

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Агапова Дмитрия Павловича**  
**на тему: «Фантомная поляриметрия в классических и квантовых**  
**световых полях в формализме Джонса»**  
**по специальности 1.3.19 – Лазерная физика**

**Актуальность темы диссертационной работы**

Квантовая оптика, информатика и голограммия – три важные области науки, на стыке которых возникают и активно развиваются новые направления исследований со своими задачами, требующими построения соответствующих теорий, постановки оригинальных экспериментов. Эти исследования сопровождаются появлением важных научных результатов, обладающих большим потенциалом практических приложений. В полной мере к этому можно отнести работы в области квантовой оптики запутанных двухфотонных полей (бифотонов), которые привели к открытию необычно сильных корреляционных свойств бифотонов, проявляющих фундаментальные свойства квантовой теории. Данное направление исследований оказало большое влияние на развитие современной квантовой оптики, оптической квантовой информатики, привело к разработке оптического квантового компьютера, появлению оптических квантовых коммуникаций.

Фантомные изображения были обнаружены в работах Д.Н.Клышко и его сотрудников также в результате исследования необычайно сильных пространственных корреляционных свойств у бифотонов. Удивительным оказалось и то, что подобные пространственные корреляционные свойства в определенной степени оказалось присущи и хаотическим классическим полям. То есть эти работы показали большие возможности получать фантомные изображения изучаемого объектов в корреляционных свойствах «объектного» и «восстанавливающего» пучка, используя световые поля без получения непосредственного изображения в виде фотографии или голограммы. Более того, получение фантомных изображений позволило существенно ослабить требования к интенсивности используемых световых полей, открывая возможность получать неразрушающим образом

изображения предельно слабыми световыми полями в физических условиях, неприемлемых для традиционной оптики. При этом не возникает требований к разрешающей способности детектора в области нахождения изучаемого объекта, что открывает возможность использования сенсоров с предельно малыми размерами. Кроме того, появляется возможность создавать изображения в ТГц и X-ray диапазонах частот. Поэтому большой научный интерес к фантомным изображениям сопровождается разработкой методов практического применения этого эффекта в различных областях, включая биологию и медицину.

Использование поляризации в фантомных изображениях, дало новое направление в развитии этой науки, получившее название фантомной поляриметрии, в которой ставятся задачи использования возможностей поляризационных степеней бифотонов при получении изображения об объекте и в изучении его поляризационной структуры. Фантомная поляриметрия до работ автора диссертации оставалась практически не затронутой областью исследований, хотя было известно, что использование поляризационных степеней может существенным образом улучшить возможности фантомной поляриметрии, аналогично преимуществам поляризационных микроскопов. Не было работ, посвященных восстановлению поляризационной структуры объектов, используя методы фантомной поляриметрии, что является основной целью данной диссертации .

Это новое направление работ в фантомной поляриметрии можно рассматривать своеобразным важным расширением возможностей поляризационной голографии, предсказанной в свое время Ю.Н.Денисюком. При этом особый научный и практических интерес связан с изучением квантовых свойств фантомной поляриметрии, которая основана в настоящее время на использовании свойств бифотонов, техника генерации которых также продолжает оставаться важной областью исследований и также стала предметом исследований автора диссертации. В формулируемой автором области исследований можно ожидать появления важных научных результатов и практических приложений. Таким образом, высокая значимость научных задач работ в области фантомной поляриметрии сочетается с большим потенциалом практического использования, что делает актуальными и практически важными исследования, которым посвящена диссертационная работа Агапова Дмитрия Павловича.

## **Научные результаты и новизна диссертационной работы**

В данной диссертации Агапов Д.П. последовательно строит теорию фантомной поляриметрии для классических и для квантовых оптических полей. На основе развитой теории автор разрабатывает способы экспериментальной реализации фантомной поляриметрии, создает необходимые классические и квантовые источники света, разрабатывает методы измерения корреляционных функций световых полей и способы обработки полученных данных. Таким образом, в настоящей диссертационной работе выполнен большой объем исследований, в результате чего автором разработаны основы классической и квантовой фантомной поляриметрии и получены следующие важные научные результаты:

1. Построена теория классической и квантовой фантомной поляриметрии, основанная на использовании формализма матриц Джонса в описании поляризационных свойств света. Для использования бифотонных полей получено обобщенное условие формирования квантовых фантомных изображений в двухлинзовой схеме. Найден полный набор измерений для восстановления азимута и величины линейной амплитудной анизотропии. Применяя развитый подход, автором показано, что путем измерения значений трех корреляционных функций объектного и восстанавливающего световых полей, измеряемых детекторами, регистрирующими ортогональные компоненты сигналов, можно восстанавливать двумерную карту поляризационных свойств объекта, обладающего линейно амплитудной анизотропией (т. е. линейным дихроизмом).

2. Разработаны и изготовлены источники поляризованного и неполяризованного псевдотеплого светового излучения на основе вращающихся матовых дисках и на основе пространственного модулятора света. Показано, что при использовании пространственного модулятора света для создания псевдотеплого излучения, возникает анизотропия радиуса корреляции «объектного» и «восстанавливающего» полей, что влияет на пространственное разрешение фантомного изображения. Созданные классические и квантовые источники света успешно применены в экспериментальной реализации фантомной поляриметрии изучаемых объектов.

3. Впервые разработана и обучена многослойная нейронная сеть в рамках обратной задачи фантомной поляриметрии. Обученная сеть продемонстрировала возможность определять тип анизотропии в плоскости

изучаемого объекта и величину конкретных параметров анизотропии. Успешность использования обученной нейронной сети, продемонстрировала новые возможности в обработке экспериментальных данных, получаемых в фантомной поляриметрии, которые могут быть применены для классических и квантовых источников излучения.

4. Как классическая, так и квантовая фантомная поляриметрия была реализована в эксперименте. Последняя реализована впервые. Также впервые получены поляризационные фантомные изображения объектов, обладающих линейным дихроизмом. Разработанная в диссертации теория успешно подтверждена многочисленными экспериментами.

### **Достоверность научных выводов**

Достоверность и обоснованность положений выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечиваются:

- надежностью теоретических подходов квантовой и статистической оптики, используемых при построении автором теории классической и квантовой фантомной поляриметрии, а также сводимостью полученных им теоретических результатов в предельных случаях к надежно установленным теоретическим результатам,
- использованием проверенных экспериментальных методов при проведении экспериментов, многократной проверкой полученных результатов,
- корректным сопоставлением полученных экспериментальных и теоретических результатов,
- публикациями представленных в диссертации научных результатов в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, индексируемыми в SCOPUS. В частности, результаты представлены в журнале первого квартриля – Optics Letters,
- апробациями полученных результатов на российских и международных конференциях, многократным обсуждением результатов со специалистами в области квантовой оптики;

### **Общая оценка диссертационной работы**

Работа состоит из четырех глав. В первой главе приведено подробное изложение способов формирования фантомного изображения и приводится

исчерпывающий обзор литературы. Во второй главе представлена теория квантовой и фантомной поляриметрии, где также обсуждаются возможности использования глубокого обучения нейронной сети в фантомной поляриметрии. В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований в классическом свете. Подробно описаны созданные источники псевдотеплового света. Продемонстрированы фантомные поляризационные изображения объектов, чьи свойства ограничены линейным дихроизмом. В четвертой главе обсуждается эксперимент по квантовой фантомной поляриметрии, используя созданный при участии автора источник СПР бифотонов. Описываются параметры созданного источника источника бифотонов, в котором генерируются два фотона ортогональной поляризации, излучаемые в разных направлениях. Также описываются предлагаемые экспериментальные методики детектирования одиночных фотонов. Собрана схема с постселекцией детектированных фотонов, на которой автором впервые были получены квантовые фантомные поляризационные изображения.

В данной диссертации Дмитрию Павловичу удалось сочетать глубокое теоретическое исследование с проведением многочисленных экспериментов. Развитая им теория была успешно применена к объяснению этих экспериментов. Полученные результаты и сделанные выводы надежны, их следует в полной мере считать обоснованными, что делает представленную диссертационную работу насыщенной важной информацией, очень интересной для чтения и заслуживающей самой высокой оценки. Материал диссертации изложен ясно и логично с необходимой полнотой, вся работа очень хорошо оформлена и иллюстрирована большим числом графиков, рисунков, фотографий оборудования и важных деталей экспериментальной установки. При прочтении диссертации у меня возникли несколько замечаний и рекомендаций.

1. Похоже, что развитую теорию автор смог применить успешно только к некоторым объектам, которые не могут иметь произвольной поляризационной структуры. Так, автор отмечает, что ФП явно проявляют себя, если поляризационные свойства изучаемых объектов можно интерпретировать как линейный дихроизм. Вопрос, когда это возможно, а когда нет, желательно было бы иметь пояснение. В целом, интересно было бы обсудить степень общности построенной теории.

2. В диссертации автор отдельно формулирует результат, посвященный использованию многоуровневой нейронной сети. Вместе с тем этот вопрос почему-то не отражен в оглавлении диссертации, а

возникает как-то между делом внутри первого абзаца на ст. 40. Также стоит отметить, что автор использует слово «предсказание» в работе нейронной сети (см. стр. 44) а именно пишет:

«Точность предсказания Regression stack характеризуется средней абсолютной ошибкой»

Слово предсказание в этом контексте используется автором и в автореферате:

«Выбран набор из пяти корреляционных функций, результат обработки которого с помощью нейронной сети позволяет предсказать распределение типа анизотропии в плоскости объекта и величины параметров для соответствующего типа анизотропии».

Считаю, что стоило бы лучше говорить о высокой вероятности определения существующей уже поляризационной структуры, чем о ее предсказании.

3. На стр. 61 диссертации автор вводит состояние фотона после прохождения изучаемого объекта

$$|e(\mathbf{r})\rangle_1 = M_{11}(\mathbf{r})|H\rangle + M_{21}(\mathbf{r})|V\rangle,$$

где перед ортогональными поляризационными состояниями стоят элементы матрицы Джонса, которые описывают изменение в пространстве пропускания фотона через объект из-за различной степени его поглощения. Вместе с тем, почему-то автор не обсуждает вопрос о возможной декогеренции излучения при его распространении сквозь изучаемые объекты. Почему в описании эксперимента автору удается избежать необходимости перехода от волновой функции к матрице плотности двухфотонных полей? Например, эффект декогеренции явно будет иметь место при рассеянии однофотонных полей в усиливающей излучение среде, где будет невозможно избежать введения декогеренции между элементами матрицы Джонса. Желательно было бы иметь пояснение.

4. Автор отмечает, что учет поляризации в фантомном изображении может улучшить пространственное разрешение в изучении структуры объекта. Желательно было бы в выводах диссертации вернуться к этому вопросу при обсуждении полученных результатов.

5. Автор в конце диссертации на стр. 107 заключает, что им теоретически показано, что запутанные по импульсу бифотоны, генерируемые в процессе спонтанного параметрического рассеяния, позволяют реализовать принцип квантовой фантомной поляриметрии. Также им вводится и понятие принципа классической фантомной поляриметрии, но эти принципы четко не формулировались в диссертации.

Так при формулировке задачи ранее на стр. 45 в начале параграфа, посвященного квантовой ФП, автор пишет:

«Задача квантовой ФП идентична классическому аналогу, однако механизм формирования изображений отличается, так как используются неклассические корреляции»

То есть какие-то особые квантовые принципы не отмечаются. Если такие принципы есть, то они заслуживают специального внимания и четкой формулировки.

6. В диссертации отмечено: «Экспериментально показана эффективность квантовой фантомной поляриметрии в применении к задаче определения модуля азимута анизотропии» .

Интересно было бы отметить преимущества в использовании квантовой ФП при решении данной задачи по сравнению с использованием классической фантомной поляриметрии и количественно сравнить их свойства. Если возможно было бы важно ввести количественную меру, определяющую преимущество использования квантовой фантомной поляриметрии, например, в разрешающей способности изучения поляризационной пространственной структуры аналогично неравенствам Белла. В этой связи было бы интересно поставить эксперименты по изучению свойств фантомной поляриметрии, используя поляризационно запутанные фотонные пары. Желательно иметь обсуждение этого вопроса в диссертации и возможностей использования поляризационной запутанности фотонов в этих экспериментах.

7. Диссертация хорошо оформлена, крайне редко встречаются опечатки, отмечу одну. После формулы (3.34) автор, ссылаясь на работу, указывает вместо номера статьи знак вопроса.

## Заключение

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Автореферат полностью отвечает содержанию диссертации, которая соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова и оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на

соискание ученой степени доктора наук Московского государственного  
университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Агапов Дмитрий Павлович заслуживает  
присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
профессор Казанского национального исследовательского технического  
университета им. А.Н. Туполева - КНИТУ-КАИ,  
директор Казанского квантового центра

Моисеев Сергей Андреевич

«\_\_\_» 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +7(843)321-16-29,  
e-mail: s.a.moiseev@kazanqc.org

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

420111, г.Казань, ул. К. Маркса, д. 10,

Казанский национальный исследовательский технический университет им.  
А.Н. Туполева - КАИ, Казанский квантовый центр  
Тел.: +7(843)231-01-09; e-mail: kai@kai.ru

Подпись Моисеева С.А. заверяю:

ученый секретарь/кадровый работник \_\_\_\_\_

«\_\_\_» 2023 г.