

*На правах рукописи*

Гончаров Алексей Сергеевич

Лазерная диагностика аберраций человеческого глаза  
с использованием фазовой томографии

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 2008

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов и кафедре медицинской физики физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор  
Шмальгаузен Виктор Иванович

кандидат физико-математических наук  
Ларичев Андрей Викторович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Рябухо Владимир Петрович

кандидат физико-математических наук  
Вохник Ольга Михайловна

Ведущая организация: Институт проблем лазерных и информационных  
технологий Российской академии наук (ИПЛИТ РАН)

Защита состоится 17 апреля 2008 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного  
совета Д 501.001.31 в Московском государственном университете  
им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ,  
дом 1, стр. 62, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » марта 2008 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.31  
кандидат физ.-мат. наук, доцент

Т.М. Ильинова

## **Актуальность темы**

Глаз — сложная фотооптическая физиологическая система. Лучи света от окружающих предметов, падающие на систему, преломляются, фокусируются на сетчатке и дают изображение этих предметов. Плохое зрение человека часто связано с нарушением оптической системы глаза, когда отсутствует четкая фокусировка изображения на сетчатку. Распространенными заболеваниями являются близорукость (миопия) или дальнозоркость (гиперметропия), но встречаются и более сложные случаи, когда изображение ухудшается за счет аберраций высокого порядка. К примеру, при кератоконусе к искажению волнового фронта приводит нерегулярная форма роговицы.

Исследование особенностей рефракционного аппарата глаза человека уже давно привлекает внимание исследователей. Пионерские работы Смирнова положили начало изучению волновых аберраций, возникающих из-за несовершенства оптических структур глаза. Актуальность этих исследований особенно возросла в последнее время, когда были разработаны различные методы персонализированной коррекции рефракционных патологий, такие как имплантация интраокулярных линз, лазерная коррекция зрения и т.д. Их успех в значительной степени определяется достоверным измерением оптических параметров глаза.

Обычно для диагностики используют авторефракторы и корнеал (роговичные)-топографы. Возможности этих приборов ограничены. Так, авторефракторы позволяют определить суммарные аберрации глаза только второго порядка (астигматизм и дефокус), что явно не достаточно для полной диагностики глаза. Роговичный топограф определяет лишь форму передней поверхности роговицы, в то время как аберрации вносит и задняя ее поверхность, а также другие элементы оптической системы глаза, например, хрусталик. Причем, известны случаи, когда хрусталик, к примеру, является основным источником аберраций.

Ограничения существующих приборов и методик делают актуальным развитие новых методов, позволяющих определить полные аберрации глаза и их распределение между оптическими элементами глаза.

Для измерения полных аберраций глаза с успехом используются датчики волнового фронта типа Шака-Гартмана. При этом с помощью лазера малой мощности на сетчатке создается виртуальный опорный источник. Рассеянное излучение, вышедшее из глаза, направляется на датчик волнового фронта (датчик Шарка-Гартмана), информация с которого поступает на компьютер. По измеренным локальным наклонам волновой фронт восстанавливается по полиномам Цернике или путем прямого интегрирования. Таким образом, получается фазовая картина суммарных аберраций глаза, включая и высокие порядки. Преимуществом метода является измерение профиля аберраций одновременно во всей апертуре зрачка.

Однако, локализация источников искажения данным методом также невозможна. То есть нельзя определить на каком расстоянии вдоль оптической оси от вершины роговицы возникают те или иные аберрации, соответственно нельзя определить, какой элемент их вносит: хрусталик, роговица или другие структуры оптической системы глаза. Теоретически, используя систему Шака-Гартмана и корнеал-топограф и полагая, что аберрации вносят только роговица или хрусталик, можно разделить источники аберраций. Однако, на практике, возникают значительные трудности с сопряжением этих двух систем. Во-первых, человеческий глаз весьма сложно зафиксировать, по этому трудно настроить прибор так, что бы оптическая ось прибора совпадала с визуальной осью глаза, а тем более настроить оба прибора так, что бы измерения снятые одним прибором и другим были сделаны вдоль одной и той же оси. Во вторых, характер получаемых данных одним прибором и другим – различен, и при приведении их к одному и тому же виду возникает дополнительная ошибка пересчета.

Поэтому возникла необходимость разработки приборов, позволяющих определять как силу аберраций высоких порядков, так их источники.

В астрономии для решения задач локализации источников аберраций при прохождении излучения через атмосферу были разработаны методы модальной томографии. Поставим задачу адаптации этих методов для исследования человеческого глаза. Глава 1 данной работы посвящена разработке и исследованию

одного из методов, позволяющего разделить вклад отдельных элементов глаза в суммарные искажения. В основу указанных методов положен принцип представления искажающей среды в виде набора конечного числа фазовых экранов, расположенных перпендикулярно оптической оси. С помощью датчика, расположенного в плоскости, сопряженной с плоскостью приемной апертуры, определяются картины фазовых искажений от некой конфигурации опорных источников. Как можно заметить, зарегистрированный от каждого опорного источника волновой фронт будет различаться, поскольку излучение проходит различные участки фазовых экранов. Обработав эти данные можно определить, какие искажения вносит каждый экран.

В случае определения аберраций глаза человека, измерения осложняются наличием спекл-модуляции в рассеянном сетчаткой лазерном излучении, затрудняющей регистрацию волнового фронта излучения, вышедшего из глаза. Спекл-поле промодулировано как по амплитуде так и по фазе. Поэтому измеренный датчиком профиль волнового фронта в общем случае несет информацию как об аберрациях оптических элементов глаза, так и о характеристиках спекл-поля. Как правило, нас интересует именно информация об аберрациях глаза. При этом, необходимо обеспечить высокую относительную точность каждого измерения, так как метод модальной томографии использует разность измерений волнового фронта от разных опорных источников. Следовательно, необходимо каким-то образом устранить влияние фазово-амплитудной модуляции спекл-поля на результаты измерений. Для этого применяются методы, основанные на некогерентном суммировании множества различных реализаций спекл-поля.

Одним из подходов является использование широкополосных источников излучения (например суперлюминисцентных диодов), такие методы мы в дальнейшем будем называть спектральным усреднением. Другой подход основан на усреднении реализаций спекл-поля, получаемых при смещении опорного источника по поверхности сетчатки. Для его реализации в измерительную систему помещается специальное сканирующее устройство. В дальнейшем мы будем называть этот метод пространственным усреднением. Оба описанных метода ранее

применялись при регистрации волнового фронта рассеянного сетчаткой глаза излучения, однако эффективность методов исследована не была. Так, изучение метода пространственного усреднения ограничивалось визуальной оценкой качества гартманограммы. Изучение метода спектрального усреднения ранее не проводились. Кроме того, эффективность описанных методов существенно зависит от свойств рассеивателя, в нашем случае сетчатки глаза человека. Глава 2 настоящей работы посвящена теоретическому описанию, а также численному и экспериментальному исследованию указанных методов подавления спекл-структуры.

Точность восстановления волнового фронта в значительной степени зависит от распределения интенсивности в сечении входного пучка. Наличие амплитудной составляющей в спекл-структуре рассеянного сетчаткой глаза излучения уменьшает точность измерения датчиком волнового фронта. Остаточная спекл-структура может не позволить провести измерения с необходимой для использования метода модальной томографии точностью. Так, смещение каждого из конфигурации сформированных опорных источников по поверхности сетчатки в методе пространственного усреднения, не должно превышать расстояния между ними, что ограничивает количество усредняемых реализаций спекл-структуры и может привести к неполному ее подавлению.

За прошедшие годы были предложены разнообразные методы, позволяющие качественно оценивать и измерять профиль волнового фронта. Наиболее популярными в настоящее время являются интерферометрические устройства, использующие когерентное сложение волн и датчики типа Шака-Гартмана. Обладая многими преимуществами, точность упомянутых методов в значительной степени зависит от распределения интенсивности в сечении входного пучка, что ограничивает область их применения.

В главе 3 данной работы для регистрации формы волнового фронта предлагается использовать конфокальную  $4-f$  систему с фазовым ножом в качестве преобразователя пространственного спектра сигнала.

Фазовый нож, как метод визуализации фазовых искажений известен уже довольно давно, однако его использование ограничивалось лишь качественной

оценкой профиля фазовых искажений. Недавно была предложена модификация схемы с фазовым ножом улучшающая линейность преобразования «фаза-интенсивность» и позволяющая визуализировать первую производную функции фазового распределения. Было показано, что такая схема обладает малой чувствительностью к амплитудной модуляции входного излучения. Однако этот метод по-прежнему оставался лишь качественным.

### **Цели работы и решаемые задачи**

Цель настоящей работы заключается в разработке неинвазивного метода раздельного измерения аберраций оптических элементов глаза. Метод должен обеспечивать измерения в условиях сильных флуктуаций интенсивности, обусловленных наличием спекл-структуры в рассеянном сетчаткой глаза излучении.

Для выполнения поставленных целей решены следующие задачи:

Разработан и исследован модернизированный метод модальной фазовой томографии для раздельного измерения аберраций оптических элементов человеческого глаза. Метод основан на анализе волнового фронта от нескольких опорных источников, формируемых лазерным излучением на сетчатке глаза.

Проведено подробное исследование методов подавления спекл-структуры, позволяющих повысить точность измерения датчиком Шака-Гартмана волнового фронта излучения опорных источников в условиях сильных флуктуаций интенсивности.

Разработан и исследован датчик волнового фронта на основе фазового ножа, позволяющий проводить количественные измерения в условиях сильных флуктуаций интенсивности для целей модальной фазовой томографии.

### **Научная новизна**

Разработан и исследован модернизированный метод модальной фазовой томографии для исследования аберраций глаза человека, основанный на анализе

волнового фронта от нескольких опорных источников, формируемых на сетчатке глаза.

Впервые проведено подробное исследование и сравнение методов подавления амплитудной и фазовой составляющих спекл-структуры, основанных на пространственном и на спектральном усреднении множества реализаций спекл-поля, рассеянного сетчаткой глаза.

Впервые предложен и реализован датчик волнового фронта на основе фазового ножа для количественного измерения распределения фазы световой волны.

**Практическая значимость** работы определяется возможностью применения разработанного метода модальной фазовой томографии для исследования аберраций человеческого глаза. Метод позволяет определять вклад различных оптических структур в суммарные аберрации глаза. Проведенное исследование спекл-структуры светового поля, отражённого от сетчатки глаза, позволяет оценить потенциальную точность измерений и обосновать применение сканирующего устройства при определении аберраций глаза. Исследование оптической системы с фазовым ножом показывает возможность её использования в качестве датчика волнового фронта. Использование датчика целесообразно при измерении полей с малыми фазовыми искажениями на фоне сильной пространственной модуляции интенсивности.

### **Защищаемые положения**

1. Метод модальной фазовой томографии на основе анализа волнового фронта от нескольких опорных источников, формируемых на сетчатке глаза, позволяет измерять полные аберрации глаза, а также их распределение между оптическими структурами глаза. Так, метод позволяет определить вклад двух элементов оптической системы глаза для модельных аберраций второго порядка со среднеквадратичной ошибкой не превышающей 0.25 дптр, а также для модельных



аббераций третьего порядка со среднеквадратичной ошибкой не превышающей 0.4 мкм.

2. Пространственное усреднение (сканирование источника по поверхности сетчатки глаза) позволяет понизить контраст спекл-структуры, возникающей при измерении аббераций модели глаза, более чем в 10 раз (что соответствует уменьшению дисперсии флуктуаций фазы с  $0.6\lambda$  до  $0.05\lambda$ ) при диаметре окружности сканирования 0.15 мм и характерном размере неоднородностей сетчатки около 6 мкм.

3. Спектральное усреднение с использованием широкополосного излучения (суперлюминисцентный диод с  $\Delta\lambda/\lambda=0.02$ ) при диапазоне значений разности хода лучей, участвующих в формировании спекл-картины равном  $16.7\lambda$ , позволяет снизить контраст спекл-структуры, возникающей при измерении аббераций модели глаза, в 1.5 раза (что соответствует уменьшению дисперсии флуктуаций фазы с  $0.6\lambda$  до  $0.4\lambda$ ).

4. Диапазон линейной работы датчика волнового фронта на основе фазового ножа может быть увеличен путем использования протяженного источника исходного светового поля. Использование источника с угловым размером 0.5 градусов при  $\lambda=0.63$  мкм расширяет диапазон линейной работы датчика более чем в 5 раз.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на четырех международных конференциях: третьей международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, 18-21 октября 2004 г.), международной конференции ICONO/LAT 2005 (Санкт-Петербург, 11-15 мая 2005 г.), XVI-ой международной конференции «Лазеры в науке, технике, медицине» (Адлер, 19-23 сентября 2005 г.), международной конференции ICONO/LAT 2007 (Минск, 28 мая – 1 июня 2007 г.), а также изложены в семи авторских публикациях, четыре из которых опубликованы в изданиях, входящих в список ВАК.

Список опубликованных работ приведен в конце настоящего реферата.

## **Структура и объем работы**

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объем работы составляет 143 страницы, включая 86 рисунков и 2 таблицы. Библиография содержит 105 работ.

## **Личный вклад**

Все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при его определяющем участии.

## **Содержание работы**

Во **ВВЕДЕНИИ** кратко обоснована актуальность работы, определены цели диссертационной работы, приведены защищаемые положения и структура диссертации.

В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** предложен и исследован новый метод модальной фазовой томографии для диагностики аберраций глаза человека.

В **параграфе 1.1** описаны существующие методики исследования аберраций глаза человека, в том числе с использованием таких приборов как авторефракторы, роговичные топографы и абберометры. Описаны различные томографические методы реконструкции распределения функции, заданной в трехмерном пространстве, в том числе метод обратных проекций, метод ламинографии и модальной томографии.

В **параграфе 1.2** описана модель оптической системы глаза, использующая для моделирования индивидуальных аберраций роговицы и хрусталика комбинацию идеальных линз и ассоциированных с ними фазовыми экранами.

Представлено теоретическое описание предложенного метода модальной фазовой томографии, а также описание общей схемы измерений и восстановления функций фазовых экранов. Для реализации метода предполагается проводить серию измерений полных аберраций глаза под различными углами к оптической оси, каждое из которых несет в себе информацию сразу обо всех фазовых экранах.

Однако, тот факт, что при каждом измерении лучи проходят через разные участки экранов позволяет разделить вклады каждого фазового экрана.

**Параграф 1.3** посвящен численному моделированию восстановления aberrаций глаза методом модальной фазовой томографии. Модель глаза, использованная в расчётах, состояла из двух фазовых экранов, зрачка, расположенного между ними, и задней поверхности глаза, на которой формировались опорные источники. В отсутствие фазовых экранов распространение лучей происходило прямолинейно по нормали к волновому фронту. При наличии фазовых экранов суммарный фазовый набег вычисляется путём сложения функций экранов в соответствующих точках. Отличительной особенностью метода в применении к человеческому глазу является наличие преломляющих элементов большой оптической силы – роговицы и хрусталика, приводящее к изменению оптического хода лучей, что необходимо учитывать, как при расчете, так и при томографическом восстановлении. На данной модели глаза получены результаты исследования точности восстановления функций фазовых экранов в зависимости от количества используемых опорных источников, от их углового расположения, а также от количества субапертур датчика волнового фронта.

Также представлены результаты исследования эффективности метода на модели глаза Гюльстранда-Легранда. Расчет проводился методом трассировки лучей. С помощью метода модальной фазовой томографии проведено разделение между роговицей и хрусталиком aberrаций, возникающих при прохождении лучей через сферические поверхности элементов глаза. Также приведены результаты восстановления функций фазовых экранов, расположенных в главных плоскостях роговицы и хрусталика модели глаза Гюльстранда-Легранда.

Кроме того, представлены результаты исследования влияния ошибочного определения параметров модели глаза на точность восстановления функций фазовых экранов.

В **параграфе 1.4** содержится описание экспериментальной установки, построенной по однопроходной схеме. Модель глаза была установлена на поворотном механизме, позволяющем производить вращение вокруг двух осей

(X, Y) перпендикулярных оптической оси системы Z. Для внесения aberrаций в оптическую систему использовались тестовые сферические и цилиндрические линзы оптической силой от  $-6$  до  $6$  дптр. Для каждой комбинации линз проводилось 5 измерений волнового фронта: по центральной оси глаза, и при поворотах на  $\pm 7$  градусов по осям X и Y.

В параграфе представлены результаты экспериментов по восстановлению aberrаций, внесенных тестовыми линзами, методом модальной фазовой томографии.

В параграфе 1.5 содержится описание двух экспериментальных установок, построенных по двухпроходной схеме. Измерения проводились с помощью абберметра. В первом случае, в качестве рассеивателя в модели глаза использовалась стекловолоконная шайба с передней вогнутой гранью, а в качестве источников aberrаций в оптической системе глаза - тестовые сферические и цилиндрические линзы оптической силой от  $-6$  до  $6$  дптр. Во втором случае, в качестве рассеивателя использовалась матовая стеклянная поверхность, а в качестве источников aberrаций в оптической системе глаза – фазовая пластина и сферическая преломляющая поверхность.

В параграфе представлены результаты экспериментов (рис. 1) по восстановлению aberrаций, внесенных в оптическую систему, методом модальной фазовой томографии.

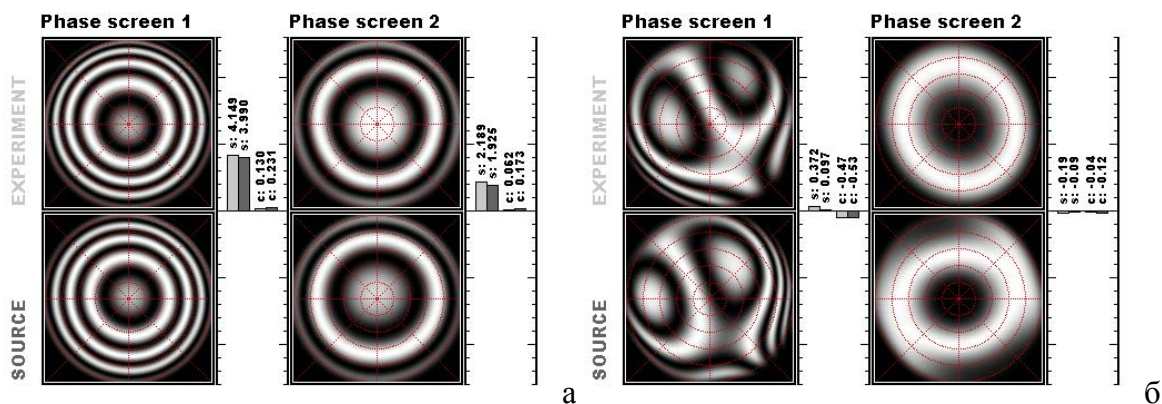


Рис. 1. а) Интерферограммы исходных и восстановленных aberrаций, вносимых двумя линзами. б) Интерферограммы исходных и восстановленных aberrаций, вносимых фазовой пластинкой и сферической преломляющей поверхностью. Эксперименты проведены на установке с двухпроходной схемой.

**ВТОРАЯ ГЛАВА** посвящена исследованию спекл-структуры, возникающей при рассеянии лазерного излучения на сетчатке человеческого глаза и методов её подавления.

В **параграфе 2.1** содержится описание методики измерений аберраций глаза с использованием абберметров с датчиками волнового фронта Шака-Гартмана. При этом, из-за наличия спекл-структуры в рассеянном сетчаткой глаза излучении, значительно уменьшается точность измерения волнового фронта. В параграфе представлено краткое описание двух методов подавления спекл-структуры: пространственного и спектрального усреднения. Оба метода основаны на некогерентном суммировании множества реализаций спекл-поля.

В **параграфе 2.2** описаны особенности строения сетчатки глаза, рассеивания света на слое фоторецепторов и возникновения спекл-структуры в излучении, выходящем из оптической системы глаза. Также обсуждаются особенности моделирования свойств сетчатки при проведении численного и экспериментального исследований.

**Параграф 2.3** посвящен численному моделированию процесса возникновения спеклов при рассеянии света на сетчатке глаза и методов их подавления. Представлено описание компьютерной модели, использующей упрощенную схему рассеяния лазерного излучения на сетчатке глаза человека. Микроструктура сетчатки задавалась матрицей гексагональных элементов, моделирующих мозаику фоторецепторов. Вычисление контраста спекл-структуры проводилось согласно формуле:

$$\gamma = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}, \quad (1)$$

где  $\sigma_I$  – среднее квадратичное отклонение флуктуаций интенсивности в сечении пучка,  $\langle I \rangle$  – средняя интенсивность. Характерный размер спеклов рассчитывался исходя из ширины автокорреляционной функции интенсивности светового поля.

Представлены результаты исследования эффективности подавления спекл-структуры методом пространственного усреднения. В этом случае происходит некогерентное суммирование множества реализаций спекл-поля, получаемых при смещении опорного источника по поверхности сетчатки. На практике такой метод

реализуется внесением в измерительную систему специального сканера, при вращении которого фокальное пятно на сетчатке описывает окружность.

Приведены зависимости контраста амплитудной (рис. 2) и фазовой составляющих спекл-структуры от диаметра контура сканирования. Также представлена зависимость дисперсии флуктуации фазы излучения, от количества усредняемых реализаций. Также представлена зависимость ошибки измерения волнового фронта датчиком Шака-Гартманна от диаметра окружности сканирования. Результаты моделирования сравниваются с оценками, полученными теоретически.

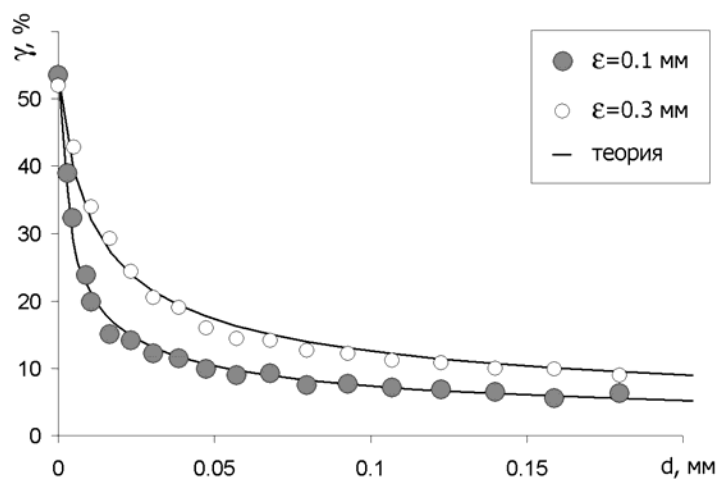


Рис. 2. Зависимость контраста спекл-структуры  $\gamma$  от диаметра сканирования  $d$ .

Представлены результаты исследования эффективности подавления спекл-структуры методом спектрального усреднения. В этом случае происходит некогерентное суммирование множества реализаций спекл-поля, получаемых на различных длинах волн излучения. На практике такой метод реализуется использованием широкополосного источника излучения.

Приведены зависимости контраста спекл-структуры от ширины спектра рассеянного излучения (рис. 3), построенные для различных значений показателя  $\Delta_G$ , характеризующего полный диапазон значений разности хода лучей, участвующих в формировании спекл-картины. Результаты моделирования сравниваются с теоретическими расчетами.

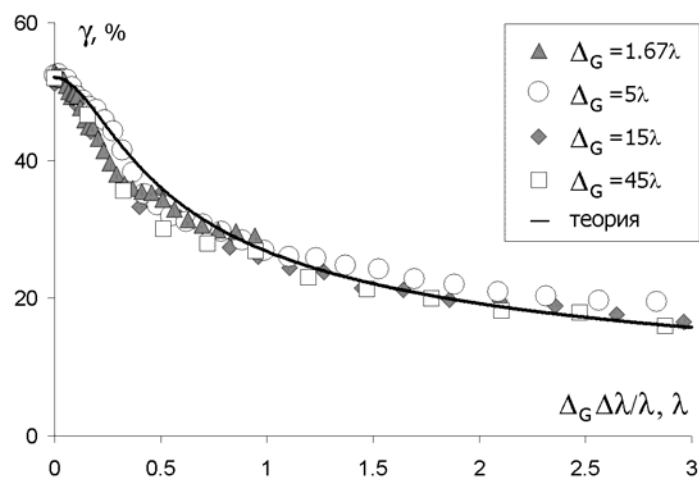


Рис. 3. Зависимость контраста спекл-структуры  $\gamma$  от произведения ширины спектра рассеянного излучения  $\Delta\lambda/\lambda$  и показателя  $\Delta_G$  в сравнении с теоретической зависимостью.

В параграфе 2.4 представлена схема и описание экспериментальной установки. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер  $\lambda=630$  нм сопряженный с одномодовым волокном. Для моделирования рассеивающих свойств сетчатки использовалась стекловолоконная шайба с диаметром волокон 6 мкм. Крепление шайбы позволяло изменять расстояние между ней и линзой, внося расфокусировку в рассеянное излучение. Для осуществления сканирования в оптическую систему помещался сканер, представляющий собой прозрачную клиновидную пластинку, отклоняющую световой пучок от первоначального направления распространения. При вращении пластинки, опорный источник на рассеивателе описывал окружность диаметром 0.15 мм. При исследовании спектрального усреднения лазер заменялся на суперлюминесцентный диод СЛМ-825-02М с длиной волны излучения  $\lambda=825$  нм, шириной спектра  $\Delta\lambda=17$  нм и значением  $\Delta\lambda/\lambda=0.02$ .

Параграф 2.5 посвящен экспериментальному исследованию спекл-структуры и эффективности методов её подавления. Представлена зависимость характерного размера спеклов в рассеянном свете от расфокусировки падающего излучения.

Представлены результаты исследования эффективности подавления спекл-структуры методом пространственного усреднения. Приведены зависимости контраста спекл-структуры и коэффициента подавления спекл-структуры при использовании сканирования от расфокусировки падающего излучения.

Результаты эксперимента сравниваются с результатами численного моделирования.

Представлены результаты исследования эффективности подавления спекл-структуры методом спектрального усреднения. Приведены зависимости контраста спекл-структуры и коэффициента подавления спекл-структуры при использовании широкополосного источника света от расфокусировки падающего излучения. Результаты эксперимента сравниваются с результатами численного моделирования.

Представлены результаты эксперимента с глазом человека при пространственном усреднении с использованием сканера. Изображение зрачка со спекл-структурой излучения, рассеянного сетчаткой глаза, получено с помощью абберметра, использующего лазер малой мощности ( $\lambda=785$  нм). Определен коэффициент подавления спекл-структуры рассеянного излучения при диаметре окружности сканирования фокального пятна по поверхности сетчатки 0.2 мм. Результат эксперимента совпадает с оценками, полученными при численном моделировании.

**ТРЕТЬЯ ГЛАВА** посвящена исследованию оптической системы с фазовым ножом для регистрации формы волнового фронта оптического излучения.

В **параграфе 3.1** приведен обзор существующих методик измерения волнового фронта. В частности, описаны датчики кривизны, Шака-Гартмана, интерферометрические устройства, в том числе интерферометры поперечного и радиального сдвига, теневые приборы, а также их преимущества и недостатки.

В **параграфе 3.2** теоретически описана работа фазового ножа в оптической 4f-системе. Для теоретического описания применялся аппарат Фурье-оптики. Расчеты проводились с использованием двух подходов: приближения малых фазовых модуляций, а также модуляции, заданой гармонической функцией. Получить на выходе 4-f системы интенсивность линейно зависящую от производной функции фазового распределения входного светового поля позволяет смещение кромки фазового ножа в поперечном направлении. При этом дифференцирование будет проводиться по направлению, перпендикулярному кромке ножа. Таким образом



распределение интенсивности в сечении пучка будет пропорционально локальным наклонам волнового фронта, по которым, используя метод наименьших квадратов, проводится количественное измерение распределения фазы входной световой волны. В конце параграфа обсуждается дополнительный алгоритм обработки выходного изображения, использующий четыре изображения с выхода оптической системы, полученных при смещении ножа по разные стороны относительно нулевого порядка дифракции по обеим осям.

**В параграфе 3.3** описана компьютерная модель, используемая для численного моделирования работы датчика. Модель позволяла производить необходимые манипуляции с пространственным спектром заданного на вход системы излучения, имитируя тем самым работу различных фазово-амплитудных транспарантов, являющихся ключевыми элементами системы.

**В параграфе 3.4** описана экспериментальная установка, используемая для физической реализации датчика и проверки его работоспособности при различных режимах работы. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер сопряженный с одномодовым волокном. В качестве источника фазовых искажений в системе использовалось адаптивное зеркало. Измерения волнового фронта контролировались с помощью датчика Шака-Гартмана, на который направлялась часть исходного излучения. В конце параграфа приведен пример восстановления карты волнового фронта датчиком на основе фазового ножа, а также сравниваются передаточные функции датчика, полученные численным моделированием и экспериментально.

**В параграфе 3.5** представлены результаты численного и экспериментального исследования датчика с точечным опорным источником света. Исследование влияния модуляции интенсивности в сечении входного светового пучка обнаружило малую чувствительность датчика на основе фазового ножа к пространственной амплитудной модуляции исследуемого излучения. Установлено, что случайная 100%-ная модуляция интенсивности приводит к ошибке восстановления волнового фронта не более 15%. В эксперименте амплитудная модуляция создавалась шпальной мишенью, имеющей 100% модуляцию пропускания. Результат восстановления профиля фазы при наличии амплитудной модуляции в сравнении с результатом численного расчета показан на рис. 4.

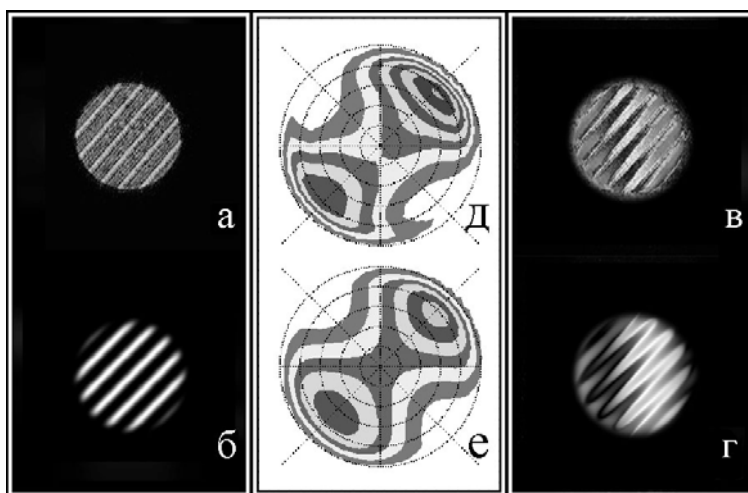


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных и численного моделирования при работе датчика с пучком со 100%-ной модуляцией интенсивности в своём сечении: распределение интенсивности в сечении пучка в эксперименте (а) и при численном расчете (б); изображения, полученные на выходе из системы в эксперименте (в) и при численном расчете (г); восстановленный волновой фронт в эксперименте (д) и при численном расчете (е).

Также определены ошибки восстановления волнового фронта датчиком в зависимости от амплитуды исходной фазовой модуляции и от количества пикселей ПЗС-матрицы фотоприемника. Исследован итерационный алгоритм восстановления, а также метод сканирования, заключающийся в перемещении изображения (спектрального отображения исходного сигнала) на поверхности ножа поперёк его кромки, и регистрации некоего среднего сигнала. Метод позволяет получать более точное соответствие изображения на выходе системы производной исходной функции фазового распределения и, таким образом, увеличить диапазон линейной работы датчика.

В параграфе 3.6 представлены результаты численного и экспериментального исследования датчика с распределенным опорным источником света. Использование такого источника эквивалентно применению операции сканирования изображения по поверхности фазового ножа. В экспериментах для создания распределенного источника на место полупроводникового лазера был установлен светодиод с пиковой длиной волны 650нм. Размер квадратной светоизлучающей площадки диода составлял приблизительно 1.5 мм, что соответствовало угловому размеру источника 30 секунд. Эксперименты показали, что использование распределенного опорного источника света позволяет расширить диапазон линейной работы датчика более чем в 5 раз. В конце параграфа

обсуждается выбор оптимального размера и формы источника. Исследована зависимость точности восстановления волнового фронта от углового размера опорного источника для аберраций различного порядка.

В **параграфе 3.7** обсуждаются особенности конструкции датчика, а также предложены две схемы его реализации: с пространственным и временным разделением по кадрам, позволяющим получать на выходе оптической системы четыре изображения, необходимых для дальнейшего использования алгоритма восстановления волнового фронта.

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Проведено экспериментальное исследование метода модальной фазовой томографии аберраций человеческого глаза, основанного на анализе волнового фронта от нескольких опорных источников, формируемых на сетчатке глаза. Проведено сравнение результатов измерения аберраций, преднамеренно вносимых в известные оптические модели глаза с их заданными значениями. Эксперименты выполнены на установках с однопроходной и двухпроходной схемами. Проведено численное моделирование метода при различных параметрах измерительной системы. Искажения в оптическую систему вносились с помощью фазовых экранов, имитирующих аберрации элементов глаза.

2. Для разделения аберраций на двухэкранной модели глаза достаточно пяти опорных источников, равномерно расположенных по окружности с угловым размером 5-10 градусов.

3. Метод позволяет восстанавливать параметры тестовых линз, вносящих аберрации второго порядка (дефокус, астигматизм) с точностью до 0.25 дптр. Аберрации более высокого порядка, вносимые фазовыми пластинами совместно со сферической преломляющей поверхностью восстанавливаются с точностью до 0.4 мкм (что на зрачке диаметром 4 мм соответствует 0.2 дптр. дефокуса).

4. Проведено численное моделирование двух методов подавления спекл-структуры: метода сканирования опорного пучка по поверхности рассеивающего объекта и метода, использующего немонахроматический источник света. На

известной оптической модели глаза проведено экспериментальное сравнение двух описанных методов. Проведено экспериментальное исследование метода сканирования для подавления спекл-структуры рассеяного сетчаткой глаза излучения *in vivo*.

5. Среднеквадратичная ошибка измерения волнового фронта датчиком Шака-Гартмана и дисперсия флуктуации фазы излучения прямо пропорциональны контрасту интенсивности спекл-структуры светового поля.

6. Метод сканирования по поверхности рассеивающего объекта при диаметре окружности сканирования 0.15 мм позволяет добиться снижения контраста спекл-структуры более чем в 10 раз (что соответствует уменьшению дисперсии флуктуаций фазы с  $0.6\lambda$  до  $0.05\lambda$ ). При этом не наблюдается существенной зависимости от расфокусировки исходного излучения.

7. Метод, использующий некогерентное излучение, для суперлюминисцентного диода с  $\Delta\lambda/\lambda=0.02$ , при диапазоне значений разности хода лучей, участвующих в формировании спекл-картины равном  $16.7\lambda$ , позволяет добиться снижения контраста спекл-структуры в 1.5 раза (что соответствует уменьшению дисперсии флуктуаций фазы с  $0.6\lambda$  до  $0.4\lambda$ ). При этом не наблюдается существенной зависимости от расфокусировки исходного излучения.

8. Проведено экспериментальное исследование датчика волнового фронта на основе фазового ножа. Численно исследованы характеристики датчика при различных параметрах его конструкции и характеристиках светового поля. Проведено сравнение результатов эксперимента с результатами численного моделирования.

9. Датчик позволяет проводить измерения в условиях сильной модуляции интенсивности при сохранении достаточной точности измерений. Установлено, что случайная 100%-ная модуляция интенсивности исследуемого сигнала приводит к ошибке восстановления волнового фронта не более 15%.

10. Использование протяженного источника света с угловым размером 0.5 градусов повышает диапазон линейной работы датчика более чем в 5 раз.

## Список публикаций по теме диссертации

1. Гончаров А.С., Ларичев А.В., Датчик волнового фронта на основе фазового ножа // Квантовая Электроника. – 2005. – т.35, №1, с.91.
2. Гончаров А.С., Ларичев А.В. Ирошников Н.Г., Метод томографии aberrаций человеческого глаза // Вестник Московского университета. – 2007. - 1, с.43-47.
3. A.S.Goncharov, A.V.Larichev, N.G.Iroshnikov, V.Yu.Ivanov and S.A.Gorbunov, Modal tomography of human eye aberrations // Laser Physics. – 2006. - V.16, N12, p.1689.
4. A.S.Goncharov and A.V.Larichev, Speckle Structure of a Light Field Scattered by Human Eye Retina // Laser Physics. – 2007. - V.17, N9, p.1157-1165.
5. A.S.Goncharov and A.V.Larichev, Specialized modal tomography of human eye aberrations (Proceedings Paper) // International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Laser Technologies for Medicine. – 2007. - 67341V.
6. Гончаров А.С., Ларичев А.В., Датчик волнового фронта на основе фазового ножа // Труды третьей международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики», Санкт-Петербург, 18-21 октября 2004 г., с. 239.
7. Гончаров А.С., Ларичев А.В., Модальная томография aberrаций человеческого глаза // Сборник научных трудов по материалам конференции «Лазеры 2005», Адлер, 19-23 сентября 2005 г., М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2005, с.133-138.