) and the European Quantum Electronics Conference (EQEC), Munich, Germany, June 12-17, 2005. — P. EI2-1-WED.
- [A9] *Noskov R., Zharov A., Zharova N., Shadrivov I. and Kivshar Y.* Birefringent Perfect Lens // 12th International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena, Seminar Proceedings, St. Petersburg Electrotechnical University ("LETI"), St. Petersburg, Russia, October 17-19, 2005 — P. 84.
- [A10] *Noskov R. and Zharov A.* Optical bistability of the layered metal-dielectric nonlinear nanostructures // 12th International Student Seminar on

Microwave Applications of Novel Physical Phenomena, Seminar Proceedings, St. Petersburg Electrotechnical University ("LETI"), St. Petersburg, Russia, October 17-19, 2005 — P. 88.

- [A11] *Носков Р.Е., Жаров А.А.* Нелинейный оптический резонансный отклик металл-диэлектрических наноструктур // Тезисы докладов конференции "Нелинейные волновые процессы - 2006", Н. Новгород, 1-7 марта 2006 г., Н. Новгород: ИПФ РАН, 2006.— С. 113.
- [A12] *Жаров А.А., Носков Р.Е.* Резонансные нано и микроструктурированные среды: левосторонние свойства и отрицательная рефракция электромагнитных волн // Материалы X Международного Симпозиума "Нанопизика и наноэлектроника", Нижний Новгород, Россия, 13-17 марта, 2006.— Т. 1.— С. 4.
- [A13] *Жаров А.А., Носков Р.Е.* Оптический левосторонний метаматериал на основе решёток сдвоенных металлических наночастиц // Материалы XI Международного Симпозиума "Нанопизика и наноэлектроника", Нижний Новгород, Россия, 10-14 марта, 2007.— Т. 2 — С. 482.
- [A14] *Noskov R.E., Zharov A.A.* Optical left-handed metamaterial based on array of nanoparticle pairs: linear and nonlinear properties // 14th International Student Seminar on Microwave and Optical Applications of Novel Physical Phenomena, Seminar Proceedings, Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK, 23-24 August, 2007. — P. 38.
- [A15] *Носков Р.Е., Жаров А.А.* Оптическая левосторонняя среда на основе решёток сдвоенных металлических наночастиц: линейные и нелинейные свойства // Тезисы обзорных докладов ЛМШФ-3, Архангельск - Петрозаводск - Санкт-Петербург, 23 июля - 9 августа, 2007.— С. 78.
- [A16] *Zharov A.A., Noskov R.E. and Tsarev M. V.* Plasmon induced spontaneous magnetization of a metallic nanoparticle pair // Proceedings of the Second International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials 2008), Pamplona, Spain, September 21-26, 2008. — P. 8-P-5.
- [A17] *Zharov A.A., Noskov R.E. and Tsarev M. V.* Plasmon-driven spontaneous symmetry breaking and terahertz radiation emission at the light scattering on a pair of nonlinear metallic nanoparticles // Proceedings of the Second European Meeting on Nanophotonics and Metamaterials (Nanometa 2009), Seefeld, Tirol, Austria, January 5-8, 2009. — P. WED4f.9.

- [A18] *Носков Р.Е., Жаров А.А., Царёв М.В.* О генерации терагерцового излучения при взаимодействии света с двумерной решёткой металлических нанодимеров // Труды XII Всероссийской школы-семинара "Волны-2009", Пансионат "Университетский", Московская область, 25-30 мая, 2009.— Часть 5 — С. 19.
- [A19] *Noskov R.E., Zharov A.A. and Tsarev M. V.* On the self-modulation mechanism of the emission of THz radiation from 2D lattices of nonlinear metallic nanodimers illuminated by light // Modern Problems in Optics and Photonics (MPOP 2009). Book of Abstracts, Yerevan, Armenia, 27 August - 2 September, 2009. — P. 45.
- [A20] *Noskov R.E., Zharov A.A. and Zharova N.A.* Images of pulse and moving sources produced by a planar left-handed superlens // International Young Scientist workshop on "Optics, Photonics and Metamaterials" — 2009 (OPAM 2009), Kharkov, Ukraine, September 25-27, 2009. — P. 80.
- [A21] *Noskov R.E., Zharov A.A. and Tsarev M. V.* Parametric generator of THz radiation based on a 2D lattice of nonlinear metallic nanodimers // Abstracts. The Second International Competition of Scientific Papers in Nanotechnology for Young Researchers, Moscow, Russia, October 6-8, 2009. — P. 87.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C. et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // *Phys. Rev. Lett.* — 2000. — Vol. 84. — P. 4184.
- [2] *Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S.* Experimental verification of a negative index of refraction // *Science.* — 2001. — Vol. 292. — P. 77.
- [3] *Веселаго В.Г.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ // *УФН.* — 1967. — Т. 172. — С. 1215.
- [4] *Pendry J.B.* Negative refraction makes a perfect lens // *Phys. Rev. Lett.* — 2000. — Vol. 85. — P. 3966.
- [5] *Smith D.R., Pendry J.B., Wiltshire M.C.K.* Metamaterials and Negative Refractive Index // *Science.* — 2004. — Vol. 305. — P. 788.
- [6] *Soukoulis C.M., Linden S., Wegener M.* Negative Refractive Index at Optical Wavelengths // *Science.* — 2007. — Vol. 315. — P. 47.

- [7] *Soukoulis C.M., Wegener M.* Optical Metamaterials — More Bulky and Less Lossy // *Science*. — 2010. — Vol. 330. — P. 1633.
- [8] *Долин Л.С.* О возможности сопоставления трёхмерных электромагнитных систем с неоднородным анизотропным заполнением // *Изв. вузов. Радиофизика*. — 1961. — Т. 4. — С. 964.
- [9] *Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R.* Controlling Electromagnetic Fields // *Science*. — 2006. — Vol. 312. — P. 1780.
- [10] *Leonhardt U.* Optical Conformal Mapping // *Science*. — 2006. — Vol. 312. — P. 1777.
- [11] *Chen H., Chan C.T., Sheng P.* Transformation optics and metamaterials // *Nature Mater.* — 2010. — Vol. 9. — P. 387.
- [12] *Schurig D., Mock J.J., Justice B.J. et al.* Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies // *Science*. — 2006. — Vol. 314. — P. 977.
- [13] *Valentine J., Li J., Zentgraf T. et al.* An optical cloak made of dielectrics // *Nature Mater.* — 2009. — Vol. 8. — P. 568.
- [14] *Smolyaninov I.I., Smolyaninova V.N., Kildishev A.V., Shalaev V.M.* Anisotropic metamaterials emulated by tapered waveguides: application to optical cloaking // *Phys. Rev. Lett.* — 2009. — Vol. 102. — P. 213901.
- [15] *Ergin T., Stenger N., Brenner P.* Three-Dimensional Invisibility Cloak at Optical Wavelengths // *Science*. — 2010. — Vol. 328. — P. 337.
- [16] *Liu Z., Lee H., Xiong Y. et al.* Far-Field Optical Hyperlens Magnifying Sub-Diffraction-Limited Objects // *Science*. — 2007. — Vol. 315. — P. 1686.
- [17] *Grbic A., Eleftheriades G.V.* Overcoming the diffraction limit with a planar left-handed transmission-line lens // *Phys. Rev. Lett.* — 2004. — Vol. 92. — P. 117403.
- [18] *Lagarkov A.N., Kissel V.N.* Near-perfect imaging in a focusing system based on a left-handed-material plate // *Phys. Rev. Lett.* — 2004. — Vol. 92. — P. 077401.
- [19] *Ono A., Kato J., Kawata S.* Subwavelength Optical Imaging through a Metallic Nanorod Array // *Phys. Rev. Lett.* — 2005. — Vol. 95. — P. 267407.
- [20] *Belov P.A., Hao Y.* Subwavelength imaging at optical frequencies using a transmission device formed by a periodic layered metal-dielectric structure operating in the canalization regime // *Phys. Rev. B*. — 2006. — Vol. 73. — P. 113110.

- [21] *Belov P.A., Hao Y., Sudhakaran S.* Subwavelength microwave imaging using an array of parallel conducting wires as a lens // *Phys. Rev. B.* — 2006. — Vol. 73. — P. 033108.
- [22] *Silveirinha M.G., Belov P.A., Simovski C.R.* Subwavelength imaging at infrared frequencies using an array of metallic nanorods // *Phys. Rev. B.* — 2007. — Vol. 75. — P. 035108.
- [23] *Wang C., Zhao Y., Gan D. et al.* Subwavelength imaging with anisotropic structure comprising alternately layered metal and dielectric films // *Opt. Express.* — 2008. — Vol. 16. — P. 4217.
- [24] *Kawata S., Ono A., Verma P.* Subwavelength colour imaging with a metallic nanolens // *Nature Photon.* — 2008. — Vol. 2. — P. 438.
- [25] *Enoch S., Tayeb G., Sabouroux P. et al.* A Metamaterial for Directive Emission // *Phys. Rev. Lett.* — 2002. — Vol. 89. — P. 213902.
- [26] *Ziolkowski R.W., Chia-Ching L., Nielsen J.A. et al.* Design and Experimental Verification of a 3D Magnetic EZ Antenna at 300 MHz // *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE.* — 2009. — Vol. 8. — P. 989.
- [27] *Papasimakis N., Fedotov V.A., Zheludev N.I.* Metamaterial Analog of Electromagnetically Induced Transparency // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — Vol. 101. — P. 253903.
- [28] *Luk'yanchuk B., Zheludev N.I., Maier S.A. et al.* The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials // *Nature Mater.* — 2010. — Vol. 9. — P. 707.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение	4
Глава 1. Левосторонние метаматериалы и совершенные линзы	16
1.1. Введение	16
1.2. Объёмный оптический левосторонний метаматериал на основе массива металлических нанодимеров	20
1.3. Двухлучепреломляющие левосторонние метаматериалы и совершенные линзы	34
1.4. Динамическая теория формирования субволновых изображений в левосторонней суперлинзе	41
Глава 2. Спонтанное нарушение симметрии в нелинейных металлических нанодимерах	75
2.1. Введение	75
2.2. Уединённый металлический нанодимер: спонтанная намагниченность и терагерцовая модуляция	77
2.3. Генерация терагерцового излучения при помощи двумерной решётки металлических нанодимеров	89
2.4. Заключение	96
Глава 3. Нелинейные оптические свойства планарных металлодиэлектрических наноструктур	98
3.1. Введение	98
3.2. Эффективное макроскопическое описание в линейном приближении	100
3.3. Тензор эффективной нелинейной диэлектрической проницаемости. Оптическая бистабильность	106
3.4. Нелинейность и изочастотные поверхности	116
3.5. Заключение	120
Заключение	121
Литература	124
Список публикаций по диссертации	137

Носков Роман Евгеньевич

Оптические свойства
наноструктурированных плазмонных метаматериалов

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано к печати 15.04.2011. Тираж 100 экз.
Отпечатано в Институте Физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105