

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физического института
им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук
Колачевский Н.Н.



_____ 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Стафеева Сергея Сергеевича
**«Острая фокусировка лазерных пучков с фазовой
и поляризационной сингулярностью»,**
представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности
1.3.6. Оптика

Диссертация Стафеева С.С. посвящена теоретическому, численному и экспериментальному исследованию потока энергии и спинового углового момента при острой фокусировке лазерных пучков с сингулярностью фазы и/или поляризации.

1. Актуальность темы

Последние 10-15 лет область оптики, связанная с вопросами острой фокусировки лазерного излучения, переживает период бурного развития. Это связано, в первую очередь, со всё более расширяющимися возможностями оптиков-экспериментаторов, современный инструментарий которых позволяет получать при фокусировке световые поля разнообразных форм. Кроме того, изменение поляризации лазерного пучка помогает сформировать в фокусе световые пятна с размерами меньше дифракционного предела, оптиче-

ские иглы, световые тоннели и т.д.

В 1959 году Ричардс и Вольф в своей знаменитой работе по острой фокусировке показали, что фокусировка плоской линейно поляризованной волны сферической линзой приводит к появлению в плоскости фокуса области с отрицательной величиной продольной составляющей вектора потока световой энергии (абсолютное значение этой величины составляет примерно 1% от максимальной величины потока в направлении распространения плоской волны). Однако феномен обратного потока (т.е. отрицательных значений продольной составляющей вектора Пойнтинга) в векторной формулировке до сих пор не исследовался. В диссертационной работе Стафеева С.С. показано, что при острой фокусировке сферической линзой лазерного пучка с неоднородной поляризацией (радиальной или азимутальной) m -го порядка в плоскости фокуса имеет место обратный поток световой энергии. При $m = 2$ он максимален на оптической оси, а при $m > 2$ на оптической оси он равен нулю, но достигает максимума вблизи оптической оси. При этом величина обратного потока сравнима с прямым потоком энергии.

Для экспериментального исследования острой фокусировки в своей диссертации Стафеев С.С. использовал сверхтонкие оптические элементы (метаповерхности, металинзы), которые обладают большой числовой апертурой (более 0,95) и позволяют создавать пучки с пространственно неоднородным состоянием поляризации. Следует отметить, что подобные элементы для управления характеристиками лазерного излучения появились сравнительно недавно – до сих пор научных публикаций по металинзам с такой числовой апертурой практически нет.

Интерес представляют и рассмотренные в диссертационной работе Стафеева С.С. различные варианты преобразования поляризации пучка в области острой фокусировки.

2. Научная новизна исследования и полученных результатов

Среди новых научных результатов, полученных в диссертации Стафеева С.С., отметим следующие.

- С помощью теории Ричардса–Вольфа получены аналитические выражения проекции вектора Пойнтинга на оптическую ось для двух классов остросфокусированных пучков: 1) цилиндрических векторных пучков произвольного порядка; 2) оптических вихрей с произвольным топологическим зарядом. Найдено отличие в фокусировках этих классов пучков. Найдены условия формирования обратного потока энергии на оптической оси, а также условия, когда обратный поток энергии становится сопоставимым с прямым потоком. На примере интерференции четырёх плоских волн продемонстрировано появление обратного потока. Разработанный математический формализм позволяет делать выводы о поведении характеристик любого радиально-симметричного светового поля без необходимости вычислять интегралы Ричардса–Вольфа.
- Разработаны оптические микроэлементы (характерный размер ~ 100 нм), предназначенные для получения пучков с пространственно неоднородной поляризацией, на основе секторных субволновых отражающих (в тонкой пленке золота) и пропускающих (в тонкой пленке аморфного кремния) бинарных решёток. Численно и экспериментально продемонстрирована генерация пучков с радиальной и азимутальной поляризацией из пучка с линейной поляризацией с помощью четырёх-секторных субволновых микрополяризаторов.
- Разработаны оптические элементы – металлинзы на основе субволновых решёток – для одновременного управления всеми характеристиками световой волны в видимом диапазоне света: амплитудой, фазой и поляризацией. Численно и экспериментально исследованы высокоапертурные металлинзы с фокусным расстоянием, равным длине волны, со-

стоящие из субволновых решёток и предназначенные для преобразования лазерных пучков света с линейной поляризацией в цилиндрические векторные пучки первого и второго порядка и фокусировки получившихся пучков. С помощью металинз сформирован обратный поток в фокусе. Эксперимент и расчёт показали хорошее соответствие.

- С помощью формул Ричардса–Вольфа теоретически и численно показано, что при фокусировке света с линейной поляризацией в поперечных плоскостях до и после фокуса (на расстоянии длины волны от фокуса) имеются четыре локальные области, в которых поляризация эллиптическая (в одной паре диагонально противоположных областей – левая, а в другой паре – правая). При переходе через плоскость фокуса направление вращения вектора поляризации в этих областях меняется на противоположное. В самом фокусе поляризация остается линейной в каждой точке.
- Предложен новый тип неоднородной гибридной поляризации, объединяющий свойства цилиндрической поляризации высокого порядка и круговой поляризации. Рассмотрена острая фокусировка света с такой циркулярно-азимутальной поляризацией. Теоретически и численно показано, что в плоскости фокуса имеются области, в которых поперечный поток энергии – вихревой, а продольная проекция спинowego углового момента отлична от нуля (число этих областей определяется порядком векторного пучка).

3. Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики

В работе развит теоретический подход Ричардса–Вольфа описания компонент электромагнитного поля в фокусе для широкого класса лазерных пучков с сингулярностями фазы и поляризации. На основе построенного формализма получены теоретические результаты, связанные с обратным потоком энергии и преобразованием поляризации при острой фокусировке. Ре-

зультаты, полученные в диссертации, могут найти практическое применение для формирования субволновых пятен заданной формы в микроскопии и задачах оптической манипуляции частицами. Разработанные в диссертации металинзы размером сотни микрометров применимы для уменьшения габаритов оптических схем (замена оптической схемы одной металинзой, которая может одновременно изменять поляризацию, амплитуду и фазу проходящего через неё лазерного пучка).

4. Достоверность полученных результатов

Автор корректно использует известные научные методы, приводит четкие обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Автором изучены и проанализированы научные работы по острой фокусировке лазерных пучков с фазовыми и поляризационными сингулярностями. Список использованной литературы содержит 329 наименований.

Теоретические результаты по острой фокусировке были получены на основе интегральных представлений Ричардса–Вольфа для компонент электромагнитного поля в области фокуса, если фокусное расстояние многократно превышает длину волны. Для экспериментов с острой фокусировкой использовалась сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ), позволяющая детектировать неоднородности интенсивности светового поля, размеры которых меньше дифракционного предела. Численные эксперименты были основаны на разностном решении уравнений Максвелла (метод FDTD).

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью математических выкладок, согласием между теоретическими выводами и результатами численных и оптических экспериментов. Представленные в работе результаты и выводы не противоречат результатам, полученным другими авторами.

5. Рекомендации по использованию результатов диссертации

Полученные в диссертации научные результаты рекомендуется использовать в Институте систем обработки изображений РАН – филиале Федерального государственного учреждения "Федеральный Научно-Исследовательский Центр "Кристаллография и фотоника" Российской академии наук", Самарском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», Институте электрофизики УрО РАН, федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и в других организациях, где исследуются свойства субволновой фокусировки лазерного света и спин-орбитальное взаимодействие.

6. Замечания по диссертации.

1. Первое замечание (скорее, сожаление, чем замечание) касается экспериментальных способов верификации эффекта обратного потока при острой фокусировке. Это только косвенные способы. Было бы интересно увидеть прямой способ, например, движение микрочастицы навстречу направлению распространения светового поля.

2. В диссертации нет объяснения тому, почему в фокусе цилиндрического векторного пучка целого порядка только линейная поляризация, а в фокусе цилиндрического векторного пучка дробного порядка появляются области с эллиптической и круговой поляризацией

3. В диссертации приводится лишь качественное сравнение результатов численного моделирования методом FDTD и аналитических выражений, по-

лученных с помощью формул Ричардса-Вольфа (например, стр. 27), а также результатов численного моделирования и экспериментов (например, стр. 76, 84). Непонятно, что мешало провести моделирование для условий эксперимента или подобрать апертуру линзы при сравнении численных и аналитических результатов.

4. Имеются небрежности в оформлении автореферата и диссертации:

- Так, в автореферате цель исследования сформулирована более узко, чем в диссертации.
- Есть повторы абзацев в тексте, например, на стр. 53 и 73.
- На рисунке 3.17 при отражении света от зеркал M_2 и M_3 не выполняются законы геометрической оптики.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы.

Оценка диссертации в целом

Все основные результаты диссертационной работы отражены в публикациях Стафеева С.С., включая 58 работ в реферируемых отечественных и зарубежных журналах, в том числе 3 монографии и 28 статей в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени доктора наук. Автореферат отражает содержание диссертации.

Диссертация Стафеева Сергея Сергеевича «Острая фокусировка лазерных пучков с фазовой и поляризационной сингулярностью» представляет собой самостоятельное, четко структурированное научное исследование и является завершённой научно-квалификационной работой. Основные выводы и результаты работы обладают научной новизной, имеют теоретическую и практическую значимость.

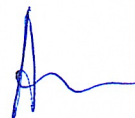
Диссертация по выбранной теме, характеру проведённых исследований, полученным результатам соответствует специальности 1.3.6. Оптика и отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, изложенным в разделе 2 Положения о присуждении

учёных степеней, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (ред. от 26.09.2022), в работе разработаны теоретические положения, совокупность которых можно классифицировать как научное достижение в области острой фокусировки лазерного излучения с фазовыми и поляризационными сингулярностями, а ее автор, Стафеев С.С., заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Учёного совета Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН) (протокол № 10 от «16» ноября 2022 г.).

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории когерентной оптики СФ ФИАН,
доктор физико-математических наук



Е.Г. Абрамочкин

Директор СФ ФИАН,
Председатель учёного совета СФ ФИАН
доктор физико-математических наук



В.Н. Аязов