

На правах рукописи

**Краснок Александр Евгеньевич**

**ОПТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2013

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

Традиционно, в области оптических длин волн управление электромагнитным полем происходит посредством линз, оптических волноводов, дифракционных элементов, то есть приборов, размеры которых гораздо больше длины волны управляемого излучения. С другой стороны, управление электромагнитным излучением в радио и СВЧ диапазоне с помощью антенн, то есть, приборов, сравнимых с длиной волны, является устоявшейся техникой. Несмотря на огромную важность оптического диапазона частот, конкретные дизайны наноантенн и их практическая реализация стали обсуждаться лишь совсем недавно. Это обусловлено тем, что характерные размеры оптической антенны определяются рабочей длиной волны излучения, что составляет сотни нанометров, поэтому возникает технологическая проблема воспроизведения объекта такого размера с нанометровой точностью.

Приемной наноантенной называют устройство, которое способно эффективно преобразовывать падающий свет (излучение оптических частот) в сильно локализованное эванесцентное поле [1, 2, 3]. Передающая наноантенна, наоборот, преобразовывает сильно локализованное поле оптических частот, созданное некоторым слабоизлучающим источником в свободное излучение. Под сильно локализованным полем подразумевается электромагнитное поле, сконцентрированное в области малого по сравнению с длиной волны размера. Область, в которой сконцентрировано сильно локализованное поле, может быть субволновой во всех трех измерениях. В этом случае говорят о сильно локализованном ближнем поле, причем энергия такого поля является запасенной и не распространяется.

Важной проблемой с которой должны справиться оптические *наноантенны* является организация беспроводной системы передачи данных на поверхности и в объеме оптического чипа. Создание таких, полностью оптических чипов является одной из основных задач нанофотоники [4, 5, 6]. Использование оптических чипов позволит создать оптические компьютеры и иные устройства передачи, хранения и обработ-

ки информации с революционно расширенными возможностями, скоростью функционирования, а также делает их более компактными и менее энергоемкими. Использование в таких системах более привычных волноводных структур, когда сигналы передаются по плазмонным волноводам, наталкивается на непреодолимые сложности связанные с быстрой диссипацией энергии плазмонной волны. Наноантенны способны передавать оптические сигналы между различными частями оптических чипов по пустому пространству или слабо поглощающему материалу диэлектрической матрицы и поэтому в значительной мере лишены этого недостатка [1].

Область применения оптических наноантенн не ограничивается вопросами разработки оптических микрочипов и затрагивает вопросы медицины [7], солнечной энергетики [8], микроскопии сверхвысокого разрешения [9] и многих других областей науки и техники. В частности, использование концепции наноантенн позволяет решить проблему эффективной связи между волоконно-оптическими линиями передачи информации и элементами нанофотоники [10], включая оптические микрочипы. Применительно к области телекоммуникаций это позволит в сотни раз увеличить скорость передачи данных по уже существующим оптоволоконным сетям и повысить уровень их защиты и кодировки.

Однако, металлические наноантенны, в виду своей плазмонной природы, являются сильно диссипативными устройствами, что мешает их повсеместному применению. В тоже время, до сегодняшнего времени, в литературе отсутствовали работы по наноантеннам на основе диэлектрических наночастиц, которые и являются **объектом исследования** данной диссертации.

**Целью диссертационной работы** является разработка оптических антенн на основе диэлектрических наночастиц, выполненных из материала с большим и положительным значением диэлектрической проницаемости.

#### **Научная новизна**

В работе предложен и развит новый, альтернативный плазмонике, подход к разработке оптических наноантенн. Подход состоит в замене металлических структурных компонентов известных плазмонных наноантенн на наноэлементы выполненные из материала с большим и положительным значением диэлектрической проницаемости. В силу этой замены наноантенны приобретают новые и уникальные свойства, такие как магнитный отклик и сверхнаправленность. В разработке диэлектрических наноантенн и исследовании их оптических свойств и состоит научная новизна диссертационной работы.

### **Основные методы исследования**

Методами исследования являются аналитические методы, численное имитационное компьютерное моделирование и экспериментальная верификация методом частотного масштабирования в микроволновой области частот.

### **Научные положения выносимые на защиту:**

1. Одиночная кремниевая наночастица субволновых размеров в случае возбуждения её плоской волной или точечным источником обладает одновременно электрическим и магнитным дипольным откликом и является источником Гюйгенса, в некотором диапазоне оптических частот.
2. Нелинейно-оптическое взаимодействие пары металлической и диэлектрической наночастиц с падающей плоской электромагнитной волной приводит к динамическому переключению основного направления диаграммы направленности рассеяния.
3. Диэлектрическая оптическая наноантенна Яги-Уда, включающая рефлектор в виде сферической кремниевой наночастицы и набор из 4 директоров меньшего размера, периодически упорядоченных вдоль прямой линии, а так же квантовый источник оптического излучения, расположенный между рефлектором и первым дирек-

тором, обладает высоким коэффициентом направленности, численно равным более 10.

4. Наноантенна состоящая из дипольного источника расположенного в выемке на поверхности диэлектрической наночастицы субволнового размера обладает эффектом сверхнаправленности благодаря возбуждению набора высших мультипольных мод. Субволновое смещение дипольного источника в выемке вызывает эффект поворота основного лепестка диаграммы направленности.

#### **Практическая значимость**

Практическая значимость работы состоит в том, что в ней впервые предложен новый класс оптических наноантенн на основе диэлектрических наночастиц которые могут быть использованы для разработки и создания высокоэффективной элементной базы полностью оптических средств обработки информации.

#### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах НИУ ИТМО и Австралийского национального университета (Канберра, Австралия), а так же на международных конференциях:

- META'13, the 4th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Sharjah (UAE), 18-22 March 2013
- "Nanometa'2013 Seefeld (Austria), 3-6 January 2013
- The Fifth International Workshop on Theoretical and Computational Nano-Photonics "TaCoNa-Photonics'2012 Bad Honnef (Germany) 24-26 October 2012
- "Metamaterials'2012 St.Petersburg (Russia) 17 - 22 September 2012
- International conference "Days on Diffraction'2012" St.Petersburg (Russia), May 28 - June 1 2012

- 2012 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Chicago (USA), 08 - 14 Jul 2012
- Seventh International Conference of Young Scientists and Specialists "Optics-2011 St. Petersburg (Russia), 17-21 October 2011

### **Публикации**

Основное содержание диссертации опубликовано в 13 статьях, входящих в список ВАК. Полный список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из ??? наименований. Объем диссертации - ??? страниц.

**Личный вклад автора** Во всех выполненных работах автор принимал участие в постановке и решении задач, обсуждении полученных результатов и их интерпретации. Вклад автора при разработке диэлектрических наноантенн источник Гюйгенса и Яги-Уда был определяющим. Автором были обнаружены эффекты сверхнаправленности и поворота основного лепестка диаграммы направленности излучения при субволновом смещении источника в диэлектрической наноантенне с выемкой.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

**Первая глава** носит обзорный характер. В этой главе сформулировано общее понятие оптической антенны и приведены основные характеристики, которые относятся к данному разделу науки. Проведена классификация основных известных металлических наноантенн на группы согласно их геометрии и физическим принципам работы. По

каждой из групп металлических наноантен проведен обзор современной литературы. Дается общее представление о нелинейных оптических наноантеннах. Обсуждаются основные достоинства и недостатки металлических наноантенн, а так же обосновывается необходимость разработки нового типа наноантенн - наноантенн на основе диэлектрических наночастиц.

**Вторая глава** посвящена изложению оптических свойств диэлектрических наночастиц субволнового размера, включая физические механизмы формирования сильного электрического и магнитного отклика в оптическом диапазоне частот. Предлагается, а так же изучается аналитически и при помощи имитационного моделирования, простейший вариант диэлектрической наноантенны, геометрия которой изображена на Рис.1а), и получившей название “источник Гюйгенса”. На Рис. 1б) приведена зависимость коэффициента направленности источника Гюйгенса, от длины волны. Видно, что эта кривая имеет два максимума, расположенные соответственно в области электрического и магнитного резонансов. Вставками изображены трёхмерные диаграммы направленности на соответствующих частотах. Главный лепесток диаграмм направленности в этих двух случаях направлен по разному. Для длины волны 480 нм (Рис. 1б) главный лепесток направлен в отрицательную сторону оси  $x$ . На этой длине электрический и магнитный дипольные

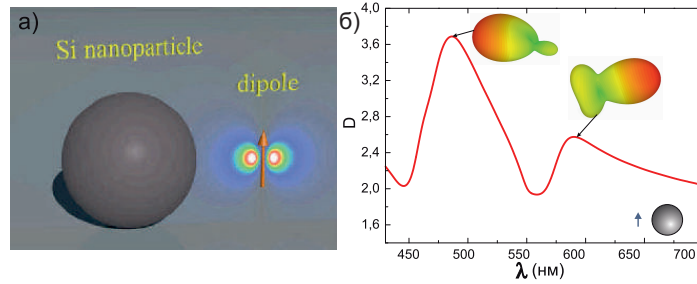


Рис. 1: (а) Геометрия источника Гюйгенса. (б) Зависимость коэффициента направленности излучения источника Гюйгенса от длины волны. В качестве вставок на графике помещены трёхмерные диаграммы направленности.

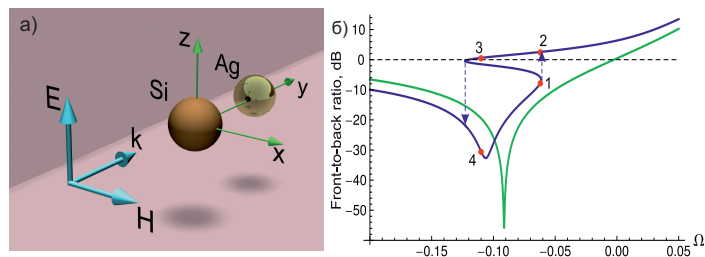


Рис. 2: (а) Схематическое изображение металло-диэлектрического димера. (б) Величина отношения мощности рассеянного света в прямом направлении (по отношению к волновому вектору падающей волны) к величине мощности рассеянной в обратном направлении. Зелёная и синяя кривые относятся к линейному и нелинейному случаям, соответственно.

моменты колеблются с большой разностью фаз. На длине 590 нм он направлен в положительную сторону оси  $x$ , на этой длине волны электрический и магнитный дипольные моменты частицы колеблются практически в фазе. Аналитические результаты с использованием дипольной модели взаимодействия [11] хорошо согласуются с результатами полученными численным путём. Заметим, что эта особенность работы одной диэлектрической наночастицы в качестве антенны обязана наличию у неё наряду с электрическим ещё и магнитного дипольного момента.

В **третьей главе** предлагается и теоретически исследуется новый тип металло-диэлектрических наноантенн состоящих из пары диэлектрической (кристаллический кремний) и металлической (серебро) наночастиц. Высокое значение диэлектрической проницаемости диэлектрической наночастицы позволяет достигнуть эффективной концентрации света, в то время как нелинейный отклик металлической наночастицы позволяет контролировать направление рассеяния наноантенной внешней оптической волны. В результате, такая структура способна реализовать эффективный динамический контроль диаграммы направленности рассеянного излучения путём изменения напряженности внешнего оптического поля.

Сначала рассматривается геометрия изучаемой структуры, которая состоит в паре сферических, кремниевой и серебряной наночастиц по-



мещённых в матрицу из  $\text{SiO}_2$  с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_h$ , облучаемых плоской волной, как показано на Рис. 2а). Пологается, что радиусы металлической и диэлектрической наночастиц, а так же расстояние между их центрами равны  $R_{\text{Ag}} = 15 \text{ nm}$ ,  $R_{\text{Si}} = 30 \text{ nm}$ , и  $d = 80 \text{ nm}$ , соответственно. В оптической области частот, линейная часть диэлектрической проницаемости серебра можно записать в виде обобщённой формы Друде  $\varepsilon_{\text{Ag}}^{\text{L}} = \varepsilon_{\infty} - \omega_p^2/[\omega(\omega + i\nu)]$ , где  $\varepsilon_{\infty} = 4.96$ ,  $\hbar\omega_p = 9.54 \text{ eV}$ ,  $\hbar\nu = 0.055 \text{ eV}$  [12] [предполагается зависимость от времени  $\exp(-i\omega t)$ ]; в то время как дисперсией  $\text{SiO}_2$  можно пренебречь. Нелинейная диэлектрическая проницаемость серебра может быть записана в виде  $\varepsilon_{\text{Ag}}^{\text{NL}} = \varepsilon_{\text{Ag}}^{\text{L}} + \chi^{(3)}|\mathbf{E}^{(\text{in})}|^2$ , где  $\mathbf{E}^{(\text{in})}$  локальное поле внутри частицы. Согласно модели предложенной в [13], частицы серебра радиусом 15 нм обладают чрезвычайно высокой и чисто реальной кубической восприимчивостью  $\chi^{(3)} \simeq 6 \times 10^{-9} \text{ esu}$ , в сравнении с которой нелинейность Si и  $\text{SiO}_2$  ничтожно мала.

Далее изучаются характеристики рассеяния излучения этим металло-диэлектрическим димером. Изучаются поведение диаграммы направленности рассеяния и величина отношения мощности рассеянного света в прямом направлении (по отношению к волновому вектору падающей волны) к величине мощности рассеянной в обратном направлении (см. Рис. 2б) в линейном и нелинейном режимах работы. В линейном режиме работы, когда напряженность внешнего оптического поля мала по сравнению с той при которой необходим учёт нелинейного отклика, зависимость отношения вперёд-назад имеет глубокий провал где практически полностью (в дипольной модели) отсутствует рассеянное назад излучение. Затем эта кривая испытывает рост с увеличением частоты падающего излучения и проходит через 0 (через 1 в линейном масштабе) где наблюдается равенство мощностей рассеянных в прямом и обратном направлениях. Значения отношения вперёд-назад больше 0 дВ соответствуют случаю подавления рассеяния назад. В нелинейном режиме работы у зависимости отношения вперёд-назад появляется петля бистабильности где решения являются неустойчивыми. В качестве примера рассмотрим переход между состояниями 1 и 2, положения ко-

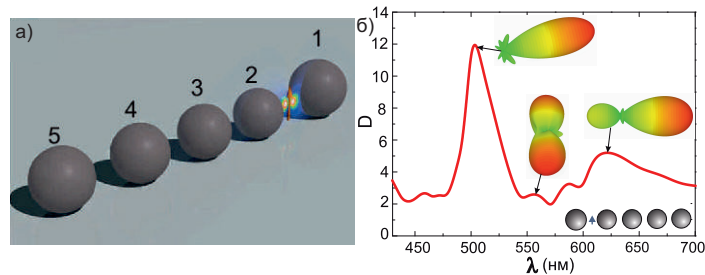


Рис. 3: (а) Геометрия диэлектрической наноантенны Яги-Уда. (б) Зависимость коэффициента направленности излучения наноантенны Яги-Уда от длины волны. В качестве вставок на графике помещены трёхмерные диаграммы направленности.

торых изображены на Рис. 2б красными точками. В состоянии 1 мощность рассеянная димером назад больше мощности рассеянной вперед. Однако это состояние является неустойчивым и за промежуток времени равный приблизительно 260 фсек система переходит в состояние 2. В этом новом состоянии система напротив рассеивает большую часть мощности в прямом направлении. Для состояний 3 и 4 аналогично имеем переход между состоянием равномерного рассеяния во все стороны (состояние 3) и состоянием почти полного рассеяния назад (состояние 4).

Малое время необходимое системе для переключения между состояниями, наряду с относительно низкой требуемой интенсивностью  $11 \text{ MW/cm}^2$ , открывает широкий спектр перспектив использования нелинейных металло-диэлектрических наноантенн в логических и коммутационных устройствах.

Темой **четвёртой главы** является разработка наноантенн Яги-Уда на основе диэлектрических наночастиц. Здесь приводятся результаты аналитического и численного исследования диэлектрической наноантенны Яги-Уда, включающая рефлектор в виде сферической кремниевой наночастицы радиуса 75 нм и набор из 4 директоров радиуса 70 нм, периодически упорядоченных вдоль прямой линии, а так же квантовый источник оптического излучения, расположенный между рефлектором и первым директором [см. Рис.3а]. На Рис. 3 приведена зависимость ко-

эфициента направленности от длины волны для диэлектрической наноантенны Яги-Уда, при расстоянии между поверхностями директоров 70 нм. Вставками изображены трёхмерные диаграммы направленности на соответствующих частотах. Видно, что в зависимости имеет резкий максимум на длине волны 500 нм. Угловая ширина главного лепестка примерно равна  $40^\circ$ . Далее проведено сравнение характеристик работы геометрически идентичных диэлектрической и плазмонной наноантенн Яги-Уда. Показано, что существенным преимуществом наноантенны Яги-Уда на основе диэлектрических наночастиц перед антеннами на частицах из металла является возможность работы в существенно более широком диапазоне длин волн. При этом, ввиду слабого поглощения в диэлектрике, снимается проблема возрастания не радиационных потерь при приближении источника к поверхности частицы. Представлены результаты изучения фактора Перселла в диэлектрической наноантенне, его зависимость от геометрических характеристик наноантенн, а так же сравнение его значения с фактором Перселла в плазмонных антеннах.

В заключительном разделе этой главы представлены результаты экспериментальной верификации диэлектрической наноантенны Яги-Уда в микроволновой области частот. Отмечается высокая степень согласия наблюдаемых экспериментальных результатов с результатами полученными численным путём.

В **пятой главе** предложена новая концепция сверхнаправленной оптической наноантенны выполненной в виде диэлектрической наночастицы с выемкой которая возбуждается дипольным источником расположенным внутри этой выемки. При этом, антенна понимается сверхнаправленной если её размер много меньше чем длина излучаемой волны, а коэффициент направленности много больше направленности точечного диполя.

Сначала в этой главе вводится понятие сверхнаправленности применительно к оптическим наноантеннам. Проводится различие между обычными высоконаправленными и сверхнаправленными наноантеннами. Анализируются свойства эффективной апертуры сверхнаправленной наноантенны и приводится удобное выражение для оценки наличия

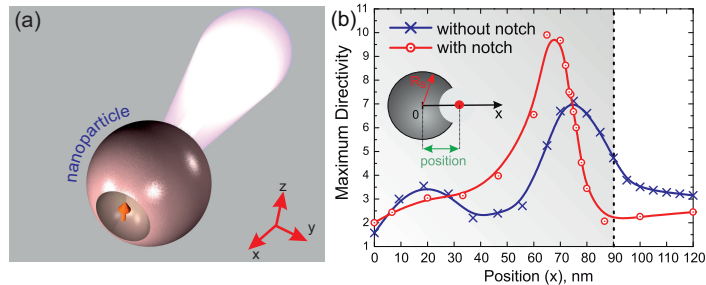


Рис. 4: (а) Геометрия диэлектрической сверхнаправленной наноантенны выполненной в виде наночашки. (б) Зависимость максимального значения направленности от положения дипольного источника на длине волны  $\lambda = 455$  нм в случаях частицы с и без выемки, соответственно. Вертикальная пунктирная линия обозначает радиус частицы с центром в начале координат.

эффекта сверхнаправленности.

Далее демонстрируется и изучается эффект сверхнаправленности в диэлектрической наноантенне с выемкой. При этом важно, что эффект сверхнаправленности достигается без использования сложных массивов наноантенн или метаповерхностей. Здесь рассматривается кремниевая наночастица с реальной дисперсией диэлектрической проницаемости и потерями [14]. Радиус кремниевой наночастицы в этом случае равен  $R_S = 90$  нм. Для кремниевой наночастицы такого размера, при возбуждении однородным полем (на масштабах частицы), наиболее существенный вклад в оптический отклик вносят электрический и магнитный дипольные моменты, в то время как мультиполи высшего порядка пренебрежимо малы. Если на поверхности такой частицы сделать выемку то произойдет некоторое видоизменение ближнего поля, которое однако не приводит к сильному изменению его модового состава. Однако помещая дипольный источник (например квантовую точку) внутрь этой выемки, как показано на Рис. 4а ситуация изменится кардинально. В этом случае неоднородность ближнего поля дипольного источника приводит к возбуждению высших мультипольных мод ближнего поля частицы. Это в свою очередь сопровождается сильным увеличением коэффициента направленности, как показано на Рис. 4б). Частица как и

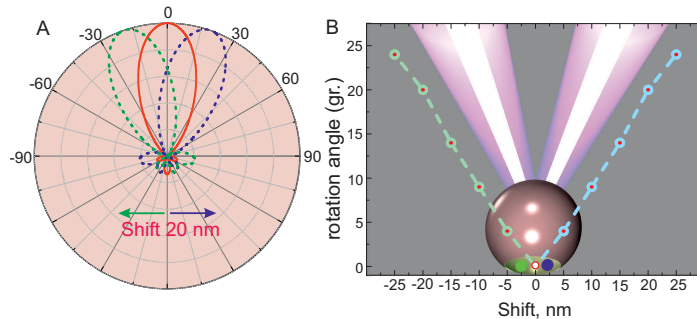


Рис. 5: Эффект поворота основного лепестка диаграммы направленности при суб-волновом смещении точечного источника. (а) Диаграммы направленности излучения в случае источника расположенного в центре выемки (красная линия), а так же источника смещённого на 20 нм вправо (зелёная линия) и в лево (синяя линия). (б) Зависимость угла поворота основного лепестка диаграммы направленности от величины смещения источника.

выемка может иметь различную форму – сферическую, эллипсоидальную, кубическую и так далее. Однако в этой работе частица имеет форму сферы, в то время как выемка имеет форму полусферы с радиусом  $R_{\text{п}} < R_{\text{с}}$ . Эмиттер моделируется как точечный дипольный источник. На Рис. 4а источник показан красной стрелочкой.

Далее описывается и изучается эффект сильной зависимости направления основного лепестка диаграммы направленности (луча) от положения точечного источника расположенного в выемке. Смещение источника в плоскости перпендикулярной к оси аксиальной симметрии приводит к повороту луча без исчезновения эффекта сверхнаправленности. На Рис.5а изображены диаграммы направленности излучения в случае источника расположенного в центре выемки (красная линия), а так же источника смещенного на 20 нм вправо (зелёная линия) и в лево (синяя линия). Дальнейший сдвиг точечного источника ведёт к ещё большему повороту основного лепестка. На Рис.5б приведена зависимость угла поворота от величины смещения источника. Видно, что для выбранной геометрии выемки, величина поворота равняется в среднем  $1^\circ$  на каждый 1 нм смещения. В этом параграфе так же приводится анализ модового состава поля в случае не симметричного расположе-

ния источника и даётся объяснение эффекта поворота луча.

В заключительной части представлены результаты экспериментальной верификации обнаруженных эффектов сверхнаправленности и поворота основного лепестка диаграммы направленности излучения сверхнаправленной диэлектрической наноантенны в микроволновой области частот с использованием метода частотного масштабирования. Отмечается высокая степень согласия наблюдаемых экспериментальных результатов с результатами полученными численным путём.

В **Заключении** обобщены основные результаты работы:

1. Предложен новый класс наноантенн на основе диэлектрических наночастиц с высоким значением показателя преломления.
2. Исследована работа одной такой наночастицы изготовленной из кремния в качестве источника Гюйгенса.
3. Диэлектрическая оптическая наноантенна Яги-Уда, включающая рефлектор в виде сферической кремниевой наночастицы радиуса 75 нм и набор из 4 директоров радиуса 70 нм, периодически упорядоченных вдоль прямой линии, а так же квантовый источник оптического излучения, расположенный между рефлектором и первым директором, обладает большим значением коэффициента направленности, численно равным более 10.
4. Предложена новая концепция сверхнаправленной оптической наноантенны выполненной в виде диэлектрической наночастицы с выемкой возбуждаемая дипольным эмиттером расположенным внутри этой выемки.
5. Показано, что в этом случае внутри субволновой диэлектрической наночастицы, размер которой допускает возбуждение моментов поля низших порядков (электрический и магнитный диполи) при возбуждении однородным полем, возникают более сложные распределения поля, которые характеризуются наличием высших мультипольных моментов.

6. Основные результаты теоретического и имитационного исследования Яги-Уда и сверхнаправленных наноантенн были экспериментально верифицированы с использованием метода частотного масштабирования в микроволновой области частот.
7. Предложен и теоретически исследован новый тип металло-диэлектрических наноантенн состоящих из пары диэлектрической (кристаллический кремний) и металлической (серебро) наночастиц. Такая антенна способна реализовать эффективный динамический контроль диаграммы направленности рассеянного излучения путём изменения напряженности внешнего оптического поля.

Основные результаты диссертационной работы изложены в публикациях:

**Публикации из списка ВАК:**

1. А. Е. Краснок, А. Е. Мирошниченко, П. А. Белов, Ю. С. Кившарь. Оптические элементы Гюйгенса и наноантенны Яги-Уда на основе диэлектрических наночастиц// Письма в ЖЭТФ.– 2011.– Vol. 94.– P. 635.
2. D. S. Filonov, A. E. Krasnok, A. P. Slobozhanyuk, P. V. Kapitanova, E. A. Nenasheva, Yu. S. Kivshar, and P. A. Belov. Experimental verification of the concept of all-dielectric nanoantennas// Applied Physics Letters.– 2012.– Vol. 100.– P. 201113.
3. A. E. Krasnok, A. E. Miroshnichenko, P. A. Belov, and Yu. S. Kivshar. All-dielectric optical nanoantennas// Opt. Express.– 2012.– Vol. 20.– P. 20599.
4. R. E. Noskov, A. E. Krasnok, and Yu. S. Kivshar. Nonlinear metal-dielectric nanoantennas for light switching and routing// New Journal of Physics.– 2012.– Vol. 14.– P. 093005.
5. A. E. Krasnok, A. E. Miroshnichenko, P. A. Belov, and Yu. S. Kivshar. All-dielectric optical nanoantennas// AIP Conf. Proc.– 2012.– Vol. 1475.– P. 22.

6. А. Е. Краснок, И. С. Максимов, А. И. Денисюк, П. А. Белов, А. Е. Мирошниченко, К. Р. Симовский, Ю. С. Кившарь. Оптические наноантенны// Успехи Физических Наук.– 2013.– Vol. 183.– P. ??.

**Публикации в трудах конференций:**

7. А.Е. Краснок, А.Е. Мирошниченко, П.А. Белов, Ю.С. Кившарь. Оптические элементы Гюйгенса и наноантенны Яги–Уда на основе диэлектрических наночастиц.//Сборник трудов VII международной конференции молодых учёных и специалистов ”Оптика 2011”–Санкт-Петербург, 2011.–С.652.
8. А. Е. Krasnok, А. Е. Miroshnichenko, D. S. Filonov, А. P. Slobozhanyuk, P. V. Kapitanova, P. A. Belov, Y. S. Kivshar. All-dielectric optical nanoantennas.//Proceedings of the International Conference ”Metamaterials 2012”–Saint-Petersburg, 2012.–P.91.
9. R. E. Noskov, А. Е. Krasnok, Y. S. Kivshar. Ultrafast light switching and routing by nonlinear metal-dielectric nanoantennas//Proceedings of the International Conference ”Days on Diffraction 2012” – Saint-Petersburg, 2012. – P.147.
10. D. S. Filonov, А. Е. Krasnok, А. Е. Miroshnichenko, А. P. Slobozhanyuk, P. V. Kapitanova, Y. S. Kivshar, P.A. Belov “Testing the concept of all-dielectric optical nanoantennas at microwaves”//Proceedings of the International Conference ”Days on Diffraction 2012” – Saint-Petersburg, 2012. – P.134.
11. D. S. Filonov, А. Е. Krasnok, А. Е. Miroshnichenko, А. P. Slobozhanyuk, P. V. Kapitanova, Y. S. Kivshar, P. A. Belov. Modeling of Optical Dielectric Nanoantennas at Microwaves//Proceedings of The 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation – Chicago (USA), 2011. – P.97.
12. А. Е. Krasnok, А. Е. Miroshnichenko, P. A. Belov, Y. S. Kivshar. Progress in all-dielectric optical nanoantennas//Proceedings of the



International Conference "META 2013" – Sharjah (UAE), 2013. – P.50.

13. P. A. Belov, A. E. Krasnok, A. E. Miroschnichenko, Y. S. Kivshar. All-dielectric optical nanoantennas: concept and experimental verification // Proceedings of the International Conference "NANOMETA 2013" – Seefeld (Austria), 2013. – P.39.

#### Список литературы

- [1] *Alu A., Engheta N.* Wireless at the nanoscale: Optical interconnects using matched nanoantennas // *Phys. Rev. L.* – 2010. – Vol. 104. – P. 213902.
- [2] *Bharadwaj P., Deutsch B., Novotny L.* Optical antennas // *Advances in Optics and Photonics.* – 2009. – Vol. 1. – Pp. 438–483.
- [3] *Biagioni P., Huang J.-S., Hecht B.* Nanoantennas for visible and infrared radiation // *Rep. Prog. Phys.* – 2012. – Vol. 75. – P. 024402.
- [4] *Klimov V.* Nanoplasmonics. – Pan Stanford Publishing, 2011.
- [5] *Maier S.* Plasmonics: Fundamentals and Applications. – New York: Springer, 2007.
- [6] *Stockman M. I.* Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future // *Opt. Express.* – 2011. – Vol. 19. – P. 22029.
- [7] *Mahendra R., Nelson D.* Metal Nanoparticles in Microbiology. – Springer, 2011.
- [8] *Atwater H. A., Polman A.* Plasmonics for improved photovoltaic devices // *Nat. Materials.* – 2010. – Vol. 9. – Pp. 205–213.
- [9] Near-field probing of slow bloch modes on photonic crystals with a nanoantenna / P. Vo, M. Mivelle, S. Callard et al. // *Opt. Express.* – 2012. – Vol. 20. – Pp. 4124–4135.

- [10] Compact dipole nanoantenna coupler to plasmonic slot waveguide / A. Andryieuski, R. Malureanu, G. Biagi et al. // *Opt. Lett.* — 2012. — Vol. 37. — Pp. 1124–1126.
- [11] Optical response features of si-nanoparticle arrays / A. B. Evlyukhin, C. Reinhardt, A. Seidel et al. // *Phys. Rev. B.* — 2010. — Vol. 82. — P. 045404.
- [12] *Johnson P., Christy R.* Optical constants of the noble metals // *Phys. Rev. B.* — 1972. — Vol. 6. — P. 4370.
- [13] Size dependent  $\chi^{(3)}$  for conduction electrons in Ag nanoparticles / V. Drachev, A. Buin, H. Nakotte, V. Shalaev // *Nano Lett.* — 2004. — Vol. 4. — P. 1535.
- [14] *Palik E.* Handbook of Optical Constant of Solids. — San Diego, Academic, 1985.