

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Агапова Дмитрия Павловича «Фантомная поляриметрия в классических и
квантовых световых полях в формализме Джонса»,
представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертационная работа Д. П. Агапова посвящена исследованию методов получения фантомных изображений в классических и квантовых полях, а также развитию этих методов для анализа свойств поляризационно-чувствительных объектов.

Научные исследования, проводимые Д. П. Агаповым, находятся на стыке фантомной поляриметрии, статистической оптики и разработки интеллектуальных систем обработки изображений, представляющих собой важные и перспективные направления современной оптики. Фантомная визуализация и получение фантомных изображений является новой быстроразвивающейся областью, которая помимо фундаментальной значимости, представляет несомненный практический интерес. Методы, основанные на фантомных изображениях, открывают новые уникальные возможности для диагностики объектов с высоким разрешением, с использованием миниатюрных сенсоров, а также световых пучков низкой интенсивности. При этом наиболее перспективной представляется фантомная визуализация с использованием неклассических световых полей, которая основана на корреляциях фотонов в неклассических перепутанных состояниях света и позволяет получить пространственное фантомное изображение без дополнительного сканирования. Особую важность в таких исследованиях приобретает анализ роли поляризации используемого излучения, а также разработка методов высокоточного измерения поляризационных свойств исследуемых объектов. Данные вопросы в литературе еще практически не изучены. Поэтому актуальность темы исследований Д.П. Агапова не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения с основными выводами по результатам исследования и списка литературы. Объем диссертации составляет 121 страницу и включает в себя 42 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 105 библиографических ссылок.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования,

формулируются цели и задачи работы, научная новизна диссертационной работы и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации диссертационной работы.

Первая глава содержит подробный обзор литературы по теме работы. Представлен детальный анализ современного состояния научных исследований по фантомной визуализации в классической и квантовой оптике. Обсуждаются основные принципы получения фантомных изображений в классическом и квантовом свете. Рассмотрены дискретные методы. Освещены современные применения фантомной визуализации. Отдельное внимание уделено учету и анализу поляризации при получении и обработке фантомных изображений.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому описанию оптических методов фантомной поляриметрии, разработанных для получения фантомных изображений, позволяющих проводить измерения поляризационных свойств объектов в классических и квантовых полях. Рассматриваемые методы нацелены на восстановление зависящих от пространственных переменных элементов матрицы Джонса плоских объектов. Преимущество разработанных методов заключается в регистрации по схеме совпадений, что дает возможность проводить измерения в одном плече, получая информацию об объекте, взаимодействующем со светом в другом плече. При этом высокое пространственное разрешение необходимо только для измерений в восстанавливающем «свободном» плече, в то время как, регистрация сигнала от объекта производится суммирующим детектором интегрально по пространству. Продемонстрировано, что измерение корреляционных функций между различными поляризационными компонентами излучения в «свободном» плече и в суммирующем детекторе в объектном плече позволяют полностью восстановить поляризационные свойства объекта. Причем число необходимых корреляционных измерений определяется размерностью пространства, задающего анизотропию поляризационных свойств объекта.

Третья глава посвящена описанию экспериментальной реализации фантомной поляриметрии в классическом свете псевдотеплового источника излучения. Обсуждается проблема создания таких источников. Приводится экспериментальная схема установки и ее параметры. Экспериментально продемонстрировано восстановление пространственного профиля поляризации объекта из измеренных корреляционных функций как в квазиодномерном, так и в двумерном случаях. Причем, в случае фантомного изображения щели с

поляризатором в опорном плече ошибка определения угла анизотропии поляризации не превосходила 1-2%.

Четвертая глава посвящена обсуждению особенностей экспериментальной реализации фантомной поляриметрии в квантовом свете. В эксперименте использовались неклассические перепутанные состояния фотонов, получаемые в процессе спонтанного параметрического рассеяния. Поэтому сама реализация эксперимента представляет собой непростую задачу. Разработана экспериментальная методика, основанная на измерении числа совпадений с учетом калибровки на «темновой» сигнал, которая позволила с хорошей точностью восстанавливать азимут анизотропии поляризации.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации, список работ автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Следует отметить, что диссертационная работа Д. П. Агапова представляет собой комплексное научное исследование, выполненное на высоком уровне. Результаты работы апробированы публикациями в авторитетных журналах и докладами на российских и международных конференциях. Несомненным достоинством работы является согласованное и взаимосвязанное применение теоретических и экспериментальных методов исследования, что открывает возможности для дальнейшего развития прикладных задач. Одним из важных результатов, полученных в диссертации, является реализация вычислительной фантомной поляриметрии на основе нейронных сетей с возможностью использования глубокого обучения. При этом удалось минимизировать среднюю абсолютную ошибку предсказываемого параметра на уровне не более 1% от максимального значения.

Таким образом, в диссертации получен целый ряд важных результатов, новизна и научная значимость которых, не вызывает сомнений. Достоверность результатов подтверждается согласием проведенного теоретического анализа и полученных экспериментальных результатов.

Автореферат полностью соответствует тексту диссертационной работы.

Тем не менее, по работе имеется ряд замечаний:

1. Хотя работа нацелена на восстановление пространственных профилей распределения поляризационных свойств объектов, в тексте не приводится детального обсуждения факторов, определяющих пространственное разрешение

разработанных методов, а также предельных достижимых величин разрешения по пространству.

2. Остается не ясным, чем определяется ошибка измерений восстановленного угла наклона поляризации, приведенных на рис. 3.17, которая оказалась существенно больше в сравнении с достаточно точным измерением азимута анизотропии поляризации, приведенным на рис. 3.16 и в формуле (3.46).

3. Представляется важным проанализировать преимущества использования квантовых перепутанных состояний фотонов в фантомной поляриметрии по сравнению с регистрацией в классическом свете.

4. В работе не рассмотрено влияние потерь на качество восстановления поляризационных свойств объектов в схемах фантомной поляриметрии на основе квантового света. Поскольку корреляции фотонов в неклассических состояниях света могут легко разрушаться в случае любых воздействий, данный аспект является важным с точки зрения перспектив практического использования неклассического света в таких схемах.

5. Следует также отметить, что работа не свободна от опечаток и неточностей. В ряде случаев промежуточные выражения в формулах не верны, например, в формулах (1.9) и (1.10). Также не вводится и не обсуждается оператор импульса поля, используемый для анализа эволюции квантовых фотонных операторов в Главе 2, просто приводится ссылка на цитируемую литературу.

Приведенные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационного исследования, а также его достоверность, актуальность и научную значимость.

Диссертационная работа Д. П. Агапова является целостной научно-исследовательской работой, которая выполнена на высоком научном уровне, содержит новые решения актуальных задач и представляет собой важный вклад в развитие теоретических основ и экспериментальную разработку методов анализа свойств поляризационно-чувствительных объектов на основе фантомных изображений в классических и квантовых полях.

Содержание диссертации «Фантомная поляриметрия в классических и квантовых световых полях в формализме Джонса» 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.

Диссертация 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. Диссертация отвечает всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода.

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,
профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники
физического факультета Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова

Тихонова Ольга Владимировна

Дата составления отзыва: 30 ноября 2023 года

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Телефон: +7 (495) 939-13-04

E-mail: ovtikhonova@physics.msu.ru

Подпись Тихоновой Ольги Владимировны УДОСТОВЕРЯЮ:

Учёный секретарь учёного совета
физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
д.ф.-м.н., профессор

В.А. Караваев