

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Коллективные эффекты в линейных и нелинейных системах микролинз при воздействии  
лазерного излучения»**

**Аспирант:** Митин Николай Николаевич

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:** Пикулин Александр  
Викторович, к.ф.-м.н., с.н.с. лаб.341 ИПФ РАН

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

01.04.21 Лазерная физика

**Форма обучения:** очная

Нижний Новгород  
2020

## **Общая характеристика научно-квалификационной работы.**

**Актуальность темы исследования и степень её разработанности.** В настоящее время лазеры нашли своё применение в огромном количестве научных и промышленных приложений, одним из которых является наномодификация материалов [1], в частности, коллоидная лазерно-частичная литография [2]. Коллоидная литография — это метод, в котором диэлектрические микро- и наночастицы (например, частицы из полистирола, диоксида титана) различной формы наносятся на поверхность твёрдого тела, некоторой подложки, в виде коллоидного раствора. После высыхания коллоидного раствора на подложке остается плотноупакованный монослой, состоящий из десятков тысяч микрочастиц. [3] Благодаря самоорганизации можно получить почти идеальную гексагональную упаковку частиц.

В качестве составляющих монослой частиц в силу своей доступности наиболее часто используются сферические частицы. [4] Диэлектрические микрошарики действуют как микролинзы в ближнем поле. В результате облучения лазерным фемтосекундным импульсом такого монослоя за каждой частицей формируется область усиления электромагнитного поля. Это приводит к его поглощению подложкой, и, как следствие, к сильно локализованной модификации вещества. Например, к возникновению фотохимических изменений в подложке [5], а также к абляции [6] и свеллингу [7]. Абляция — удаление вещества с подложки под воздействием лазерного излучения. Свеллинг — процесс «набухания» поверхности. Модифицирование подложек таким образом приводит к появлению периодических неоднородностей в их поверхностном слое. Описанная техника может найти применение в создании фотонных кристаллов и метаматериалов. Например, в результате абляции на поверхности подложки возникают периодические отверстия, которые могут быть заполнены материалами с другими показателями преломления.

Метод коллоидной литографии позволяет создавать структуры разных типов [8, 9], которые нашли своё применение в нанофотонике [10], наноплазмонике [11], в изготовлении светодиодов [12], механических метаматериалов [13], в задачах накопления и хранения энергии [13, 14], в биомедицине [15]. В сравнении с остальными техниками литографии, таких как ультрафиолетовая фотолитография [16], электронно-лучевая литография [17] или ионно-лучевая литография [18], коллоидная литография позволяет создавать поверхностные структуры на больших масштабах с меньшими затратами.

В современных статьях по лазерному наноструктурированию шарики, находящиеся в плотноупакованных монослоях, часто рассматривают как отдельные микролинзы, локализующие падающее лазерное излучение независимо друг от друга. [19, 20] Однако, их нельзя рассматривать как совокупность независимых линз, так как существенную роль играют коллективные моды, возникающие в монослое. [21]

Также в последних работах наблюдается повышенный интерес к исследованию зависимо-

сти распределения электромагнитных полей от формы объектов, нанесённых на подложку. [22-34] Например, известны работы, в которых в качестве фокусирующих частиц рассматривались многослойные шарики [22-26], эллиптические микроцилиндры [28], эллипсоиды. [29-34] Одной из главных задач лазерно-частичной литографии является поиск условий на монослой частиц при которых возможно возникновение так называемых наноджетов — сильно вытянутых в направлении распространения волны областей с высокой интенсивностью электромагнитного поля. [21, 35, 36]. Наноджеты, распространяющиеся вглубь подложки, приводят к многоточечной параллельной модификации поверхности [37].

Кроме того, монослои могут быть использованы для создания таких структур поля, как массивы фотонных вихрей. Фотонные вихри — пучки со специальной пространственной («вихревой») структурой поля. В таком вихре фаза и вектор Пойнтинга вращаются вокруг оси распространения пучка. Это приводит к тому, что в центре вихря образуется ноль поля или оптическая сингулярность. При проецировании на поперечную направлению его распространения плоскость оптический вихрь выглядит как кольцо света с тёмным пятном в центре. Вихрю ставится в соответствие целое число, называемое топологическим зарядом, определяющее набег фазы при проходе по замкнутому контуру вокруг оси распространения пучка.

Уникальные особенности вихревых пучков с орбитальным угловым моментом [38-40] используются в различных областях, таких как изготовление нано- и микрочастиц [41-43], микромашиining [44], оптическая микроскопия высокого разрешения [45, 46], квантовые информационные технологии [47, 48], связь [49, 50], трёхмерные нанотехнологии [51, 52], поверхностные структуры [53-55]. Вихревые пучки азимутальной [56] или радиальной [57] поляризации имеют более чёткую фокусировку по сравнению с обычными радиально или линейно поляризованными пучками. Поверхностные плазмоны [58], включая тёмные моды [59], могут эффективно возбуждаться вихревыми пучками, что позволяет применять их в биохимическом зондировании и наноразмерной генерации. Массивы вихрей находят своё применение в высокопроизводительной оптической связи [50] и одностадийном изготовлении хиральных трёхмерных фотонных структур [51].

Отдельные вихревые пучки могут быть получены непосредственно лазером [60] или созданы с помощью различных формирующих пучков устройств, таких как спиральные фазовые пластины [61, 62], ассиметричные устройства с точечным отверстием [63], метаповерхности [64], компьютеро-сгенерированные голограммы [65], жидкокристаллические ячейки [66], диэлектрические клинья [67]. Массивы вихрей могут быть получены в виде суперпозиции нескольких когерентных волн с использованием интерферометрических схем [68, 69], схем с точечным отверстием [70] или пространственных модуляторов света [71, 72]. Трёхмерные периодические фотонные решётки [73, 74] могут быть сгенерированы монослоями микрошариков благодаря эф-

фекту Гальбо [75].

Как правило, периодичность структур, изготовленных с помощью коллоидной литографии, отражает периодичность монослоя частиц. Таким образом, изготовление коллоидных суперструктур — важный путь для создания поверхностных структур сложной морфологии. Например, известно, что трёхблочные янусоподобные частицы самоорганизуются в решётки КагOME [76]. Также коллоидные суперструктуры могут быть получены при помощи обычных полистироловых микрошариков на подложке, где смачиваемость поверхности избирательно модифицируется УФ-излучением [77].

**Цели и задачи.** Работа направлена на теоретическое исследование оптимальных параметров монослоёв фокусирующих частиц в задачах коллоидной лазерно-частичной литографии для создания необходимых распределений лазерного поля, а также на исследование режимов, возникающих при определённых параметрах этих задач, таких как возникновение фотонных вихрей и струй. Также перед автором была поставлена теоретическая задача о применении плотноупакованных массивов сферических частиц и многолучевой интерференции для модификации подложек по заданному шаблону.

#### **Научная новизна.**

- Теоретически исследован режим возникновения фотонных вихрей при использовании монослоёв сфероидальных частиц с большим показателем преломления.
- Теоретически описано применение метода многолучевой интерференции для задач коллоидной литографии с использованием диэлектрических сферических частиц.
- Исследованы условия возникновения режима генерации фотонных джетов, возникающие в плотноупакованных монослоях диэлектрических частиц типа «ядро-оболочка» на примере частиц  $TiO_2$ -полистирол.
- Рассмотрена возможность использования диэлектрических янусоподобных частиц и частиц типа «ядро-оболочка» для задач лазерно-частичной литографии.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

- Продемонстрирована возможность использования частиц сфероидальной формы с большим показателем преломления (диоксид титана, диоксид циркония) для задач лазерно-частичной ближнепольной коллоидной литографии.
- Получены условия возникновения режима генерации фотонных вихрей с топологическим зарядом  $m = \pm 1$  в массивах сфероидальных частиц.
- Создан алгоритм, согласно которому, можно сформировать заданную картину распределения фотонных джетов в диэлектрической подложке для её лазерной модификации. Алгоритм позволяет определить направления распространения, амплитуды и фазы лазерных

пучков, падающих на плотноупакованный монослой диэлектрических сферических частиц.

- Исследованы распределения поля в массивах диэлектрических частиц типа «ядро-оболочка» и янусоподобных частиц, что также может быть в будущем использовано в эксперименте.

**Методология и методы исследования.** В диссертационной работе производилось численное моделирование решения системы уравнений Максвелл с помощью метода конечных разностей во временной области. Этот метод был применён для создания структур поля в бесконечно-периодических системах сложно-составных объектов.

**Положения, выносимые на защиту.**

- Массивы плотноупакованных диэлектрических сфероидальных частиц с большим показателем преломления могут быть использованы для локализации электромагнитного поля внутри подложки, на которой они расположены.
- Плотноупакованные коллоидные монослои диэлектрических сфероидальных микрочастиц с высоким показателем преломления (диоксид титана, диоксид циркония) могут преобразовывать падающее циркулярно-поляризованное лазерное излучение в периодическую решётку недифрагирующих фотонных вихрей с орбитальным угловым моментом с топологическими зарядами  $m = \pm 1$  и двумя различными поляризациями.
- Многолучевая интерференция с использованием плотноупакованных коллоидных монослоёв диэлектрических сферических микрочастиц позволяет создавать на подложках периодические структуры заданной конфигурации, состоящие из фотонных джетов.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Проведённое исследование опирается на известный метод численного моделирования решения системы уравнения Максвелла (метод конечных разностей в числовой области, finite-difference time-domain — FDTD).

По теме работы были опубликованы две статьи в международных реферируемых журналах [A1, A2]. Одна статья, написанная по теме Главы 3 научно-квалификационной работы, на момент написания данного научного доклада находится на рецензии в журнале Optics Letters [A3].

Изложенные в работе результаты докладывались на международных конференциях:

- PIERS (Прага, Чехия, 2015)
- ICPEPA-10 (Брашов, Румыния, 2016)
- SFM (Саратов, 2016, 2017 гг.)
- PIERS (Санкт-Петербург, 2017)

Также результаты докладывались на школе «Нелинейные Волны-2016» (Нижний Новгород, 2016).

**Личный вклад автора.** Все полученные в работе результаты получены лично автором либо при его непосредственном участии. Автор активно участвовал в программной реализации численных экспериментов и теоретическом описании полученных в них результатов.

**Структура и объём научно-квалификационной работы (диссертации).** Научно-квалификационная работа (диссертация) состоит из введения, трёх глав, двух приложений, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём работы — 52 страницы, включая 20 рисунков и список литературы из 111 наименований.

## **Краткое содержание научно-квалификационной работы (диссертации)**

Во **введении** обосновывается актуальность темы работы, её научная новизна и практическая значимость. Освещается современное состояние проблем, рассматриваемых в диссертации. Приводится обзор литературы по вопросам коллоидной лазерно-частичной литографии, оптических наноджетов и оптических вихрей. Во введении также формулируются основные цели и задачи, поставленные перед автором работы.

В **первой главе** диссертации приведены результаты исследования режима фотонных наноджетов, возникающих при использовании в качестве фокусирующих элементов массивов сфероидальных частиц с большим показателем преломления, таких как, например, диоксид титана  $TiO_2$ .

Известно, что попытка уменьшения размера шариков с одновременным увеличением показателя преломления влечёт за собой переход основного максимума поля внутрь шарика, что затрудняет использование систем таких микрочастиц для наноструктурирования поверхности. Уменьшение диаметра шариков с показателем преломления 1.4 – 1.6 (кварц, полистирол и др.) до диаметра, меньшего длины волны, практически приводит к исчезновению фокусировки поля за шариками.

В этой главе предлагается решение данной проблемы путём использования массивов не сферических, а сфероидальных частиц. Сплюснутая форма сфероидальной микролинзы уменьшает негативное влияние абберационных эффектов и позволяет получить выраженный максимум поля на границе частицы и подложки даже в случае микролинз с большим показателем преломления (например, сфероиды из диоксида титана) и диаметром, меньшим длины волны. В результате можно добиться дальнейшего увеличения плотности записи наноструктур.

На Рисунке 1 продемонстрировано пространственное распределение интенсивностей поля после прохождения фемтосекундного импульса на центральной длине волны 800 нм через монослой сплюснутых сфероидальных частиц с соотношением сторон 1.45 и радиусами 322 нм, рас-

положенный на подложке из ПММА.

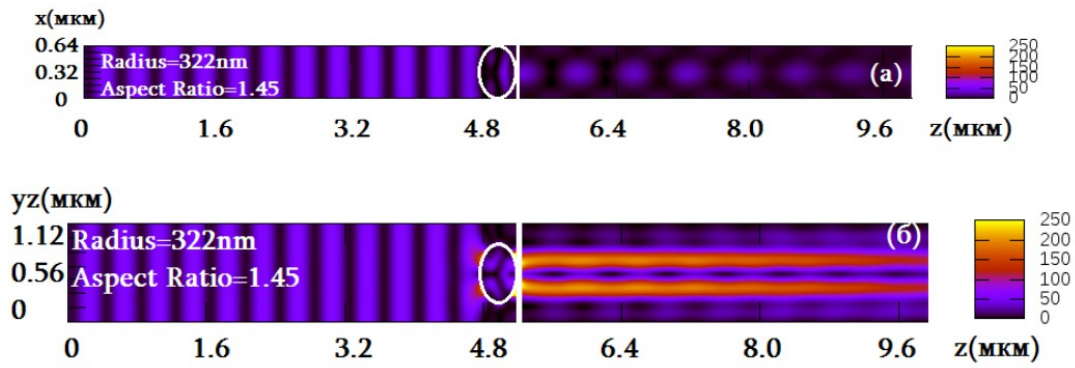


Рисунок 1: Вычисленные распределения интенсивности поля при нормальном падении плоской линейно-поляризованной волны с длиной волны 800 нм на монослой сфероидов с радиусами 322 нм с соотношением сторон 1.45. Распределения полей нормированы на значение интенсивности падающей плоской волны. Границы сфероида и подложки обозначены белыми линиями. Показатели преломления среды, частиц и подложки соответственно равны 1, 2.61, 1.46.

Также была рассмотрена задача наноструктурирования поверхности под действием бихроматических фемтосекундных лазерных импульсов с целью значительного увеличения плотности записи структур на единицу площади и оптимизации параметров структур по сравнению с полученными ранее. Результаты показаны на Рисунке 2.

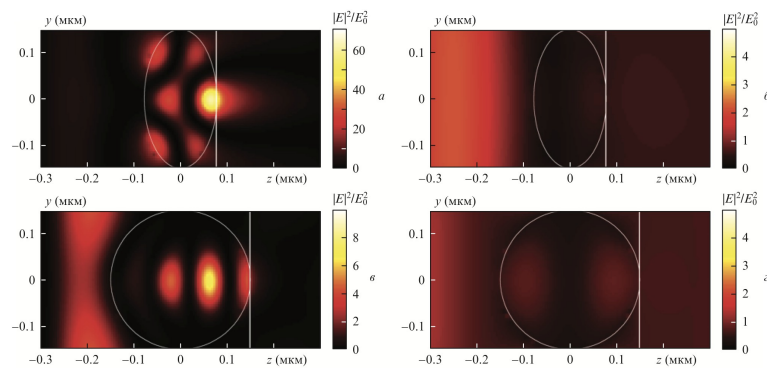


Рисунок 2: Представлены рассчитанные методом FDTD распределения квадрата модуля амплитуды электрического поля, образующиеся вблизи плотноупакованных массивов сфероидов и шариков из  $TiO_2$  (диоксида титана) на подложках из полиметилметакрилата (ПММА) при их облучении на длинах волн 400 и 800 нм фемтосекундными импульсами с длительностью 50 фс. Диаметр шариков и сфероидов 300 нм, высота сфероидов 155 нм. Падающая волна линейно поляризована вдоль оси x. Показатели преломления  $TiO_2$  составляют 3.0 ( $\lambda=400\text{ нм}$ ) и 2.6 ( $\lambda=800\text{ нм}$ ), ПММА – 1.5 ( $\lambda=400\text{ нм}$ ) и 1.49 ( $\lambda=800\text{ нм}$ ).

Во **второй** главе приведены результаты исследования решёток фотонных вихрей топологических зарядов  $m=\pm 1$ , возникающих в плотноупакованных массивах сферических и сфероидальных частиц (Рисунок 3).

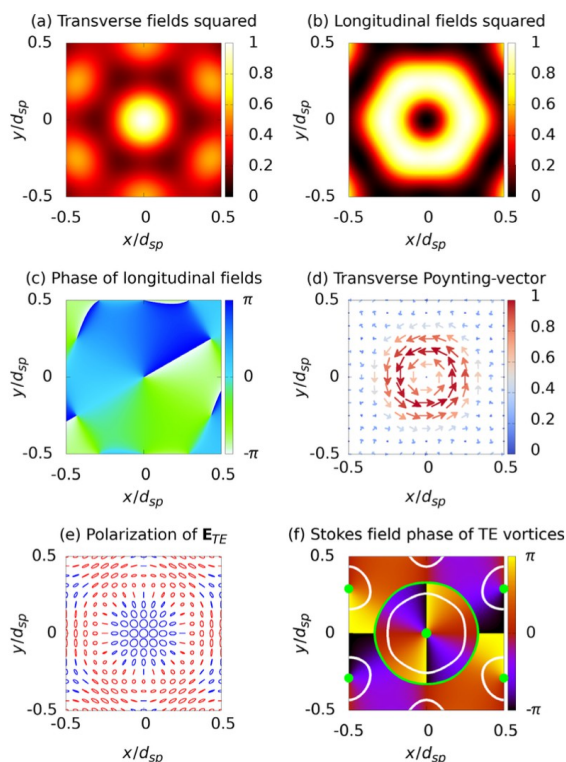


Рисунок 3: Повторяющийся фрагмент решётки вихрей, центр которой находится на продольной к направлению распространения волны оси сфероида. Нормированный квадрат поперечной (a) и продольной (b) компонент электрического и магнитного полей ТМ- и ТЕ- мод. (c) Распределение фаз продольных полей. (d) Нормированная поперечная компонента вектора Пойнтинга ТЕ- и ТМ- мод. (e) Распределение поляризации в ТЕ-мод. Голубые эллипсы показывают ориентацию соответствующую ориентации падающего луча. Красные — противоположную. (f) Фаза комплексной стоксовой поляризации поля. [78] L-линии и С-линии обозначены белыми и зелёными линиями соответственно. Зелёные точки соответствуют С-точкам сингулярности поляризации.

Была изучена возможность генерации чистых ТЕ- и ТМ-вихревых решёток с использованием монослоёв частиц при падении на них лазерных импульсов. Также было проанализировано, как меняются интенсивности ТЕ-,ТМ- и ТЕМ-мод при изменении параметров частиц составляющих массивы (Рисунок 4). При облучении массива из сфероидальных частиц может происходить возбуждение практически чистой ТЕ-моды. Произведена оценка продольной длины вихрей.



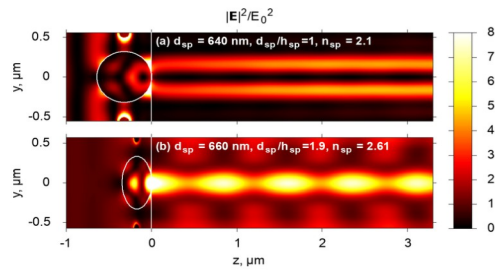


Рисунок 4: Распределения усиления квадрата модуля электрического поля, получившиеся при падении лазерного импульса длительностью 300 фс на монослой микрошариков из диоксида циркония (а) и микросфероидов из диоксида титана (б), расположенные на стеклянной ( $n_{\text{sub}}=1.46$ ) подложке. Усиление поля нормировано на квадрат модуля амплитуды поля падающей волны.

В **третьей** главе была показана возможность генерации периодической структуры заданной конфигурации фотонных джетов при использовании коллоидного монослоя диэлектрических сферических микрочастиц, нанесённых на подложку. Для их создания частицы должны быть облучены несколькими интерферирующими лазерными пучками, падающими под разными углами к подложке. В главе описан простейший алгоритм, с помощью которого можно выбрать направления распространения пучка и рассчитать между ними разность фаз, необходимую для получения желаемых рисунков из «ярких» и «тусклых» джетов. Контраст квадрата модуля электрического поля между джетами оказывается ниже для структур больших размеров. На Рисунке 5 показан пример расчёта заданной структуры из фотонных джетов с периодом 4x4. Периодические структуры из джетов размером 8x8 могут быть получены с помощью полистироловых шариков с диаметром 0.9 мкм на подложке из ПММА. (Рисунок 6)

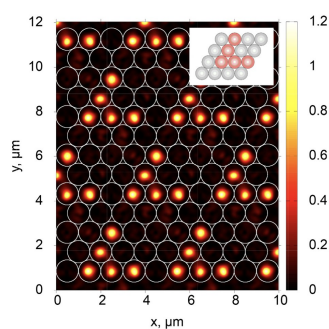


Рисунок 5: Распределение  $|E|^2$  в ПММА подложке (на расстоянии 40 нм вглубь подложки), на которой расположен монослой полистироловых частиц с диаметром 1 мкм. Микрошарики (обозначены белыми окружностями) облучаются несколькими интерферирующими плоскими циркулярно-поляризованными волнами с длиной волны 800 нм. Показатели преломления ПММА и полистирола равны соответственно 1.46 и 1.58. На рисунке изображена решётка фотонных джетов размером 4x4.

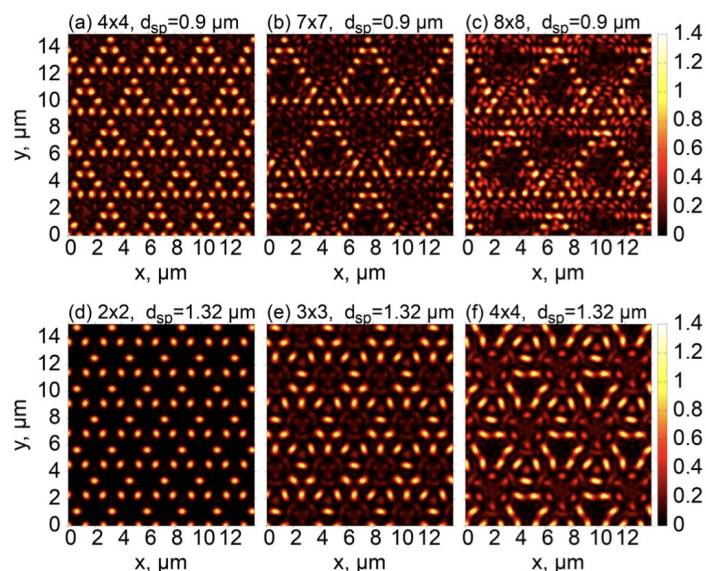


Рисунок 6: Вычисленные структуры разных размеров, сконструированные из фотонных джетов, полученные на ПММА подложке с монослоем полистироловых шариков при её облучении несколькими плоскими волнами на длине волны  $\lambda = 800 \text{ нм}$ . Размеры структур: (a) 4x4, (b) 7x7, (c) 8x8 для  $d_{\text{sp}} = 0.9 \text{ мкм}$  и (d) 2x2, (e) 3x3, (f) 4x4 для  $d_{\text{sp}} = 1.32 \text{ мкм}$ .

В **Приложении А** показана возможность генерации наноджетов с помощью диэлектрических частиц типа «ядро-оболочка». При диаметре ядра 500 нм из диоксида титана и толщине полистироловой оболочки 250 нм на длине волны 900 нм (см. Рисунок 7) возможно получение режима распространяющихся вглубь подложки слабозатухающих наноджетов, что позволяет значительно увеличить толщину слоя подложки, который можно модифицировать.

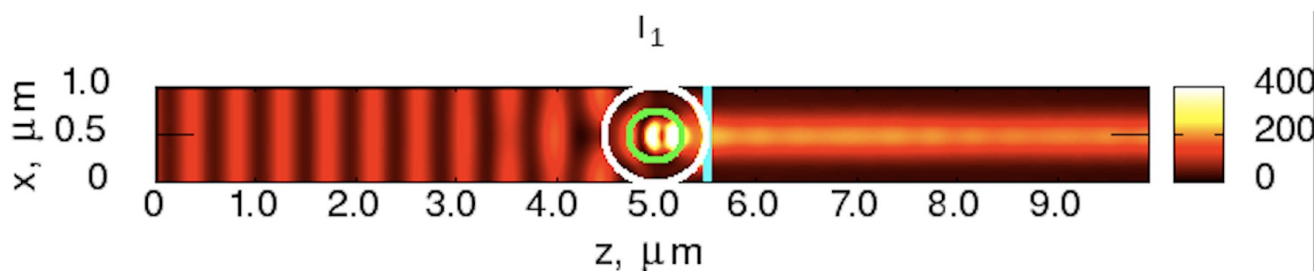


Рисунок 7. Распределение интеграла квадрата модуля электрического поля при падении лазерного циркулярно-поляризованного излучения на длине волны 900 нм на плотноупакованный монослой частиц типа «ядро-оболочка» диаметром 1 мкм (ядро из диоксида титана диаметром 500 нм, показатель преломления 2.5; оболочка из полистирола, показатель преломления 1.47), расположенный на подложке из полиметилметакрилата (показатель преломления 1.49). Лазерное излучение распространяется слева направо. Голубой линией указана граница подложки, белой — граница частицы, зелёной — граница между материалами, из которых состоит частица.

В **Приложении Б** исследована возможность использования монослоёв диэлектрических янусоподобных («двуликих») частиц. Рассмотрена задача численного моделирования нормального падения плоской монохроматической линейно-поляризованной волны на плотноупакованный массив таких частиц. Был произведён поиск оптимального соотношения показателей преломления, при котором возможно использование таких частиц в задачах лазерно-частичной литографии. Результаты показаны на Рисунке 8.

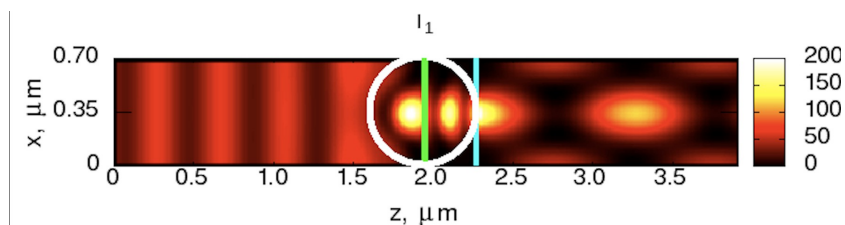


Рисунок 8. Распределение интеграла квадрата модуля электрического поля при падении лазерного линейно-поляризованного по оси  $oY$  излучения на длине волны 800 нм на плотноупакованный монослой янусоподобных частиц диаметром 700 нм (левая часть состоит из вещества с показателем преломления 1.95; правая — из диоксида титана, показатель преломления 2.51), расположенный на подложке из ПММА (показатель преломления 1.49). Лазерное излучение распространяется слева направо. Голубой линией указана граница подложки, белой — граница янусоподобной частицы, зелёной — граница между материалами из которых изготовлена частица.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

## Список публикаций автора по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

- [A1] А. В. Афанасьев, В. И. Бредихин, А. В. Пикулин, И. Е. Иляков, Б. В. Шишкин, Р. А. Ахмеджанов, Н. Н. Митин, Е. Н. Горшкова, Н. М. Битюрин, “Повышение разрешающей способности метода наноструктурирования поверхности с помощью слоя коллоидных микрочастиц при воздействии фемтосекундного лазерного излучения”, *Квантовая электроника*, **45**:5 (2015), 467–471 [Quantum Electron., 45:5 (2015), 467–471]
- [A2] Nikolai Mitin and Alexander Pikulin, "Generation of photonic vortex lattices with colloidal monolayers of dielectric microparticles," *Opt. Lett.* 42, 2527-2530 (2017)
- [A3] Nikolai Mitin and Alexander Pikulin, "Interference surface patterning using colloidal particle lens arrays", submitted to *Optics Letters* (2020)

## Список литературы

- [1] Bauerle, D. *Laser processing and chemistry* / D. Bauerle. — 4th rev. enlarged edition. — Berlin: Springer, 2011.
- [2] T.C.Chong, M.H.Hong, and L.P.Shi, “Laser precision engineering: from microfabrication to nanoproccessing,” *Laser Photonics Rev.* 4(1), 123–143(2010).
- [3] F. Burmeister, C. Schafle, B. Keilhofer et al / “From mesoscopic to nanoscopic surface structures: Lithography with colloid monolayers”//*Advanced Materials*. — Vol. 10, no. 6. — P. 495. - 1998.
- [4] B. S. Luk'yanchuk, Y. W. Zheng, Y. F. Lu / “Laser cleaning of solid surface: Optical resonance and near-field effects” *High-Power Laser Ablation III*. — Vol.4065. — P. 576– 587. - 2000.
- [5] X. A. Zhang, B. Dai, Z. Xu, and C. H. Chang, "Sculpting Asymmetric, Hollow- Core, Three-Dimensional Nanostructures Using Colloidal Particles," *Small* 11, 1285– 1292 (2015).
- [6] A. Afanasiev, V. Bredikhin, A. Pikulin, I. Ilyakov, B. Shishkin, R. Akhmedzhanov, and N. Bityurin, "Two-color beam improvement of the colloidal particle lens array assisted surface nanostructuring," *Appl. Phys. Lett.* 106, 183102 (2015).
- [7] N. Bityurin, A. Afanasiev, V. Bredikhin, A. Alexandrov, N. Agareva, A. Pikulin, I. Ilyakov, B. Shishkin, and R. Akhmedzhanov, "Colloidal particle lens arrays-assisted nano-patterning by harmonics of a femtosecond laser," *Opt. Express* 21, 21485–21490 (2013).
- [8] X. A. Zhang, I.-T. Chen, and C.-H. Chang, "Recent progress in near-field nanolithography using light interactions with colloidal particles: from nanospheres to three-dimensional nanostructures," *Nanotechnology* 30, 352002 (2019).

- [9] Y. Wang, M. Zhang, Y. Lai, and L. Chi, "Advanced colloidal lithography: From patterning to applications," *Nano Today* 22, 36–61 (2018).
- [10] H. Xu, N. Lu, D. Qi, J. Hao, L. Gao, B. Zhang, and L. Chi, "Biomimetic Antireflective Si Nanopillar Arrays," *Small* 4, 1972–1975 (2008).
- [11] A. S. Hall, S. A. Friesen, and T. E. Mallouk, "Wafer-Scale Fabrication of Plasmonic Crystals from Patterned Silicon Templates Prepared by Nanosphere Lithography," *Nano Lett.* 13, 2623–2627 (2013).
- [12] Z. Xiong, T. Wei, Y. Zhang, J. Wang, and J. Li, "Multiple-exposure colloidal lithography for enhancing light output of GaN-based light-emitting diodes by patterning Ni/Au electrodes," *Opt. Express* 24, A44 (2016).
- [13] C. Yue, Y. Yu, J. Yin, T. Wong, Y. Zang, J. Li, and J. Kang, "Fabrication of 3D hexagonal bottle-like Si–SnO<sub>2</sub> core–shell nanorod arrays as anode material in on chip micro-lithium-ion-batteries," *J. Mater. Chem. A* 1, 7896 (2013).
- [14] J. Zhu, C. M. Hsu, Z. Yu, S. Fan, and Y. Cui, "Nanodome solar cells with efficient light management and self-cleaning," *Nano Lett.* 10, 1979–1984 (2010).
- [15] M. A. Wood, "Colloidal lithography and current fabrication techniques producing in-plane nanotopography for biological applications," *J. R. Soc. Interface* 4, 1–17 (2007).
- [16] N. Fu, Y. Liu, X. Ma, and Z. Chen, "EUV Lithography: State-of-the-Art Review," *J. Microelectron. Manuf.* 2, 1–6 (2019).
- [17] M. Altissimo, "E-beam lithography for micro-/nanofabrication," *Biomicrofluidics* 4, 026503 (2010).
- [18] L. Bruchhaus, P. Mazarov, L. Bischoff, J. Gierak, A. D. Wieck, and H. Hovel, "Comparison of technologies for nano device prototyping with a special focus on ion beams: A review," *Appl. Phys. Rev.* 4, 011302 (2017).
- [19] G. Langer, D. Brodoceanu, D. Bauerle / "Femtosecond laser fabrication of apertures on two-dimensional microlens arrays" // *Applied Physics Letters*. — 2006. — Vol. 89. — P.261104.
- [20] K. Piglmayer, R. Denk, D. Bauerle / "Laser-induced surface patterning by means of microspheres" // *Applied Physics Letters*. — 2002. — Vol. 80. — P. 4693.
- [21] A. Pikulin, A. Afanasiev, N. Agareva, A. P. Alexandrov, V. Bredikhin, and N. Bityurin/ "Effects of spherical mode coupling on near-field focusing by clusters of dielectric microspheres" // *Optics Express*. - 2012. - Vol.20, Issue 8 – P.9052-9057.

- [22] Yu.E. Geints, E.K. Panina, A.A. Zemlyanov / “Control over parameters of photonic nanojets of dielectric microspheres” // *Optics Communications* 283 (2010) 4775–4781.
- [23] Yuri E. Geints, Alexander A. Zemlyanov, and Ekaterina K. Panina / “Photonic nanojet calculations in layered radially inhomogeneous micrometer-sized spherical particles” // *J. Opt. Soc. Am. B* / Vol. 28, No. 8 / August 2011, p.1825-1830.
- [24] Yuri E. Geints, Ekaterina K. Panina, Alexander A. Zemlyanov / “Photonic jet shaping of mesoscale dielectric spherical particles: Resonant and non-resonant jet formation” // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 126 (2013) 44–49.
- [25] David Grojo, Nicolas Sandeau, Luca Boarino, Catalin Constantinescu, Natascia De Leo, Michele Laus, and Katia Sparnacci / «Bessel-like photonic nanojets from core- shell sub-wavelength spheres» // July 1, 2014 / Vol. 39, No. 13 / *OPTICS LETTERS*, p.3989-3992.
- [26] Yuecheng Shen, Lihong V. Wang, and Jung-Tsung Shen / “Ultralong photonic nanojet formed by a two-layer dielectric microsphere” // *OPTICS LETTERS* / Vol. 39, No. 14 / July 15, 2014, p.4120-4123.
- [27] Alexander Heifetz, Soon-Cheol Kong, Alan V. Sahakian, Allen Taflove, and Vadim Backman / «Photonic Nanojets» // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* Vol. 6, 1979–1992, 2009.
- [28] Cheng-Yang Liu, Li-Jen Chang / “Photonic nanojet modulation by elliptical microcylinders” // *Optik - Int. J. Light Electron Opt.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.01.116>.
- [29] Yu. E. Geintz, A. A. Zemlyanov, and E. K. Panina / “Photonic nanojets from nonspherical dielectric microparticles” // *Russian Physics Journal*, Vol. 58, No. 7, November, 2015 (Russian Original No. 7, July, 2015), p.904-910.
- [30] Victor V. Kotlyar, Sergey S. Stafeev, and Alexander Feldman / “Photonic nanojets generated using square-profile microsteps” // *Applied Optics* / Vol. 53, No. 24 / 20 August 2014, p.5322-5329.
- [31] Zhigang Chen and Allen Taflove, Vadim Backman / “Concept of the equiphase sphere for light scattering by nonspherical dielectric particles” // *J. Opt. Soc. Am. A*/Vol. 21, No. 1/January 2004, p.88-97.
- [32] Manuel J. Mendes, Ignacio Tobias, Antonio Marti, and Antonio Luque / “Near- field scattering by dielectric spheroidal particles with sizes on the order of the illuminating wavelength” // Vol. 27, No. 6/June 2010/*J. Opt. Soc. Am. B*, p.1221- 1231. [33] Manuel J. Mendes, Ignacio Tobias, Antonio Marti, and Antonio Luque / «Light concentration in the near-field of dielectric spheroidal particles with mesoscopic sizes» // August 2011 / Vol. 19, No. 17 / *OPTICS EXPRESS* 16207, p.16207-16222.

- [34] Hanming Guo, Yunxuan Han, Xiaoyu Weng, Yanhui Zhao, Guorong Sui, Yang Wang, and Songlin Zhuang / "Near-field focusing of the dielectric microsphere with wavelength scale radius" // 28 January 2013 / Vol. 21, No. 2 / OPTICS EXPRESS, p.2434-2443.
- [35] B. S. Luk'yanchuk, R. Paniagua-Dominguez, I. Minin, O. Minin, and Z. Wang, "Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow [Invited]," *Opt. Mater. Express* 7, 1820 (2017).
- [36] Y. E. Geints, A. A. Zemlyanov, and E. K. Panina, "Characteristics of photonic nanojets from ordered microassemblies of dielectric spheres," *Quantum Electron.* 46, 236–241 (2016).
- [37] W. Guo, Z. B. Wang, L. Li, D. J. Whitehead, B. S. Luk'yanchuk, and Z. Liu, "Near-field laser parallel nanofabrication of arbitrary-shaped patterns," *Appl. Phys. Lett.* 90, 243101 (2007).
- [38] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre- Gaussian laser modes," *Phys. Rev. A* 45, 8185–8189 (1992).
- [39] M. S. Soskin, V. N. Gorshkov, M. V. Vasnetsov, J. T. Malos, and N. R. Heckenberg, "Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices," *Phys. Rev. A* 56, 4064–4075 (1997).
- [40] A. M. Yao and M. J. Padgett, "Orbital angular momentum: origins, behavior and applications," *Adv. Opt. Photonics* 3, 161–204 (2011).
- [41] K. Dholakia and T. Cizmar, "Shaping the future of manipulation," *Nat. Photonics* 5, 335–342 (2011).
- [42] M. Padgett and R. Bowman, "Tweezers with a twist," *Nat. Photonics* 5, 343–348 (2011).
- [43] A. V Arzola, P. Jakl, L. Chvatal, and P. Zemanek, "Rotation, oscillation and hydrodynamic synchronization of optically trapped oblate spheroidal microparticles," *Opt. Express* 22, 16207 (2014).
- [44] K. Ladavac and D. G. Grier, "Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays," *Opt. Express* 12, 1144 (2004).
- [45] H. Blom and J. Widengren, "Stimulated Emission Depletion Microscopy," *Chem. Rev.* [acs.chemrev.6b00653](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00653) (2017).
- [46] M. Ritsch-Marte, "Orbital angular momentum light in microscopy," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 375, 20150437 (2017).
- [47] M. Krenn, M. Malik, M. Erhard, and A. Zeilinger, "Orbital angular momentum of photons and the entanglement of Laguerre–Gaussian modes," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 375, 20150442 (2017).

- [48] V. Parigi, V. D'Ambrosio, C. Arnold, L. Marrucci, F. Sciarrino, and J. Laurat, "Storage and retrieval of vector beams of light in a multiple-degree-of-freedom quantum memory," *Nat. Commun.* 6, 7706 (2015).
- [49] A. E. Willner, Y. Ren, G. Xie, Y. Yan, L. Li, Z. Zhao, J. Wang, M. Tur, A. F. Molisch, and S. Ashrafi, "Recent advances in high-capacity free-space optical and radio-frequency communications using orbital angular momentum multiplexing," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 375, 20150439 (2017).
- [50] Z. Wang, N. Zhang, and X. C. Yuan, "High-volume optical vortex multiplexing and demultiplexing for free-space optical communication," *Opt. Express* 19, 482 (2011).
- [51] J. Xavier and J. Joseph, "Tunable complex photonic chiral lattices by reconfigurable optical phase engineering," *Opt. Lett.* 36, 403 (2011).
- [52] J. Fischer and M. Wegener, "Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit," *Laser Photon. Rev.* 7, 22–44 (2013).
- [53] F. Takahashi, K. Miyamoto, H. Hidai, K. Yamane, R. Morita, and T. Omatsu, "Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle," *Sci. Rep.* 6, 21738 (2016).
- [54] K. Toyoda, F. Takahashi, S. Takizawa, Y. Tokizane, K. Miyamoto, R. Morita, and T. Omatsu, "Transfer of Light Helicity to Nanostructures," *Phys. Rev. Lett.* 110, 143603 (2013).
- [55] K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, and T. Omatsu, "Using Optical Vortex To Control the Chirality of Twisted Metal Nanostructures," *Nano Lett.* 12, 3645–3649 (2012).
- [56] X. Hao, C. Kuang, T. Wang, and X. Liu, "Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam," *Opt. Lett.* 35, 3928–3930 (2010).
- [57] R. Dorn, S. Quabis, and G. Leuchs, "Sharper Focus for a Radially Polarized Light Beam," *Phys. Rev. Lett.* 91, 233901 (2003).
- [58] P. S. Tan, X.-C. Yuan, J. Lin, Q. Wang, T. Mei, R. E. Burge, and G. G. Mu, "Surface plasmon polaritons generated by optical vortex beams," *Appl. Phys. Lett.* 92, 111108 (2008).
- [59] K. Sakai, K. Nomura, T. Yamamoto, and K. Sasaki, "Excitation of Multipole Plasmons by Optical Vortex Beams," *Sci. Rep.* 5, 8431 (2015).
- [60] A. Forbes, "Controlling light's helicity at the source: orbital angular momentum states from lasers," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 375, 20150436 (2017).



- [61] V. V. Kotlyar, H. Elfstrom, J. Turunen, A. A. Almazov, S. N. Khonina, and V. A. Soifer, "Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate," *J. Opt. Soc. Am. A* 22, 849 (2005).
- [62] R. S. Rodrigues Ribeiro, P. Dahal, A. Guerreiro, P. Jorge, and J. Viegas, "Optical fibers as beam shapers: from Gaussian beams to optical vortices," *Opt. Lett.* 41, 2137 (2016).
- [63] Z. Li, M. Zhang, G. Liang, X. Li, X. Chen, and C. Cheng, "Generation of high-order optical vortices with asymmetrical pinhole plates under plane wave illumination," *Opt. Express* 21, 15755–15764 (2013).
- [64] F. Yue, D. Wen, J. Xin, B. D. Gerardot, J. Li, and X. Chen, "Vector Vortex Beam Generation with a Single Plasmonic Metasurface," *ACS Photonics* 3, 1558–1563 (2016).
- [65] S. Li and Z. Wang, "Generation of optical vortex based on computer-generated holographic gratings by photolithography," *Appl. Phys. Lett.* 103, 141110 (2013).
- [66] N. Londono, E. Rueda, J. A. Gomez, and A. Lencina, "Generation of optical vortices by using binary vortex producing lenses," *Appl. Opt.* 54, 796–801 (2015).
- [67] Y. A. Izdebskaya, V. Shvedov, and A. Volyar, "Generation of higher-order optical vortices by a dielectric wedge," *Opt. Lett.* 30, 2472–4 (2005).
- [68] J. Masajada and B. Dubik, "Optical vortex generation by three plane wave interference," *Opt. Commun.* 198, 21–27 (2001).
- [69] S. Vyas and P. Senthilkumaran, "Interferometric optical vortex array generator," *Appl. Opt.* 46, 2893 (2007).
- [70] Z. Li and C. Cheng, "Generation of second-order vortex arrays with six-pinhole interferometers under plane wave illumination," *Appl. Opt.* 53, 1629 (2014).
- [71] J. Becker, P. Rose, M. Boguslawski, and C. Denz, "Systematic approach to complex periodic vortex and helix lattices," *Opt. Express* 19, 9848 (2011).
- [72] A. Kapoor, M. Kumar, P. Senthilkumaran, and J. Joseph, "Optical vortex array in spatially varying lattice," *Opt. Commun.* 365, 99–102 (2016).
- [73] C.-H. Chang, L. Tian, W. R. Hesse, H. Gao, H. J. Choi, J.-G. Kim, M. Siddiqui, and G. Barbastathis, "From Two-Dimensional Colloidal Self-Assembly to Three-Dimensional Nanolithography," *Nano Lett.* 11, 2533–2537 (2011).
- [74] J.-H. Min, X. A. Zhang, and C.-H. Chang, "Designing unit cell in three-dimensional periodic nanostructures using colloidal lithography," *Opt. Express* 24, A276 (2016).

- [75] J. Wen, Y. Zhang, and M. Xiao, "The Talbot effect: recent advances in classical optics, nonlinear optics, and quantum optics," *Adv. Opt. Photonics* 5, 83 (2013).
- [76] Q. Chen, S. C. Bae, and S. Granick, "Directed self-assembly of a colloidal kagome lattice," *Nature* 469, 381–384 (2011)
- [77] V. Bredikhin and N. Bityurin, "2D mesoscale colloidal crystal patterns on polymer substrates," *Mater. Res. Express* 5, 055306 (2018).
- [78] S. Kumar Pal, Ruchi, and P. Senthilkumaran, "C-point and V-point singularity lattice formation and index sign conversion methods," *Opt. Commun.* 393, 156–168 (2017).