

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФФИАН)



В.С. Казакевич

2017 г.

ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Сергея Александровича Дегтярева «**Эффекты субволновой локализации лазерного излучения в ближнем поле аксикона**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 - «Оптика»

1. Актуальность

На сегодняшний день наиболее распространенными методами изучения световых полей в субволновом масштабе являются методы ближнепольной микроскопии. Важным элементом ближнепольного микроскопа является его сканирующий зонд, так как он оказывает существенное влияние на измерение распределения интенсивности излучения. Анализ литературы показывает, что существуют разногласия по поводу того, какая именно величина измеряется зондом ближнепольного микроскопа. Учитывая существующие разногласия, представляется актуальным исследование дифракции лазерного излучения на конических аксиконах с малым углом схождения на конус, аппроксимирующих волоконные зонды ближнепольного микроскопа.

Сфокусированные световые распределения с продольной поляризацией электрического вектора широко используются для достижения острой фокусировки, в микроскопии, при исследовании взаимодействия излучения с веществом. Существует несколько подходов к формированию продольно-поляризованного поля, основанных на фокусировке линейно- или циркулярно поляризованных лазерных пучков с вихревой фазовой сингулярностью, а так же радиально поляризованных пучков. Для фокусировки используются классические фокусирующие зеркала и объективы, а также дифракционные оптические элементы. Однако в литературе не приводится детальный сравнительный анализ эффективности упомянутых подходов с точки зрения максимизации содержания продольной компоненты в фокальной области и уменьшения поперечного размера создаваемого пучка. Актуальным является проведение исследований, позволяющих получить ответ на дан-

ный вопрос.

Достижение нанофокусировки представляет большой научно-практический интерес для повышения разрешения оптических методов микроскопии, литографии, манипулирования микро- и наночастицами. Обычно для получения острой фокусировки используются наночастицы и наноиглы, выполненные из металла. Однако диэлектрические наноантенные устройства значительно более устойчивы к перегреву и к некоторым химическим средам. Одним из подходов, позволяющим достичь существенного усиления поля является применение диэлектрических заостренных структур, рассматриваемое и анализируемое в диссертационной работе.

Оптическая схема нанофокусировки, состоящая из предфокусирующего аксикона с наносферой в вершине использовалась в статье [Kuchmizhak, 2014] для прецизионного измерения показателя преломления поверхности на основе нелинейного отклика золотой наносферы. Однако при освещении данной схемы Гауссовым пучком максимумы амплитуды возникают по бокам от наносферы. Актуальным является разработка метода создания фокальной области на оптической оси, а не по бокам фокусирующей наносферы, что можно осуществить, освещая оптическую схему линейно-поляризованным вихревым или радиально-поляризованным лазерным пучком.

Создание трехмерных спиральных распределений, в частности спиральных пучков, представляет широкий интерес для оптического микроманипулирования, оптической литографии, исследований взаимодействия света с поверхностями. Однако у спиральных пучков, как правило, размер пятна в поперечнике составляет несколько десятков длин волн, а длина самого пучка составляет несколько миллиметров. Известны также методы создания световых распределений с существенно субволновыми размерами. Такие распределения называются фотонными наноструями. Поскольку дифракционный элемент состоит из таких малых объектов, то его работа в ближнем поле представляет отдельный интерес в смысле формирования фотонных наноструй, которые широко применяются в оптике ближнего поля, оптическом микроманипулировании, микроскопии. Вихревой бинарный дифракционный фазовый аксикон классически используется для создания Бесселева пучка первого порядка в дальней зоне. Однако ближнее поле дифракции на таком элементе исследовано недостаточно.

Исходя из выше упомянутых актуальных задач, решение которых позволит повысить разрешающую способность оптических приборов, сформулирована цель диссертационной работы Дегтярева С.А.

2. Научная новизна исследований и полученных результатов

На основании проведенных исследований автором получен ряд новых науч-

ных результатов:

1. С помощью численного моделирования обнаружена существенная зависимость картины дифракции лазерного излучения на аксиконоподобных зондах от малых изменений геометрии. Так, при показателе преломления материала зонда 1,5 в двумерной модели с углом при вершине 20 градусов (стандартный угол волоконного конического зонда NT-MDT) аксикон является рассеивающим для ТЕ-поляризованного излучения, а при 17 градусах, аксикон является фокусирующим. В рамках трехмерной модели установлено, что аксикон с углом при вершине 14 градусов является рассеивающим, а аксикон с углом 24,5 градуса является фокусирующим.

2. Сравнительное моделирование дифракции Гауссова пучка с радиальной поляризацией на сферической микролинзе, рефракционном и дифракционном микроаксиконах показало, что лучшим элементом для формирования продольно-поляризованной световой «иглы» является высокоапертурный дифракционный аксикон, который обеспечивает максимизацию продольной компоненты вектора напряженности электрического поля.

3. Предложена схема фокусировки, состоящая из рефракционного аксикона, собирающего и направляющего излучение на вершину, где располагается наносфера. В качестве материала наносферы предложено вместо металла использовать диэлектрик с высоким показателем преломления, что обеспечивает химическую инертность и устойчивость к перегреву. Для локализации светового пятна на оптической оси за наносферой необходимо освещать аксикон радиально-поляризованным излучением, либо вихревым пучком с однородной поляризацией. Численно показано, что при использовании стеклянного (показатель преломления 1,5) аксикона с числовой апертурой 0,6 с кремниевой наносферой радиусом 22 нм ($\lambda/70$) на вершине аксикона происходит локализация светового излучения в области с диаметром по полуспаду 42 нм ($\lambda/37$). Длина волны $\lambda=1550$ нм. При этом наблюдается трехкратное увеличение амплитуды по сравнению с амплитудой освещающего пучка.

4. Впервые предложен способ создания специального вида фотонной наноструктуры – фотонной наноспиральной – посредством дифракции Гауссова лазерного пучка с линейной поляризацией на бинарном вихревом фазовом аксиконе в ближнем поле. Данные численного расчета и экспериментальных измерений хорошо согласуются между собой.

3. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность полученных результатов подтверждается близостью результатов численного моделирования, экспериментального измерения и аналитических оценок. Численный расчёт производился на основе решения стационарных урав-

нений Максвелла методом конечных элементов коммерческим программным пакетом Comsol Multiphysics. Экспериментально измеренные параметры фотонной наноспираль хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

4. Теоретическая и практическая значимость

Для проектирования фотонных устройств теоретический интерес представляют результаты трехмерного векторного численного моделирования дифракции монохроматического излучения на различных аксиконоподобных микроструктурах с нетривиальной формой, исключающей возможность аналитических приближений.

С практической точки зрения, полученные результаты важны в тех областях, где требуется реализация разрешающей способности, сильно превосходящей возможности традиционных оптических приборов. Это оптика ближнего поля, микроскопия, оптическое манипулирование микрообъектами, техника записи и считывания информации, нанолитография и другие приложения.

За счет особой структуры светового распределения фотонная наноспираль и продольно поляризованная игла, методы получения которых предложены в работе, может сообщать движение захваченных частиц по траектории, повторяющей форму светового распределения. Фотонная наноспираль потенциально может быть использована для захвата трехмерных объектов, таких как спиралевидные микроорганизмы. В нанолитографии фотонные наноспираль могут быть использованы для создания трехмерных спиралевидных профилей и рельефов. Устройство для нанофокусировки может быть использовано также в нанолитографии, оптических наносенсорах, в качестве оптической наноантенны при Рамановской спектроскопии.

5. Общая характеристика

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Часть выводов всех четырех глав диссертации основана на численном решении стационарных уравнений Максвелла методом конечных элементов. Во второй главе применялись интегральные выражения Ричардса-Вольфа, и численный алгоритм Мансурипура. В третьей главе использовались интегральные выражения Рэля-Зоммерфельда. В четвертой главе представлены результаты эксперимента по измерению трехмерной области дифракции с помощью ближнепольного микроскопа.

В первой главе на основе численного моделирования показано, что картина дифракции лазерного излучения на аксиконах с малым углом схождения на конус, являющихся аналогами безапертурных зондов для оптической микроскопии ближнего поля, существенно зависит от малых изменений угла при вершине и

размера входного окна зонда.

Во второй главе выполнен анализ различных методов формирования тонкой световой иглы, электрическое поле которой имеет продольную поляризацию. Показано, что дифракционный аксикон является лучшим элементом для формирования длинной продольно-поляризованной световой иглы с субволновым поперечным размером.

В третьей главе на основе численного моделирования показано, что стеклянный аксикон с помещенной в его вершине наносферой с высоким показателем преломления, и возбуждаемый линейно- или циркулярно-поляризованным пучком с вихревой фазовой зависимостью первого порядка, либо радиально-поляризованным пучком, позволяет локализовать вводимое в него излучение с длиной волны 1520 нм в наномасштабной области с размером 42 нм.

В четвертой главе впервые предложен и реализован метод создания фотонной наноструи спиральной формы. Полученное распределение интенсивности в работе названо фотонной наноспиралью.

В целом, диссертация выполнена на высоком научном уровне, содержит необходимые формулы, рисунки и ссылки на источники, удобные для практического использования.

Автореферат соответствует диссертации, в полной мере отражает основные разделы и положения выполненной работы. В нем приведены главные выводы, перечень работ автора по теме диссертации, актуальность темы, практическая значимость и достоверность полученных результатов.

6. Рекомендации по применению результатов

Разработанные в диссертации методы и устройства позволяют управлять распределением ближнего поля в оптическом диапазоне со сверхразрешением. В качестве возможных приложений полученных результатов следует отметить такие области как микроманипулирование, нанолитография, дизайн и оптимизация зондов ближнепольных микроскопов, в том числе поляризационно чувствительных. Результаты, полученные в диссертации будут полезны в научной и учебной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук, Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт систем обработки изображений РАН - филиала Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Международного учебно-научного лазерного центра (МЛЦ) Московского

государственного университета имени М.В. Ломоносова.

7. Замечания и недостатки

К сожалению, в диссертационной работе имеются некоторые недостатки.

1. Формулы представляются неуместными во введении.
2. Во второй главе из трех элементов (линза, линза с кольцевой диафрагмой и аксикон) выбирался наиболее подходящий для создания тонкой протяженной продольно-поляризованной фотонной иглы. Не ясна мотивация выбора именно этих элементов для анализа.
3. Численное моделирование формирования продольно-поляризованной фотонной иглы проведено как на основе формул Ричардса-Вулфа, так и метода конечных элементов. Однако сравнению результатов уделено мало внимания.
4. В третьей главе предложено устройство для нанофокусировки, однако отсутствует какое бы то ни было обсуждение технологии создания наноустройств подобного рода. Кроме того имеются существенные ограничения на интервалы длин волн возбуждающего излучения, так как окно пропускания кремния лежит в ИК диапазоне.
5. Результаты моделирования фотонной спирали в четвертой главе значительно более зашумленные, чем результаты экспериментального измерения. Отсутствует количественное описание расхождения расчетных и экспериментальных данных.
6. В работе широко используется понятие “интенсивность”, однако отсутствует строгое определение этого термина и его обоснование.

8. Оценка диссертации в целом

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы, которая является завершенным исследованием и соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Все основные результаты диссертационной работы отражены в публикациях автора, включая 11 статей в ведущих рецензируемых журналах, внесенных в Перечень журналов и изданий, утвержденных ВАК. Содержание диссертации соответствует содержанию опубликованных работ. Полученные в работе результаты соответствуют поставленным целям, соответствие темы диссертации и научной специальности не вызывает сомнений. Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

По выбранной теме, характеру проведенных исследований, полученным результатам рассматриваемая диссертация Дегтярева С.А. соответствует специальности 01.04.05 – Оптика и является научно-квалификационной работой, в которой

содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития теории фотонных устройств. Таким образом, диссертационная работа Дегтярева С.А. удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Отзыв подготовлен:

главный научный сотрудник

Самарского филиала ФГБУН

Физического института им. П.Н. Лебедева

Российской академии наук, д.ф.-м.н.

В.Г. Волостников

Волостников Владимир Геннадьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Адрес: 443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221

телефон: +7 (846) 3347396

эл. адрес: coherent@fian.smr.ru

Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН).

Адрес: 443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221

телефон: +7 (846) 3341481

сайт: <http://www.fian.smr.ru>; эл. адрес: laser@fian.smr.ru

Диссертационная работа и отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании Учёного совета Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (протокол №2 от 15 марта 2017 г.)

Ученый секретарь

СФ ФИАН, д.т.н.



С.И. Ярьско