МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Агапов Дмитрий Павлович

Фантомная поляриметрия в классических и квантовых световых полях в формализме Джонса

1.3.19 - Лазерная физика

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Научные руководители	_	Магницкий Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент
		Чиркин Анатолий Степанович, доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты	_	Цыпкин Антон Николаевич,
		доктор физико-математических наук, Университет ИТМО, научно-образовательный центр фотоники и оптоинформатики, доцент
		Моисеев Сергей Андреевич,
		доктор физико-математических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, директор Казанского квантового центра
		Тихонова Ольга Владимировна,
		доктор физико-математических наук, профессор, МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники, профессор

Защита диссертации состоится «21» декабря 2023 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория имени С.А.Ахманова.

E-mail: diss.sov.31@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.4/2730

Автореферат разослан «___» ____ 20_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета МГУ.013.4, кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Бурный рост вычислительных мощностей и объема перерабатываемой информации вызывает необходимость развития новых методов визуализации как для научных исследований, так и для разработки современных интеллектуальных систем формирования и обработки изображений. Одним из новых подходов к задаче визуализации является метод фантомных изображений (ФИ) (см. обзор [1]), который предоставляет уникальные возможности для диагностики объектов. Последнее является следствие того, что информация об объекте восстанавливается из взаимной корреляционной функции интенсивностей излучения освещающего объект и «восстанавливающего» излучения, не взаимодействующего с объектом. При этом регистрация излучения, рассеянного на объекте или прошедшего через него, производится суммирующим детектором без пространственного разрешения, что позволяет использовать миниатюрные сенсоры для визуализации и слабые световые пучки. Такой подход, использующий статистические свойства случайного света, радикально отличается от традиционных способов формирования изображений, основанных на измерении средней интенсивности с помощью многопиксельных детекторов (например, ПЗС камеры), либо сканирования (например, лидары).

В последнее время ежегодно публикуется множество работ по фантомной оптике как в классических, так и в квантовых световых полях. Говоря о классических полях мы будем подразумевать световые поля с тепловой (гауссовской) статистикой, а под квантовыми полями световые поля в неклассических состояниях (например, запутанные состояния).

Область применения принципа ФИ постоянно расширяется. ФИ наблюдались с помощью рентгеновского излучения, ТГц- излучения и даже в потоке запутанных ультрахолодных метастабильных атомов гелия. Важным шагом в развитии ФИ стала разработка вычислительной фантомной визуализации, которая позволила значительно упростить экспериментальные стенды за счет исключения из схемы восстанавливающего пучка. Особый интерес к фантомной визуализации возник на фоне динамичного внедрения сложных интеллектуальных систем, основанных на глубоком обучении [2].

Однако вопрос о возможной роли поляризации света в методе ФИ практически не изучен. В работах [3, 4] обсуждалось только влияние степени поляризации на качество фантомных изображений и показано увеличение контраста изображения с ростом степени поляризации зондирующего света. В [5, 6] продемонстрировано, что при освещении объекта линейно поляризованным тепловым излучением можно увеличить контраст изображения рассеивающих объектов при определенной ориентации анализатора в объектном плече. Для улучшения качества восстановленных изображений в [7] реализовано поляризационное мультиплексирование.

В работе [8] теоретически показано, что с помощью метода ФИ, путем выбора соответствующих поляризаторов в объектном и восстанавливающем плечах, можно определять свойства поляризационно -чувствительных объектов. В ней было введено понятие фантомной поляриметрии (ФП). Отметим, что в развитие идей использования поляризации в фантомном принципе внесен в [9, 10], где развивалась концепция фантомной эллипсометрии. Таким образом, до начала работ по теме диссертации экспериментальная реализация фантомной поляриметрии не была осуществлена. Более того, квантовый вариант ФП не рассматривался. Позднее параллельно с нашими работами опубликованы статьи [11, 12, 13]. В этих статьях обсуждается применение запутанных фотонов для измерения оптической активности сред и поверхностей. Однако возможность восстановления профиля поляризационных свойств объектов не изучалась.

Цели и задачи диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы является экспериментальная и теоретическая разработка метода фантомной поляриметрии для определения пространственного распределения поляризационных свойств объекта на основе аппарата матриц Джонса. В работе решаются следующие задачи:

1. Развитие теории фантомной поляриметрии в классических неполяризованных световых полях в формализме Джонса. Выявление полного набора измерений, необходимых для восстановления пространственных профилей распределения поляризационных свойств.

2. Создание источников псевдотеплового поляризованного и неполяризованного излучения.

3. Разработка и создание экспериментальных стендов для реализации фантомной поляриметрии в классических световых полях. Восстановление поляризационных фантомных изображений

4. Развитие теории фантомной поляриметрии в квантовых световых полях; определение условия формирования квантового ФИ с линзами в объектном и восстанавливающем каналах.

5. Создание источника запутанных по импульсу и коррелированных по поляризации фотонных пар. Создание экспериментальных стендов для реализации принципов ФП в квантовых световых полях. Получение распределения поляризационных свойств объекта с помощью квантовой ФП.

6. Исследование возможностей глубоких нейронных сетей в ФП.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в систематической разработке принципа, лежащего в основе концепции фантомных изображений, для поляризационно- чувствительных объектов, которые изменяют состояние поляризации падающего света. При этом были получены следующие результаты:

1. Теоретически впервые показано, что при облучении объекта неполяризованным тепловым излучением элементы матрицы Джонса связаны с взаимными корреляционными функциями фототоков, измеряемых в объектном плече и в восстанавливающем плече, где регистрируются сигналы в двух ортогональных поляризациях. Продемонстрировано, что разработанный метод позволяет восстановить поляризационную структуру объекта.

2. Впервые в ФП применен подход на основе нейронных сетей. Разработана глубокая нейронная сеть, определяющая тип присущей объекту анизотропии, исходя из измерений корреляционных функций интенсивности в различных поляризационных состояниях классического

света. Показано, что созданная нейронная сеть способна определить не только тип анизотропии, но и величину конкретных параметров анизотропии.

3. Впервые экспериментально осуществлена концепция фантомной поляриметрии в классическом неполяризованном и поляризованном свете. Предложенная концепция формирования поляризационных фантомных изображений обеспечивает получение полной информации о пространственном распределении поляризационных свойств объектов с линейным дихроизмом.

4. Заложены основы квантовой фантомной поляриметрии с применением бифотонов, включая разработку теории, создание экспериментальных методик и экспериментальную реализацию при облучении объекта одиночными коррелированными фотонами.

Научная и практическая значимость

Метод фантомных изображений для объектов с поляризационной структурой является новым направлением в фантомной оптике. Как известно, поляризационное состояние света, рассеянного объектом или прошедшего через него, содержит ценную информацию об объекте. Это обстоятельство привело к зарождению, в частности, поляризационной голографии. Основанная на предлагаемом в данной работе исследовании методика слабо интенсивной поляризационной диагностики объектов может дополнить технологию поляризационной микроскопии, где невозможно управление параметрами света в объектном плече, например, в медицине для идентификации биологических структур.

Практическая значимость работы заключается в потенциальной возможности применения полученных результатов в двух направлениях: 1) технология и аппаратура для неинвазивной оптической диагностики различных патологий в медицине, включая клеточную медицину (например, методами волоконной фантомной оптики); 2) технология и аппаратура для увеличения контраста оптических изображений объектов, получаемых с помощью оптических лидаров, в частности при оптическом мониторинге земной поверхности беспилотными летательными аппаратами.

Методология и методы исследования

При использовании классических световых полей описание процессов формирования поляризационных ФИ основано на традиционных методах статистической оптики и формализма матриц Джонса. При облучении объекта неклассическими состояниями света применяется методы квантовой оптики.

При экспериментальной реализации ФП в классическом свете применяли разработанные источники псевдотеплового света, включающие в себя: Не-Ne лазер (длина волны 632 нм), поляризационный контроллер, матовое стекло, фазовый пространственный модулятор света. Регистрация излучения производилась стандартными CCD/CMOS камерами, либо фотодиодами работящими в линейном режиме.

Для экспериментальной реализации ФП в квантовом свете использовалось специальное оборудование, разработанное в лаборатории. Так, для регистрации однофотонного света использовался счетчик одиночных фотонов SPC-V1 и время-цифровой преобразователь TDC-6. В некоторых случаях использовался время-цифровой преобразователь фирмы ID Quantique. В качестве источника коррелированных фотонных пар использовался нелинейный кристалл BBO, который накачивался непрерывным лазером на длине волны 405 нм.

Защищаемые положения

1. Пространственное распределение поляризационных свойств объектов, обладающих линейной амплитудной анизотропией, однозначно восстанавливается из измерения 3-х взаимных корреляционных функций интенсивностей, получаемых при освещении образца неполяризованным псевдотепловым светом и регистрации горизонтальной, вертикальной и диагональной поляризационной компоненты излучения в канале восстановления.

2. При облучении объекта неполяризованным псевдотепловым светом со степенью деполяризации 93% пространственное распределение азимута линейной амплитудной анизотропии восстанавливается с точностью 92% из измерения трех корреляционных функций при усреднении по 4000 реализациям.

3. Пространственное распределение типа анизотропии в сечении двухмерного объекта, обладающего линейной/циркулярной фазовой/амплитудной анизотропией, восстанавливается с точностью 95% из измерения 5-ти взаимных корреляционных функций, каждая из которых измерена с погрешностью в 1%, с помощью обученной многослойной нейронной сети.

4. При описании объекта модифицированными матрицами Джонса пространственное распределение поляризационных свойств этого объекта, обладающего линейной амплитудной анизотропией, восстанавливается методом квантовой фантомной поляриметрии, основанном на использовании одиночных фотонов.

5. Пространственное распределение модуля азимута линейной амплитудной анизотропии при использовании линейно поляризованных бифотонов восстанавливается с точностью 96% из измерения числа совпадений в различных поляризационных базисах, при среднем числе совпадений меньше 2000 событий в секунду.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы представлены на российских и международных научных конференциях. Материалы диссертационных исследований опубликованы в 8 печатных работах в международных рецензируемых научных изданиях, входящих в базы данных Web of Science, Scopus и РИНЦ, таких как Optics Letters, ЖЭТФ, Измерительная техника, EPJ Web of Conferences, Вестник Московского университет. Серия 3: Физика, астрономия.

Личный вклад автора

Личный вклад автора является определяющим. Все экспериментальные методики и стенды созданы лично автором данной работы. Все представленные в работе измерения проводились автором или при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в разработке теории фантомной поляриметрии в классических и квантовых световых полях, а также в подготовке материалов к публикациям и отчетам. Программное обеспечение, использованное в работе, написано при непосредственное участие автора. Разработка нейронной сети и её обучение проведены автором самостоятельно.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из Введения, трех глав, Заключения и Списка литературы. Объем работы составляет 121 страницу, включая 42 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 104 наименования, включая 10 авторских работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава представляет собой обзор литературы. Подробно описан процесс формирования фантомных изображений (ФИ) в классических световых полях, т. е. при облучении объекта псевдотепловым излучением с гауссовской статистикой, и в квантовых световых полях, т. е. в случае, когда используются неклассиечкие состояния света. Обсуждаются некоторые интересные потенциальные возможности метода ФИ на примере терагерцовой визуализации и волоконной фантомной оптики. Приведен подробный анализ работ, связанных с использованием поляризации света в методе ФИ. Дается краткое описание поляризации светового поля в формализме Джонса и формализме векторов Стокса.

Вторая глава посвящена теоретическому описанию концепции фантомной поляримтерии (ФП) как в классических, так и в квантовых световых полях.

Раздел 2.1.1 рассмотрена реализация ФП, когда объект облучается непрерывным неполяризованным псевдотепловым излучением. Изучаются объекты, чьи поляризационные свойства могут быть описаны матрицами Джонса (т.е. нерассеивающие и недеполяризующие объекты). Показано, что взаимная корреляционная функция фототоков с суммирующего детектора и многопиксельного детектора зависит от элементов матрицы Джонса объекта:

$$G^{(i)}(\mathbf{r}) = sK^{(i)}(\mathbf{r}) \int |\Gamma^{(i)}(\boldsymbol{\rho} - \mathbf{r})|^2 d^2 \rho, \qquad (1)$$

где $K^{(i)}(\mathbf{r})$ - функция элементов матрицы Джонса; $\Gamma^{(i)}(\boldsymbol{\rho} - \mathbf{r})$ - корреляционная функция поля; **r** - радиус вектор в плоскости объекта; *s* - площадь суммирующего детектора; (*i*) - индекс соответствующий различным измеряемым поляризационным компонентам.

Рассмотрен частный случай, когда объект обладает линейной амплитудной анизотропией (линейный дихроизм), т.е.:

$$\boldsymbol{M}(\mathbf{r}) = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta(\mathbf{r}) + P(\mathbf{r}) \sin^2 \theta(\mathbf{r}) & \frac{(1 - P(\mathbf{r})) \sin 2\theta(\mathbf{r})}{2} \\ \frac{(1 - P(\mathbf{r})) \sin 2\theta(\mathbf{r})}{2} & \sin^2 \theta(\mathbf{r}) + P(\mathbf{r}) \cos^2 \theta(\mathbf{r}) \end{pmatrix},$$
(2)

где $\theta(\mathbf{r})$ - азимут анизотропии, $P(\mathbf{r})$ - величина анизотропии (показывает относительное поглощение двух ортогональных компонент поля). Показано, что для определения параметров $\theta(\mathbf{r})$ и $P(\mathbf{r})$ достаточно измерить 3 корреляционные функции $G^{(x)}(\mathbf{r}), G^{(y)}(\mathbf{r}), G^{(d)}(\mathbf{r})$. В этом случае имеем:

$$P(\mathbf{r}) = \frac{G^{(x)}(\mathbf{r}) + G^{(y)}(\mathbf{r})}{G_0(\mathbf{r})} - 1,$$
(3)

где $G_0(\mathbf{r}) = s \int |\Gamma(\boldsymbol{\rho} - \mathbf{r})|^2 d^2 \rho$ - параметр системы, измеренный в случае, когда объект отсутствует. Определить величину азимут анизотропии можно из следующего выражения

$$\theta(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} (\arcsin\{\frac{2C(\mathbf{r})(P^2(\mathbf{r})+1)}{\sqrt{2}(P^2(\mathbf{r})-1)(C(\mathbf{r})+1)}\} - \frac{\pi}{4}),\tag{4}$$

где $C(\mathbf{r}) = \frac{(G^{(y)}(\mathbf{r}) - G^{(d)}(\mathbf{r}))}{(G^{(x)}(\mathbf{r}) + G^{(d)}(\mathbf{r}))}.$

В раздел 2.1.2 обсуждается идея вычислительной ФП и возможности использования глубокого обучения. Рассмотрены объекты, обладающие одним из 4-х типов анизотропии: линейная амплитудная анизотропия - ЛА, линейная фазовая анизотропия - ЛФ, циркулярная амплитудная анизотропия - ЦА, циркулярная фазовая анизотропия - ЦФ. 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. Разработанная нейронная сеть, названная «GPNN», состоит из блока преобразования, блока классификации и блока предсказания параметров (см. рис. 1).



Рис. 1: Блок схема нейронной сети GPNN.

Нейронная сеть принимает на вход значения пяти измеренных корреляционных функций. На выходе GPNN рассчитывается наиболее вероятный типа анизотропии в каждой точки объекта, а также величина параметров анизотропии. Точность «Блок классификации» определяется с помощью метрики F1-score. Результат применения GPNN для классификации типа анизотропии приведен на рис.2.



Рис. 2: Пример работы GPNN при решении задачи классификации. а) Реальное распределение типа анизотропии по объекту. б) Распределение типа анизотропии полученное с помощью GPNN. НО - неопределенный тип анизотропии.

Точность Блока предсказания параметров характеризуется средней абсолютной ошибкой (САО), величина которой отражает среднее отклонение предсказанной величины от истинного значения. При этом величина САО каждого из параметров не превышает 1% от его максимального значения.

Раздел 2.2 посвящен теории квантовой фантомной поляриметрии с использованием бифотонов, генерируемых в результате спонтанного параметрического рассеяния. В раздел 2.2.1. в соответствии с [14] описаны основные свойства бифотонов, в частности приведен расчет некоторых корреляционных функций полевых операторов . В разделе 2.2.2. показано, что в двухлинзовой схеме корреляционная функция операторов токов из объектного и восстанавливающего каналов зависит от элементов матрицы Джонса объекта:

$$G(\mathbf{r}) = \frac{l^2 s_p}{L^2 (1 - l_2/f)^2} \Gamma_{12}(0) \Gamma_{int} K(-\frac{l}{L} \mathbf{r}),$$
(5)

где l, s_p, L, l_2, f, F - геометрические параметры установки, $K(-\frac{l}{L}\mathbf{r})$ - функция элементов матрицы Джонса с учетом изменения масштаба ввиду наличия линз в оптических каналах, $\Gamma_{12}(0)$ - корреляционная функция полевых операторов.

Более того, показано, что для формирования фантомного изображения необходимо, чтобы геометрия системы удовлетворяла следующему условию:

$$(1 - \frac{l_2}{f})L + (1 - \frac{L_2}{F})l = 0.$$
(6)

В разделе 2.2.3 обсуждается проблема неунитарности матрицы Джонса в общем виде. Поэтому для построения теории фантомной поляриметрии предлагается использовать модифицированные матрицы Джонса:

$$\hat{M}^{mod} \left| e \right\rangle = \frac{1}{\kappa} \hat{M} \left| e \right\rangle, \tag{7}$$

где $|e\rangle$ поляризационное состояние падающего на объект фотона; $\kappa = \sqrt{|M_{11}\alpha + M_{12}\beta|^2 + |M_{21}\alpha + M_{22}\beta|^2} = \sqrt{p}$, а *p* - вероятность прохождения фотона через поляризационный элемент.

Для объектов, обладающих линейно амплитудной анизотропией и изотропным поглощением, получено, что:

$$T (\mathbf{r}) = \frac{\Upsilon (\mathbf{r}) + g_1 (\mathbf{r}) + g_2 (\mathbf{r})}{2}$$

$$P (\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{g_1 (\mathbf{r}) + g_2 (\mathbf{r}) - \Upsilon (\mathbf{r})}{2}};$$

$$\theta (\mathbf{r}) = \arctan \frac{2g_3 (\mathbf{r}) - g_1 (\mathbf{r}) - g_2 (\mathbf{r})}{\Upsilon (\mathbf{r}) + g_1 (\mathbf{r}) - g_2 (\mathbf{r})}$$
(8)

где $T(\mathbf{r})$ - коэффициент прозрачности, не зависящий от поляризации падающего излучения; g_1, g_2, g_3 - нормированные корреляционные функции, измеренные в различных конфигурациях установки;

 $\Upsilon^{2}(\mathbf{r}) = (g_{1}(\mathbf{r}) - g_{2}(\mathbf{r}))^{2} + (2g_{3}(\mathbf{r}) - g_{1}(\mathbf{r}) - g_{2}(\mathbf{r}))^{2}.$

Третья глава посвящена описанию экспериментальной реализации фантомной поляриметрии в псевдотепловом излучении. В разделе 3.1. описаны разработанные источники псевдотеплового излучения: источник на основе вращающихся матовых дисках и источник на основе пространственного модулятора света. На базе первого источника был собран экспериментальный стенд, реализующий ФП в неполяризованном псевдотепловом свете (см. рис3) - разделе 3.2.



Рис. 3: Принципиальная схема экспериментальной установки для реализации классической ФП. В состав установки входят источник деполяризованного псевдотеплового света, формирующие диафрагмы, коллимирующая и фокусирующая линзы, светоделитель, поляризационночувствительный образец который помещается в предметное плечо, линейный поляризатор, установленный в восстанавливающее плечо; ПЗС-датчик.

В соответствии с теоретическими выкладками проводятся измерения необходимых корреляционных функций для каждого пикселя ПЗС-матрицы. При измерении с помощью ПЗС матрицы производится последовательная съемка кадров. Так, для расчета одной корреляционной функции необходимо сделать 4000 независимых фотографий. Как отмечалось выше, время корреляции нашего источника порядка 5 мс, в связи с этим выдержка одного кадра устанавливалась равной 50 мкс, а временная задержка между кадрами 120 мс, что обеспечивает статистическую независимость отдельных измерений.

В разделе 3.3. исследуется процесс формирования поляризационных фантомных изображений. В качестве объекта выбран 4-х секционный образец. Как отмечалось выше, для реконструкции поляризационного фантомного изображения необходимо измерить корреляционные функции $G^{(0)}(\mathbf{r})$, $G^{(\pi/4)}(\mathbf{r})$, $G^{(\pi/2)}(\mathbf{r})$, которые представленны на рис. 4(b,d). Каждый пиксель на рис. 4(b-d) получен путем усреднения 4000 кадров. Кроме того, поскольку радиус корреляции светового луча в плоскости камеры в несколько раз превышал размер пикселя, для повышения контрастности изображения была проведена процедура увеличения пикселя. Все изображение разбивалось на новые пиксели размером 8х8 исходных пикселей ПЗС с усредненной по исходным пикселям информацией. Увеличенные таким образом пиксели изображены и хорошо видны на рис. 4(b-d).



Рис. 4: Амплитудные фантомные изображения 4-х секционного объекта. (а) Схематическое изображение объекта. В сегменте 1 расположен поляризатор, ориентированный вдоль оси х, в сегменте 2 - под углом $\frac{\pi}{4}$, в сегменте 3 - под углом $\frac{\pi}{2}$, а в сегменте 4 содержит неполяризующую пленку; (б), (в) и (г) Экспериментально измеренные корреляционные функции $G^{(0)}(\mathbf{r}), G^{(\pi/4)}(\mathbf{r})$ и $G^{(\pi/2)}(\mathbf{r})$, соответственно. Масштабы по горизонтальной и вертикальной осям одинаковы для всех изображений и даны в пикселях. Всей шкале соответствует 1200 мкм. Цветом отображены значения $G^{(\alpha)}(\mathbf{r})$, восстановленные из экспериментальных данных.

Распределения, показанные на рис. 4, представляют собой амплитудные фантомные изображения, полученные в поляризованном свете.

Зная все 3 корреляционные функции $G^{(\alpha)}(\mathbf{r})$ можно восстановить поляризационные изображения $P(\mathbf{r})$ и $\theta(\mathbf{r})$ в соответствии с уравнениями (3) и (4). В секциях 1-3 величина $P(\mathbf{r}) = 0.18 \pm 0.01$, а в секции 4, где нет поляризатора, $P(\mathbf{r}) = 0.98 \pm 0.05$. Зная $P(\mathbf{r})$ и используя уравнение (4), восстанавливаем пространственное распределение параметра $\theta(\mathbf{r})$. Результат представлен на рис. 5.



Рис. 5: Поляризационное фантомное изображение $\theta(\mathbf{r})$ 4-х секционного образца. Цветная полоса отображает значения $\theta(\mathbf{r})$ (в градусах), оспределенные из экспериментальных данных. Серый цвет соответствует непрозрачным областям, а белый — области без дихроизма (участок без поляризатора).

Четвертая глава посвящена экспериментальной реализации фантомной поляриметрии в квантовом свете. В эксперименте в качестве источника бифотонов используется нелинейный кристалл *BBO* толщиной 0.5 мм. В этом кристалле осуществляется процесс спонтанного параметрического рассеяния (СПР), когда один фотон накачки распадается на два (сигнальный и холостой). Накачкой служит излучение диодного лазера на длине волны $\lambda_{pump} = 405$ нм и длиной когерентности 1м. Размер пучка накачки ~ 1.1 мм. Кристалл вырезан таким образом, что вдоль конуса с углом раствора 3° распространяются сигнальные и холостые фотны СПР на длине волны 810 нм (вырожденный неколлинеарный режим, тип взаимодействия e - oo).

В разделе 4.1 описана экспериментальная методика. Указанный СПР-источник использован при создании экспериментальных установок, реализующих принцип ФП в квантовом свете. Точнее сказать, собраны две установки с несколько отличающимися оптическими схемами (см. рис. 6).



Рис. 6: Схемы экспериментальных установок, реализующих принцип фантомногй поляриметрии в квантовом свете: а) однолинзовая схема б) двухлинзовая схема.

Розовым цветом на рисунках изображены направления распространения фотонов из СПРисточника. Объект помещается в нижний (объектный) канал непосредственно перед коллиматором оптоволокна, соединенного с фотодетектором. В установке использовались коллиматоры с фокусным расстоянием 7, 5 мм. Верхний канал является восстанавливающим. В этом канале помещается сканирующая щель, которая может перемещаться перпендикулярно направлению распространения фотонов. Перед коллиматорами установлены интерференционные фильтры, пропускающие излучение СПР на длинах волн от 805 нм до 815 нм. Конфигурации установок отличаются количеством используемых линз. Положения линз указаны на рисунках. В созданных установках для регистрации фотонов использовались счетчики одиночных фотонов SPD_V1 и время-цифровой преобразователь TDC-6, изготовленные коллективом.

При этом геометрия системы удовлетворяет соотношению квантового фантомного изображения, определенного выражением (6).

В восстанавливающем плече проводится сканирование пучка фотонов сканирующей щелью. При каждом положении сканирующей щели происходит регистрация фотоотсчетов и регистрация времени их появления.

В разделе 4.2 обсуждается исследование процесса восстановления распределения поляризационных свойств в квантовой фантомной поляримтерии. Для того чтобы продемонстрировать возможность получения пространственного распределения поляризационных свойств объекта, мы взяли двойную щель с наложенным поляризатором, поляризационная ось которого была повернут на угол 30° относительно базисного горизонтального направления. Размер каждой щели 150 мкм, а расстояние между ними ~ 250 мкм.

Разработана экспериментальная методика, состоящая из: измерения числа совпадений, измерения нормировочной кривой, нормировки и вычисления модуля азимута анизотропии. На рис. 7(а) приведена зависимость числа совпадений от положения сканирующей щели, полученная в конфигурации установки с одной линзой. Кривая на рис. 7(б) является нормировочной и измеряется, когда объект изъят из плеча. Нормированные кривые представлены на рис.7(в). Сформированное распределение азимута анизотропии исследуемого объекта представлено на рис. 7(г).



Рис. 7: а) Количество совпадений между фотоотсчетами на собирающем и сканирующем детекторах в зависимости от положения сканирующей щели в конфигурации установки с одной линзой. Красными точками обозначены числа совпадений при облучении объекта горизонтально поляризованным излучением, полученные из экспериментальных данных. Зелеными точками обозначены числа совпадений при облучении объекта вертикально поляризованным излучением полученные из экспериментальных данных. Зелеными точками обозначены числа совпадений при объекта вертикально поляризованным излучением полученные из экспериментальных данных. Точки соединены линиями для наглядности; б) Нормировочная кривая; в)Нормированные фантомные амплитудные изображения щелей, снятые при облучении объекта фотонами с горизонтальной (красная кривая) и вертикальной (зеленая кривая) поляризациями; г) Распределение модуля азимута анизотропии в плоскости двущелевого образца. Красным точкам соответствуют значения, полученные из экспериментальных данных. Горизонтальной пунктирной линией изображен угол физически установленного поляризатора.

Восстановленное поляризационное изображение показывает, что измеренное направление поляризационного директора пленочного поляризатора составляет $30^{\circ} \pm 4\%$ по отношению к горизонту, что находится в достаточно хорошем согласии с направлением, под которым был установлен поляризатор в данном эксперименте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведены всесторонние исследования метода фантомной

поляриметрии в формализме матриц Джонса. В частности, теоретически показано, что в случае использования неполяризованного псевдотеплового излучения информация о элементах матрицы Джонса объекта извлекается из набора взаимных корреляционных функций. Для объектов, чьи поляризационные свойства описываются линейным дихроизмом (линейная амплитудная анизотропия), распределение азимута анизотропии $\theta(r)$ и величины анизотропии P(r) восстанавливаются из измерения трех корреляционных функций при измерении горизонтально, вертикально и диагонально поляризованной компоненты излучения.

С использованием матовых дисков был создан лабораторный источник неполяризованного псевдотеплового излучения, с радиусом корреляции 56 ± 3.2 мкм и степенью деполяризации $93\pm3\%$. На основе фазового пространственного жидкокристалического модулятора света создан источник поляризованного псевдотеплового излучения с регулируемым радиусом корреляции в диапазоне от 10 до 100 мкм. Создан экспериментальный стенд, реализующий принцип классической фантомной поляриметрии. Экспериментально продемонстрирована эффективность фантомной поляриметрии с использовании неполяризованного псевдотеплового излучения, в применении к объектам с линейным дихроизмом; полученные экспериментальные распределения азимута анизотропии $\theta(\mathbf{r})$ и величины анизотропии $P(\mathbf{r})$ хорошо сходятся с предсказанными значениями.

Продемонстрировано, что бифотоны, генерируемые в процессе спонтанного параметрического рассеяния, позволяют реализовать принцип квантовой фантомной поляриметрии. При этом установлено, что в квантовой ФП поляризационные свойства объекта могут быть описаны операторами, построенными на основе модифицированных матриц Джонса. Для объектов, обладающих линейным дихроизмом и изотропным поглощением показано, что элементы матрицы Джонса восстанавливаются также из комбинаций трех корреляционных функций, измеренных при горизонтальной, вертикальной и диагональной поляризации проходящего через объект фотона.

Создан экспериментальный стенд, который включается в себя: СПР-источник бифотонов на длине волны 810нм, схему квантовой фантомной поляриметрии и схему совпадений с использованием счетчиков одиночных фотонов и время-цифровых преобразователей. Разработана экспериментальная методика для измерения модуля азимута анизотропии объектов, обладающих линейным дихроизмом. Экспериментально показана эффективность квантовой фантомной поляриметрии в применении к задаче определения модуля азимута анизотропии. Восстановлено распределение модуля азимута анизотропии объекта, представляющего собой двойню щель с наложенным поляризатором с азимутом анизотропии 30°. При этом распределение было усреднено вдоль вертикально оси, а ошибка определения модуля азимута анизотропии составила 4%.

Разработана и обучена многослойная полносвязная нейронная сеть «GPNN». Обучение осуществлено на модельных даных. Показано, что нейронная сеть способна определить пространственное распределение типа анизотропии с точностью превышающей 95%. Модель также способна предсказывать абсолютное значение параметров анизотропии (P(r), $\theta(r)$, $\Delta(r)$, $\alpha(r)$, R(r), $\varphi(r)$) с ошибкой порядка 1%.

Список публикаций по теме диссертации, входящих в базы данных Web of Science, Scopus, РИНЦ:

1. Magnitskiy S., **Agapov D.**, and Chirkin A. Ghost polarimetry with unpolarized pseudo-thermal light //Optics Letters. – 2020. – Т. 45. – №. 13. – С. 3641-3644. JIF WoS: 3.56; вклад соискателя 70%.

2. Magnitskiy S., **Agapov D.**, and Chirkin A. Quantum ghost polarimetry with entangled photons //Optics Letters. – 2022. – Т. 47. – №. 4. – С. 754-757. JIF WoS: 3.56; вклад соискателя 60%.

3. Агапов Д. П., Беловолов И. А., Гостев П. П., Магницикй С. А., Фроловцев Д. Н., Чиркин А. С. Статистические особенности псевдотеплового излучения, формируемого пространственным модулятором света //ЖЭТФ. – 2022. – Т. 162. – №. 2. – С. 215-225. JIF WoS: 1.111; вклад соискателя 40%.

4. Балакин Д.А., **Агапов Д. П.**, Гостев П. П., Магницикй С. А., Фроловцев Д. Н., Чиркин А. С. Формирование изображений в фантомной волоконной эндоскопии методом редукции измерений //ЖЭТФ. – 2022. – Т. 135. – №. 6. – С. 779-788. JIF WoS: 1.111; вклад соискателя 15%.

5. Магницкий С. А., **Агапов Д. П.**, Беловолов И. А., Гостев П. П., Фроловцев Д. Н., и Чиркин, А. С. Фантомная поляриметрия в классическом и квантовом свете //Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. - 2021. – N.6. –12-25. Импакт-фактор РИНЦ: 0.516; вклад соискателя 25%.

6. Chirkin A. S., Gostev P. P., **Agapov D. P.**, and Magnitskiy S. A. Ghost polarimetry: ghost imaging of polarization-sensitive objects //Laser Physics Letters. – 2018. – Т. 15. – №. 11. – С. 115404. JIF WoS: 1.7; вклад соискателя 30%.

7. Гостев П.П., **Агапов Д.П.**, Дёмин А.В., Левин Г.Г., Мамонов Е.А., Магницкий С.А. Измерение эффективности детектирования счётчиков одиночных фотонов на базе лавинных фотодиодов методом спонтанного параметрического рассеяния с асимметричными по спектру каналами //Измерительная техника. – 2018. – №. 12. – С. 27-32. Импакт-фактор – РИНЦ 0.432; вклад соискателя 30%.

Иные труды соискателя:

8. Agapov D., Magnitskiy S., and Chirkin A. Experimental obtaining of polarization ghost images by ghost polarimetry //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 220. – С. 03002; вклад соискателя 70%.

Результаты, отраженные в диссертационной работе, были представлены на следующих международных конференциях: Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023», г. Москва, апрель 2023; 20th International Conference Laser Optics «ICLO 2022», г. Санкт-Петербург, Россия, 20-24 июня 2022; XII Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС-2021), г. Казань, октябрь 2021; Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021», г. Москва, 21 апреля 2021; III Международная конференция «Фотоника и квантовые технологии, г. Казань, декабрь 2020; 19th International Conference on Laser Optics "ICLO 2020", г. Санкт-Петербург, ноябрь 2020; XIII Международные чтения по квантовой оптике (IWQO-2019), Владимир, Россия, сентябрь 2019; XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова (Волны 2019), Красновидово, Московская область, Россия, май 2019; Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», Москва, Россия, апрель 2019; Конференция по фотонике и квантовым технологиям, Свияжские Холмы, Казань, Россия, Россия, декабрь 2019; The Nigmatullin's Readings-2018 (ICNR-2018), Казань, Россия, октябрь 2018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Moreau, P. A., Toninelli, E., Gregory, T., & Padgett, M. J. Ghost imaging using optical correlations //Laser & Photonics Reviews. - 2018. - T. 12. - №. 1. - C. 1700143.
- [2] Wang, F., Wang, C., Chen, M., Gong, W., Zhang, Y., Han, S., & Situ, G. Far-field super-resolution ghost imaging with a deep neural network constraint //Light: Science & Applications. – 2022. – T. 11. – №. 1. – C. 1-11.
- [3] Shirai, T., Kellock, H., Setälä, T., & Friberg, A. T. Visibility in ghost imaging with classical partially polarized electromagnetic beams //Optics letters. – 2011. – T. 36. – №. 15. – C. 2880-2882.
- [4] Kellock, H., Setälä, T., Shirai, T., & Friberg, A. T. Image quality in double-and triple-intensity ghost imaging with classical partially polarized light //JOSA A. – 2012. – T. 29. – №. 11. – C. 2459-2468.
- [5] Shi, D., Hu, S., Wang, Y. Polarimetric ghost imaging //Optics Letters. 2014. T. 39. №. 5. C. 1231-1234.
- [6] Shi, D. F., Wang, F., Jian, H., Kai-Fa, C., Yuan, K., Shun-Xing, H., & Ying-Jian, W. Compressed polarimetric ghost imaging of different material's reflective objects //Optical Review. – 2015. – T. 22. – №. 6. – C. 882-887.
- [7] Dongfeng, S., Jiamin, Z., Jian, H., Yingjian, W., Kee, Y., Kaifa, C., ... & Wenyue, Z. Polarizationmultiplexing ghost imaging //Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – T. 102. – C. 100-105.
- [8] Kellock, H., Setälä, T., Friberg, A. T., & Shirai, T. Polarimetry by classical ghost diffraction //Journal of Optics. – 2014. – T. 16. – №. 5. – C. 055702.
- [9] Hannonen, A., Friberg, A. T., Setälä, T. Classical spectral ghost ellipsometry //Optics Letters. –
 2016. T. 41. №. 21. C. 4943-4946.
- [10] Hannonen A., Friberg A. T., Setälä T. Classical ghost-imaging spectral ellipsometer //JOSA A. 2017. – T. 34. – №. 8. – C. 1360-1368

- [11] Vega A., Pertsch T., Setzpfandt F., Sukhorukov A. A. Metasurface-assisted quantum ghost discrimination of polarization objects //Physical Review Applied. – 2021. – T. 16. – №. 6. – C. 064032.
- [12] Yoon S. J., Lee J. S., Rockstuhl C., Lee C., Lee K. G. Experimental quantum polarimetry using heralded single photons //Metrologia. – 2020. – T. 57. – №. 4. – C. 045008.
- [13] Restuccia S., Gibson G. M., Cronin L., Padgett M. J. Measuring optical activity with unpolarized light: Ghost polarimetry //Physical Review A. – 2022. – T. 106. – №. 6. – C. 062601.
- [14] Chirkin A. S., Makeev E. V. Parametric image amplification at low-frequency pumping //Journal of Modern Optics. – 2006. – T. 53. – №. 5-6. – C. 821-834.