

УТВЕРЖДАЮ:

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

Н.Н. Колачевский

“30” октября 2024 г.

ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического  
института им. Н.П. Лебедева

Российской академии наук на диссертационную работу Зайцева Владислава  
Дмитриевича «Аналитический и численный расчет потока энергии и спинового  
углового момента в остром фокусе векторных лазерных пучков», представленную  
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.3.6. Оптика

### 1. Актуальность работы

Диссертация «Аналитический и численный расчет потока энергии и спинового углового момента в остром фокусе векторных лазерных пучков», посвящена расчету основных характеристик векторных вихревых лазерных пучков (распределения интенсивности, плотности потока энергии, спинового углового момента) в остром фокусе, а также поиску начальных состояний поляризации таких векторных пучков, при которых в фокусе можно наблюдать спиновый эффект Холла.

В связи с развитием нанотехнологий, оптических интегральных схем, метаматериалов и оптических элементов на их основе, с работами по получению суперразрешения в оптической микроскопии, весьма актуальным является изучение особенностей острой фокусировки лазерного излучения. Это относится к вопросу об исследовании размеров фокального пятна для различных видов лазерных полей, включая векторные и вихревые поля, а также использования разных критериев при определении размеров светового пятна в фокусе, связанных с методами измерения и дальнейшего использования таких полей

Векторные пучки и пучки с неоднородной поляризацией нужны для решения различных задач. В частности, они позволяют повысить разрешение в задачах

Входящий № 206-2378  
Дата 11 НОЯ 2024  
Самарский университет

микроскопии, увеличить точность интерференционных измерений, дают возможность управлять процессами лазерной абляции. Поэтому развитие методов описания их поляризационных свойств, включая поляризационные сингулярности, при распространении и фокусировке таких пучков, является важной и весьма непростой задачей.

В последнее время, благодаря появлению оптических сканирующих ближнепольных микроскопов различных типов, в остром фокусе были открыты интересные оптические эффекты, в их числе спиновый и орбитальный эффекты Холла. Актуальной задачей является поиск лазерных пучков, у которых в фокусе, имеет место спиновый эффект Холла.

Таким образом, исследование распределения интенсивности, плотности потока энергии, спинового углового момента в остром фокусе векторных лазерных пучков предоставляет большой как научный, так и практический интерес. Это определяет высокую актуальность диссертационной работы соискателя.

## **2. Научная новизна исследований и полученных результатов**

В диссертационной работе автором получены следующие новые результаты:

1. Аналитически и численно показано, что распределения осевого потока энергии в остром фокусе света с круговой и линейной поляризацией одинаковые и обладают круговой симметрией. Также показано, что равны осевые потоки энергии для оптических вихрей с единичным топологическим зарядом и с радиальной или азимутальной поляризацией. Аналитически показано, что диаметр фокусного пятна, рассчитанного по потоку энергии, у света с круговой поляризацией меньше (при прочих равных условиях), чем у оптического вихря с азимутальной поляризацией.

2. С использованием параметров Стокса показано, что для пучков Пуанкаре индекс поляризационной сингулярности равен топологическому заряду оптических вихрей, содержащихся в пучке. С помощью формализма Ричардса-Вольфа найдены аналитические выражения для проекций вектора напряженности электрического поля вблизи острого фокуса данных пучков. Получено выражение для распределения интенсивности в плоскости фокуса. Число локальных максимумов (боковых лепестков) интенсивности в плоскости фокуса пропорционально величине индекса поляризационной сингулярности пучка.

3. Аналитически показано, что до и после фокальной плоскости цилиндрического векторного пучка высокого порядка формируется четное число локальных субволновых областей, где вектор поляризации в каждой точке вращается. В соседних областях векторы поляризации вращаются в разные стороны, так что продольная составляющая векторов спинового углового момента в этих соседних областях имеет противоположный знак. Такое пространственное

разделение левого и правого вращения векторов поляризации демонстрирует наличие оптического спинового эффекта Холла.

4. Аналитически и численно показано, что в остром фокусе аксиальной суперпозиции цилиндрического векторного пучка порядка  $m$  и пучка с линейной поляризацией, при нечетном  $m$  имеет место спиновый эффект Холла. То есть, хотя такой пучок в начальной плоскости имеет неоднородную линейную поляризацию, в фокусе формируются области с эллиптической или круговой поляризацией с чередующимися направлениями вращения (по часовой стрелке и против часовой стрелки).

### **3. Обоснование и достоверность научных положений и выводов**

Достоверность полученных результатов доказывается корректными математическими преобразованиями и совпадением результатов расчета с помощью полученных аналитических выражений с результатами расчета с помощью формул Ричардса-Вольфа.

### **4. Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы соискателя состоит в том, что изучены закономерности в остром фокусе ряда новых интересных пучков, проведено сравнение размеров фокальных пятен по двум критериям, подробно исследовано влияние поляризации и топологического заряда сложных пучков, определен индекс поляризационной сингулярности векторных пучков, получены характеристики спинового эффекта Холла в области фокуса цилиндрических векторных пучков высокого порядка. Результаты применимы для любой длины волны, любой числовой апертуры апланатической системы (идеальной сферической линзы) и для любого радиально-симметричного начального распределения амплитуды пучка.

Практическая значимость работы состоит в том, что определение минимального фокусного пятна позволяет достигать предельного разрешения в оптической микроскопии, от величины индекса поляризационной сингулярности векторных пучков зависит число боковых лепестков в фокусе, которые определяют структуру оптических ловушек для захвата и манипулирования микрочастицами, спиновый эффект Холла в фокусе можно использовать в микромеханике в качестве оптического двигателя, когда в фокусе в двух соседних областях со спином разного знака вращаются две взаимодействующих микрочастицы в виде шестеренок. Параксиальные цилиндрические векторные пучки, у которых имеет место спиновый эффект Холла, можно использовать для передачи информации в беспроводных системах связи.

## 5. Общее содержание работы

Диссертация Зайцева В.Д. состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Текст изложен на 137 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 132 наименований.

В Главе 1 рассмотрена острая фокусировка света с линейной, круговой, радиальной и азимутальной поляризацией. Аналитически и численно показано, что распределение осевого потока энергии в остром фокусе идеальной сферической линзы для света с круговой и линейной поляризацией одинаковые и обладают круговой симметрией. Также показано, что равны осевые потоки энергии для оптических вихрей с единичным топологическим зарядом и с радиальной или азимутальной поляризацией. Минимальный диаметр имеет фокусное пятно, измеренное по интенсивности для оптического вихря с азимутальной поляризацией. Немного больше (на доли процента) диаметр фокусного пятна, рассчитанного по потоку энергии для света с круговой или линейной поляризацией. Величина диаметра фокуса по интенсивности играет роль при взаимодействии света с веществом, а величина диаметра фокуса по потоку энергии влияет на разрешение в оптической микроскопии.

В Главе 2 рассмотрена острая фокусировка пучков Пуанкаре. С помощью параметров Стокса найден индекс поляризационной сингулярности пучков Пуанкаре. Он оказался равен топологическому заряду оптических вихрей, участвующих в формировании пучка Пуанкаре. С помощью формализма Ричардса-Вольфа аналитически найдены аналитические выражения для проекций вектора напряженности электрического поля вблизи острого фокуса данных пучков. Получено выражение для распределения интенсивности в плоскости фокуса, и найдены параметры, при которых фокусное пятно имеет круглую форму. Число локальных максимумов интенсивности в плоскости фокуса пропорционально величине индекса поляризационной сингулярности пучка.

Для разных векторных и гибридных световых полей, в том числе для полей со многими точками поляризационной сингулярности, найдены индексы поляризационной сингулярности по известной формуле М. Берри, которая применяется обычно для нахождения топологического заряда скалярных вихревых световых полей. Показано, что у полей, состояние поляризации которых зависит только от полярного угла в сечении пучка, могут быть либо линии поляризационной сингулярности, исходящие из центра, либо одна точка поляризационной сингулярности, находящаяся в центре сечения пучка. Если поляризационное состояние векторного поля зависит от обеих полярных координат, то такое поле может иметь несколько точек поляризационной сингулярности, расположенных в разных местах в сечении пучка.

В Главе 3 аналитически и численно рассмотрено спин-орбитальное

преобразование в остром фокусе аксиальной суперпозиции цилиндрического векторного пучка высокого порядка (порядка  $m$ ) и пучка с линейной поляризацией. Хотя такой пучок не имеет спинового углового момента в начальной плоскости и третья проекция его вектора Стокса равна нулю, в фокальной плоскости формируются субволновые локальные области с поперечным вихревым потоком энергии и с ненулевой третьей проекцией Стокса (продольная компонента спинового углового момента) при нечетном числе  $m$ . Это означает, что такой пучок с нечетным  $m$  имеет в фокусе области эллиптической или круговой поляризации с чередующимися направлениями вращения (по часовой стрелке и против часовой стрелки). При четном  $m$  поле линейно поляризовано в каждой точке фокальной плоскости и поперечный поток энергии отсутствует. Такое разделение в пространстве областей с разным направлением поляризации демонстрирует наличие спинового эффекта Холла.

Показано, что вблизи фокальной плоскости начального цилиндрического векторного пучка произвольного целого порядка (до и после фокуса) генерируется четное число локальных субволновых областей, где вектор поляризации в каждой точке вращается. Кроме того, в соседних областях векторы поляризации вращаются в разные стороны, так что продольная составляющая вектора спинового углового момента в этих соседних областях имеет противоположный знак. Кроме того, после прохождения пучком фокуса, направление вращения вектора поляризации в каждой точке поперечного сечения пучка меняется на противоположное. Такое пространственное разделение левого и правого вращения векторов поляризации демонстрирует наличие оптического спинового эффекта Холла.

## **6. Рекомендации по применению результатов**

Полученные в диссертации научные результаты, касающиеся изучения оптических закономерностей в остром фокусе лазерного излучения, в том числе определение минимального фокусного пятна по продольному потоку энергии, рекомендуется использовать в организациях, проводящих исследования и разработку оптических систем: МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Национальном исследовательском университете ИТМО, Обществе с ограниченной ответственностью «Системы фотоники», Физическом институте им. Н.П. Лебедева РАН, Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева, Научно-исследовательском центре «Кристаллография и фотоника» РАН.

Рекомендуется использование результатов диссертации в учебном процессе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», а также их внедрение в учебный процесс других

вузов, осуществляющих подготовку специалистов в области оптики.

## 7. Замечания

Имеется ряд замечаний:

1. В диссертации показано, что при фокусировке света с цилиндрической поляризацией на расстоянии длины волны до фокуса и после фокуса формируются области с левой и правой эллиптической поляризацией. Но не проанализировано на каких расстояниях от фокуса будет иметь место этот эффект.
2. Нет достаточного обоснования выбора набора пучков, для которых проводились исследования характеристик при острой фокусировке.
3. Нет пояснения, по какой физической причине плоская дифракционная линза обеспечивает меньший размер фокального пятна по сравнению с апланатической линзой.
4. Замечания по оформлению:
  - На стр.19 в уравнении (1.19) у компоненты  $E_z$  двойка пропала, надо  $E_z = -2e^{i\varphi} I_{1,1}$ . Соответственно, в уравнении (1.21) слагаемое  $2I_{1,1}^2$  надо заменить на  $4I_{1,1}^2$ .
  - Значения величин диаметров фокальных пятен, приведенные в таблице 1.2 и в тексте не совпадают
  - Имеются повторы фрагментов текста, например, на стр. 40 и 63, а также формул: (1.3) = (3.3) = (3.23) и (3.8) = (3.13)

## 8. Оценка диссертации в целом

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности представленной диссертационной работы, которая является завершённым исследованием, в котором содержится решение научной задачи расчета проекций вектора напряженности электрического поля, распределение интенсивности, продольных проекций потока энергии для сравнения размеров фокусного пятна и спинового углового момента в остром фокусе для обнаружения спинового эффекта Холла для некоторых векторных вихревых лазерных пучков. Все основные результаты диссертационного исследования отражены в публикациях автора, включая 11 научных работ в рецензируемых журналах, внесенных в Перечень журналов и изданий, рекомендованный ВАК России. Содержание диссертации соответствует содержанию опубликованных работ. Полученные в работе результаты соответствуют поставленным целям, соответствие темы диссертации и

специальности 1.3.6. Оптика не вызывает сомнений. Автореферат диссертации правильно отражает её содержание и полностью ему соответствует. Диссертационная работа прошла необходимую апробацию её результаты были представлены на девяти международных научно-технических конференциях.

Таким образом диссертационная работа Зайцева В.Д. «Аналитический и численный расчет потока энергии и спинового углового момента в остром фокусе векторных лазерных пучков» удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присвоения ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании учёного совета Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. Н.П. Лебедева Российской академии наук.  
(протокол № 11 от 23 октября 2024 г.)

Отзыв составила:  
Ведущий научный сотрудник  
лаборатории когерентной оптики,  
к.ф.-м.н., с.н.с.

  
С.П. Котова

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

  
В.Н. Азязов