

На правах рукописи

Силин Дмитрий Евгеньевич

**МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ
СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

01.04.03 – радиофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2012

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН
(г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
И.Е. Кожеватов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Н.Ф. Ковалев

кандидат физико-математических наук,
доцент С.Н. Менсов

Ведущая организация: Физический факультет МГУ
им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Защита состоится 12 марта 2012 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан «___» февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Ю.В. Чугунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Оптические интерферометры давно и успешно применяются для прецизионного измерения формы поверхностей, фазы волновых полей, показателей преломления сред и других параметров объектов. Существуют, однако, типы объектов, которые не удастся исследовать при помощи классических интерференционных схем. В частности, к таким объектам относятся оптические элементы, контроль которых возможен только с большого расстояния, и объекты, характеристики которых должны быть измерены с субволновым пространственным разрешением. Сложности при контроле объектов первого типа связаны с тем, что во многих случаях при выполнении измерений с большого расстояния не удастся использовать эталонную поверхность для создания опорного пучка. Исследование объектов второго типа вызывает трудности в связи с необходимостью включения в задачу формирования изображения так называемого ближнего поля, которое сильно прижато к поверхности на расстояние порядка длины волны света. Измерение параметров обоих типов объектов является важной проблемой на практике.

Актуальность удаленного контроля параметров оптических элементов вызвана, как минимум, двумя задачами. Первая из них – это задача измерения параметров оптических элементов в процессе их изготовления, решение которой позволяет сократить время изготовления элементов и повысить точность их обработки. Другая задача связана с необходимостью контроля параметров оптических элементов во время их работы в схеме, поскольку эти параметры могут непрерывно изменяться вследствие воздействия различных внешних факторов. К сожалению, традиционные интерференционные схемы не подходят для решения этих задач. В таких схемах помимо пробной волны, освещающей исследуемый объект, создается также опорная волна, которая геометрически разнесена с пробной волной, и это сильно ограничивает точность измерения полей от удаленных объектов из-за флуктуаций среды прохождения излучения. Кроме того, наличие источника зондирующего излучения в самом интерферометре не позволяет измерять при помощи таких схем поля от внешних источников.

Тем не менее, существуют типы интерферометров, которые лишены указанных выше недостатков. В этих интерферометрах в качестве опорной волны используются те или иные составляющие самой исследуемой волны: это так называемые интерферометры сдвига (поперечного, радиального, поворотного сдвига) и интерферометры с дифракционной волной сравнения. В интерферометрах сдвига [1,2] исследуемый пространственно когерентный световой пучок сравнивается со своей копией, при этом осуществляется смещение (или изменение диаметра, или поворот) интерферирующих пучков друг относительно друга. В классических интерферометрах сдвига [1] это смещение пучков невелико, поэтому такие интерферометры позволяют измерить пространственную производную фазы, из которой можно определить

само распределение фазы исследуемого пучка. Однако определение распределения фазы из ее пространственной производной при помощи интегрирования приводит к неизбежному нарастанию ошибок за счет того, что ошибки измерений фазы в разных точках складываются. Это приводит к взаимному ограничению точности измерения фазы и пространственного разрешения таких интерферометров. Были предложены интерферометры поперечного сдвига, которые лишены указанного недостатка за счет осуществления нескольких различных сдвигов пучков друг относительно друга [2], однако недостатком таких интерферометров является длительная процедура измерения. В интерферометрах с дифракционной волной сравнения исследуемый волновой фронт складывается с опорным волновым фронтом, получаемым из исследуемого путем фильтрации его пространственного спектра [3]. В качестве фильтра выступает маленькое отверстие, которое сглаживает неоднородности сфокусированного на него исследуемого пучка. Чем меньше размер отверстия, тем более качественный опорный волновой фронт оно позволяет получить. Однако даже в случае создания идеального опорного волнового фронта точность таких интерферометров будет ограничена качеством изготовления дополнительных оптических элементов схемы (объективов, светоделителей и т.д.), фазовые неоднородности которых оказывают влияние на распределение фазы в исследуемом пучке. Продемонстрированная точность измерений различных модификаций интерферометра с дифракционной волной сравнения составляет величину $\lambda/40$, где λ – длина волны. Для решения ряда задач требуется создание методов, обладающих более высокой точностью.

Актуальность измерения характеристик объектов с субволновым разрешением связана, в первую очередь, с развитием микробиологии. Именно в этой области науки оказалось очень важным получать изображения объектов с высоким разрешением, но при этом использовать неразрушающее излучение оптического диапазона. В последнее время появились оптические устройства, позволяющие проводить такие измерения. К таким устройствам относятся ближнепольный сканирующий оптический микроскоп [4, 5] и суперлинзы [6], которые изготавливаются из метаматериалов с отрицательным показателем преломления. Но, к сожалению, и те, и другие приборы имеют недостатки. Исследование объектов при помощи ближнепольного микроскопа происходит поточечно и поэтому очень медленно. Суперлинзы не позволяют исследовать произвольные неплоские поверхности из-за невозможности однозначной интерпретации получаемых изображений. Кроме того, создание суперлинз является технологически сложной задачей. Указанные недостатки делают актуальной разработку новых оптических методов, обладающих субволновым разрешением.

Цели работы.

Целями данной работы, таким образом, являются:

1. Разработка интерференционных методов удаленного контроля параметров оптических элементов, в которых получение опорного пучка осуществ-

вляется за счет модификации пространственно-угловых характеристик самого исследуемого пучка.

2. Разработка оптических методов, которые, используя ближнее поле, позволяли бы получать изображения объектов с субволновым разрешением одновременно по всей их площади.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработаны и экспериментально реализованы новые интерференционные методы измерения полей от удаленных объектов и внешних источников, обладающие низкой чувствительностью к флуктуациям воздуха и вибрациям элементов оптической схемы.

2. Разработана и проверена в экспериментах процедура калибровки интерферометра с дифракционной волной сравнения, позволяющая исключить влияние на результаты измерений фазовых ошибок, вызванных неидеальностью элементов оптической схемы.

3. Разработан новый алгоритм восстановления фазы волнового поля по интерференционным картинам, обладающий высокой устойчивостью к вибрациям элементов оптической схемы интерферометра.

4. Разработан новый метод решения задач дифракции монохроматических электромагнитных волн на периодических структурах, сводящий решение задачи дифракции к вычислению суммы сходящегося ряда.

5. Предложены новые методы получения оптических изображений с субволновым разрешением, позволяющие проводить измерения структуры ближнего поля и характеристик поверхности одновременно по всей площади исследуемого образца.

Научная и практическая значимость диссертации состоит в следующем:

1. Разработанные методы измерения оптических полей от удаленных объектов могут быть использованы для измерения параметров оптических элементов при их изготовлении или во время работы в оптической схеме. В частности, интерферометр с поперечным сдвигом пучков разрабатывался применительно к задаче контроля формы зеркал детекторов гравитационных волн, создаваемых в рамках международного проекта LIGO. Предложенные методы применимы и к задаче измерения волновых полей, создаваемых внешними источниками, например, лазерами.

2. Разработанный метод решения дифракционных задач позволяет получать решения задач дифракции монохроматических электромагнитных волн на одномерных и двумерных периодических структурах достаточно общего вида.

3. Предложенные методы получения оптических изображений с субволновым разрешением позволят исследовать микрообъекты в оптическом диапазоне спектра с разрешением, недостижимым для классической оптики, и

обеспечат существенно более быстрый съем данных по сравнению с ближне-польной сканирующей оптической микроскопией.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Интерферометр, основанный на сравнении разных участков пучка зондирующего излучения, позволяет выполнять прецизионные измерения формы удаленных оптических элементов даже при наличии флуктуаций воздуха на пути прохождения излучения и высоком уровне вибраций элементов оптической схемы.

2. Прецизионные измерения оптических полей от удаленных объектов и внешних источников могут быть выполнены при помощи интерферометра, в котором опорный пучок получается из исследуемого пучка путем фильтрации его пространственного спектра одномодовым световодом. Аберрации элементов оптической схемы такого интерферометра могут быть определены и учтены за счет проведения процедуры его калибровки, основанной на выполнении нескольких измерений с двумя поперечными сдвигами и поворотом вокруг своей оси исследуемого пучка.

3. Преобразование уравнения Гельмгольца и граничных условий к системе интегральных уравнений специального вида позволяет получить в виде сходящегося ряда решения задач дифракции монохроматических электромагнитных волн на периодических кусочно-однородных структурах, заполненных изотропной средой и имеющих произвольные кусочно-гладкие границы между однородными областями.

4. Регистрация двух или более интерферограмм ближнего поля на различных расстояниях от исследуемой поверхности позволяет при помощи решения обратной задачи восстановить распределение комплексной амплитуды ближнего поля и некоторые характеристики исследуемой поверхности.

5. Размещение в ближнем поле маски с субволновой структурой, имеющей широкий спектр пространственных частот, позволяет, благодаря преобразованию маской нераспространяющихся волн в распространяющиеся, проводить измерения в дальнем поле структуры поверхности с субволновым разрешением.

Апробация результатов.

Материалы диссертации докладывались на 20-th Meeting «Advanced Solid-State Photonics» (Вена, Австрия, 2005); на конференциях молодых ученых «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики», проводимых в рамках XIII, XIV и XV научных школ «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2006, 2008 и 2010); на XII и XIII международных конференциях «Laser Optics» (Санкт-Петербург, 2006 и 2008); на 13-й и 14-й Нижегородских сессиях молодых ученых (естественнонаучные дисциплины, 2008 и 2009); на «Russian-French-German Laser Symposium» (Нижний Новгород, 2009); на международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2009» (Киев, 2009); на Втором

международном конкурсе научных работ молодых ученых в области нанотехнологий (Москва, 2009); на «International Conference on Coherent and Non-linear Optics» (ICONO 2010, Казань); на международной конференции «SPIE Optics+Optoelectronics» (Прага, Чехия, 2011), а также на семинарах ИПФ РАН и ИФМ РАН.

Личный вклад автора.

Все методы, предложенные в диссертации, были разработаны автором лично или совместно с научным руководителем. Автору также принадлежат создание алгоритмов и компьютерных программ, проведение численного моделирования, выполнение экспериментов и анализ полученных результатов.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых научных журналах, 2 статьи в сборниках трудов конференций и 12 тезисов докладов на российских и международных конференциях.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, из которых основное содержание включает 125 страниц, 36 рисунков. Список литературы состоит из 119 наименований на 11 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, формулируются ее цели, приводятся основные положения, кратко излагается содержание диссертации.

Глава 1 посвящена разработке интерференционных методов измерения пространственных распределений фазы в оптических полях от удаленных объектов и внешних источников.

В разделе 1.2 рассмотрены основные принципы прецизионной оптической интерферометрии: модуляция фазы интерферограммы [7] и абсолютная калибровка эталонной пластины [8]. В случае интерференции двух когерентных волн интенсивность I в каждой точке (x,y) интерференционной картины может быть представлена выражением:

$$I(x, y) = A(x, y) \cos \varphi(x, y) + C(x, y), \quad (1)$$

где $A(x,y)$ – амплитудная компонента интерферограммы, $C(x,y)$ – постоянная фоновая интенсивность, $\varphi(x,y)$ – фаза интерферограммы:

$$\varphi(x, y) = 2\pi \frac{\Delta(x, y)}{\lambda}. \quad (2)$$

Здесь $\Delta(x,y)$ – оптическая разность хода между интерферирующими волнами в заданной точке; λ – центральная длина волны зондирующего излучения.

Модуляция фазы интерферограммы применяется для независимого восстановления функций $\varphi(x,y)$, $A(x,y)$ и $C(x,y)$, что позволяет сделать задачу восстановления фазы нечувствительной к произвольным распределениям интенсивности интерферирующих пучков и неоднородностям внешнего освещения. Во многих типах интерферометров фаза интерферограммы несет информацию о разности профилей поверхности образца и эталона. Для измерения непосредственно профиля поверхности образца профиль эталонной поверхности должен быть известен, и для этой цели применяется абсолютная ее калибровка. Она заключается в проведении нескольких последовательных измерений с различными поперечными сдвигами и поворотами исследуемой и эталонной пластин друг относительно друга и последующем решении соответствующей обратной задачи. При правильно подобранных сдвигах и поворотах пластин данная процедура позволяет независимо измерить профили поверхности эталона и образца.

В разделе 1.3 представлен новый алгоритм восстановления фазы волнового поля по набору интерференционных картин, отличающихся друг от друга фазовыми сдвигами. Используемые в настоящее время алгоритмы такого рода имеют существенные ограничения: в них предполагается, что фазовые сдвиги между интерференционными картинками или точно известны [9], или незначительно отличаются от заранее заданных сдвигов [10]. Это накладывает ограничения на область применимости данных алгоритмов, поскольку в реальных экспериментах из-за вибраций оптических элементов фазовые сдвиги могут значительно отличаться от заданных.

Представленный в разделе 1.3 алгоритм позволяет восстанавливать фазу волнового поля при произвольных значениях фазовых сдвигов между интерференционными картинками, что снимает ограничения на допустимые уровни вибраций. Данный алгоритм учитывает также возможность появления у фазы интерферограммы неконтролируемых наклонов при каждом фазовом сдвиге. В основе предложенного алгоритма лежит итерационный цикл, каждая итерация которого состоит из двух шагов. На первом шаге каждой итерации фазовые сдвиги между интерференционными картинками и наклоны фазы считаются известными, и определяются значения функций $\varphi(x,y)$, $A(x,y)$ и $C(x,y)$. На втором шаге эти функции, в свою очередь, считаются известными, и вычисляются значения фазовых сдвигов и наклонов фазы. Итерационный цикл завершается, когда изменения за одну итерацию вычисляемых значений сдвигов и наклонов фазы станут меньше заданной пороговой величины.

Численные эксперименты показали, что в большинстве случаев для восстановления фазы волнового поля предложенным алгоритмом достаточно 5 интерференционных картин (в случае, когда отклонения фазовых сдвигов от заданных не превышают величину $\pi/8$, а перепады фазы, вызванные ее случайными наклонами, на размерах области измерения не превосходят величину $\pi/2$). Если увеличить допустимые отклонения фазовых сдвигов от заданных до величины $\pi/2$, оставив максимальную величину случайных наклонов

фазы на прежнем уровне, то алгоритму для восстановления фазы потребуется 12 кадров. Фазовые сдвиги могут быть даже полностью случайными, в таких условиях алгоритму для восстановления фазы требуется 36 кадров, если величину случайных наклонов фазы оставить на прежнем уровне. Представленный алгоритм тестировался и в реальных экспериментах с различными типами интерферометров и показал свою работоспособность, устойчивость к вибрациям и высокую точность восстановления фазы волнового поля. Данный алгоритм был использован при работе с интерференционными методами, предложенными в разделах 1.4 и 1.5.

В разделе 1.4 представлен интерферометр с поперечным сдвигом пучков, предназначенный для измерения распределений фазы в пространственно когерентных параллельных пучках света от удаленных объектов и внешних источников. Данный интерферометр создан на основе модификации интерферометров поперечного сдвига. Принцип работы предложенного интерферометра заключается в сравнении разных участков исследуемого оптического пучка путем их совмещения и получения между ними интерференционной картины. Таким образом, одна часть пучка играет роль эталона для другой его части. Это позволяет, в частности, исследовать пучки, в которых имеются нестационарная область и область с неизменной во времени фазой. Наложение этих областей друг на друга позволяет измерить изменение фазы во времени в нестационарной части пучка. Предложенный интерферометр рассмотрен в приложении к конкретной задаче: удаленному измерению распределений оптической толщины так называемых ЕТМ-зеркал детекторов гравитационных волн, создаваемых в рамках международного проекта LIGO.

На созданной экспериментальной установке, состоящей из макетов элементов детектора LIGO, были проведены эксперименты с целью исследования точности измерений и выявления основных источников шума интерферометра с поперечным сдвигом пучков. Для этого были измерены серии распределений оптической толщины при максимальной однородности условий эксперимента и вычислены функции спектральной плотности мощности шумов. На рис. 1 приведены полученные временные спектры шумов. Слева показан спектр суммарного шума, возникающего как в самом интерферометре, так и на трассе прохождения зондирующего излучения (измерения оптической толщины макета ЕТМ-зеркала проводились с расстояния примерно трех метров). Справа на рис. 1 приведен временной спектр шума без учета вклада трассы. Сравнение представленных спектров дает основание считать, что основным источником низкочастотных составляющих шума является трасса прохождения зондирующего излучения. Интересной особенностью исследуемых шумов является то, что за пределами низкочастотной части они обладают свойствами так называемого «белого» шума, причем уровень «белого» шума во всех экспериментах практически одинаков (различия в уровнях «белого» шума на временных спектрах рис. 1 не являются существенными и могут быть объяснены неполной повторяемостью условий экспериментов).

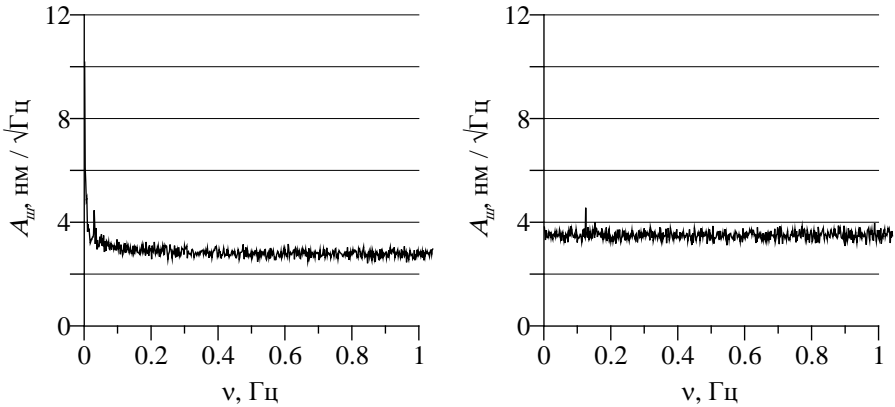


Рис. 1. Временные спектры шумов интерферометра с поперечным сдвигом пучков (слева – суммарный шум интерферометра и трассы, справа – шум интерферометра)

Точность измерений, определяемая среднеквадратичным отклонением полученных шумов, составляет величину $\lambda/500$ (2 нм) при времени измерения 0.5 с, где $\lambda=1075$ нм – длина волны зондирующего излучения. Поскольку временные спектры шумов очень близки к спектру «белого» шума, то существует возможность путем усреднения измеренных распределений оптической толщины по нескольким последовательным циклам измерения получать и значительно более высокие точности. Например, при времени усреднения 2 с точность достигает величины $\lambda/1000$ (1 нм). Дальнейшее увеличение времени усреднения позволяет достигнуть точности $\lambda/3000$ (0.3 нм). Выявлено, что основным фактором, ограничивающим точность измерений созданной экспериментальной установки, являются шумы CCD-камеры и АЦП.

В разделе 1.5 предложен интерференционный метод измерения оптических полей от удаленных объектов и внешних источников на основе модификации интерферометра с дифракционной волной сравнения. Данный интерферометр построен по схеме интерферометра Маха – Цендера, в одном из плеч которого расположен одномодовый световод. Исследуемый пространственно когерентный параллельный пучок света поступает на вход этого интерферометра, где он делится на два одинаковых пучка. Один из этих пучков не претерпевает никаких изменений, в то время как в другом пучке при помощи фокусирующей линзы, одномодового световода и коллиматора осуществляется фильтрация пространственного спектра волнового поля, превращающая этот пучок в практически идеально плоский. Дальнейшее сложение данных пучков на матрице CCD-камеры позволяет по интерференционным картинам восстановить фазовые неоднородности в исследуемом поле.

Отличием представленного интерферометра от других интерферометров с дифракционной волной сравнения является использование одномодового

световода вместо отверстия в качестве пространственного фильтра оптического поля. Одномодовый световод создает на своем выходе практически идеальный сферический волновой фронт. Кроме того, отличием данной схемы от большинства других интерференционных схем с дифракционной волной сравнения является пространственное разделение плечей интерферометра, что позволяет достаточно просто ввести модуляцию фазы интерферограммы путем смещения одного из поворотных зеркал.

Для исключения влияния на результаты измерений фазовых ошибок, вносимых в волновое поле оптическими элементами схемы, разработана процедура калибровки интерферометра. Ее целью является измерение фазовых искажений волнового поля, вызванных неидеальностью элементов оптической схемы, что позволяет учесть эти искажения при проведении дальнейших экспериментов. Установлено, что для проведения калибровки интерферометра необходимо выполнить несколько экспериментов с различными поперечными сдвигами и поворотами входного пучка относительно интерферометра: минимум двумя различными поперечными сдвигами этого пучка вдоль одной из осей и одному повороту пучка вокруг своей оси на 90° . Дальнейшее решение соответствующей обратной задачи позволяет независимо восстановить распределение фазовых искажений интерферометра и распределение фазы во входном пучке.

Был создан лабораторный макет интерферометра с дифракционной волной сравнения, проведена его калибровка и исследованы точностные характеристики собранной установки. Продемонстрированная точность калибровки интерферометра составила величину $2\pi/100$ рад. Данная величина определяет абсолютную точность, с которой могут быть измерены распределения фазы в оптических пучках. Среднеквадратичное отклонение шумовой составляющей фазы на созданной установке составило величину $2\pi/300$ рад при времени измерения 0.5 с и может быть значительно уменьшено путем временного усреднения измеренных данных. Например, при времени усреднения 8 с среднеквадратичное отклонение шума достигает величины $2\pi/1000$ рад. Получено, что, за исключением низкочастотной части, шум фазы является практически «белым», так же, как и у интерферометра с поперечным сдвигом пучков. Главной причиной возникновения «белого» шума здесь также являются флуктуации сигналов, возникающие в CCD-камере и АЦП.

Главы 2 и 3 посвящены проблеме измерения поверхностных структур в оптическом диапазоне с субволновым пространственным разрешением. В диссертации решение данной проблемы разбито на два этапа. В главе 3 предложены оптические методы измерения характеристик поверхностей с субволновым разрешением. Эти методы основаны на взаимодействии ближнего оптического поля с наноструктурами и решением соответствующих задач электромагнитной дифракции. В свою очередь, в **главе 2** представлен метод решения задач дифракции электромагнитных волн на различных структурах, в том числе в области ближнего поля.

В настоящее время широко известны решения отдельных дифракционных задач, таких как задачи Зоммерфельда и Ми. Решения подобных модельных задач были получены либо методом разделения переменных, либо методом Винера – Хопфа и его модификациями. Но таких задач совсем немного, поэтому при решении конкретных задач дифракции электромагнитных волн или полагаются на приближенные методы, имеющие ограниченную область применимости, или используют численные методы решения. Среди численных методов выделим FDTD (Finite-Difference Time-Domain) алгоритм [11], метод связанных волн – RCWA метод (rigorous coupled-wave analysis method) [12] и метод дискретных источников [13]. Существуют также методы, позволяющие свести дифференциальные уравнения к интегральным уравнениям, которые затем численно решаются. К таким методам относится метод граничных интегральных уравнений [14].

Представленный в главе 2 метод решения дифракционных задач основан на решении трехмерного уравнения Гельмгольца и позволяет получать решения задач дифракции монохроматических электромагнитных волн на одномерных и двумерных периодических структурах достаточно общего вида. Структуры являются периодическими вдоль осей Ox и Oy и ограничены вдоль оси Oz . Помимо периодичности на структуру накладывается три условия: она должна быть кусочно-однородной, должна быть заполнена изотропной средой и должна иметь кусочно-гладкие границы между однородными областями. В каждой однородной области задаются произвольные, в общем случае комплексные, значения диэлектрической и магнитной проницаемостей ϵ и μ . На данную структуру из однородного полупространства под произвольным углом падает плоская монохроматическая электромагнитная волна. Требуется найти поля, возникающие в результате дифракции падающей волны на заданной структуре. Постановка этой задачи дается в разделе 2.2.

Решение дифракционной задачи предложенным методом состоит из трех этапов. На первом этапе (раздел 2.3) уравнение Гельмгольца в каждой однородной области преобразуется к системе интегральных уравнений первого рода с несингулярными ядрами на границе области. Для этого используется теорема Грина, из которой может быть получено следующее выражение:

$$\iint_S \left(E_a \frac{\partial u}{\partial n} - u \frac{\partial E_a}{\partial n} \right) dS = 0, \quad (3)$$

где S – один период границы однородной области вдоль осей Ox и Oy , E_a – комплексная амплитуда одной из декартовых компонент искомого вектора электрического поля ($a=x,y,z$), $\partial/\partial n$ – производная по нормали к поверхности S , u – некоторая функция, удовлетворяющая уравнению Гельмгольца в данной области. Из соотношения (3) путем подстановки в него различных функций u , соответствующих дискретной последовательности плоских волн, получается система интегральных уравнений относительно неизвестных распределений E_a и $\partial E_a/\partial n$ на границах однородных областей. В разделе 2.4 при-

водится доказательство эквивалентности решений полученной системы интегральных уравнений и уравнения Гельмгольца на границах однородных областей.

На втором этапе решения задачи дифракции (раздел 2.5) к системе интегральных уравнений аналогичного вида преобразуются граничные условия на каждой границе и уравнение связи декартовых компонент вектора электрического поля. Рассмотрение всех декартовых компонент вектора электрического поля во всех однородных областях дает итоговую систему интегральных уравнений, которая в общем виде может быть записана следующим образом:

$$\int_0^{L_\xi} \int_0^{L_\eta} \left(\sum_{j,a} E_{ja}(\xi, \eta) v_{jal}(\xi, \eta) + \sum_{j,a} \frac{\partial E_{ja}}{\partial n}(\xi, \eta) w_{jal}(\xi, \eta) \right) d\xi d\eta = b_l, \quad (4)$$

$l = 1, 2, \dots$

где искомые распределения поля E_{ja} и его нормальной производной $\partial E_{ja}/\partial n$ на всех границах заданы в виде функций от переменных ξ и η ; $a=x, y, z$ пробегает значения всех декартовых компонент; j – номер текущей пары (E_{ja} ; $\partial E_{ja}/\partial n$) (на каждую границу приходится по две пары таких распределений); $v_{jal}(\xi, \eta)$ и $w_{jal}(\xi, \eta)$ – некоторые известные функции; константы b_l также известны и отвечают за падающее поле.

На третьем этапе решения задачи дифракции (раздел 2.6) полученная система интегральных уравнений (4) решается при помощи разложения искомых полей на границах по полной системе функций. В общем случае решение задачи представляет собой сходящийся рекуррентный ряд. Найденные распределения поля и его нормальной производной используются для определения поля во всем пространстве.

В разделе 2.7 получены предельные аналитические соотношения для задачи дифракции плоской ТЕ волны на одномерной металлической поверхности, глубина которой много меньше характерных размеров поперечных неоднородностей. Для получения этих соотношений использованы два первых слагаемых ряда, представляющего собой решение данной дифракционной задачи.

В разделе 2.8 приведены примеры решения предложенным методом нескольких задач дифракции: на металлической пилообразной структуре, на металлической синусоидальной поверхности и металлической ленточной структуре. На рис. 2 приведено решение задачи дифракции плоской ТЕ волны на одномерной металлической синусоидальной структуре, профиль поверхности которой задан формулой $\rho(x) = A_s \cos 2\pi x / L_x$; волна имеет единичную амплитуду и падает перпендикулярно структуре. Показаны зависимости амплитуд рассеянных волн от глубины структуры и числа просуммированных членов ряда для нулевого и первого порядков дифракции. Эти графики соответствуют периоду $L_x = 2.4\lambda$. Видно, что чем глубже структура, тем большее число членов ряда требуется использовать для получения решения с заданной точностью. Зависимости, полученные при суммировании 700 членов ряда,

соответствуют результатам, даваемым другими методами, и закону сохранения энергии.

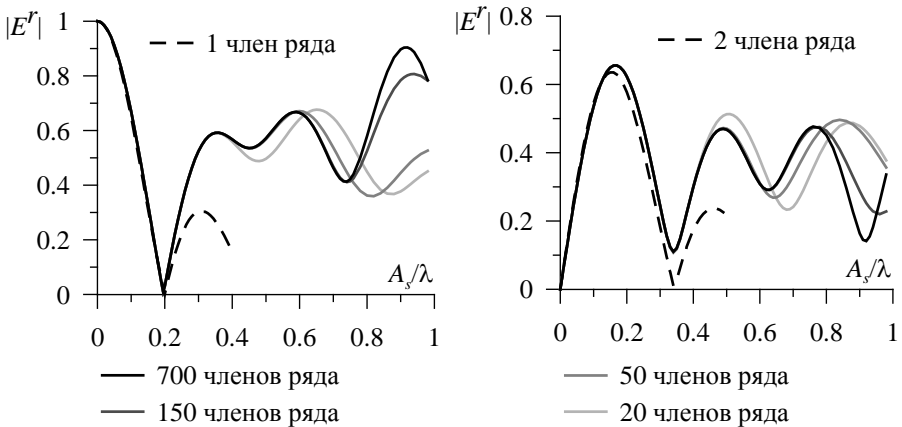


Рис. 2. Вычисленные амплитуды рассеянных плоских волн, соответствующих нулевому (слева) и первому (справа) порядкам дифракции, в зависимости от глубины синусоидальной структуры и числа просуммированных членов ряда

Глава 3 посвящена разработке оптических методов измерения характеристик поверхностей с субволновым пространственным разрешением. Предложено три метода решения этой задачи. Представленные методы позволяют получать информацию о структуре образца одновременно по всей его поверхности, что может обеспечить значительно более быстрый съем данных по сравнению с ближнепольной сканирующей оптической микроскопией. Данные методы были опробованы в численных экспериментах для случая, когда характеристики поверхностей зависят только от одной из поперечных координат.

В разделе 3.2 рассмотрено понятие ближнего поля. Ближнее поле принципиально важно при получении оптических изображений с субволновым разрешением. Оно локализовано на расстояниях от поверхности, меньших длины волны λ . В ближнем поле содержится информация о субволновой структуре поверхности. Эту информацию несут так называемые нераспространяющиеся волны, которые экспоненциально затухают в направлении, перпендикулярном поверхности. Пространственные периоды этих волн примерно соответствуют характерным поперечным размерам мелких деталей исследуемого образца и могут быть значительно меньше λ .

В разделе 3.3 представлен первый из предложенных методов получения оптических изображений с субволновым разрешением. Его схема приведена на рис. 3. Метод предполагает получение интерферограмм ближнего поля. Для этого над исследуемой поверхностью в непосредственной близости от

нее располагаются тонкие фотопластинки (Φ_1 , Φ_2 и т.д.), имеющие небольшой коэффициент поглощения. Все фотопластинки нанесены на одну подложку, расположенную над ними. Перпендикулярно поверхности и фотопластинкам на них падает плоская монохроматическая пространственно когерентная волна. Эта волна рассеивается исследуемой поверхностью, причем фотопластинки оказываются в ближнем поле. Таким образом, на фотопластинках регистрируются интерференционные картины, возникающие в результате сложения рассеянного исследуемой поверхностью поля и опорной плоской волны.

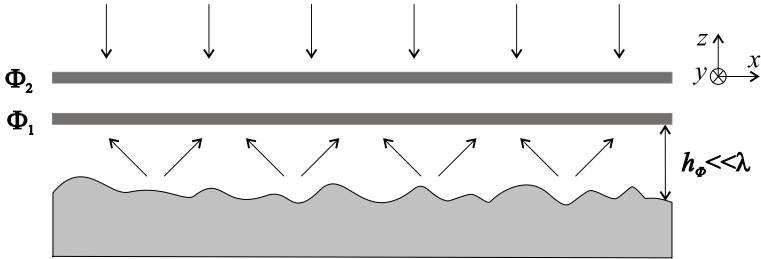


Рис. 3. Схема метода с регистрацией интерферограмм ближнего поля

Измеренные интерференционные картины используются в качестве исходной информации при решении обратной задачи, позволяющей восстановить распределение комплексной амплитуды ближнего поля. Для однозначного решения данной обратной задачи используются интерференционные картины, записанные на нескольких (минимум двух) фотопластинках, расположенных на разных расстояниях от исследуемой поверхности.

На рис. 4 приведены результаты численного эксперимента, в котором восстанавливался пространственный спектр ближнего поля. Исходный пространственный спектр показан на рис. 4 черным цветом, а восстановленный – серым. Пространственный спектр поля восстанавливался в пределах $k_x \in (-5k, 5k)$, что соответствует пространственному разрешению $\lambda/10$ ($k=2\pi/\lambda$ – волновое число в вакууме). В качестве исходной информации при решении обратной задачи использовались распределения интенсивности поля в двух плоскостях (на двух фотопластинках), отстоящих друг от друга на расстояние 0.1λ . Для моделирования реальных измерений на задаваемые распределения интенсивности накладывался шум со среднеквадратичным отклонением, равным 0.01. На рис. 4 видно хорошее соответствие между исходным и восстановленным пространственными спектрами поля.

После определения ближнего поля решается задача восстановления характеристик поверхности (профиля, распределения показателя преломления и т.д.) по известному полю вблизи нее.

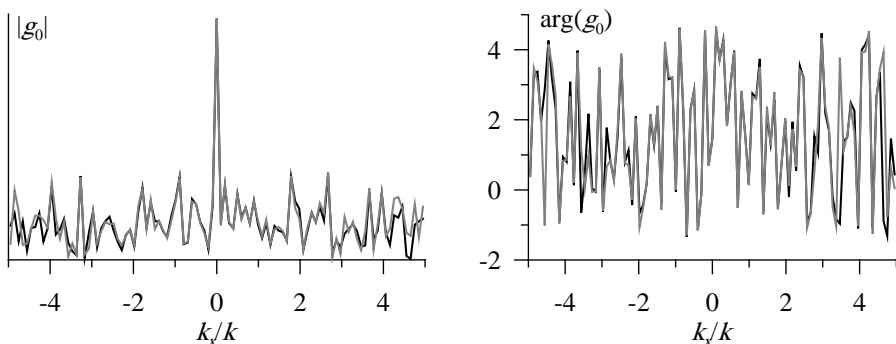


Рис. 4. Результаты численного эксперимента: исходные (черные кривые) и восстановленные (серые кривые) амплитудная и фазовая составляющие пространственного спектра ближнего поля (k – волновое число в вакууме)

В разделе 3.4 представлен интерференционно-растровый метод получения оптических изображений с субволновым разрешением. Этот метод основан на переносе пространственного спектра ближнего поля в область более низких пространственных частот. Упрощенная схема этого метода приведена на рис. 5. Плоская монохроматическая пространственно когерентная волна падает изнутри образца на исследуемую поверхность и рассеивается ею. В результате этого в непосредственной близости от поверхности (на расстоянии, меньшим λ) возникает ближнее поле. В области ближнего поля размещается маска M с субволновой структурой, нанесенная на подложку Π . В качестве такой структуры предлагается использовать случайный растр, обладающий широким спектром пространственных частот. В результате взаимодействия ближнего поля с маской нераспространяющиеся волны, содержащие информацию о субволновой структуре образца, частично превращаются в распространяющиеся. Амплитуды и фазы формируемого маской волнового поля измеряются вдали от образца средствами обычной интерферометрии. Для этой цели образец с маской помещаются в одно из плеч интерферометра, предназначенного для измерения угловых распределений амплитуды и фазы волнового поля в расходящемся от маски пучке. Эти распределения, полученные при нескольких различных положениях маски относительно образца, используются в качестве исходной информации для обратной задачи, решение которой позволяет восстановить субволновую структуру исследуемой поверхности.

Минимально необходимое число измерений (поперечных смещений маски относительно образца) для однозначного решения данной обратной задачи составляет величину порядка λ/r в случае восстановления одномерной структуры и $(\lambda/r)^2$ – в случае двумерной структуры, где r – размер элемента разрешения. Таким образом, выигрыш в скорости измерения по сравнению с ближнепольным сканирующим оптическим микроскопом, где каждая точка

измеряется независимо, определяется соотношением L/λ в одномерном случае (L – размер измеряемой области) и S/λ^2 в двумерном случае (S – площадь измеряемой области на образце). Данная оценка выполнена для случая, когда угол, в пределах которого измеряются распределения комплексной амплитуды дальнего поля, равен 60° . При уменьшении указанного угла минимально необходимое число измерений возрастает.

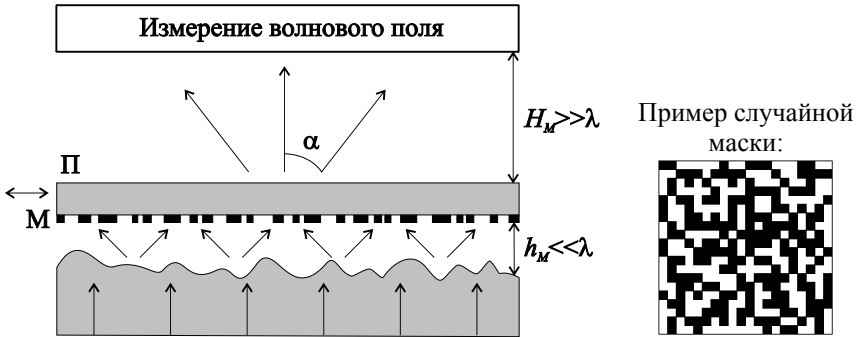


Рис. 5. Упрощенная схема интерференционно-растрового метода

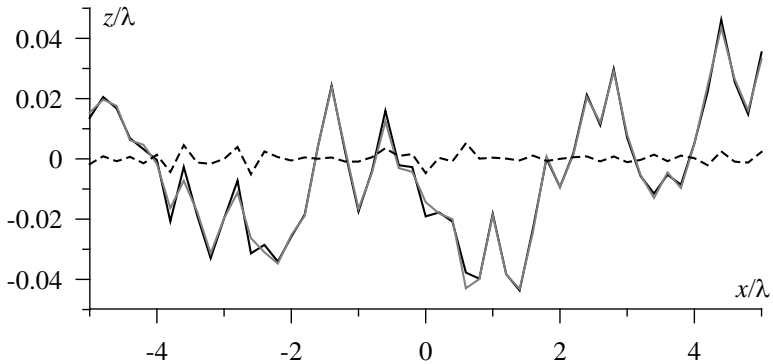


Рис. 6. Результаты численного эксперимента: исходный (черная кривая) и восстановленный (серая кривая) профили поверхности диэлектрика и их разность (пунктир)

На рис. 6 приведены результаты численного эксперимента, в котором восстанавливался профиль поверхности диэлектрика с показателем преломления 1.5 (черная кривая соответствует исходному профилю поверхности, серая кривая – восстановленному профилю, их разность изображена пунктирной линией). Профиль поверхности восстанавливался с разрешением $\lambda/5$. В этом численном эксперименте была использована бесконечно тонкая идеально проводящая одномерная случайная маска, которая располагалась на высоте 0.1λ от исследуемой поверхности. Было проведено 10 измерений с

различными положениями этой маски. В качестве исходной информации при решении обратной задачи использовались угловые распределения (в пределах угла 45°) амплитуд и фаз дальнего поля. Для моделирования реальных измерений на эти распределения накладывался шум, соответствующий относительной точности их измерения на уровне $1/500$, что в настоящее время является обычной точностью для интерферометров. На рис. 6 видно хорошее соответствие исходного и восстановленного профилей поверхности.

В разделе 3.5 представлен растровый метод с микроскопом, также предназначенный для получения оптических изображений с субволновым разрешением. Данный метод близок к интерференционно-растровому методу и также основан на переносе пространственного спектра ближнего поля в область распространяющихся волн при помощи маски с субволновой случайной структурой. Отличием данного метода от предыдущего является способ измерения дальнего поля. Здесь образец с маской помещаются в обычный оптический микроскоп, строящий изображение маски с разрешением, сравнимым с длиной волны зондирующего излучения. Горизонтальные смещения маски относительно исследуемой поверхности позволяют получить несколько различных изображений с подобным разрешением, из которых по отдельности нельзя извлечь информацию о субволновой структуре образца. Однако в совокупности несколько таких изображений с низким разрешением после решения соответствующей обратной задачи позволяют восстановить распределение комплексной амплитуды ближнего поля и характеристики исследуемой поверхности с высоким, субволновым разрешением.

Преимуществами растрового метода с микроскопом перед интерференционно-растровым методом являются более простая оптическая схема и более наглядные измерения. Недостатками же данного метода по сравнению с предыдущим методом являются необходимость проведения в 2 раза большего числа измерений (сдвигов маски относительно образца) и более трудоемкое решение обратной задачи.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан интерференционный метод измерения оптических полей от удаленных объектов и внешних источников, основанный на сравнении разных участков исследуемого пучка. Проведена экспериментальная проверка метода на установке, моделирующей процесс измерения распределений оптической толщины ЕТМ-зеркал в детекторах гравитационных волн проекта LIGO. Получено, что точность измерений на созданной установке составляет величину $\lambda/500$ (2 нм) при времени измерения 0.5 с и может быть значительно увеличена вплоть до $\lambda/3000$ путем увеличения времени усреднения.

2. Разработан интерференционный метод измерения оптических полей от удаленных объектов и внешних источников, в котором опорный пучок получается из исследуемого пучка путем фильтрации его пространственного спектра одномодовым световодом. Для исключения влияния на результаты измерений фазовых ошибок, вызванных неидеальностью элементов оптической схемы, разработана процедура калибровки интерферометра, позволяющая определить эти ошибки с целью дальнейшего их вычитания из измеряемых распределений фазы поля. Полученная в экспериментах точность калибровки, которая определяет абсолютную точность измерения фазы, составила величину $2\pi/100$ рад. Среднеквадратичное отклонение шумовой составляющей фазы, определяющее точность относительных измерений, составило величину $2\pi/300$ рад для постоянной времени 0.5 с и значительно уменьшается при увеличении времени усреднения (при времени усреднения 8 с среднеквадратичное отклонение шумовой составляющей фазы достигает величины $2\pi/1000$ рад).

3. Разработан метод решения задач дифракции, в которых монохроматическая электромагнитная волна рассеивается на периодической кусочно-однородной структуре, заполненной изотропной средой и имеющей произвольные кусочно-гладкие границы между однородными областями. Метод основан на преобразовании уравнения Гельмгольца и граничных условий к системе интегральных уравнений первого рода с несингулярными ядрами на границах однородных областей и последующем решении этой системы. Решение задачи записывается в виде сходящегося ряда.

4. Предложен оптический интерференционный метод измерения ближнего поля и характеристик поверхностей с субволновым разрешением. Метод основан на записи на фотопластинках, расположенных в непосредственной близости от исследуемой поверхности, интерференционных картин, возникающих в результате сложения рассеянного исследуемой поверхностью поля и опорной плоской волны. Метод опробован в численных экспериментах (для одномерной модели), в которых было получено пространственное разрешение $\lambda/10$.

5. Предложено два метода получения оптических изображений с субволновым разрешением, идея которых заключается в переносе пространственного спектра ближнего поля в область более низких пространственных частот при помощи маски с субволновой структурой, расположенной в непосредственной близости от исследуемой поверхности. Структура поверхности определяется по результатам измерений в дальнем поле средствами обычной интерферометрии или микроскопии и последующем решении обратной задачи. Методы опробованы в численных экспериментах (для одномерной модели), в которых было получено пространственное разрешение $\lambda/5$.

Цитируемая литература

1. Bates W.J. A wavefront shearing interferometer // Proc. Phys. Soc. London. 1947. V.59. P.940-952.
2. Elster C. Exact two-dimensional wave-front reconstruction from lateral shearing interferograms with large shears // Applied Optics. 2000. V.39. P.5353-5359.
3. Meddecki H., Tejnil E., Goldberg K.A., Bokor J. Phase-shifting point diffraction interferometer // Optics Letters. 1996. V.21. P.1526-1528.
4. Pohl D.W., Denk W., Lanz M. Optical stethoscopy: image recording with resolution $\lambda/20$ // Appl. Phys. Lett. 1984. V.44. P.651-653.
5. Zenhausern F., Martin Y., Wickramasinghe H.K. Scanning interferometric apertureless microscopy: optical imaging at 10 angstrom resolution // Science. 1995. V.269. P.1083-1085.
6. Pendry J.B. Negative refraction makes a perfect lens // Phys. Rev. Lett. 2000. V.85. P.3966-3969.
7. Creath K. Phase-measurement interferometry techniques // Progress in Optics. 1989. V.26. P.349-393.
8. Руденчик Е.А., Кожеватов И.Е., Черагин Н.П. и др. Метод абсолютной калибровки эталонных пластин для интерферометрического контроля поверхностей // Оптика и спектроскопия. 2001. Т.90. С.127-135.
9. Creath K. Temporal phase measurement methods // Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Technique / Ed. by Robinson D.W., Reid G.T. Bristol: Institute of Physics, 1993. P.94-140.
10. Okada K., Sato A., Tsujiuchi J. Simultaneous calculation of phase distribution and scanning phase shift in phase shifting interferometry // Opt. Commun. 1991. V.84. P.118-124.
11. Taflove A., Brodwin M.E. Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1975. V.23. P.623-630.
12. Peng S., Morris G.M. Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings // J. Opt. Soc. Am. A. 1995. V.12. P.1087-1096.
13. Еремин Ю.А., Свешников А.Г. Метод дискретных источников в задачах электромагнитной дифракции. М.: Изд-во МГУ, 1992. 182 с.
14. Зимовец С.В., Гешев П.И. Метод граничных интегральных уравнений для расчета рассеяния света на двумерных наночастицах // ЖТФ. 2006. Т.76. №3. С.1-6.

Список публикаций автора по теме диссертации

- 1a. Zelenogorsky V.V., Solovyov A.A., Kozhevato I.E., Kamenetsky E.E., Rudenchik E.A., Palashov O.V., Silin D.E., Khazanov E.A. High-precision methods and devices for in situ measurements of thermally induced aberrations in optical elements // *Applied Optics*. 2006. V.45, P.4092-4101.
- 2a. Кожеватов И.Е., Силин Д.Е., Руденчик Е.А., Зеленогорский В.В., Черагин Н.П., Палашов О.В., Куликова Е.Х. Интерференционная схема с поперечным сдвигом пучков для удаленного прецизионного контроля параметров оптических элементов // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2007. Т.50. С.638-648.
- 3a. Кожеватов И.Е., Силин Д.Е. Оптические интерференционные методы получения изображений с субволновым разрешением // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2009. Т.52. С.73-84.
- 4a. Силин Д.Е. Метод строгого решения задач дифракции монохроматических электромагнитных волн на периодических структурах // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2010. Т.53. С.743-756.
- 5a. Sergeev A.M., Khazanov E.A., Kozhevato I.E., Silin D.E. Subnanometer characterization of large aperture optical components using broad-band interferometry // *Proc. SPIE*. 2008. V.7022, P.70220I-70220I-11.
- 6a. Silin D.E., Kozhevato I.E. New methods of near-field holography // *Proc. SPIE*. 2011. V.8074. P.80740N-80740N-7.
- 7a. Zelenogorsky V.V., Kamenetsky E.E., Khazanov E.A., Kozhevato I.E., Palashov O.V., Silin D.E., Solovyev A.A. Two methods for remote measurements of thermal effects in optical elements // 20th Meeting «Advanced Solid-State Photonics». 2005. Vienna, Austria. TuB32.
- 8a. Кожеватов И.Е., Силин Д.Е. Прецизионный метод измерения термоэффектов в оптических элементах // Тезисы докладов конференции молодых ученых «Нелинейные волновые процессы». 2006. Нижний Новгород. С.141-142.
- 9a. Kozhevato I.E., Silin D.E., Zelenogorsky V.V., Khazanov E.A., Kulikova E.Kh., Rudenchik E.A., Cheragin N.P., Palashov O.V. Sub-nanometer-precision large-aperture remote characterization of optical elements with new type of interferometers // Technical Program of XII Conference on Laser Optics. 2006. St.Petersburg. ThR4-28. P.49.
- 10a. Кожеватов И.Е., Силин Д.Е. О возможности разрешения субволновой структуры оптического поля // Тезисы докладов конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики». 2008. Нижний Новгород. С.141-142.
- 11a. Kozhevato I.E., Silin D.E. Interference methods of diffraction limit overcoming in optics // Technical program of International Conference “Laser Optics 2008”. 2008. St.Petersburg. FrR4-32. P.52.
- 12a. Кожеватов И.Е., Силин Д.Е. Интерференционные методы преодоления дифракционного предела в оптике // Тезисы докладов 13-й Нижегород-

- ской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины). 2008. Нижний Новгород.
- 13а. Силин Д.Е., Кожеватов И.Е. Оптический растровый метод преодоления дифракционного предела // Тезисы докладов 14-й Нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины). 2009. Нижний Новгород. С.54-55.
- 14а. Kozhevato I.E., Silin D.E. Optical interferometry with subwavelength transverse resolution // Russian-French-German Laser Symposium 2009. 2009. Nizhny Novgorod.
- 15а. Силин Д.Е., Кожеватов И.Е. Оптический растровый метод получения изображений с субволновым разрешением // Сборник тезисов докладов участников Второго международного конкурса научных работ молодых ученых в области нанотехнологий. 2009. Москва. С.291-292.
- 16а. Силин Д.Е. Метод строгого решения электромагнитных задач дифракции на периодических структурах // Тезисы докладов конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики». 2010. Нижний Новгород. С.117-118.
- 17а. Silin D.E., Kozhevato I.E. No-reference-beam optical interferometer based on wave field spatial spectrum filtration // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2010). 2010. Kazan. IThP8.
- 18а. Silin D.E., Kozhevato I.E. New methods of near-field holography // Technical Summaries of International Conference "SPIE Optics+Optoelectronics". 2011. Prague, Czech Republic. 8074-23. P.77.

Силин Дмитрий Евгеньевич

**МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ
СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 27.01.2012 г.

Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 100 экз. Заказ № 14 (2012).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46

