

На правах рукописи



Рассказов Илья Леонидович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА ОПТИЧЕСКИХ
ВОЛНОВОДОВ ИЗ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ИХ ТРАНСМИССИОННЫХ И ДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель *доктор физико-математических наук, профессор Карпов Сергей Васильевич*

Официальные оппоненты *Сарычев Андрей Карлович, доктор физико-математических наук, профессор, Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, главный научный сотрудник.*

Косарев Николай Иванович, доктор физико-математических наук, Сибирский юридический институт Федеральной службы Российской Федерации по контролю за оборотом наркотиков, профессор кафедры информационных технологий.

Ведущая организация *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск*

Защита состоится «__» _____ 2015 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 003.055.01 при Институте физике им. Л.В. Киренского СО РАН по адресу: 660036, г.Красноярск 36, Академгородок, 50, стр. 38. Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Втюрин А.Н.

Общая характеристика работы

Работа посвящена разработке способов получения оптических плазмонных волноводов (ОПВ) в виде одномерных цепочек ограниченной длины из периодически расположенных плазмонных наночастиц методом численного моделирования, а также исследованию их волноводных свойств в задачах применения этих объектов в качестве перспективных функциональных элементов оптических интегральных микросхем.

В работе предложен оригинальный метод синтеза ОПВ в форме упорядоченных цепочечных структур из металлических наночастиц на диэлектрической подложке, снабженной металлическим наношаблоном. На основе метода Бруновской динамики разработана физическая модель осаждения наночастиц из объема гидрозоля в заданной области подложки, электростатически функционализированной за счет электрического потенциала наношаблона. Исследовано влияние различных параметров системы «нанокolloид–подложка» на степень дефектности синтезируемых цепочечных ОПВ. Предложены методы, позволяющие минимизировать дефектность таких цепочек.

Получены сведения о спектральных, трансмиссионных и дисперсионных свойствах относительно коротких, технологически востребованных ОПВ из наночастиц серебра, синтезируемых предложенным методом. Установлены закономерности распространения поверхностного плазмон-поляритона (ППП) в коротких ОПВ, характерной особенностью которых являются паразитные отражения импульсов от границ цепочки. Предложена модель оптических ловушек, подавляющих отраженные паразитные импульсы.

Исследованы волноводные свойства длинных ОПВ с различной конфигурацией цепочек из наночастиц. Обращено внимание на важность использования несферических наночастиц (в форме вытянутых или сплюснутых сфероидов) для существенного улучшения трансмиссионных свойств ОПВ. Продемонстрирована возможность использования кривых ОПВ в качестве функциональных элементов оптических микросхем, управляющих световыми потоками и поляризацией распространяющегося оптического излучения. Получены сведения о влиянии технологической диэлектрической подложки на волноводные свойства расположенных на ней ОПВ.

Актуальность работы

Возможность использования цепочек металлических наночастиц для передачи модулированного пространственно-локализованного оптического излучения привлекает внимание в связи с перспективой создания оптических логических элементов с размерами, значительно меньшими длины волны [1–5]. В общем случае при передаче оптического излучения с помощью традиционных волноводов проявляется действие ограничивающих факторов, из-за которых рассматривать несколько логических элементов, соединенных в одну микросхему, в качестве электрической цепи с сосредоточенными параметрами, вообще говоря, нельзя. В такой системе различные элементы будут обмениваться энергией с помощью излучения. Чтобы исключить подобные «паразитные» связи, необ-

ходимо создать волноводы, способные передавать оптические сигналы в виде пространственно-локализованных возбуждений. В данном случае под локализацией понимается экспоненциальное затухание электромагнитного поля вдали от волновода, поперечные размеры которого сами малы по сравнению с длиной волны. Отметим, что обычные оптические волокна не удовлетворяют этому условию, поскольку сфокусировать оптическое излучение в пятно размером меньше длины волны невозможно. Кроме того, вблизи границы раздела двух сред при полном внутреннем отражении электромагнитная волна частично проникает из оптического волокна во внешнюю среду с экспоненциальной потерей энергии в поперечном направлении. Близкое расположение соседних волноводов в условиях миниатюризации микросхем создает условия для взаимного проникновения передаваемых сигналов.

В связи с обозначенной выше проблемой, а также другими возможными приложениями (например, в спектроскопии [6,7] и в наноплазмоне [8–12]), в литературе представлены результаты исследований оптических плазмонных волноводов в виде цепочек из близкорасположенных металлических наночастиц с размерами порядка десятков нанометров (вплоть до 5-8 нм), имеющих поверхностный плазмонный резонанс [13–16]. Оптический сигнал распространяется в наночапках за счет возбуждения ППП, который представляет собой коллективное возбуждение (квазичастицу), обладающее групповой скоростью и энергией. Эти свойства отличают ППП от локализованного на отдельной частице поверхностного плазмона. Отметим, что в мировых публикациях анализируются и другие конфигурации нановолноводов, в частности, нанопровода [17,18], наноканавки на поверхности плоской подложки [18,19], а также нанополоски, нанобороздки и другие подобные структуры [20]. В настоящее время трудно предсказать, какая из перечисленных конфигураций нановолноводов окажется наиболее перспективной, однако цепочки из наночастиц выгодно отличаются высокой степенью адаптируемости.

Цель диссертационной работы

Изучение волноводных свойств ОПВ в виде различных конфигураций цепочек из наночастиц серебра сферической и сфероидальной формы, а также создание технологических предпосылок для получения и использования ОПВ.

Конкретными задачами, решаемыми в рамках диссертации, являются:

1. Определение условий, при которых наблюдается избирательное осаждение металлических сферических наночастиц в упорядоченные структуры на диэлектрическую подложку, снабженную металлическим наношаблоном.
2. Исследование дефектности синтезируемых в условиях электростатической функционализации подложки прямолинейных (1D) цепочек из наночастиц, а также разработка способов минимизации дефектов.
3. Исследование спектральных и трансмиссионных свойств оптических плазмонных волноводов в виде различных конфигураций цепочек из сферических серебряных наночастиц, которые могут быть синтезированы в условиях

избирательного осаждения на диэлектрическую подложку из объема нанокolloида.

4. Изучение влияния фактора несферичности наночастиц на волноводные характеристики оптических плазмонных волноводов различных конфигураций.
5. Исследование закономерностей распространения поверхностных плазмон-поляритонов в криволинейных цепочках из металлических наночастиц сферической и сфероидальной формы, включая поляризационные эффекты.
6. Исследование дисперсионных свойств и динамики распространения фемтосекундных импульсов в коротких цепочках из наночастиц сферической и сфероидальной формы, а также разработка способов уменьшения амплитуды паразитных сигналов, отраженных от границ цепочки.
7. Исследование влияния диэлектрической подложки на трансмиссионные свойства линейных оптических плазмонных волноводов из наночастиц сферической и сфероидальной формы.

Научная новизна

1. С помощью численных расчетов продемонстрирована возможность получения упорядоченных однодорожечных структур из близкорасположенных сферических плазмонно-резонансных наночастиц на технологической подложке при помощи оригинального электростатического метода её функционализации, обеспечивающего избирательное осаждение наночастиц в заданной области подложки из объема коллоидной системы.
2. Показано, что в оптических плазмонных волноводах с заданной конфигурацией, состоящих из несферических наночастиц, распространение поверхностных плазмон-поляритонов происходит с пренебрежимо малым пространственным затуханием.
3. Теоретически продемонстрирована возможность использования искривленных $2D$ цепочек из наночастиц в качестве наноразмерных функциональных элементов, позволяющих управлять поляризацией пропускаемого излучения. Установлено влияние факторов геометрической конфигурации цепочек и формы наночастиц на изменение поляризации оптического излучения.
4. Показано, что использование оптических ловушек диссипативного типа, установленных на границах цепочек, позволяет уменьшить амплитуду отраженных (паразитных) сигналов на порядок и более (ниже порога чувствительности фоторегистрирующего устройства) без существенного изменения дисперсионных свойств рабочей части цепочки.
5. Показано, что влияние технологической диэлектрической подложки на распространение поверхностных плазмон-поляритонов в линейных цепочках из наночастиц несферической формы, располагающихся на такой подложке, может быть пренебрежимо мало. Определен диапазон значений параметров системы «оптический плазмонный волновод – подложка», в котором эффективность распространения поверхностного плазмон-поляритона не снижается по сравнению с оптическим плазмонным волноводом в свободном пространстве.

Практическая значимость

Создана физическая модель, способная предсказывать волноводные свойства ОПВ различных конфигураций из серебряных наночастиц различной формы. Разработано оригинальное программное обеспечение, которое позволяет прогнозировать характер распространения оптического модулированного излучения в ОПВ данного типа для конкретных конфигураций с учетом характерных технологических погрешностей. Такие предсказательные возможности модели позволяют предложить оптимизированную конструкцию ОПВ до этапа трудоемкой экспериментальной реализации. Предложена концепция наноразмерных устройств в виде изогнутых цепочек из серебряных наночастиц различной формы, позволяющих управлять поляризацией распространяющегося модулированного оптического излучения на наномасштабах.

Достоверность результатов

Достоверность результатов подтверждается, в первую очередь, использованием физической модели, позволяющей получать результаты, которые коррелируют с аналогичными исследованиями других авторов при тех же условиях и приближениях. Кроме того, основные результаты работы были воспроизведены другими научными коллективами с использованием альтернативных методов (в частности, метода конечных элементов).

Положения, выносимые на защиту

1. Формирование периодических структур из наночастиц серебра на диэлектрических подложках возможно методом применения наношаблонов и электростатической функционализацией подложки, при этом значения электрических параметров являются достижимыми в экспериментальных условиях.
2. Как в прямых, так и в криволинейных оптических плазмонных волноводах из Ag наночастиц сферoidalной формы с малыми значениями соотношения полуосей поверхностный плазмон-поляритон может распространяться с незначительным затуханием в диапазоне частот, лежащем в длинноволновом крыле спектра плазмонного поглощения цепочки.
3. Криволинейные цепочки из плазмонных наночастиц сферической и сферoidalной формы позволяют управлять поляризацией распространяющегося по ним излучения, при этом наибольший эффект достигается в цепочках из сильно сплюснутых сферoidalных Ag наночастиц.
4. Существуют условия, при которых технологическая подложка с расположенным на ней оптическим плазмонным волноводом не ухудшает его волноводные свойства.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- XI, XIII, XVII Всероссийские семинары «Моделирование неравновесных систем», Красноярск, 2008г., 2010г., 2014г.;
- «Всероссийские научные конференции студентов-физиков и молодых ученых», ВНКСФ-15, 18, 20, Кемерово - Томск 2009г., Красноярск 2012г., Ижевск 2014г.;

- «Межвузовские региональные научные конференции студентов, аспирантов и молодых ученых физиков» НКСФ-XXXVIII, XXXIX, Красноярск, 2009г., 2010г.;
- XI Международная конференция «Опто-наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы», Ульяновск, 2009г.;
- II Всероссийская конференция «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях» (ММПСН-2009), Москва, 2009г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы» (5 Ставеровские чтения), Красноярск, 2009г.;
- Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям ЭВРИКА-2011, Новочеркасск, 2011г.;
- VIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского, Красноярск, 2012г.;
- Всероссийская молодежная научная школа «Актуальные проблемы физики», Таганрог - Ростов-на-Дону, 2012г.;
- Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 2013г.;
- International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2013), Moscow, Russia, 2013;
- International Conference Series on Laser-light and Interactions with Particles (LIP 2014), Marseille, France, 2014.

Материалы диссертации изложены в 28 печатных изданиях, в том числе в 23 статьях в сборниках трудов Всероссийских и международных конференций и в 5 статьях в рецензируемых изданиях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка цитируемой литературы (164 наименования) и изложена на 115 страницах машинописного текста, включая 46 рисунков.

Личный вклад автора

Разработка модели и расчеты по главе 2 выполнены автором совместно с д.ф.-м.н. Гаврилюком А.П., к.ф.-м.н. Грачевым А.С., к.ф.-м.н. Герасимовым В.С. и к.ф.-м.н. Исаевым И.Л. Работа по главам 3 и 4 выполнена совместно с Prof. Markel V.A., а также при поддержке Dr. Panasyuk G.Y. и Dr. Govyadinov A.A. Постановка задач и интерпретация полученных результатов выполнена совместно с научным руководителем д.ф.-м.н., проф. Карповым С.В. и Prof. Markel V.A.

Содержательная часть

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, аргументирована их научная новизна, показана практическая значимость полученных результатов и их до-

стоверность на основе сравнения с другими теоретическими исследованиями, представлены выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена обзору основных публикаций по теме диссертационной работы. Представлен обзор публикаций, посвящённых вопросам синтеза и волноводным свойствам ОПВ.

Во **второй главе** в качестве перспективного для постановки реального эксперимента предложен электростатический способ функционализации диэлектрической подложки. Способ основан на использовании металлических нанощаблонов, расположенных с обратной стороны подложки, на которые подается электрический потенциал. Сферические частицы серебра размером порядка 5-10 нм образуются в коллоидном растворе и в дальнейшем осаждаются на прямую линию (шаблон), образованный поперечным срезом слоистой структуры, состоящей из тонкого слоя металла между двумя кварцевыми подложками (срез также покрывается тонким слоем кварца). При этом межчастичное расстояние может контролироваться электростатическими силами и полимерным адсорбционным слоем частиц. Предложенным методом возможно получение ододорожечных и двухдорожечных цепочек ограниченной длины с незначительной неэквидистантностью и с малой степенью дефектности (рисунок 1), а также получение различных двумерных конфигураций цепочек (уголок, полуокружность и т.д.). Метод, предложенный в настоящей главе, сочетает высокую степень контролируемости

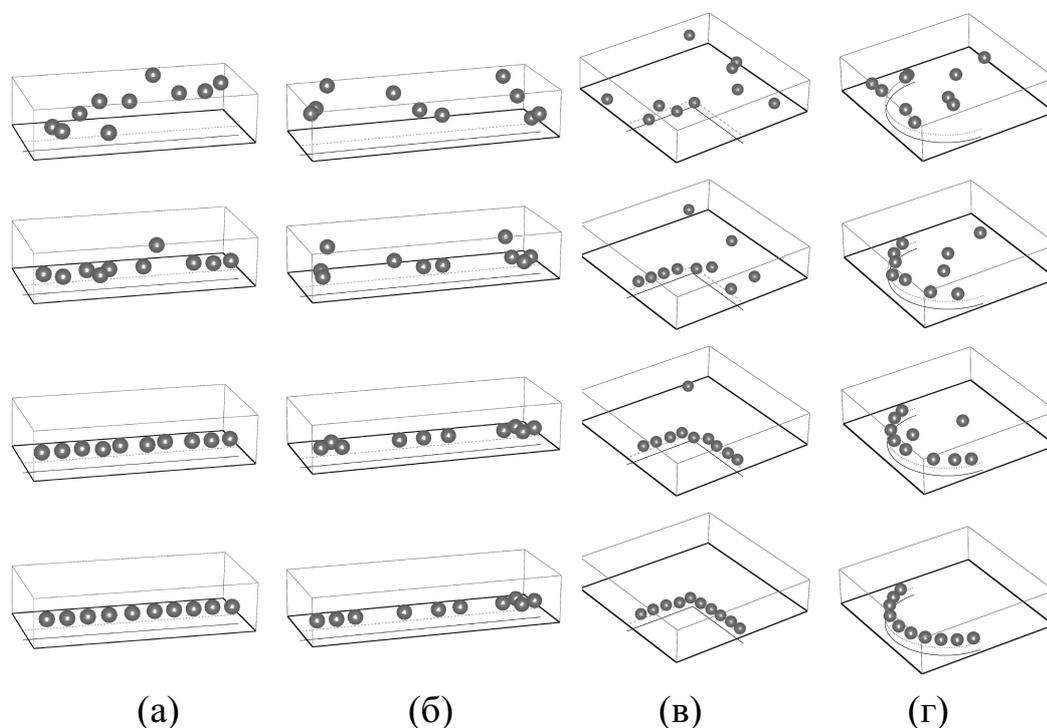


Рисунок 1: Этапы формирования цепочечной структуры на электростатически функционализированной диэлектрической подложке: а) формирование эквидистантной линейной цепочки; б) формирование дефектной структуры; в) формирование цепочки в виде уголка; г) формирование дугообразной цепочки. Сплошной линией изображена проекция нити на внешнюю плоскость подложки.

геометрии ОПВ и малые размеры частиц. При этом значения электрических параметров, необходимых для получения таких структур, являются достижимыми в экспериментальных условиях.

Помимо этого, исследована зависимость степени дефектности синтезируемых в таких условиях цепочечных структур от параметров системы «нанокolloид-подложка». Выявлены возможные типы дефектов, возникающие в цепочках при их синтезе предложенным методом, а также исследованы способы минимизации степени дефектности. Полученные данные позволяют спрогнозировать результат при постановке реального эксперимента.

В **третьей главе** исследуются спектры экстинкции и трансмиссии коротких (длина L которых не превышает длину волны λ возбуждающего излучения) оптических плазмонных волноводов (ОПВ), состоящих из $N \simeq 10$ сферических серебряных наночастиц. Расчеты спектральных свойств основаны на уравнениях связанных диполей [6]:

$$\mathbf{d}_n = \alpha_n \left[\mathbf{E}_n + \sum_{m \neq n}^N G_{nm} \mathbf{d}_m \right], \quad (1)$$

где \mathbf{d}_n и \mathbf{d}_m – дипольные моменты, наводимые на n -ной и m -ной наночастицах; α_n – поляризуемость n -й наночастицы; $\mathbf{E}_n = \mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}_n)$ – внешнее поле в точке \mathbf{r}_n и G_{nm} – тензор межчастичного взаимодействия (функция Грина для электрического поля в свободном пространстве). Исследованы различные геометрические конфигурации ОПВ, возможность синтеза которых была продемонстрирована во второй главе: прямолинейные однодорожечные и двухдорожечные цепочки, а также ОПВ в виде уголка и полуокружности.

При возбуждении ППП в определенной точке пространства ($n = m$) посредством ближнепольного оптического зонда [14] внешнее поле, независимо от формы фронта электромагнитной волны, может быть определено как $\mathbf{E}_n = \mathbf{A} \delta_{nm}$, где \mathbf{A} – векторная амплитуда плоской волны. Данное приближение физически обосновано в силу кубического пространственного затухания электрического поля, создаваемого диполем. В этом случае решение уравнения (1) можно записать как $\mathbf{d}_n = \mathcal{D}_{nm} \mathbf{A}$, где \mathcal{D}_{nm} – функция Грина для цепочки [21], характеризующая отклик отдельной наночастицы на внешнее возбуждение с учетом электромагнитного взаимодействия всех наночастиц в цепочке. Для описания распространения оптического сигнала, возбуждаемого внешним электрическим полем на первой (крайней) частице цепочки ($m = 1$), воспользуемся нормированной функцией Грина [14]:

$$\mathcal{F}_n = \frac{|\mathcal{D}_{n1} \mathbf{A}|}{|\mathcal{D}_{11} \mathbf{A}|}. \quad (2)$$

Данный параметр характеризует степень затухания возбуждения на n -й частице цепочки по сравнению с ($m = 1$) частицей. Помимо этого, будем говорить о функции $\mathcal{F}_N(\lambda)$ ($n = N$) как о спектре трансмиссии ОПВ.

Для расчета спектра экстинкции ОПВ возьмем внешнее поле в виде плоской волны $\mathbf{E}_n = \mathbf{A} \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_n)$, где \mathbf{k} – волновой вектор. Эффективность экстинкции для ОПВ задается известной формулой [22]:

$$Q_e = \frac{4k}{|\mathbf{A}|^2 N b^2} \text{Im} \sum_{n=1}^N \mathbf{d}_n \mathbf{E}^*(\mathbf{r}_n), \quad (3)$$

где $k = |\mathbf{k}|$; b – радиус сферической наночастицы. В силу незначительного вклада в экстинкцию фактора рассеяния в исследуемых цепочечных структурах, выражение (3) определяет полосу плазмонного поглощения цепочечных структур из наночастиц серебра сферической формы.

Показано, что слабая разупорядоченность или структурные несовершенства цепочки (случайные смещения частиц как вдоль, так и перпендикулярно оси ОПВ) существенно не влияют на трансмиссионные свойства ОПВ. Исследование спектров трансмиссии позволяет определить длину волны, на которой затухание оптического сигнала (поверхностного плазмон-поляритона) при распространении вдоль ОПВ минимально. При использовании этих значений длины волны продольно-поляризованные поверхностные плазмон-поляритоны распро-

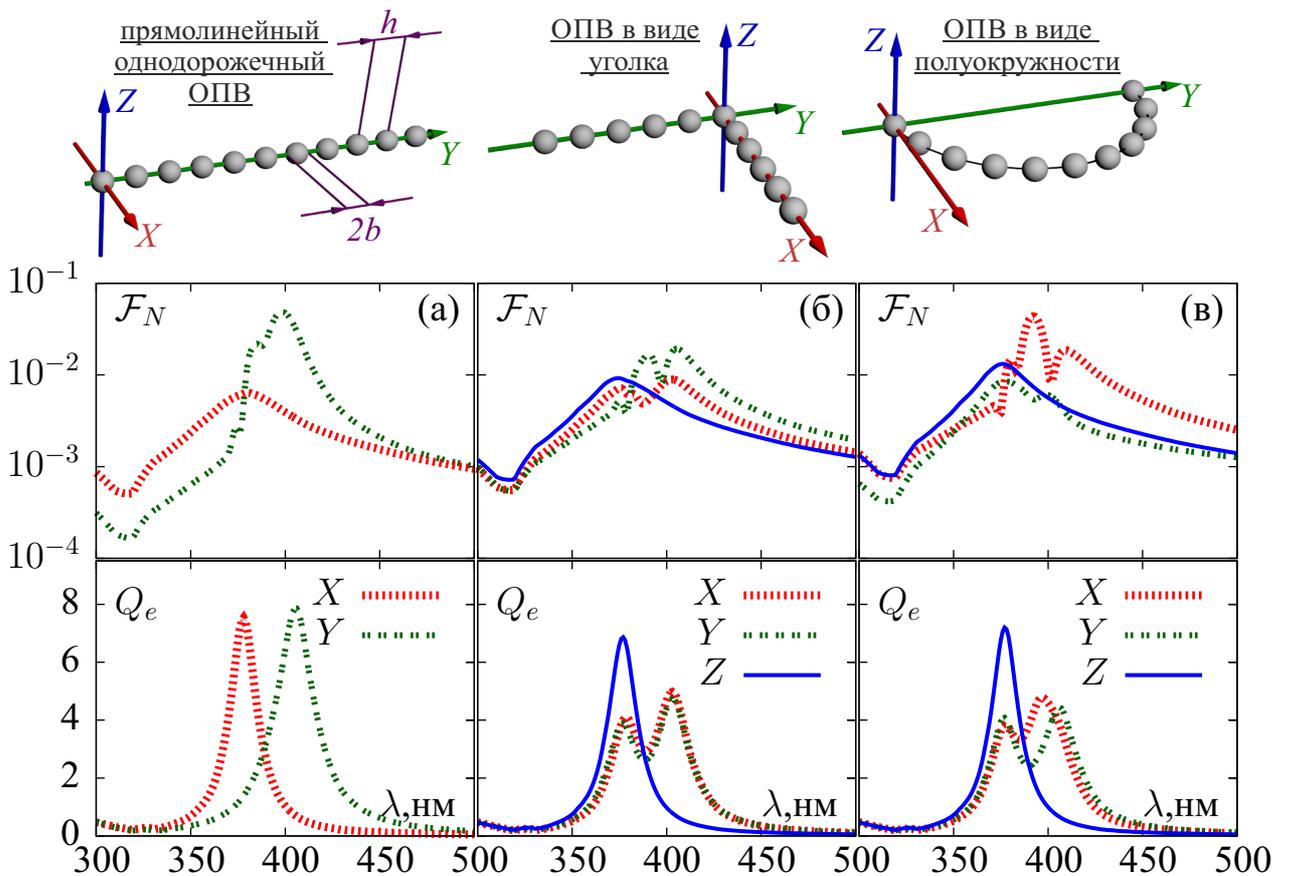


Рисунок 2: Спектры трансмиссии (\mathcal{F}_N) и экстинкции (Q_e) при различной поляризации внешнего излучения для упорядоченных ($h = 24\text{нм}$) ОПВ с различной геометрией: а) прямолинейный односторонний; б) в виде уголка; в) в виде полуокружности. ОПВ состоят из $N = 11$ сферических наночастиц радиуса $b = 8\text{нм}$.

страняются с меньшим затуханием, чем в случае поперечной поляризации (рисунок 2).

Установлено, что наименьшее затухание оптического сигнала может быть достигнуто в ОПВ в виде прямолинейных однодорожечных и двухдорожечных цепочек. Более сильное затухание наблюдается в цепочках в виде полукружности и уголка (рисунок 2).

Исследованы дисперсионные соотношения и волноводные характеристики сравнительно коротких линейных цепочек из сферических и сфероидальных металлических (Ag) наночастиц. Расчеты выполнены на основе дипольного приближения (1) по аналогии с работой [16]. При этом для расчета собственных мод ОПВ полагалось, что $\mathbf{E}_n = 0$ в уравнении (1). Определены собственные спектральные моды коротких (с числом частиц $N = 10$) линейных цепочек из наночастиц как сферической, так и сфероидальной формы. Показано, что наиболее эффективная передача энергии плазмонного возбуждения (с минимальным затуханием и наибольшей групповой скоростью распространения волнового пакета) происходит в цепочках из сплюснутых наносфероидов с минимальными значениями соотношения полуосей $\xi = b/a = 0.4$ (нанодисков), где b и a – малая и большая полуоси сфероидов соответственно. Дальнейшее уменьшение соотношения полуосей позволит увеличить значения групповых скоростей, но при этом увеличиваются и радиационные потери. Полученные выводы коррелируют с результатами работы [15].

Исследована динамика распространения фемтосекундных импульсов в коротких цепочках, состоящих из $N = 10$ наночастиц различной формы, в рамках модели, изложенной в [15]. При минимальном затухании волновых пакетов про-

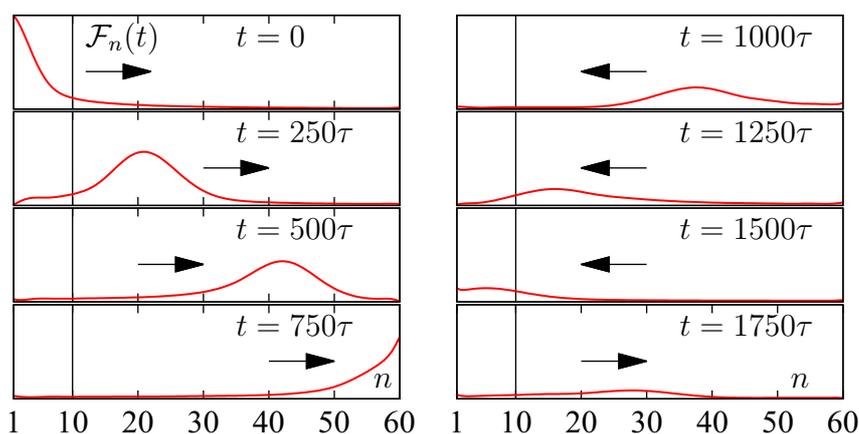


Рисунок 3: Распространение волнового пакета в цепочке из сплюснутых сфероидов, состоящей из $N = 60$ наночастиц. Поляризация ППП перпендикулярна цепочке, центральная частота оптического импульса $\omega_0 = 0.2993\omega_p$, длительность импульса $\Delta t = 1$ фсек. Здесь ω_p – плазменная частота. Полагается, что считывание сигнала происходит на $n = 10$ частице (обозначенной вертикальной линией). Остальная часть цепочки используется в качестве диссипативной ловушки, чья основная функция заключается в подавлении паразитных отраженных сигналов. Время представлено в единицах $\tau = 0.08$ фсек. Параметры цепочки: соотношение полуосей $\xi = 0.4$; длина малой полуоси $b = 8$ нм; межцентровое расстояние $h = 24$ нм.

исходит их отражение от границ цепочек, что при ограниченной длине рабочей части оптических волноводов может приводить к эффекту наложения паразитного сигнала на последующие рабочие импульсы. Этот эффект крайне негативен для процессов обработки информации. В настоящей работе показано, что использование оптической ловушки простейшего (диссипативного) типа, установленной на конце цепочки, позволяет уменьшить амплитуду отраженных сигналов на порядок и более до значений ниже порога чувствительности фоторегистрирующего устройства без существенного изменения дисперсионных свойств рабочей части цепочки (рисунок 3). Здесь $\mathcal{F}_n(t) = |\mathbf{d}_n(t)|/|\mathbf{d}_1(0)|$ – функция Грина (см. выражение (2)) во временном представлении, т.е. отношение дипольного момента на n -й частице в момент времени t к дипольному моменту на первой частице в начальный момент времени $t = 0$.

В четвертой главе исследовано распространение ППП в длинных цепочках (длина L которых на порядок и более превосходит длину волны λ возбуждающего излучения) из $N \simeq 1000$ наночастиц различной формы, а также влияние степени несферичности наночастиц на пространственное затухание ППП. Показано, что использование несферических наночастиц является перспективным для синтеза ОПВ. ППП в виде гауссовых волновых пакетов могут распространяться вдоль цепочек из наносфероидов не только с высокими значениями групповых скоростей (как это было показано в работе [15]), но и с незначительным пространственным затуханием (рисунок 4). При этом локализация электромагнитного поля в таких цепочках достигает максимальных значений. Эти особенности являются приоритетными во многих приложениях, рассматриваемых в литературе.

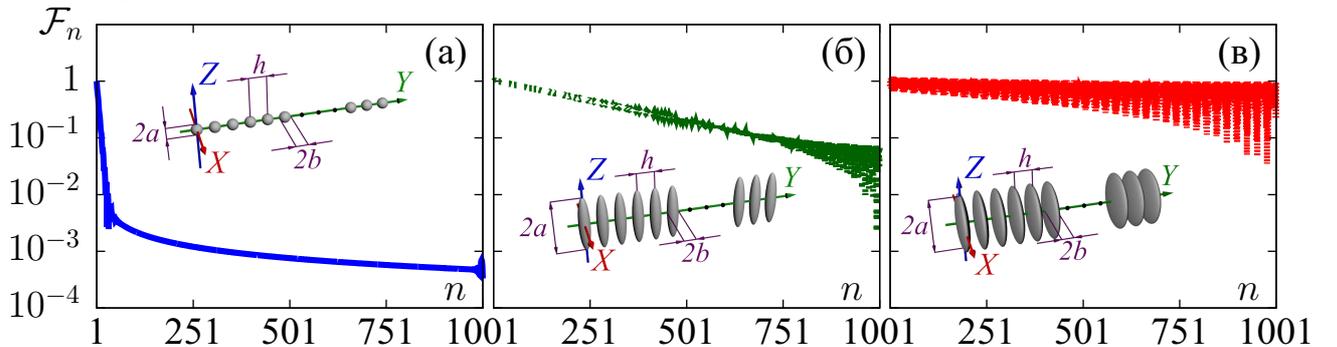


Рисунок 4: Нормированные значения функции Грина \mathcal{F}_n для линейных цепочек из $N = 1001$ наночастиц различной формы: наносфер (а) на частоте $\omega/\omega_p = 0.38$; вытянутых (б) и сплюснутых (в) наносфероидов с соотношением полуосей $\xi = 0.2$ на частоте $\omega/\omega_p = 0.15$. Межцентровое расстояние $h = 24$ нм; длина малой полуоси $b = 8$ нм. Поляризация излучения направлена вдоль оси Z .

Слабое затухание ППП можно объяснить, основываясь на уже известных теоретических результатах. В работе [14] было показано, что для оценки длины экспоненциального затухания ППП может быть использовано следующее выражение:

$$\ell_{\text{exp}} = h \frac{v}{2\pi h^3} \frac{\omega_p^2}{\omega \gamma} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nqh)}{n^2} \right|, \quad (4)$$

где h – межцентровое расстояние; v – объем наночастицы; ω_p – плазменная частота; γ – друдевская константа релаксации электронов в макрообразце (для серебра $\omega_p/\gamma = 526.3$); q – волновой вектор Блоха.

Для параметров, использованных на рисунке 4, имеем $\ell_{\text{exp}} \approx 44\text{мкм}$ (сплюснутые сфероиды), $\ell_{\text{exp}} \approx 9.1\text{мкм}$ (вытянутые сфероиды) и $\ell_{\text{exp}} \approx 0.6\text{мкм}$ (сферы), что полностью соответствуют представленным данным. Общая длина цепочки составляет $L = h(N - 1) \simeq 24\text{мкм}$.

Помимо этого, исследованы особенности распространения ППП в изогнутых двумерных цепочках различной формы. Установлено, что распространение ППП в кривых цепочках с плавно изменяющейся кривизной (см. рисунок 5) может быть слабо затухающим и характеризоваться сильной локализацией электрического поля, как и в случае линейных цепочек. Показано, что ППП гораздо медленнее затухает в кривых цепочках из наносфероидов, чем в аналогичных цепочках из наносфер. Это соответствует общей закономерности – трансмиссионные свойства цепочек из наносфероидов на два порядка выше, чем в случае наносфер. Наиболее эффективное распространение ППП, а также максимальная локализация электрического поля имеет место в цепочках из сплюснутых сфероидов с соотношением сторон $\xi = b/a = 0.3$ (рисунок 6). В этом случае ППП затухает незначительно в длинных изогнутых цепочках при частоте возбуждения $\omega = 0.2\omega_p$, при этом характерные значения нормированной функции Грина составляют порядка $\mathcal{F}_N \gtrsim 0.8$.

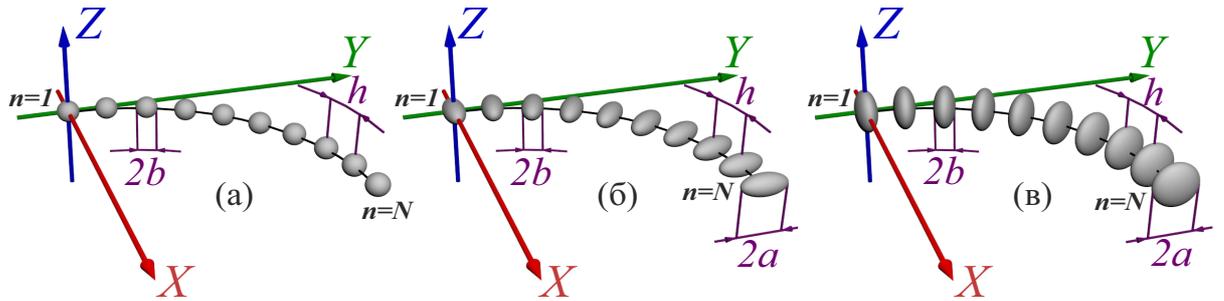


Рисунок 5: ОПВ в виде четверть окружностей из наночастиц различной формы: а) сферы; б) вытянутые сфероиды; в) сплюснутые сфероиды.

Одной из важных особенностей распространения ППП в изогнутых цепочках является проявление поляризационных эффектов. Для их описания введен параметр – степень деполяризации:

$$\delta_n = d_n^\perp / d_n^\parallel, \quad (5)$$

где d_n^\perp и d_n^\parallel – проекции вектора \mathbf{d}_n на оси, перпендикулярные и параллельные поляризации внешнего поля, соответственно. Отметим, что $\delta_n = 0$ или $\delta_n = \infty$

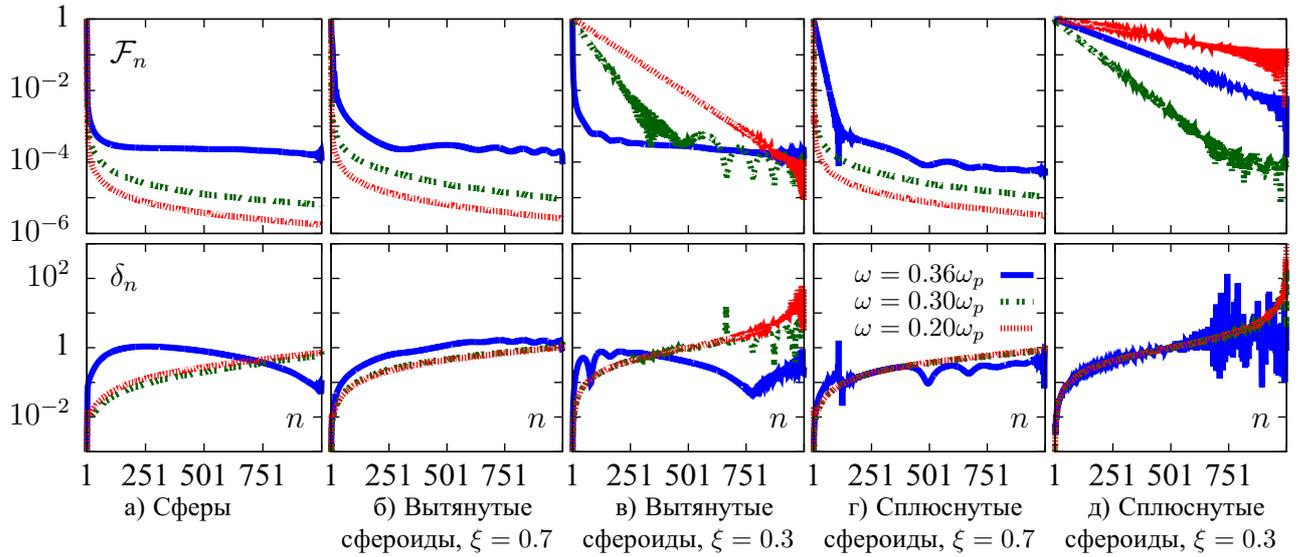


Рисунок 6: Нормированные значения функции Грина \mathcal{F}_n и степень деполяризации δ_n в зависимости от n для цепочек в виде четверть окружности для различных форм наночастиц при различных частотах ω . Поляризация излучения на $n = 1$ наночастице направлена вдоль оси X . Межцентровое расстояние, измеренное вдоль кривой, $h = 24\text{нм}$; длина малой полуоси $b = 8\text{нм}$.

соответствуют линейным поляризациям, в то время как $\delta_n = 1$ соответствует круговой поляризации.

Показано, что изогнутые цепочки из наночастиц могут быть использованы для эффективного и перестраиваемого преобразования поляризации ППП. Продемонстрирована возможность преобразования линейной в линейную, а также линейной в круговую (рисунок 6).

В заключительном разделе четвертой главы исследовано влияние плоской диэлектрической подложки на трансмиссионные и спектральные свойства линейных ОПВ, располагающихся на ней (рисунок 7). Обнаружено, что трансмис-

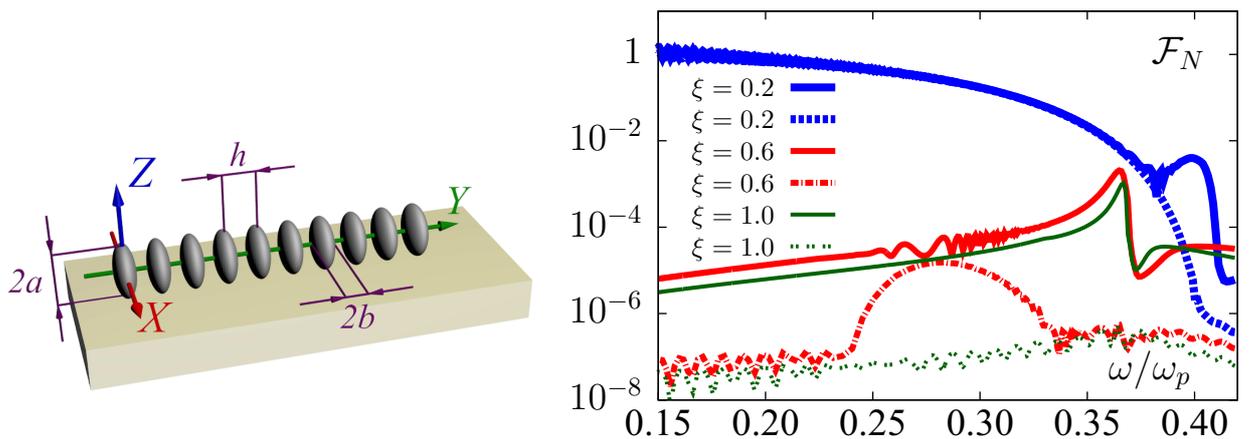


Рисунок 7: Нормированные значения функции Грина \mathcal{F}_N на конце цепочки ($n = N$) для линейных ОПВ, состоящих из $N = 1001$ сплюснутых наносфероидов, расположенных непосредственно на диэлектрической подложке (штрих-пунктирные линии) и в её отсутствии (сплошные линии). Расчеты выполнены для различных значений соотношения полуосей $\xi = b/a$. Межцентровое расстояние $h = 24\text{нм}$; длина малой полуоси $b = 8\text{нм}$. Поляризация излучения направлена вдоль оси X .

сионные свойства линейных ОПВ из наночастиц сферической формы, расположенных на диэлектрической подложке, в большинстве случаев значительно ухудшаются по сравнению с аналогичными ОПВ, расположенными в однородном пустом пространстве. Установлено, что существует диапазон значений параметров системы «ОПВ–подложка», в котором эффективность распространения ППП не снижается по сравнению с ОПВ в свободном пространстве. Кроме того, было обнаружено, что присутствие рядом с волноводом диэлектрической подложки приводит к поляризационным эффектам, заключающихся в изменении поляризации ППП по мере его распространения вдоль цепочки. Эти эффекты минимизируются при удалении ОПВ от подложки.

В заключении приведены основные результаты исследований.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Продемонстрирована возможность получения периодических однодорожечных структур из металлических наночастиц на диэлектрических подложках методом их электростатической функционализации с использованием наншаблонов различных конфигураций. При этом значения электрических параметров, необходимых для получения таких структур, являются достижимыми в экспериментальных условиях.
2. Показано, что слабая разупорядоченность или иные структурные несовершенства оптических плазмонных волноводов в виде коротких цепочек существенно не влияют на их трансмиссионные свойства.
3. Показано, что наилучшими волноводными свойствами обладают оптические плазмонные волноводы в виде цепочек из сильно сплюснутых сфероидов (нанодисков). Такие волноводы обладают широкой полосой пропускания, в пределах которой поверхностные плазмон-поляритоны распространяются с наименьшим затуханием и высокой групповой скоростью.
4. При распространении фемтосекундных импульсов в коротких цепочках (состоящих из десятков наночастиц) отражение от границ цепочки играет существенную роль. Использование ловушек диссипативного типа позволяет вывести из рабочей части цепочки паразитные (отраженные) сигналы путем уменьшения их амплитуды до значений ниже порога чувствительности считывающего фоторегистрирующего устройства.
5. Продемонстрирована возможность использования нановолноводов в виде кривых $2D$ цепочек из наночастиц серебра в качестве функциональных поляризационных элементов для управления поляризацией распространяющегося излучения.
6. Показано, что существует диапазон значений параметров (частота и поляризация возбуждающего излучения, эксцентриситет сфероидальных наночастиц, диэлектрическая проницаемость подложки и наночастиц), при которых плоская диэлектрическая подложка с расположенным на ней оптическим плазмонным волноводом не приводит к ухудшению его волноводных свойств.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Карпов С.В., Рассказов И.Л. Моделирование условий синтеза оптических нановолноводов из цепочек сферических металлических наночастиц методом электростатической функционализации технологической подложки // **Коллоидный журнал**. 2013. Т. 75. № 3. С. 308–318.
2. Рассказов И.Л., Маркель В.А., Карпов С.В. Трансмиссионные и спектральные свойства коротких оптических плазмонных волноводов // **Оптика и Спектроскопия**. 2013. Т. 115. № 5. С.753–762.
3. Rasskazov I.L., Karpov S.V., Markel V.A. Nondecaying surface plasmon polaritons in linear chains of silver nanospheroids // **Optics Letters**. 2013. Vol. 38. no. 22. P. 4743–4746.
4. Rasskazov I.L., Karpov S.V., Markel V.A. Surface plasmon polaritons in curved chains of metal nanoparticles // **Physical Review B**. 2014. Vol. 90. no. 7. P. 075405.
5. Rasskazov I.L., Karpov S.V., Markel V.A. Waveguiding properties of short linear chains of nonspherical metal nanoparticles // **Journal of the Optical Society of America B**. 2014. Vol. 31. no. 12. P. 2981-2989.
6. Карпов С.В., Исаев И.Л., Герасимов В.С., Грачев А.С., Рассказов И.Л., Ципотан А.С. Трансформация структур неупорядоченных 3D агрегатов наночастиц при их препарировании на плоской поверхности объектодержателя электронного микроскопа // Сборник трудов XI Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем», Красноярск, 26–28 сентября 2008г. С. 117-118.
7. Карпов С.В., Исаев И.Л., Гаврилюк А.П., Герасимов В.С., Грачев А.С., Рассказов И.Л., Ципотан А.С. Структурная самоорганизация наночастиц серебра в плазмонно-резонансные 1D нановолноводы для видимого диапазона спектра на электростатически функционализированных диэлектрических подложках // Сборник трудов XI Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем», Красноярск, 26–28 сентября 2008г. С.119-120.
8. Рассказов И.Л., Карпов С.В., Исаев И.Л., Герасимов В.С., Грачев А.С., Ципотан А.С. Структурная самоорганизация наночастиц серебра в плазмонно-резонансные 1D нановолноводы для видимого диапазона спектра на электростатически функционализированных подложках // Сборник трудов «Пятнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых», (ВНКСФ-15), Кемерово–Томск, 26 марта–2 апреля 2009г. С. 218–219.
9. Ципотан А.С., Рассказов И.Л., Карпов С.В., Исаев И.Л., Герасимов В.С., Грачев А.С. Трансформация структуры неупорядоченных 3D агрегатов наночастиц при их препарировании на плоской диэлектрической поверхности // Сборник трудов «Пятнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых», (ВНКСФ-15), Кемерово–Томск, 26 марта-2 апреля 2009г. С. 230-231.

10. Карпов С.В., Исаев И.Л., Герасимов В.С., Грачев А.С., Рассказов И.Л., Ципотан А.С. Оптические волноводы из наночастиц серебра, самоорганизующиеся на электростатически функционализированных диэлектрических подложках // Сборник трудов «Межвузовской региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых физиков НКСФ–XXXVIII (2009)», Красноярск, 17–18 апреля 2009г. С. 70.
11. Карпов С.В., Исаев И.Л., Герасимов В.С., Грачев А.С., Рассказов И.Л., Ципотан А.С. Трансформация структуры неупорядоченных 3D агрегатов наночастиц при их осаждении из объема лиозоля на плоскую диэлектрическую подложку // Сборник трудов «Межвузовской региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых физиков НКСФ–XXXVIII (2009)», Красноярск, 17–18 апреля 2009г. С. 71.
12. Карпов С.В., Исаев И.Л., Герасимов В.С., Грачев А.С., Рассказов И.Л., Ципотан А.С. Изменение структуры фрактальных 3D агрегатов наночастиц при их осаждении на плоскую диэлектрическую поверхность // Сборник трудов XI Международной конференции «Опто–наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы», Ульяновск, 25–29 мая 2009г. С. 145.
13. Карпов С.В., Исаев И.Л., Герасимов В.С., Грачев А.С., Рассказов И.Л., Ципотан А.С. Самосборка плазмонно–резонансных нановолноводов из металлических наночастиц методом электростатической функционализации диэлектрической подложки // Сборник трудов XI Международной конференции «Опто–наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы», Ульяновск, 25–29 мая 2009г. С. 148.
14. Карпов С.В., Исаев И.Л., Герасимов В.С., Грачев А.С., Рассказов И.Л., Ципотан А.С. Трансформация структуры неупорядоченных 3D агрегатов наночастиц при их взаимодействии с плоской диэлектрической поверхностью // Сборник трудов II Всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях» (ММПСН–2009), Москва, 28–30 мая 2009г. С. 109–110.
15. Карпов С.В., Гаврилюк А.П., Исаев И.Л., Герасимов В.С., Грачев А.С., Рассказов И.Л., Ципотан А.С. Самоорганизация наночастиц серебра в плазмонно–резонансные нановолноводы для видимого диапазона спектра на электростатически функционализированных диэлектрических подложках // Сборник трудов II Всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях» (ММПСН–2009), Москва, 28–30 мая 2009г. С. 112–113.
16. Карпов С.В., Исаев И.Л., Герасимов В.С., Грачев А.С., Рассказов И.Л., Ципотан А.С. Синтез плазмонно–резонансных нановолноводов оптического излучения на диэлектрической подложке в условиях ее электростатической функционализации // Сборник трудов Всероссийской научно–технической конференции с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы» (5 Ставеровские чтения), Красноярск, 15–16 октября 2009г. С. 210–211.

17. Рассказов И.Л., Карпов С.В. Спектры пропускания нановолноводов для видимого диапазона спектра, синтезированных на основе различных конфигураций наночастиц // Сборник трудов «Научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых–физиков НКСФ–XXXIX (2010)», Красноярск, 15–16 апреля 2010г. С. 30.
18. Рассказов И.Л., Карпов С.В. Спектры пропускания нановолноводов, синтезированных в виде различных конфигураций наночастиц методом электростатической функционализации подложки // Сборник трудов XIII Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем», Красноярск, 15–18 октября 2010г. С. 134–139.
19. Рассказов И.Л., Карпов С.В. Синтез нановолноводов различных конфигураций наночастиц методом электростатической функционализации подложки и исследование их оптических свойств // Сборник работ победителей отборочного тура Всероссийского конкурса научно–исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям ЭВРИКА–2011, Новочеркасск, октябрь–ноябрь 2011г. С.89–92.
20. Рассказов И.Л., Карпов С.В. Спектральные и трансмиссионные свойства плазмонно–резонансных нановолноводов в виде цепочек наночастиц // Сборник трудов «Восемнадцатой Всероссийской научной конференции студентов–физиков и молодых ученых», (ВНКСФ–18), Красноярск, март–апрель 2012г. С. 362–363.
21. Рассказов И.Л., Карпов С.В., Алексеенко И.В. Optical properties of the waveguides in the form of various configurations of arrays of nanoparticles, synthesized on the electrostatically functionalized substrate // Молодежь и наука: сборник материалов VIII Всероссийской научно–технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 155–летию со дня рождения К.Э. Циолковского, Красноярск, 19–27 апреля 2012г.
22. Рассказов И.Л., Карпов С.В. Спектральные и трансмиссионные свойства плазмонно–резонансных нановолноводов в виде цепочек наночастиц // Материалы трудов Всероссийской молодежной научной школы «Актуальные проблемы физики», Таганрог – Ростов–на–Дону, 19–21 сентября 2012г. С. 86–87.
23. Рассказов И.Л., Карпов С.В., Алексеенко И.В. Propagation of surface plasmon polaritons and localization of the electric field in curved 2D chains of Ag nanospheroids // Материалы трудов Всероссийской с международным участием научно–технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 6–7 мая 2013г. С. 458–461.
24. Rasskazov I.L., Karpov S.V., Markel V.A. Propagation of Surface Plasmon Polaritons in Curved 2D Chains of Nanospheroids // Proceedings of International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2013), Moscow, Russia, 18–22 June, 2013.
25. Рассказов И.Л., Ершов А.Е., Карпов С.В. Дисперсионные свойства линейных оптических нановолноводов ограниченной длины в виде цепочек металли-

- ческих наночастиц // Сборник трудов «Двадцатой Всероссийской научной конференции студентов–физиков и молодых ученых», (ВНКСФ–20), Ижевск, март–апрель 2014г. С. 323–324.
26. Ершов А.Е., Рассказов И.Л., Карпов С.В. Взаимодействие импульсного лазерного излучения с коллоидными агрегатами плазмонных наночастиц // Сборник трудов «Двадцатой Всероссийской научной конференции студентов–физиков и молодых ученых», (ВНКСФ–20), Ижевск, март–апрель 2014г. С. 325–326.
 27. Rasskazov I.L., Karpov S.V., Markel V.A. Surface plasmon polaritons in linear chains of silver nanospheroids // Book of Extended Abstracts, 10th Edition of the International Conference Series on Laser–light and Interactions with Particles (LIP2014), Marseille, France, 25–29 August, 2014.
 28. Рассказов И.Л., Карпов С.В., Маркель В.А. Влияние технологических подложек на спектры плазмонного поглощения и волноводные свойства линейных цепочек из наночастиц серебра // Сборник трудов XVII Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем», Красноярск, 3–5 октября 2014г. С. 130–133.

Цитированная литература

1. Maier S. A., Kik P. G., Atwater H. A. Optical pulse propagation in metal nanoparticle chain waveguides // *Phys. Rev. B*. 2003. Vol. 67. P. 205402.
2. Girard C., Quidant R. Near-field optical transmittance of metal particle chain waveguides // *Opt. Express*. 2004. Vol. 12. P. 6141.
3. Nikitin A.G., Nguyen T., Dallaporta H. Narrow plasmon resonances in diffractive arrays of gold nanoparticles in asymmetric environment: Experimental studies // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102, no. 22. P. 221116.
4. Lee C., Tame M., Noh C. et al. Robust-to-loss entanglement generation using a quantum plasmonic nanoparticle array // *New J. Phys.* 2013. Vol. 15, no. 8. P. 083017.
5. Климов В. В. Наноплазмоника. М. : Физматлит, 2009. 480 с.
6. Markel V. A. Coupled-dipole approach to scattering of light from a one-dimensional periodic dipole chain // *J. Mod. Opt.* 1993. Vol. 40, no. 11. P. 2281–2291.
7. Zou S., Janel N., Schatz G. C. Silver nanoparticle array structures that produce remarkably narrow plasmon lineshapes // *J. Chem. Phys.* 2004. Vol. 120, no. 23. P. 10871–10875.
8. Burin A. L., Cao H., Schatz G. C., Ratner M. A. High-quality optical modes in low-dimensional arrays of nanoparticles: application to random lasers // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2004. Vol. 21, no. 1. P. 121–131.
9. Quidant R., Girard C., Weeber J.-C., Dereux A. Tailoring the transmittance of integrated optical waveguides with short metallic nanoparticle chains // *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 69. P. 085407.

10. Simovski C. R., Viitanen A. J., Tretyakov S. A. Resonator mode in chains of silver spheres and its possible application // *Phys. Rev. E*. 2005. Vol. 72. P. 066606.
11. Evlyukhin A. B., Bozhevolnyi S. I., Stepanov A. L. et al. Focusing and directing of surface plasmon polaritons by curved chains of nanoparticles // *Opt. Express*. 2007. Vol. 15, no. 25. P. 16667–16680.
12. Краснок А. Е., Максимов И. С., Денисюк А. И. и др. Оптические наноантенны // *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183, № 6. С. 561–589.
13. Alu A., Engheta N. Theory of linear chains of metamaterial/plasmonic particles as subdiffraction optical nanotransmission lines // *Phys. Rev. B*. 2006. Vol. 74. P. 205436.
14. Markel V. A., Sarychev A. K. Propagation of surface plasmons in ordered and disordered chains of metal nanospheres // *Phys. Rev. B*. 2007. Vol. 75. P. 085426.
15. Govyadinov A. A., Markel V. A. From slow to superluminal propagation: Dispersive properties of surface plasmon polaritons in linear chains of metallic nanospheroids // *Phys. Rev. B*. 2008. Vol. 78, no. 3. P. 035403.
16. Weber W. H., Ford G. W. Propagation of optical excitations by dipolar interactions in metal nanoparticle chains // *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 70. P. 125429.
17. Chang D. E., Sorensen A. S., Hemmer P. R., Lukin M. D. Strong coupling of single emitters to surface plasmons // *Phys. Rev. B*. 2007. Vol. 76. P. 035420.
18. Rose A. H., Wirth B. M., Hatem R. E. et al. Nanoscope based on nanowaveguides // *Opt. Express*. 2014. Vol. 22, no. 5. P. 5228–5233.
19. Zhang X., Li Z., Chen J. et al. A dichroic surface-plasmon-polariton splitter based on an asymmetric T-shape nanoslit // *Opt. Express*. 2013. Vol. 21, no. 12. P. 14548–14554.
20. Han Z., Bozhevolnyi S.I. Radiation guiding with surface plasmon polaritons // *Rep. Prog. Phys*. 2013. Vol. 76, no. 1. P. 016402.
21. Hadad Y., Steinberg B. Z. Green's function theory for infinite and semi-infinite particle chains // *Phys. Rev. B*. 2011. Vol. 84. P. 125402.
22. Bohren C. F., Huffman D. R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York : John Wiley & Sons, 1998.

Подписано в печать 20.04.2015. Печать плоская. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ

Отпечатано полиграфическим центром

Библиотечно-издательского комплекса

Сибирского федерального университета

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а

Тел./факс: (391) 206-26-49; тел. (391) 206-26-67

E-mail: print_sfu@mail.ru; http://lib.sfu-kras.ru