

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Халилова Сервера Искандаровича «Определение орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра–Гаусса», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

Диссертационная работа С.И. Халилова относится к области экспериментальной диагностики структурированных пучков света и посвящена разработке метода определения орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра–Гаусса на основе анализа моментов интенсивности второго порядка.

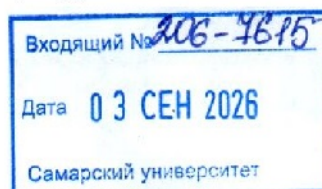
Структурированные пучки характеризуются значительным числом пространственных и фазовых степеней свободы, тонкой структурой поперечных распределений интенсивности и наличием орбитального углового момента. Как отмечено во введении диссертации, эти свойства обусловили широкое применение таких пучков в системах манипулирования микрочастицами, оптической и квантовой связи, а также в нелинейной оптике. Развитию данного направления способствовала относительная доступность средств формирования структурированных пучков на основе пространственных модуляторов света.

Несмотря на многочисленные исследования, посвящённые формированию, преобразованию и диагностике структурированных пучков, сохранялась потребность в комплексном экспериментальном подходе к определению их орбитальных параметров. Существующие интерференционные, дифракционные и другие методы, как правило, ориентированы на измерение отдельных характеристик пучка, в частности его орбитального углового момента. В этой связи **актуальна** разработка и экспериментальная реализация предложенного соискателем метода определения орбитальных параметров Стокса, позволяющего в рамках единой измерительной процедуры одновременно определить все три орбитальных параметра Стокса и представить состояние исследуемого структурированного пучка Лагерра–Гаусса на орбитальной сфере Пуанкаре.

Научная новизна предложенного подхода состоит в возможности определения всех трёх орбитальных параметров Стокса по двум зарегистрированным распределениям интенсивности на основе анализа моментов интенсивности второго порядка, без восстановления фазового фронта пучка. Такой подход связывает величины, доступные прямому измерению, с интегральными характеристиками орбитального состояния пучка и представляет самостоятельный интерес для оптической метрологии.

Значимость данного подхода возрастает по мере перехода структурированных пучков из области модельных исследований в область прикладных задач, где требуется не только сформировать пучок с заданными свойствами, но и количественно подтвердить соответствие его характеристик заданным параметрам. Представленные в диссертационной работе результаты развивают методы описания и диагностики структурированных пучков и создают предпосылки для их практического использования. Таким образом, диссертационная работа С.И. Халилова имеет **фундаментальную и прикладную значимость**.

Диссертация состоит из введения, трех глав, в которых изложены основные результаты исследований, заключения и списка библиографических источников. Материал изложен на 138 листах, содержит 37 иллюстраций и список литературы из 165 наименований.



Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведён обзор основополагающих и современных работ по диагностике структурированных пучков, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, отражена её научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Также во введении приведены положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности полученных результатов, апробации работы, публикациях и личном вкладе автора, описана структура диссертации.

В первой главе исследованы свойства двухпараметрических структурированных пучков Лагерра–Гаусса с амплитудным и фазовым управляющими параметрами. С использованием матричного ABCD-формализма получены выражения для комплексной амплитуды пучка после прохождения цилиндрической линзы и рассмотрены случаи простого и общего астигматизма. Показано, что радиальное число существенно влияет на характер осцилляций орбитального углового момента пучка.

При простом астигматическом преобразовании установлено формирование вблизи определённых значений фазового параметра двух локальных всплесков орбитального углового момента противоположного знака. Их величина может достигать половины радиального числа пучка. Теоретически и экспериментально исследованы изменения распределения интенсивности и орбитального углового момента при прохождении пучка через цилиндрическую линзу. В случае общего астигматизма проанализировано влияние поворота цилиндрической линзы на орбитальный угловой момент и пространственную структуру пучка, включая эффект следования картины интенсивности за поворотом осей астигматического элемента.

Во второй главе разработан и экспериментально реализован метод прямого определения орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра–Гаусса на основе анализа моментов интенсивности второго порядка. С использованием симплектических свойств четырёхмерной матрицы моментов интенсивности получена двумерная эрмитова матрица, аналогичная матрице когерентности в поляризационной оптике, что позволило установить связь между её элементами и орбитальными параметрами Стокса.

Метод основан на аналогии с процедурой измерения поляризационных параметров Стокса: функцию четвертьволновой пластинки выполняет цилиндрическая линза, а анализ состояния пучка осуществляется по моментам интенсивности зарегистрированных картин. Первые два орбитальных параметра Стокса определяются по распределению интенсивности в фокальной плоскости сферической линзы, а третий параметр, связанный с орбитальным угловым моментом – по распределению интенсивности в плоскости двойного фокуса цилиндрической линзы. Таким образом, для восстановления всех трёх параметров требуются два распределения интенсивности и их компьютерная обработка. Теоретические результаты сопоставлены с данными численного моделирования и экспериментальных измерений, показавших согласие предложенного метода с расчётными зависимостями.

В третьей главе разработан и экспериментально реализован модифицированный метод прямого измерения орбитальных параметров Стокса в трёхлинзовой оптической системе, состоящей из двух сферических линз и расположенной между ними цилиндрической линзы. Метод применим к неастигматическим и астигматическим структурированным пучкам Лагерра–Гаусса.

В указанной системе определены и физически интерпретированы две критические плоскости, в которых реализуются условия для измерения полного набора орбитальных параметров Стокса. На орбитальной сфере Пуанкаре этим плоскостям соответствует

поворот траектории состояния пучка вокруг соответствующей оси на угол 90° с последующим обратным вращением. Показано, что астигматическая фаза Гуи определяет преобразование состояний структурированных пучков и выражается через отношение третьего и второго орбитальных параметров Стокса: $\arctg(S_3/S_2)$. Установлено, что при астигматическом преобразовании величина орбитального углового момента структурированного пучка зависит не только от топологического заряда, но и от радиального числа. При этом сохраняется инвариант $\sqrt{S_2^2 + S_3^2}$, равный значению орбитального углового момента пучка на входе в астигматическую оптическую систему. Полученные результаты расширяют возможности прямого измерения и диагностики орбитальных характеристик структурированных пучков в астигматических линзовых системах.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Обоснованность и достоверность результатов полученных в диссертации обеспечивается согласованным применением трёх различных по природе подходов, каждый из которых выполняет самостоятельную функцию.

Аналитический вывод. Теоретическая часть выполнена в рамках параксиальной волновой оптики с использованием матричного ABCD-формализма и аппарата функции распределения Вигнера, на основе которой вводится матрица моментов интенсивности второго порядка. Соискателем использованы свойства симплектичности матрицы преобразования, определяющие закон эволюции моментов при прохождении рассматриваемых линзовых оптических систем. Аналитический вывод устанавливает связь между измеряемыми моментами и орбитальными параметрами Стокса и тем самым определяет, какие именно величины подлежат экспериментальному определению и в каких плоскостях. Использование указанного математического аппарата обеспечивает теоретическое обоснование исходных соотношений, положенных в основу измерительной процедуры.

Численное моделирование. Выполнено численное моделирование распространения и преобразования структурированного пучка при различных значениях его управляющих параметров и оптических систем. Рассчитаны все измеряемые моменты интенсивности второго порядка, орбитальные параметры Стокса и орбитальный угловой момент, а также распределения интенсивности в плоскостях регистрации. Тем самым аналитические соотношения приведены к виду, допускающему прямое сопоставление с результатами экспериментальных измерений.

Экспериментальные измерения. Достоверность подтверждается сопоставлением восстановленных из эксперимента величин с расчётными зависимостями, выполненным для различных типов структурированных пучков и различных значений управляющих параметров. В диссертации приведены количественные оценки погрешности для отдельных серий измерений, в том числе оценка относительной погрешности определения удельного орбитального углового момента и оценка погрешности при сопоставлении картин интенсивности в экспериментах с поворотом цилиндрической линзы.

Совокупность указанных подходов, каждый из которых опирается на самостоятельные основания, позволяет считать сформулированные в работе положения обоснованными. Вместе с тем результаты исследования имеют существенное теоретическое и практическое значение.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов описания и диагностики структурированных пучков Лагерра–Гаусса на основе орбитальных параметров Стокса. Представление состояния пучка на орбитальной сфере Пуанкаре позволяет связать эволюцию его пространственной структуры с непосредственно измеряемыми характеристиками. Установленная связь орбитальных параметров Стокса с астигматической фазой Гуи расширяет возможности анализа астигматических преобразований структурированных пучков. Выявленная зависимость орбитального углового момента от радиального числа уточняет физическое описание пучков Лагерра–Гаусса в условиях астигматизма.

Практическая значимость работы связана с экспериментальной реализацией метода, позволяющего определять орбитальные параметры Стокса по двум зарегистрированным распределениям интенсивности и результатам их компьютерной обработки. Метод может быть использован для диагностики структурированных лазерных пучков и контроля их орбитального углового момента. Полученные результаты представляют интерес для задач оптической связи, микроманипулирования частицами, обработки информации и исследования квантовых систем, в которых существен контроль орбитальных степеней свободы света.

Основные результаты диссертационного исследования отражены в 15 научных работах, включая 13 статей, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. По результатам исследований зарегистрированы две программы для ЭВМ. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на девяти международных и всероссийских научных конференциях.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Отмечая положительные стороны диссертации Халилова С.И. следует обратить внимание на следующие **замечания**.

1. Из текста диссертации не совсем понятно каким образом в трёхлинзовой оптической системе экспериментально определяются положения критических плоскостей Π_1 и Π_2 , обеспечивающих измерение полного набора орбитальных параметров Стокса? Как изменяется погрешность измерения трёх орбитальных параметров Стокса при отклонении плоскости регистрации от положения соответствующей критической плоскости?

2. В диссертации показано, что при простом астигматизме ОУМ может стремиться к $n/2$, а при общем астигматизме могут быть получены значения, превышающие $n + \ell$. Вместе с тем в подразделе 1.3 Астигматическое преобразование сЛГ-пучка (общий астигматизм) на стр. 43 указано предельное значение $2n + \ell$. При каких условиях и параметрах пучка реализуется этот предельный случай?

3. Каким образом осуществлялась калибровка пространственного модулятора света, формирующего исследуемый пучок, и камеры, регистрирующей распределения интенсивности? Как контролировалось соответствие сформированного пучка заданным параметрам, а зарегистрированных изображений – фактическому распределению интенсивности?

4. Как изменяется траектория состояния структурированного пучка Лагерра–Гаусса на орбитальной сфере Пуанкаре при вариации фазового параметра θ , и каким образом в пределе $\varepsilon \gg 1$ она переходит в траекторию пучка Эрмита–Лагерра–Гаусса? Как при этом

связаны управляющие параметры структурированного пучка Лагерра-Гаусса с параметрами пучка Эрмита-Лагерра-Гаусса?

5. Какие ограничения по классу исследуемых пучков имеют предложенные в диссертации методы и какова область их применимости? В частности, если сЛГ-пучок поступает на приёмную сторону линии оптической связи после воздействия шумов, аббераций или иных искажений, возможно ли по двум зарегистрированным распределениям интенсивности восстановить все три орбитальных параметра Стокса?

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основные защищаемые положения и сформулированные выводы, то есть не снижают научную и практическую ценность полученных результатов.

Диссертация Халилова Сервера Искандаровича «Определение орбитальных параметров Стокса структурированных пучков Лагерра-Гаусса» соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Халилов Сервер Искандарович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «Оптика».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, доцент

Заведующий лабораторией научно-образовательного центра фотоники и оптоинформатики

ФГАОУ ВО «Национальный

исследовательский университет ИТМО»



Петров Николай Владимирович

«02» сентября 2026 г.

Контактные данные:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Почтовый адрес: Кронверкский пр., д. 49, лит. А, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197101

Телефон: 8 (905) 204-91-58

E-mail: nickolai.petrov@gmail.com

ПОДПИСЬ
УДОСТОВЕРЯЮ
МЕНЕДЖЕР ОПС
ТАРАСОВА Я. В.

Петрова Н. В.

