

УТВЕРЖДАЮ

УТВЕРЖДАЮ

Директор СФ ФИАН

Д.Ф.М.Н., доцент



В. Н. Аязов

2022 г.

Первый проректор-проректор по научно-исследовательской работе Самарского университета

д.т.н., доцент



А. Б. Прокофьев

2022 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и Самарского филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Диссертация «Формирование вращающегося двухлепесткового светового поля для применения в трехмерной наноскопии», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. - Оптика, выполнена Прокоповой Дарьей Владимировной на кафедре оптики и спектроскопии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет) и лаборатории когерентной оптики Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН).

Проконова Дарья Владимировна, 1993 года рождения, в 2017 году окончила с отличием очную магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по направлению «03.04.02 Физика», в 2021 году окончила очную аспирантуру Самарского университета по направлению подготовки «03.06.01 Физика и астрономия». С 2014 года Проконова Д.В. работает в лаборатории когерентной оптики Самарского филиала ФИАН, в настоящее время в должности младшего научного сотрудника.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Котова Светлана Павловна, ведущий научный сотрудник, и.о. заведующей лабораторией когерентной оптики, и.о. заместителя директора по науке Самарского филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, профессор кафедры оптики и спектроскопии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

### **Оценка выполненной соискателем работы.**

Диссертационная работа является *завершённой*.

Тема диссертационной работы признана *актуальной*. Актуальность определена большой востребованностью оптических методов определения пространственного положения точечных квантовых источников излучения с разрешением, превышающим дифракционный предел. Флуоресцентная оптическая микроскопия с локализацией

одиночных светящихся объектов-маркеров с субдифракционной точностью (наноскопия) является новым подходом для описания свойств материалов. Её развитие в настоящее время продолжается поиском методов, позволяющих определить все три пространственные координаты точечного источника света (создание 3D-наноскопа). Наибольшее распространение получила методика модификации функции рассеяния точки (ФРТ) оптической системы микроскопа. Диссертационное исследование посвящено созданию новых оптических элементов для преобразования ФРТ микроскопа в так называемую «двухспиральную ФРТ». При этом формируемое системой изображение принимает вид пары ярких пятен, которые вращаются вокруг общего центра при дефокусировке.

В первой главе представлен обзор принципов работы оптических микроскопов с субдифракционным разрешением, описаны спиральные пучки света, рассмотрены методы формирования структурированных световых полей. Вторая глава посвящена новым методам формирования вращающихся двухлепестковых световых полей с помощью различных ДОЭ. Предложены два метода. Первый основан на использовании двухсекционных комбинированных оптических элементов, состоящих из комбинации линз, призм, аксиконов и спиральных фазовых пластинок (СФП). Исследуются такие элементы как билинза, бипризма и усеченный биаксикон. Второй метод основан на использовании двухлепестковых спиральных пучков света. Такой подход по созданию ДОЭ позволяет управлять параметрами формируемого поля. Приведены результаты по генерации двухлепестковых световых полей при использовании в качестве ДОЭ фазовых распределений двухлепестковых спиральных пучков. Для улучшения энергетических характеристик таких элементов предложена модификация алгоритма Герчберга-Сэкстона. В третьей главе исследуется влияние искажений различного типа на пространственную структуру вращающихся двухлепестковых световых полей. Определены предельно допустимые уровни искажений фазы, интенсивности. Изучено влияние конечной ширины спектра точечного источника на формирование двухлепесткового поля с помощью предложенного элемента. Описан процесс оптимизации распределения фазовой задержки ДОЭ, генерирующего двухлепестковос световое поле под распределение интенсивности, формируемое микрообъективом. В четвертой главе представлены результаты определения трехмерного положения одиночных коллоидных квантовых точек при помощи 3D-наноскопа, построенного на основе разработанных элементов.

Диссертационное исследование проводилось в двух организациях. На базе Самарского университета была выполнена теоретическая часть работы, проводилось численное моделирование. Экспериментальная часть работы проводилась в Самарском филиале ФИАН.

**Цель работы** заключалась в разработке эффективных методов формирования вращающихся двухлепестковых световых полей для создания 3D-наноскопа.

Таким образом, в работе выполнено следующее:

1. Разработан эффективный метод формирования вращающихся двухлепестковых световых полей для преобразования функции размытия точки микроскопа в двухспиральную.

2. Определен допустимый уровень фазовых и амплитудных искажений, а также монохроматичности излучения для стабильного формирования вращающихся двухлепестковых световых полей дифракционными оптическими элементами, полученными на основе оптики спиральных пучков света.

3. Экспериментально определена точность восстановления положения квантовых точек с помощью наноскопа, сконструированного с использованием разработанных дифракционных оптических элементов.

**Достоверность** полученных в работе результатов обеспечивается согласованием результатов моделирования с результатами натуральных экспериментов по формированию вращающихся двухлепестковых световых полей.

**Диссертация соответствует** области исследования 1 и 5 из паспорта специальности 1.3.6. - Оптика.

В рамках диссертационной работы получены результаты, обладающие **научной новизной**:

1. На основе оптики спиральных пучков света разработан метод получения фазовой функции дифракционного оптического элемента, формирующего двухлепестковос вращающееся поле.

2. С применением модифицированного алгоритма Герчберга-Сэкстона при использовании в качестве нулевого приближения фазы двухлепесткового спирального пучка света и учета допустимого уровня фазовых и амплитудных искажений получена фазовая функция дифракционного оптического элемента, оптимизированная для работы в реальной системе. Модификация алгоритма состоит в усилении главных пятен в распределении интенсивности в нескольких опорных плоскостях по определенному уровню.

3. Для модификации функции размытия точки микроскопа с целью увеличения продольного разрешения использован дифракционный оптический элемент, полученный на основе оптики спиральных пучков. Достигнуты рекордные точности локализации одиночных квантовых точек: 9 нм в поперечном и 12 нм в продольном направлениях.

#### **Полнота изложения результатов работы в публикациях.**

Соискатель имеет 62 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 15 статей в научных журналах, индексируемых в базах Scopus, 10 - Web of Science и 10 –из списка журналов, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук, 3 патента (2 – на изобретение, 1 – на полезную модель) и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Опубликованные работы достаточно полно отражают содержащиеся в диссертации научные результаты, а также основные аспекты их практического применения. Изложенные в диссертации оригинальные результаты получены соискателем, либо при его непосредственном участии. Общий объем публикаций составляет 18,6 п.л., включая авторский вклад – 8,9 п.л. В таблице отражен личный вклад Д.В. Прокоповой в статьи, опубликованные в соавторстве.

№ п/п	Научные публикации	Результаты, принадлежащие Прокоповой Д.В.
1	Волостников, В.Г. Генерация вращающихся двухлепестковых световых полей / В.Г. Волостников, Е.Н. Воронцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, <b>Д.В. Прокопова</b> // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, №11/3. – с.73-76.	Получение фазовых функций спиральных пучков и расчет голограмм. Экспериментальное формирование двухлепестковых световых полей при помощи фазовых профилей исходных спиральных пучков света и голографическим методом
2	Volostnikov, V.G. A Diffraction Element	Метод расчета дифракционных

	Used to Evaluate the Depth of Bedding of Nano-Sized Radiating Objects / V.G. Volostnikov, E.N. Vorontsov, S.P. Kotova, N.N. Losevskiy, <b>D.V. Prokopova</b> // EPJ Web of Conferences. – 2015. – Vol.103. –10007.	оптических элементов на основе оптики спиральных пучков света. Экспериментальное исследование свойств световых полей, сформированных предложенными дифракционными оптическими элементами.
3	<b>Проконова, Д.В.</b> Моделирование световых полей с вращением интенсивности с помощью ЖК ПМС HOLOEYE NEO-1080P / <b>Д.В. Проконова</b> , Е.Н. Воронцов, Н.Н. Лосевский, Е.В. Разуева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т.17, №2. – с. 97-100.	Экспериментальная реализация исследуемых фазовых дифракционных оптических элементов, анализ полученных данных.
4	Волостников, В.Г. Дифракционный элемент на основе спиральных пучков для определения глубины залегания излучающих объектов / В.Г. Волостников, Е.Н. Воронцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, <b>Д.В. Проконова</b> // Известия Российской академии наук. Серия Физическая. – 2016. Т. 80, № 7. – с. 841–845.	Модификация итерационного алгоритма для расчета дифракционных оптических элементов на основе спиральных пучков света. Экспериментальная реализация элементов полученных с помощью предложенного алгоритма для формирования вращающихся световых полей. Обработка и анализ полученных результатов.
5	Воронцов, Е.Н. Исследование формирования световых полей с различной скоростью вращения интенсивности / Е.Н. Воронцов, Н.Н. Лосевский, <b>Д.В. Проконова</b> , Е.В. Разуева, С.А. Самагин // Компьютерная оптика – 2016. – Т. 40, № 2. – с. 158-163.	Расчет фазовых функций ДОЭ с различной скоростью вращения. Экспериментальное исследование световых полей с различной скоростью вращения распределения интенсивности, полученные на основе оптики спиральных пучков. Анализ влияния параметров освещающего пучка на качество генерации исследуемых световых полей.
6	Kotova, S.P. Aberration influenced generation of rotating two-lobe light fields/ S.P. Kotova, N.N. Losevsky, <b>D.V. Prokopova</b> , S.A. Samagin, V.G. Volostnikov, E.N. Vorontsov //Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 740. – 012013.	Расчет влияния первичных аберраций (кома, астигматизм, сферическая) на формирование двухлепестковых световых полей, при помощи ДОЭ, рассчитанных на основе оптики спиральных пучков. Экспериментальное исследование влияния первичных аберраций на двухлепестковые световые поля. Анализ результатов моделирования сравнение с экспериментальными данными, установление закономерностей.
7	Volostnikov, V. Generation of the rotating light fields under amplitude and phase distortions/ V. Volostnikov, E. Vorontsov, S. Kotova, N. Losevsky, <b>D. Prokopova</b> ,	Анализ результатов моделирования влияния первичных аберраций на двухлепестковые световые поля.

	S. Samagin // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 161. – 03010.	
8	Воронцов, Е.Н. Влияние амплитудных и фазовых искажений на формирование световых полей с вращением распределения интенсивности / Е.Н. Воронцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, <b>Д.В. Проконова</b> , С.А. Самагин // Краткие сообщения по физике. – 2018. – Т. 45, № 3, с. 9-14.	Экспериментальная проверка моделирования влияния амплитудных и фазовых искажений на формирование светового поля с вращением распределения интенсивности при распространении и оценены их допустимые величины.
9	Volostnikov, V.G. Phase Filters for 3D Localization of Point Light Sources // V.G.Volostnikov, E.N. Vorontsov, N.N. Losevsky, S.P. Kotova, <b>D.V. Prokopova</b> , S.A. Samagin, in VII International Conference on Photonics and Information Optics, KnE Energy & Physics. – 2018. – p. 469–481.	Численное исследование влияния различных искажений фазы и амплитуды на формирование двухлепестковых световых полей.
10	Ефимова, К.В. Формирование контурных вихревых полей с помощью фазовых элементов на основе спиральных пучков света / К.В. Ефимова, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, <b>Д.В. Проконова</b> , С.А. Самагин // Краткие сообщения по физике. – 2019. – Т. 46, № 4. – с. 61-67.	Экспериментальная апробация предложенного бинарного по амплитуде метода амплитудно-фазовых масок, его сравнение с голографическим методом с симметричным и асимметричным профилями штриха решетки. Получение экспериментальных данных и их анализ.
11	Efimova, K.V. Two techniques for experimental generation of spiral light beams / K.V. Efimova, S.A. Kishkin, S.P. Kotova, N.N. Losevsky, <b>D.V. Prokopova</b> , S.A. Samagin // Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. – 2019. – p. OMC-P-13-OMC-P-13.	Экспериментальная реализация рассматриваемых методов, получение и обработка данных.
12	Проконова, Д.В. Повышение энергетической эффективности дифракционных оптических элементов для задач трехмерной наноскопии / <b>Д.В. Проконова</b> , Е.Н. Воронцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, С.А. Самагин, И.Т. Мышжасаров, А.А. Горшелев, И.Ю. Еремчев, А.В. Наумов // Известия Российской академии наук. Серия Физическая. – 2019. – Т. 83, № 12. – с. 1608–1613.	Исследована возможность повышения энергетической эффективности дифракционных оптических элементов (ДОЭ), формирующих двухлепестковые световые поля, распределение интенсивности которых поворачивается при распространении, путем модификации алгоритма расчета ДОЭ – было уменьшено расстояние между опорными плоскостями при реализации алгоритма. Рассмотрены случаи различного числа плоскостей (9 и 11) и варианты выбора их последовательности при расчете ДОЭ. Проведена оптимизация ДОЭ с учетом аппаратной функции конкретного микрообъектива (Carl Zeiss, 100×).
13	<b>Проконова, Д.В.</b> Фазовые	Реализация двухспиральной ФРТ

	дифракционные оптические элементы с повышенной эффективностью для наноскопии / <b>Д.В. Прокопова</b> , С.П. Котова // Фотоника. – 2020. – Т. 14, №2. – с.170-183.	предложенными методами в эксперименте. Получение данных, их анализ, обобщение результатов полученных по двухлепестковым полям.
14	Korobtsov, A.V. Manipulation of microparticles using optical vortex fields and convective heat fluxes / A.V. Korobtsov, S.P. Kotova, N.N. Losevsky, A.M. Mayorova, <b>D.V. Prokopova</b> // 2020 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2020. – p. 1-1.	Предварительная экспериментальная проверка работы элементов, формирующих вихревые световые поля перед применением в оптическом пинцете.
15	<b>Прокопова, Д.В.</b> Формирование двухлепестковых световых полей при помощи комбинированных двухсекционных оптических элементов/ <b>Д.В. Прокопова</b> , С.П. Котова, С.А. Самагин // Известия Российской академии наук. Серия Физическая. – 2021. – Т. 85, № 8. – с. 1205–1212.	Расчет фазовой функции и экспериментальная проверка работы комбинированных двухсекционных оптических элементов (билинза, биклин, усеченный биаксикон), оценка параметров формируемого ими двухлепесткового светового поля.
16	Еремчев, И.Ю. Трехмерная флуоресцентная наноскопия одиночных квантовых излучателей на основе оптики спиральных пучков света / И.Ю. Еремчев, <b>Д.В. Прокопова</b> , И.Т. Мынжасаров, С.П. Котова, А.В. Наумов // Успехи физических наук. – 2022. – Т. 192, № 6. – С. 663-673.	Расчёт фазовых функций ДОЭ, обеспечивающих наилучшую эффективность преобразования световых пучков в двухлепестковые.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

**Апробация работы** проводилась на более чем 30 конференциях и семинарах, среди которых можно выделить следующие:

- XII-XVIII Всероссийских молодежных Самарских конкурсах-конференциях научных работ по оптике и лазерной физике, ноябрь 2014-2020 года, г. Самара, Россия;
- XXIX-XXXII Международные школы-симпозиумы по голографии, когерентной оптике и фотонике, 2015, 2017, 2019 годы, г. Томск, г. Калининград, г. Екатеринбург, г. Санкт-Петербург, Россия;
- International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2016), 26 – 30 September 2016, Minsk, Republic of Belarus;
- XXV Съезд по спектроскопии, 3-7 октября 2016 года, г. Москва, г. Троицк, Россия;
- X Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2018», 15-19 октября 2018 года, г. Санкт-Петербург, Россия;
- Optics and Photonics International Congress (OPIC), 22 - 26 April 2019, Pacifico Yokohama, Japan;
- XII-XIII Международные чтения по квантовой оптике (IWQO), 2015, 2019 года, г. Москва, г. Владимир, Россия;



- V-VI Международные конференции и молодежные школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ), май 2019–2020 годы, г. Самара, Россия;
- XXXII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2021»), 6-11 июня 2021 года, г. Москва, Россия;
- VI-IX, XI Международные конференции по фотонике и информационной оптике, январь 2017-2020, 2022 годы, г. Москва, Россия.

**Теоретическая значимость работы** состоит в том, что разработаны новые способы расчета фазовой функции дифракционных оптических элементов для модификации ФРТ микроскопа в двухспиральную, структура распределения интенсивности которой сохраняется в области фокусировки на расстояниях порядка конфокального параметра

**Практическая значимость** исследования заключается в том, что на основе предложенных методов могут быть созданы стационарные фазовые элементы для конструирования 3D-наноскопа. Методы позволяют получать их для конкретных прикладных задач с учетом характеристик микроскопической системы, с заданием диапазона и точности измерений. Также эти подходы можно использовать при формировании оптических ловушек в лазерном пинцете, расширяя тем самым его функциональные возможности.

Результаты исследования нашли практическое применение при выполнении следующих работ:

«Флуоресцентная 3D-микроскопия сверхвысокого разрешения с коллоидными полупроводниковыми квантовыми точками» грант РФФИ № 16-29-11809 офи\_м (2016-2018 гг);

«Новый метод анализа контурных изображений для авиационно-космической промышленности и кардиологии», грант РФФИ № 17-42-630934 р\_a (2017-2018 гг);

«Новые оптические элементы для создания наноскопа», грант РФФИ №19-32-90078 Аспиранты (2019-2021 гг);

«Структурированные вихревые поля для задач оптического манипулирования и лазерной абляции», грант РФФИ № 20-02-00671 А (2020-2021 гг);

«Разработка дифракционных фазовых элементов для достижения сверхразрешения флуоресцентных микроскопов» грант Инновационного фонда Самарской области (2021 гг);

а также в учебном процессе Самарского университета.

Диссертация имеет четкую структуру, написана понятным и грамотным языком, хорошо оформлена. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, отвечающей критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, решает задачу создания новых фазовых дифракционных оптических элементов для формирования двухлепестковых световых полей с вращением распределения интенсивности.

Описанные в работе подходы могут быть полезны для создания 3D наноскопа и увеличения функциональных возможностей оптического пинцета.

В диссертации отсутствует заимствованный материал без ссылки на автора и (или) источник заимствования, результатов научных работ, выполненных соискателем учёной степени в соавторстве, без ссылок на соавторов.

Диссертационную работу «Формирование вращающегося двухлепесткового светового поля для применения в трехмерной наноскопии», выполненную Прокоповой

Дарьей Владимировной, рекомендуется представить к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. - Оптика.

Заключение принято на совместном заседании кафедры оптики и спектроскопии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и Ученого Совета Самарского филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН).

Присутствовало на заседании 20 чел. Результаты голосования:

«за» - 20 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 1 от 02.02.2022 г.

Заведующий кафедрой  
оптики и спектроскопии  
Самарского университета,  
д.ф.-м.н., профессор



В.В. Ивахник

Ученый секретарь  
ученого совета СФ ФИАН  
к.ф.-м.н.



А.М. Майорова