

На правах рукописи



Серебряков Андрей Евгеньевич

**АНАЛИЗ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НАНОРЕЛЬЕФА ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Специальность 01.04.01 –
«Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Рязань – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: Чиркин Михаил Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электронные приборы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Официальные оппоненты: Борисов Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского»

Артюков Игорь Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «30» июня 2015 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.211.03, в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет», <http://www.rsgeu.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Д 212.211.03, д.ф.-м.н., профессор _____ М.В. Чиркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Применение гироскопов на основе кольцевых гелий-неоновых лазеров в автономных инерциальных навигационных системах высокой точности требует комплектовать оптические резонаторы зеркалами, рассеивающими не более 10^{-5} от мощности оптического пучка. Такие отражающие поверхности характеризуются среднеквадратической шероховатостью менее 0,3 нанометра в диапазоне пространственных частот 0,2 – 3,0 мкм⁻¹. Следует учитывать, что сверхгладкую поверхность требуется сформировать на подложке из оптической стеклокерамики, которая содержит множество кристаллов размером в десятки нанометров, расположенных внутри аморфной фазы.

Проблема производства зеркал для лазерных гироскопов включает две задачи:

- поиск новых методов и режимов технологического воздействия;
- отбор зеркал по величинам интегрального и обратного рассеяния при комплектовании кольцевого резонатора.

Необходимой предпосылкой для решения обеих задач является объективная и надежная методика регистрации характеристик оптической поверхности, характеризующих рассеяние излучения, генерируемого кольцевым гелий-неоновым лазером. Как правило, следы технологического воздействия, оставшиеся после финишного полирования, приводят к анизотропии рассеивающих свойств сформированного рельефа. Это обстоятельство усложняет оценку предельных возможностей применённой технологии и степени завершенности финишного полирования.

Степень разработанности темы.

В течение последних лет интенсивно развивается комплексный подход к исследованию статистических свойств рельефа, позволяющий на основе данных, полученных методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), определить угловое распределение оптического излучения, рассеянного диэлектрическими поверхностями. Были получены убедительные экспериментальные доказательства высокой степени корреляции нанорельефа подложки и поверхности нанесенного на него многослойного отражающего покрытия. Однако осталась нерешённой проблема обоснованного выбора условий АСМ сканирования и методик обработки полученных изображений, позволяющих достоверно оценить рассеивающие свойства в условиях, когда зарегистрированы изображения лишь относительно малой части оптической поверхности.

Нанорельеф полированной поверхности диэлектрика содержит характерные особенности разного происхождения, обладающие качественно различающимися статистическими свойствами. Процесс рассеяния оптического излучения специфичен для каждой особенности, а совокупный результат зависит от технологии формирования подложек и многослойных отражающих покрытий. Таким образом, чтобы реализовать мониторинг сверхгладких диэлектрических

поверхностей необходимо иметь возможность отдельно описывать статистические свойства их особенностей.

Цель работы заключается в создании комплекса методов анализа трехмерных АСМ изображений нанорельефа оптической поверхности, обеспечивающих отдельное описание статистических свойств характерных особенностей рельефа различного происхождения.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **задач**:

1. Разработка методики экспериментальной оценки собственных шумов атомно-силового микроскопа и их влияния на спектральную плотность флуктуаций высоты, рассчитанной по полученным экспериментально изображениям оптической поверхности.

2. Определение условий регистрации АСМ изображений, исключающих искажения спектральной плотности флуктуаций высоты рельефа, вызванные ошибочным выбором шага сканирования или недостаточностью суммарной площади исследованных участков поверхности.

3. Реализация методов вейвлет-фильтрации для разделения изображения уединенных дефектов и подстилающего шероховатого рельефа.

4. Разработка способа выделения линейно структурированных особенностей поверхности.

5. Разработка последовательности операций, программного обеспечения и программно-аппаратного комплекса, которые позволяют выделить из экспериментальных данных изображения характерных особенностей топографии поверхности: уединенных дефектов, линейно структурированных особенностей и остаточного хаотического рельефа.

Методы исследований. При решении поставленных задач использованы векторная теория рассеяния оптического излучения шероховатой поверхностью диэлектрика, методы кратномасштабного анализа и математического моделирования. Для моделирования и проведения расчетов на ЭВМ применен пакет программного обеспечения Matlab и язык программирования C++. Экспериментальная часть диссертационной работы проводилась с помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA фирмы NT-MDT, расположенного в региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) Рязанского государственного радиотехнического университета.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

1) Разработана методика оценки собственных шумов атомно-силового микроскопа, основанная на регистрации последовательности отсчетов высоты в фиксированной точке на поверхности образца. Методика позволяет оценить вклад ложного хаотического рельефа, обусловленного шумами в измерительном тракте при АСМ сканировании поверхности, в спектральную плотность флуктуаций высоты зарегистрированного нанорельефа.

2) Сформулированы требования к условиям регистрации АСМ изображений поверхности оптической стеклокерамики и нанесенного на нее отражающего покрытия, обеспечивающие статистически достоверное определение спектральной плотности флуктуаций высоты.

3) Решена проблема выделения на полированной поверхности диэлектрика линейно структурированных дефектов (следов механохимического воздействия) глубиной порядка одного нанометра на основе вейвлет-фильтрации АСМ изображений в пространстве Радона.

4) Предложен способ анализа трехмерных изображений поверхности диэлектрика, позволяющий разделить угловые распределения лазерного излучения, рассеянного линейно структурированными дефектами, остаточным хаотическим дефектом и уединенными выступами.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов:

1) Разработанные методы анализа позволяет осуществлять мониторинг технологии финишного полирования подложек и зеркал кольцевых лазеров.

2) Предложенная последовательность тестовых операций при отборе зеркал обеспечивает достижение характеристик обратного рассеяния в кольцевом резонаторе, соответствующих требованиям к лазерным гироскопам, предназначенным для систем инерциальной навигации высокой точности.

3) Разработана методика определения оптимального азимутального положения зеркала при сборке кольцевого резонатора на основе регистрации рельефа поверхности и выделения его характерных особенностей.

4) Разработан программно-аппаратный комплекс для контроля рассеивающих свойств зеркал кольцевых лазеров.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Регистрация АСМ-сканов участков полированной поверхности оптической стеклокерамики позволяет определить спектральную плотность флуктуаций высоты в диапазоне, ограниченном сверху пространственной частотой 3 мкм^{-1} , если шаг сканирования не превышает две трети от радиуса корреляции шероховатого нанорельефа, локальные неоднородности которого предварительно удалены вейвлет-фильтрацией полученных изображений.
2. Синтезировать трехмерное изображение линейно структурированной особенности шероховатого рельефа оптической поверхности позволяют следующие операции:
 - преобразование Радона от вертикальной координаты точек поверхности как функции их горизонтальных координат;
 - вейвлет-фильтрация образа поверхности в пространстве Радона с заданным пороговым условием, соответствующим выделяемой особенности;
 - обратное преобразование Радона отфильтрованного образа поверхности.
3. Выбор порога при фильтрации компонент вейвлет-разложения образа Радона шероховатого нанорельефа в диапазоне $(10 \div 11) \cdot W$, где W - параметр экспоненциальной аппроксимации распределения по величине коэффициентов при вейвлетах Добеши, позволяет достичь максимальной контрастности азимутального распределения выделенных линейно структурированных особенностей.

Достоверность результатов исследований подтверждается:

1) Соответствием величин полного интегрального рассеяния лазерного излучения зеркалами кольцевых резонаторов, измеренными экспериментально,

и результатов расчетов, выполненных на основе зарегистрированных АСМ изображений оптических поверхностей;

2) Подтверждением сильной корреляции нанорельефов поверхностей подложки и сформированного на ней отражающего покрытия, обнаруженной ранее другими исследователями, с помощью методов анализа, разработанных в настоящей работе.

3) Практическим применением методов анализа трехмерных изображений шероховатого нанорельефа, обоснованных соискателем, и созданного им программно-математического обеспечения для мониторинга производства зеркал кольцевых гелий-неоновых лазеров.

Реализация результатов работы

Полученные экспериментальные результаты и разработанное программно-математическое обеспечение внедрены в ОАО «Московский институт электромеханики и автоматики» в программно-аппаратном комплексе и технологической документации для мониторинга производства зеркал кольцевых гелий-неоновых лазеров. Выводы и рекомендации, сделанные в работе, использованы в региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) Рязанского государственного радиотехнического университета для разработки методов диагностики сверхгладких поверхностей при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Апробация работы

Результаты работы представлены на 5-й и 6-й международной конференции Optical Measurement Techniques for Structures & Systems, Антверпен, Бельгия, 2012, 2015 г.г; 20-й Международной конференции по интегрированным навигационным системам (ICINS), г. Санкт-Петербург – 2013 г.; Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2012 г.; III Всероссийской школе-семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноматериалы», Рязань, 2010 г.; XXXVII, XXXVIII, XXXIX, XXXX Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» г. Москва, 2011, 2012, 2013, 2014 г.г; Всероссийской научно-практической конференции «Новые материалы и технологии НМТ-2012», г. Москва, 2012 г; IV-ой всероссийской школе-семинаре «Нанодиагностика» Рязань 2011 г., VI-ой, VII-ой Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых учёных по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур», Рязань 2013, 2014 г.г.

Публикации

По результатам исследований опубликовано 18 печатных работ (из них три работы в журналах из перечня ВАК, патент на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 151 странице основного текста, содержит 88 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 100 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основные задачи исследований и научные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен обзор публикаций, посвященных рассеянию оптического излучения прецизионной поверхностью диэлектрика и статистическим характеристикам её рельефа, характеризующегося среднеквадратической шероховатостью в доли нанометра. Методы, основанные на регистрации рассеянного оптического излучения, рассмотрены как возможная основа для определения соответствия качества технологической обработки поверхности требованиям, предъявляемым к зеркалам кольцевых лазерных гироскопов. Однако приведенные результаты демонстрируют недостаточность прямых оптических измерений для объективного контроля процесса изготовления зеркал и их отбора при комплектовании кольцевых резонаторов. В первую очередь это вызвано анизотропией рассеяния излучения лазера вследствие наличия на поверхности зеркал следов механохимической обработки их подложек.

В качестве альтернативы рассмотрен подход, основанный на регистрации методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) трехмерных изображений рельефа, представляющих собой отсчеты высоты $z_{j,q}$ в точках с координатами $x_j = jh$, $y_q = qh$, $j, q = 0 \dots N-1$, и проанализировано содержание публикаций, в которых доказана возможность применения этих методов к полированным диэлектрическим поверхностям. В данном случае для количественной оценки рассеивающих свойств ключевой характеристикой является спектральная плотность флуктуаций высоты (PSD-функции) в диапазоне пространственных частот $0,1 - 3 \text{ мкм}^{-1}$.

Обзор литературы завершает конкретизация задач диссертационной работы.

Вторая глава посвящена ошибкам, возникающим при определении спектральной плотности флуктуаций высоты по трехмерным изображениям участков отполированной поверхности оптической стеклокерамики, зарегистрированным АСМ методами. Переход от массива отсчетов высоты $z_{j,q}$ к спектральной плотности флуктуаций высоты осуществляется с помощью дискретного преобразования Фурье:

$$S(f_x, f_y) = h^2 \left| \sum_{j,q=0}^{N-1} z_{j,q} \exp(2\pi i h(jf_x + qf_y)) \right|^2, \quad (1)$$

$i = \sqrt{-1}$, $-1/2h \leq f_x, f_y \leq 1/2h$ – пространственные частоты.

Причинами искажений полученных результатов являются:

- 1) неправильный выбор шага h при сканировании поверхности (aliasing);
- 2) собственные шумы атомно-силового микроскопа;
- 3) ограниченность участков сканирования.

Возможность ошибочного выбора шага сканирования заключается в том, что диапазон частот, в котором локализована спектральная плотность флуктуа-

ций высоты, выходит за пределы, определяющие угловое распределение рассеянного излучения с длиной волны 0,6328 мкм. Искажения вследствие завышения шага отражает рис. 1, на котором представлены зависимости спектральной плотности флуктуаций высоты от модуля пространственной частоты $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$, полученные в результате обработки АСМ-изображений одних и тех же участков поверхности оптической стеклокерамики СО-115М (ситалла). Полученные результаты позволяют ограничить шаг сверху величиной 60 нм.

Шумы в измерительном тракте АСМ приводят к регистрации ложного хаотического рельефа в процессе сканирования поверхности. Обработка последовательности из 10^6 отсчетов высоты, зарегистрированных в фиксированной точке поверхности оптической подложки, позволила оценить спектральную плотность флуктуаций высоты ложного рельефа (рис. 2, кривая 3).

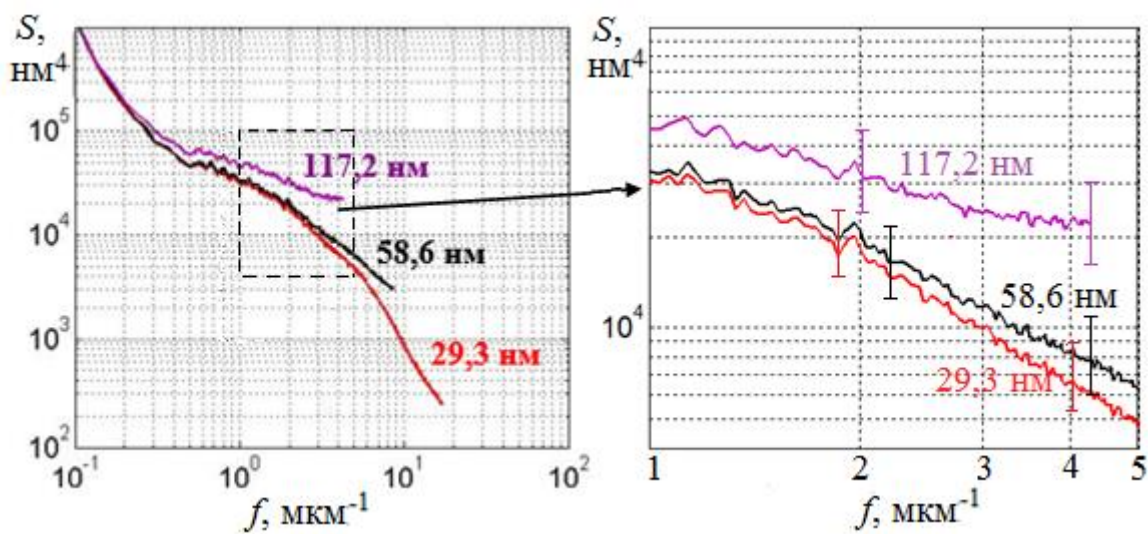


Рис. 1 - Влияние шага сканирования на результат определения спектральной плотности флуктуаций высоты. Отсчеты высоты отполированной поверхности оптической стеклокерамики зарегистрированы с помощью атомно-силового микроскопа для семи участков размером по 30x30 мкм. Расчеты выполнены с помощью соотношения (1), усредненного по углу и по семи изображениям. Около каждой кривой указаны значения шага и пределы статистического разброса результатов

Полученный результат подтверждает возможность использования атомно-силового микроскопа для регистрации нанорельефа, если спектральная плотность флуктуаций высоты последнего превышает 10^3 nm^4 для пространственных частот, составляющих десятые доли mkm^{-1} .

В кольцевых гелий-неоновых лазерах площадь поверхности зеркала, на которую падает лазерный пучок, составляет около 1 mm^2 . Сканирование всей оптической поверхности с шагом, не превышающим 60 нм, потребует не только неприемлемо большого времени измерений, но и обработки массива, содержащего 10^8 отсчетов. Следовательно, необходимо получить статистически достоверную оценку на основе изображений небольшого количества участков, распределенных по оптической поверхности.

На рис. 2 представлены результаты АСМ-сканирования полированной поверхности ситалла. Сильный разброс значений спектральной плотности флуктуаций высоты для отдельных участков (кривая 1) вызван уединенными выступами с высотой от единиц до сотен нанометров, количество которых сильно различается у разных изображений. Для достижения приемлемой достоверности из АСМ изображений необходимо исключить уединенные выступы. Эффективным методом выделения локальных особенностей поверхности является пороговая фильтрация вейвлет-разложения ее трехмерного изображения (*JP Patent 2007-292772*).

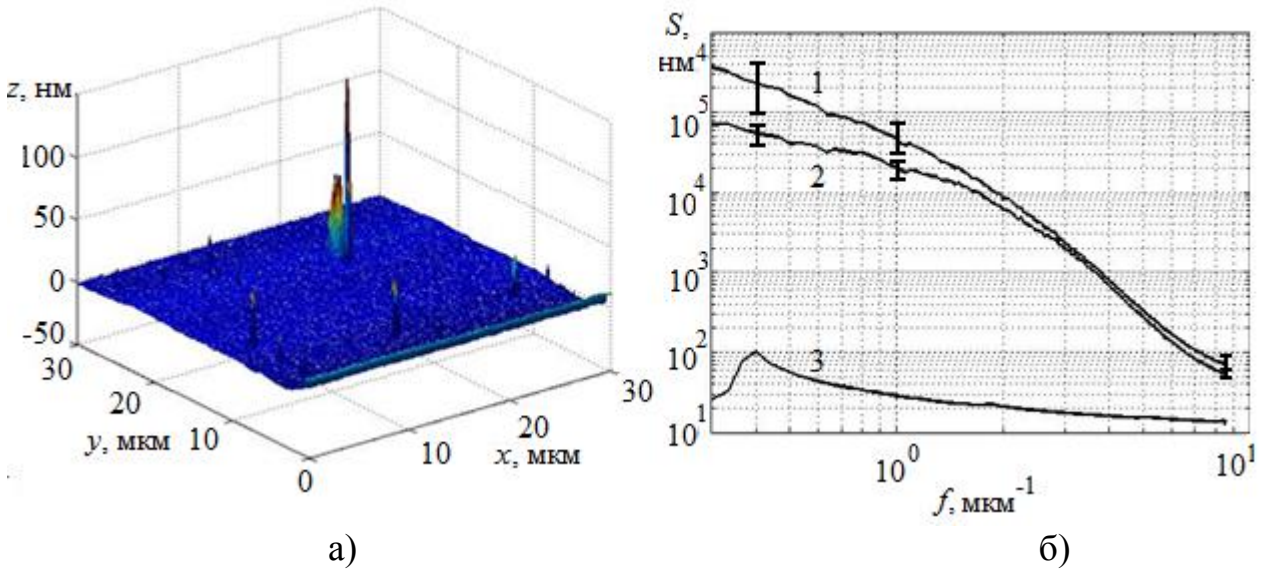


Рис. 2 – АСМ скан полированной поверхности оптической стеклокерамики СО-115М (а) и спектральная плотность флуктуаций высоты (б), усредненная по 13 участкам: 1 – для первичных изображений, 2 – после вейвлет-фильтрации уединенных выступов, 3 – оценка для ложного хаотического рельефа, связанного с собственным шумом атомно-силового микроскопа. Около точек показан разброс значений спектральной плотности, рассчитанных для разных участков

Согласно теории кратномасштабного анализа изображение поверхности $z(x, y)$ представимо в форме упорядоченной совокупности коэффициентов разложения $a(M, k_x, k_y), w_j(m, k_x, k_y), j = 1, 2, 3$ по комбинациям произведений масштабирующих функций $\varphi(M, x), \varphi(M, y)$ и вейвлетов $\psi(m, x), \psi(m, y)$:

$$z(x, y) = \sum_{k_x=1}^{2^{K-M}} \sum_{k_y=1}^{2^{K-M}} C_0(x, y, k_x, k_y, M) a(M, k_x, k_y) + \sum_{m=1}^M \sum_{k_x=1}^{2^{K-m}} \sum_{k_y=1}^{2^{K-m}} \sum_{j=1}^3 w_j(m, k_x, k_y) C_j(x, y, k_x, k_y, m),$$

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= \varphi(M, x - k_x h) \varphi(M, y - k_y h) \\ C_1 &= \psi(m, x - k_x h) \varphi(m, y - k_y h), \\ C_2 &= \varphi(m, x - k_x h) \psi(m, y - k_y h), \\ C_3 &= \psi(m, x - k_x h) \psi(m, y - k_y h), \end{aligned} \right\} (2)$$

где $m = 1..M$ - уровень разложения (декомпозиции), M – количество уровней, N^2 – количество точек в АСМ-скане, $K = \ln N / \ln 2$.

В случае локализации вейвлета около выступа коэффициент при соответствующем слагаемом в разложении (2) тем больше, чем лучше вейвлет-функция аппроксимирует выделяемую особенность. Рис. 3 иллюстрирует выбор порога фильтрации τ для коэффициентов при идентификации с уединенными выступами компонент разложения по вейвлетам Добеши пятого порядка. Количество уровней декомпозиции M выбрано равным шести. Удаление выступов позволяет уменьшить на порядок разброс значений спектральной плотности флуктуаций высоты (рис. 2). Анализ достоверности определения среднеквадратической шероховатости (рис. 4) в диапазоне пространственных частот $0,1 - 8,0 \text{ мкм}^{-1}$ демонстрирует достижение разброса $\pm 0,01 \text{ нм}$ после исключения выступов из изображений лишь семи участков.

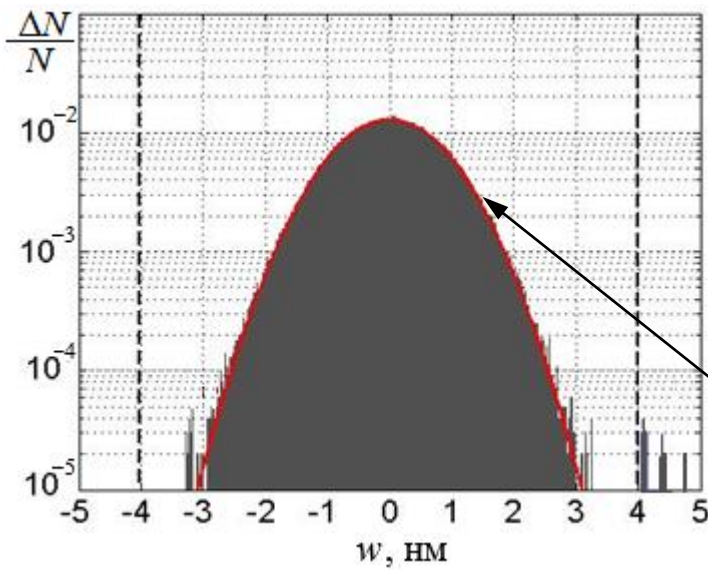


Рис. 3 - Распределение по величинам для коэффициентов вейвлет-разложения изображения поверхности ситалла ($m = 1$). Вертикальные штриховые линии – порог фильтрации:

$$\tau = \beta \sqrt{2 \ln(N)}, \quad (3)$$

$$f(w) = \frac{1}{\beta \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{w^2}{\beta^2}\right). \quad (4)$$

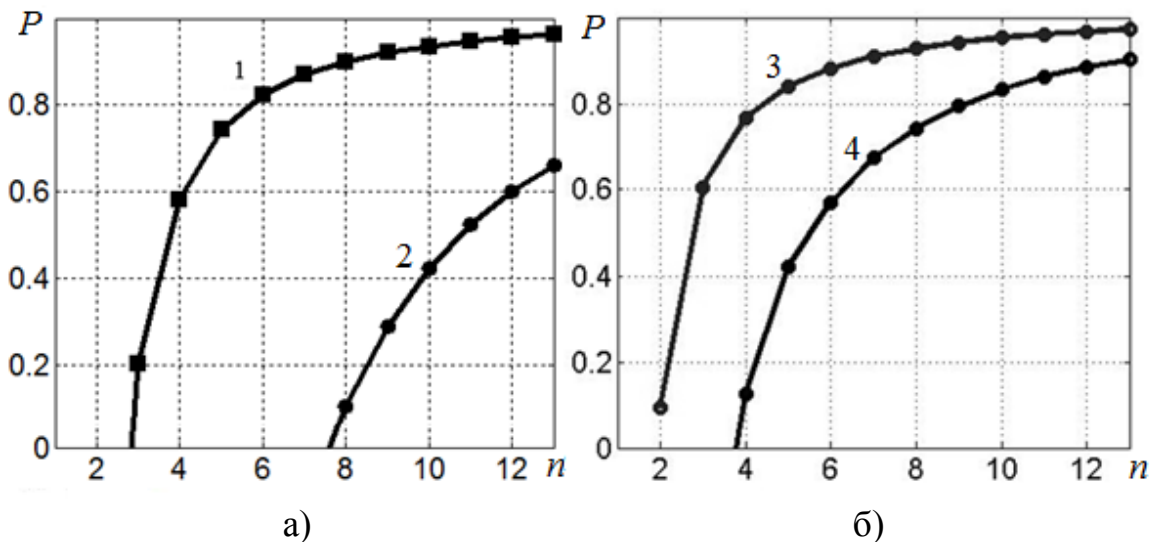


Рис. 4 - Зависимость от количества изображений n вероятности локализации оценки среднеквадратической шероховатости в пределах $\pm \delta$, нм: 1 – 1,5, 2 – 0,5, 3 – 0,02, 4 – 0,01; а – для экспериментально зарегистрированных изображений, б – для изображений подстилающего рельефа после удаления выступов

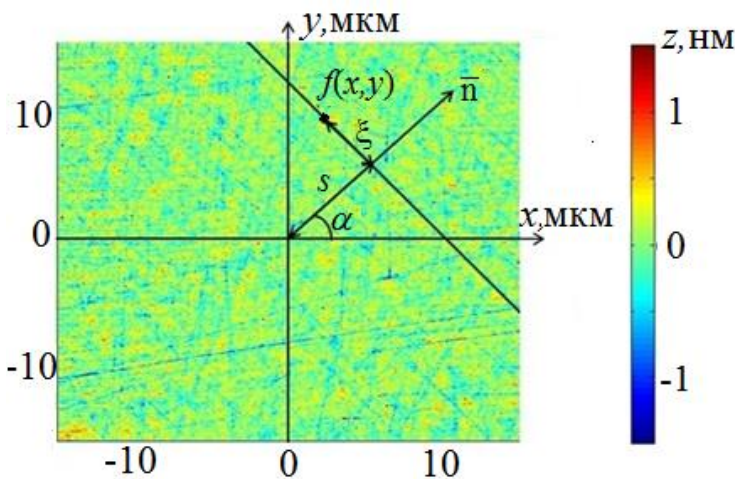
В третьей главе представлен разработанный способ выделения линейно структурированных особенностей, оставшихся в результате механохимического воздействия в процессе полирования. Решение поставленной задачи достигнуто на основе применения следующей последовательности операций с изображениями подстилающего рельефа:

- преобразование Радона трехмерного изображения поверхности;
- вейвлет-фильтрация образа поверхности в пространстве Радона с пороговым условием, соответствующим выделяемой особенности;
- обратное преобразование Радона отфильтрованного образа поверхности.

Преобразование Радона является результатом интегрирования высоты z , как функции двух переменных x, y , вдоль прямой, проходящей перпендикулярно вектору $n = (\cos\alpha, \sin\alpha)$ на расстоянии s от начала координат (рис. 5):

$$R(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} z(s \cdot \cos\alpha - \xi \cdot \sin\alpha, s \cdot \sin\alpha + \xi \cdot \cos\alpha) d\xi, \quad (5)$$

$$z(x, y) = \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{\infty} \frac{\omega d\omega}{4\pi^2} e^{i\omega(x \cdot \cos\alpha + y \cdot \sin\alpha)} \int_{-\infty}^{\infty} R(s, \alpha) e^{-i\omega s} ds, \quad (6)$$



$$\text{где } \begin{bmatrix} s \\ \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}.$$

Рис. 5 - АСМ изображение участка поверхности подложки и переменные s, α преобразования Радона (5)

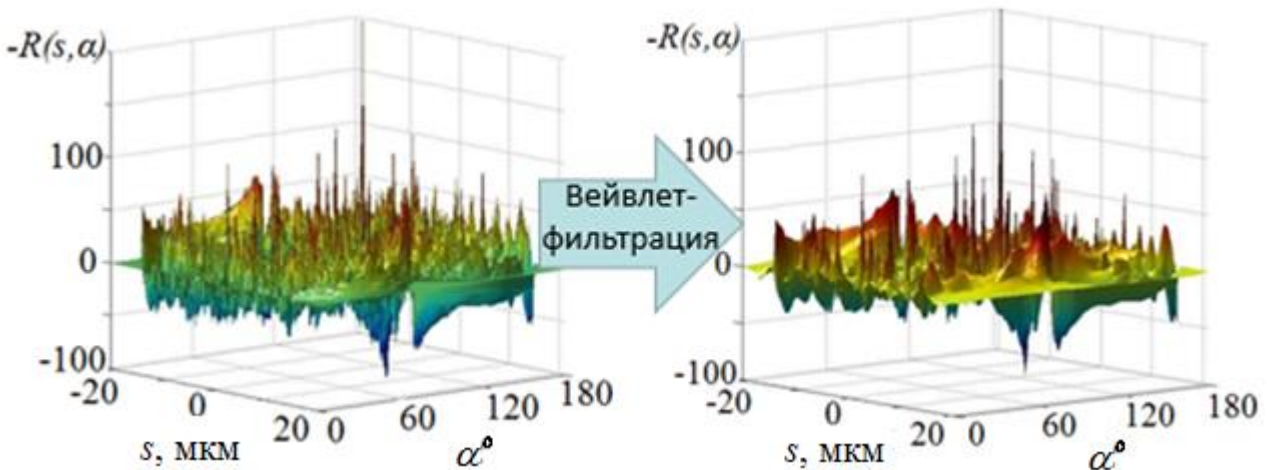


Рис. 6 - Инвертированное изображение поверхности подложки в пространстве переменных Радона до и после вейвлет-фильтрации

Для формирования изображения поверхности, содержащей, главным образом, лишь линейно структурированные особенности (рис. 6), пики в образе Радона выделены с помощью вейвлет-фильтрации. Выбор порогового условия для коэффициентов разложения изображения по вейвлетам Добеши третьего порядка, иллюстрирует рис. 7. В данном случае распределение коэффициентов разложения по величине w близко к экспоненциальной зависимости:

$$f(w) \approx F_0 \exp\left(-\frac{w}{W}\right). \quad (7)$$

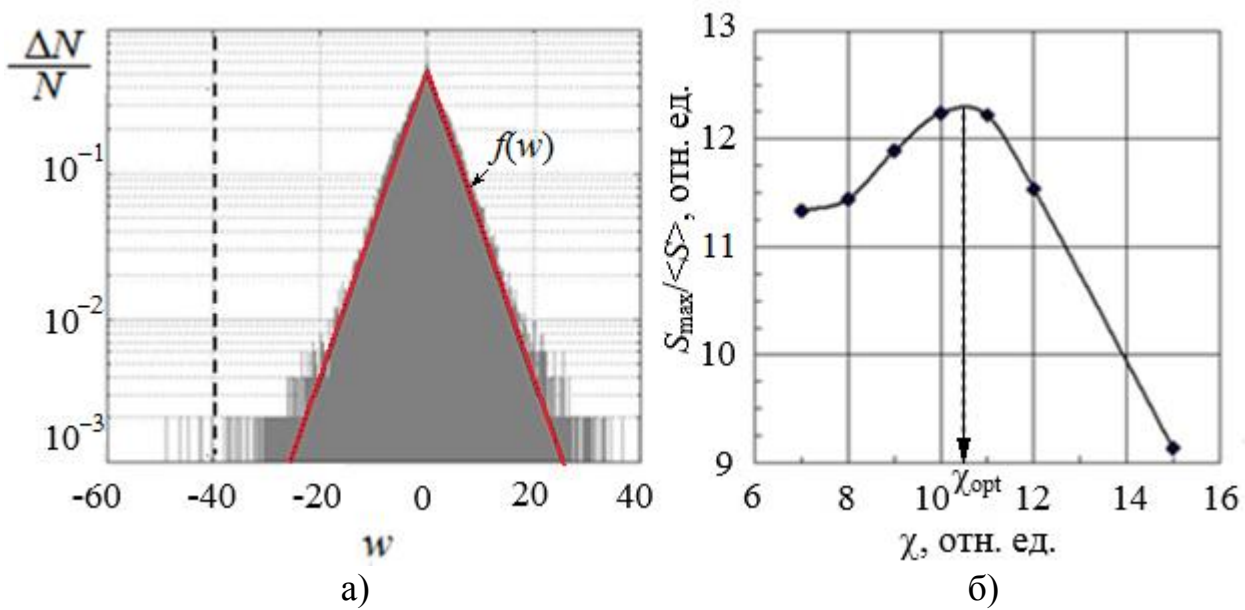


Рис. 7 - Распределение по величинам для коэффициентов вейвлет-разложения изображения подстилающего рельефа ($m = 1$) в пространстве Радона (а) и зависимость контрастности пика на угловой зависимости спектральной плотности флуктуаций высоты для синтезированного изображения линейно структурированных особенностей от нормированного порога фильтрации (б). Вертикальной штриховой линией выделен порог фильтрации

Взаимное проникновение элементов изотропной составляющей рельефа и следов полирования в их синтезированные изображения при произвольном задании порога сопровождается уменьшением контрастности пиков на угловом распределении спектральной плотности флуктуаций высоты для линейно структурированных особенностей поверхности, определяющих анизотропную составляющую рассеяния. Однако отличие распределения от гауссового не позволяет определить величину порога фильтрации с помощью соотношения (3). Поэтому в качестве критерия, отражающего качество фильтрации, использовано отношение максимальной высоты пика к среднему значению спектральной плотности флуктуаций высоты. Зависимость величины отношения $S_{\max}/\langle S \rangle$ от безразмерного параметра $\chi = \tau/W$ содержит локальный максимум в диапазоне $10 < \chi_{\text{opt}} < 11$ (рис. 7,б), что позволяет использовать обнаруженный результат при фильтрации АСМ изображений в пространстве Радона.

Четвертая глава посвящена принципам построения и апробации программно-математического обеспечения для анализа трехмерных АСМ изображений поверхности подложек и зеркал, предназначенных для кольцевых лазеров. Разделение экспериментально зарегистрированного АСМ скана на изображения характерных особенностей рельефа: линейно-структурированных дефектов, остаточного хаотического рельефа и уединенных выступов иллюстрирует рис. 8. Общее количество подложек и зеркал, АСМ сканы поверхностей которых были подвергнуты анализу, превышает 300.

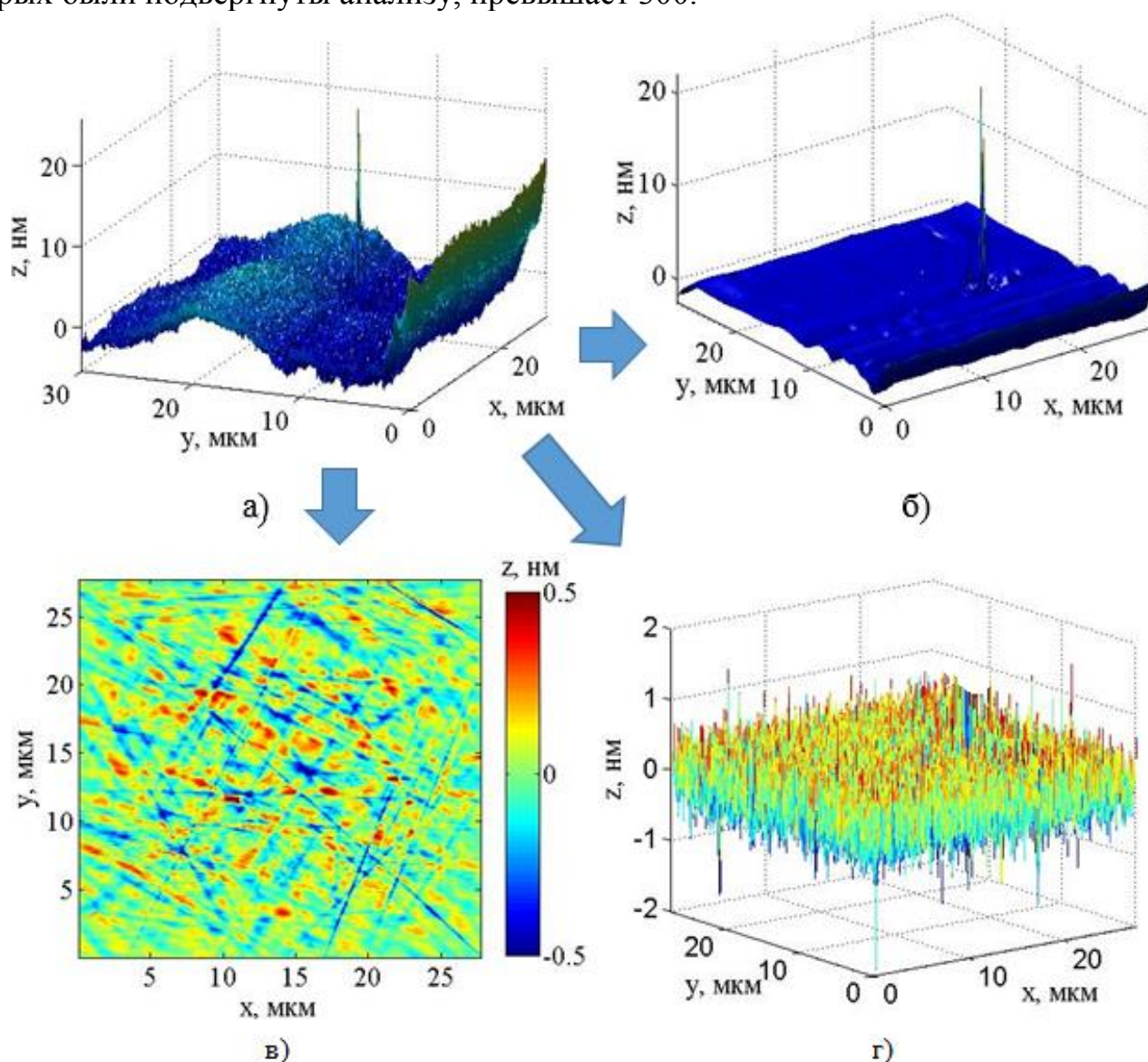


Рис. 8 - Разделение характерных особенностей рельефа оптической поверхности: а – экспериментально зарегистрированное АСМ изображение, б – уединенные выступы, в – линейно структурированные дефекты, г - остаточный хаотический рельеф

На рис. 9 представлены спектральные плотности флуктуаций высоты остаточного хаотического рельефа для двух подложек с разным качеством обработки и зеркала, сформированного на основе хорошо отполированной подложки. Таблица 1 отражает степень корреляции разных характерных особенностей поверхностей подложек и сформированных на их основе зеркал.

Полученные результаты подтверждают высокую корреляцию статистических свойств остаточного хаотического рельефа и линейно структурированных дефектов на поверхностях подложек и сформированных на их основе интерференционных отражающих покрытий.

Сравнительная оценка рассеивающих свойств исследованных зеркал и их подложек выполнена на основе лишь данные АСМ сканирования и векторной теории рассеяния оптического излучения прецизионной поверхностью диэлектрика. При расчетах реальная поверхность была заменена идеально отражающей с полностью совпадающей топографией и бесконечно большой диэлектрической проницаемостью. Величины полного интегрального рассеяния TIS и коэффициента обратного рассеяния R в таком приближении определяются следующими соотношениями:

$$TIS(\rho) = \frac{16\pi^2}{\lambda^4 \sqrt{2}} \iint_{\theta, \varphi} S(f_x, f_y) (1 + \sin^2 \varphi) \cos^2 \theta \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (8)$$

$$|R(\rho)| \approx \frac{2\pi^4 \sqrt{2} \sqrt{\pi} \nu}{\lambda^2} \sqrt{S\left(\frac{-\sqrt{2}}{\lambda} \cos \rho, \frac{-\sqrt{2}}{\lambda} \sin \rho\right)}, \quad (9)$$

где $\lambda = 0,6328$ мкм – длина волны излучения кольцевого гелий-неонового лазера, ν – расходимость излучения, генерируемого кольцевым лазером ($\sim 10^{-3}$ рад), f_x, f_y – пространственные частоты, зависящие от углов падения и рассеяния θ, φ :

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \rho & -\sin \rho \\ \sin \rho & \cos \rho \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda} \left(\sin \theta \cos \varphi - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \\ \frac{1}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi \end{pmatrix}. \quad (10)$$

ρ – угол между плоскостью падения и осью x на зарегистрированном изображении поверхности (угол азимутальной ориентации).

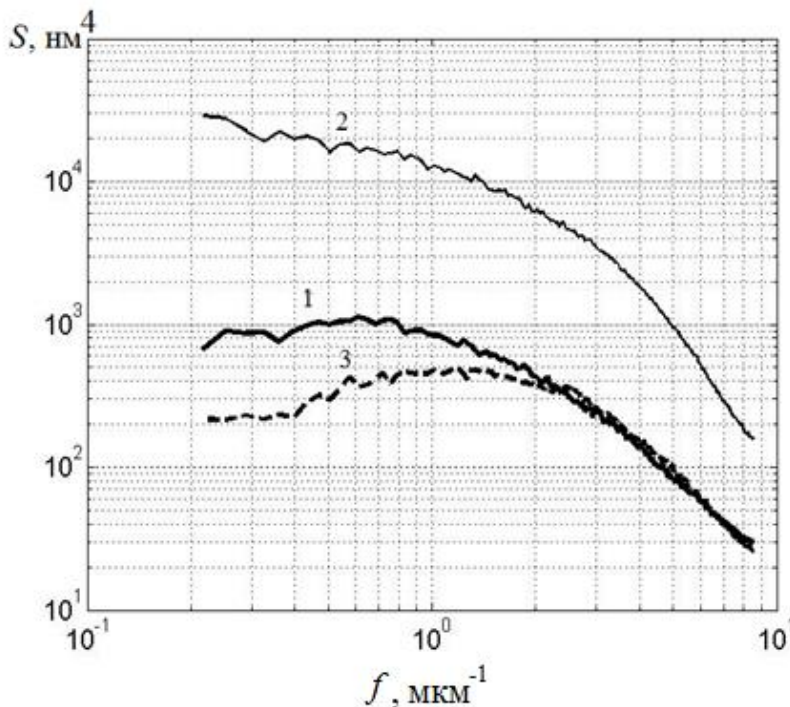


Рис. 9 - Спектральная плотность флуктуаций остаточного хаотического рельефа: 1 – хорошо отполированная подложка, 2 – недостаточно отполированная подложка, 3 – зеркало, интерференционное отражающее покрытие которого сформировано на основе хорошо отполированной подложки

Конечные результаты применения созданного программно-математического обеспечения для анализа зарегистрированных АСМ изображений на примере двух оптических поверхностей с качественно различающимися линейно структурированными особенностями иллюстрирует рис. 10. Следы технологической обработки на оптической поверхности, приводят к существованию азимутальных положений с ярко выраженными максимумами величин, характеризующих рассеяние излучения кольцевого лазера. Повороты отражающей поверхности зеркала способны изменить полное интегральное рассеяние и амплитудный коэффициент обратного рассеяния в несколько раз. Тем не менее, типичная ширина диапазона углов (порядка десяти градусов), соответствующего абсолютной величине амплитудного коэффициента обратного рассеяния на линейно структурированных особенностях рельефа, не превышающей 0,2 ppm, позволяет установить приемлемый допуск для азимутального положения оптической поверхности при сборке кольцевого резонатора.

Программно-аппаратный комплекс, разработанный для контроля рассеивающих свойств зеркал и включающий программу для разделения характерных особенностей рельефа и расчета рассеивающих свойств поверхности, позволяет в автоматическом режиме производить выбор параметров АСМ-сканирования оптической поверхности, рассчитывать ее рассеивающие свойства и их зависимость от азимутального положения зеркала.

Таблица 1

Параметры характерных особенностей рельефа подложек и интерференционных отражающих покрытий, нанесенных на их поверхность

№ оптической поверхности	Уединенные выступы		Линейно структурированные особенности		Остаточный хаотический рельеф			
	<i>Среднеквадратическая шероховатость, нм</i>		<i>Среднеквадратическая шероховатость, нм</i>		<i>Среднеквадратическая шероховатость, нм</i>		<i>Радиус корреляции, нм</i>	
	Подложка	Зеркало	Подложка	Зеркало	Подложка	Зеркало	Подложка	Зеркало
43	0,54	0,75	0,21	0,22	0,47	0,68	127	129
44	0,26	0,39	0,11	0,11	0,29	0,37	82	86
45	0,17	0,66	0,13	0,16	0,44	0,76	109	111
46	0,61	0,56	0,13	0,10	0,29	0,44	92	90
48	0,52	0,25	0,10	0,08	0,30	0,30	104	103
50	0,21	0,21	0,16	0,15	0,52	0,47	97	102
53	0,20	0,24	0,09	0,07	0,24	0,24	111	109
54	0,62	0,29	0,16	0,14	0,54	0,43	112	110
55	0,42	0,28	0,12	0,10	0,30	0,25	125	132
61	0,35	0,18	0,10	0,09	0,26	0,27	100	102

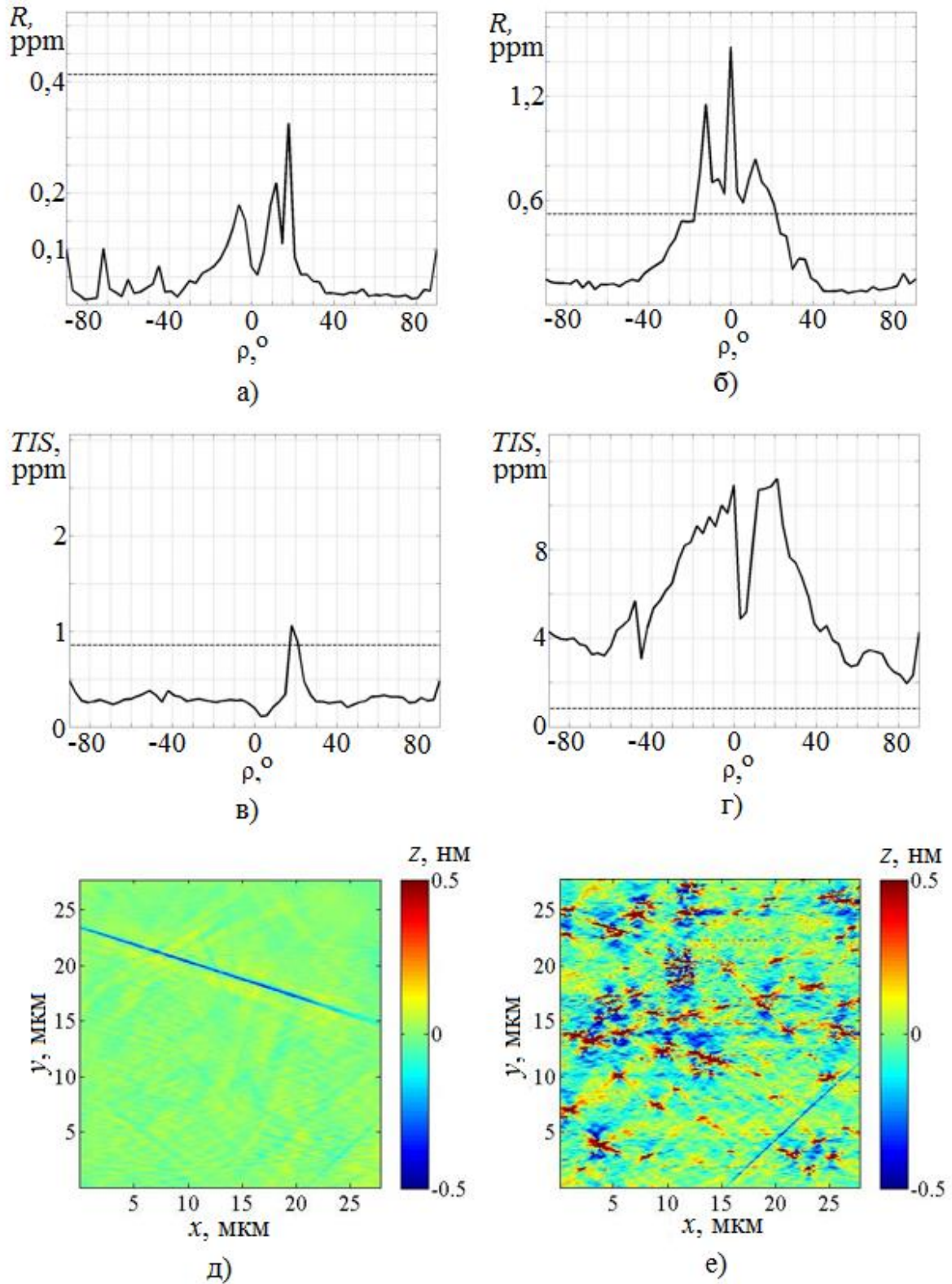


Рис. 10 - Зависимости коэффициента обратного рассеяния R (а, б), полного интегрального рассеяния TIS (в, г) от азимутального угла ориентации двух оптических поверхностей и отфильтрованные изображения линейно структурированных особенностей их нанорельефа (д, е). Сплошные кривые – вклад в характеристики рассеяния линейно структурированных особенностей, пунктир – остаточного хаотического рельефа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Разработана методика экспериментальной оценки собственных шумов атомно-силового микроскопа и их влияния на спектральную плотность флуктуаций высоты, рассчитанной по АСМ изображениям оптической поверхности.

2. Определены условия регистрации АСМ изображений нанорельефа полированной оптической стеклокерамики и поверхности нанесенного на нее отражающего покрытия, исключаяющие искажения спектральной плотности флуктуаций высоты рельефа: шаг сканирования не должен превышать две трети от радиуса корреляции шероховатого нанорельефа, локальные неоднородности которого предварительно удалены вейвлет-фильтрацией полученных изображений. Показано, что в данном случае для статистически достоверной оценки достаточно семи изображений участков с размерами 30x30 мкм².

3. Реализована пороговая фильтрация разложения по вейвлетам Добеши пятого порядка АСМ изображения оптической поверхности, которая обеспечила возможность разделения уединенных дефектов и подстилающего шероховатого рельефа.

4. Создан новый способ выделения линейно структурированных особенностей, основанный на вейвлет-фильтрации изображения поверхности в пространстве Радона.

5. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие выделить из экспериментальных АСМ сканов изображения характерных особенностей топографии поверхности: уединенных дефектов, линейно структурированных особенностей и остаточного хаотического рельефа. Методы анализа трехмерных АСМ изображений нанорельефа оптической поверхности использованы в региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.

6. Разработан программно-аппаратный комплекс для контроля зеркал, позволяющий автоматически выбирать условия АСМ-сканирования оптической поверхности и рассчитывать ее рассеивающие характеристики. Полученные результаты и разработанное программно-математическое обеспечение внедрены в ОАО «МИЭА» в программно-аппаратном комплексе и технологической документации для мониторинга производства зеркал кольцевых гелий-неоновых лазеров.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:

1. Chirkin M.V., Molchanov A. V., Serebryakov A.E. Monitoring of Superpolished Surfaces in Laser Mirror technology// Proceedings of 5-th International Conference on Optical Measurement Techniques of Structures & Systems, Shaker Publishing, Antwerp, Belgium, 2013. - pp. 93-102.
2. Chirkin M.V., Molchanov A.V., Serebryakov A.E., Zakharov M.A. Technological aspects of precision ring laser production: monitoring mirror surfaces of optical resonators// Proceedings of 20-th International Conference on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg, 2013. – pp. 66 – 68.

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

3. Молчанов А.В. Анизотропия рассеивающих свойств сверхгладких подложек зеркал для прецизионных лазерных гироскопов [Текст]/ Молчанов А.В., Серебряков А.Е., Чиркин М.В.// Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2012. – № 42–2. – С. 42–48.
4. Молчанов А.В. Определение порога вейвлет-фильтрации изображений сверхгладких поверхностей в пространстве Радона [Текст]/ Молчанов А.В., Серебряков А.Е., Чиркин М.В.// Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2013. – № 2 (44). – С.40-46.
5. Воробьев Ю.В. Оценка точности измерения спектральной плотности флуктуаций высоты сверхгладкой поверхности диэлектрика [Текст]/ Воробьев Ю.В., Куприн А.А., Молчанов А.В., Плешаков Н.С., Серебряков А.Е., Чиркин М. В.// Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. – № 1 (51). – С. 147–151.

Охранные документы:

6. Патент №2471146, Российская Федерация, МПК G01B 5/28. Способ выделения линейно структурированной особенности поверхности [Текст]/ Молчанов А.В., Серебряков А.Е., Чиркин М.В.; патентообладатель Открытое акционерное общество "Московский институт электромеханики и автоматики" (RU). – заявка №2011140730/28; заявлено 07.10.2011; опубликовано 27.12.2012, Бюл. № 36.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014613939. Программа для разделения характерных особенностей рельефа и расчета рассеивающих свойств поверхности [Текст]/ Молчанов А.В., Серебряков А.Е., Чиркин М.В.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» (RU). - заявка № 2014611207; дата поступления 19.02.2014 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 10.04.2014 г.

Прочие публикации:

8. Серебряков А.Е. Селекция линейно структурированных дефектов на сверхгладкой диэлектрической подложке [Текст]/ Серебряков А.Е., Чиркин М.В.// Электроника. Межвуз. сб. науч. трудов. Рязань, – 2010. – С. 71 – 76.
9. Серебряков А.Е. Пространственная фильтрация АСМ-изображений наноструктурированной поверхности [Текст]/ Серебряков А.Е.// III Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноматериалы», Рязань, 2010. – Т. 1. – С. 140 - 145
10. Серебряков А.Е. Информативные критерии качества сверхгладких зеркал в технологии лазерных гироскопов [Текст]/ Серебряков А.Е.// Научные труды Международной научной конференции XXXVII Гагаринские чтения. Москва, 2011. – Т. 3. – С. 87–89.
11. Серебряков А.Е. Вейвлет-фильтрация АСМ-изображений сверхгладкой поверхности диэлектрика [Текст]/Серебряков А.Е.// Труды IV Всероссийской школы семинара “Нанодиагностика”, Рязань, 2011.– Т. 3. – С. 152–156.

12. Серебряков А.Е. Диагностика поверхности сверхгладких подложек, сформированных различными методами финишного полирования [Текст]/ Серебряков А.Е.// Научные труды Международной молодежной конференции XXXVIII Гагаринские чтения. Москва, 2012г., - Т. 3. - С.69-71.
13. Молчанов А.В. Диагностика поверхности сверхгладких диэлектрических подложек, сформированных различными методами финишного полирования [Текст]/ Молчанов А.В., Серебряков А.Е., Чиркин М.В.// Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии НМТ-2012». – М.: МАТИ, 2012. – С. 221-222.
14. Молчанов А.В. Фильтрация АСМ-изображений подложек зеркал лазерного гироскопа [Текст]/ Молчанов А.В., Серебряков А.Е., Чиркин М.В.// Труды Московского института электромеханики и автоматики. Вып. 5: Навигация и управление летательными аппаратами, – М.: МИЭА, 2012. – С. 2 – 11.
15. Серебряков А.Е. Рассеяние оптического излучения в лазерном гироскопе поверхностью зеркал с наноразмерной шероховатостью [Текст]/ Серебряков А.Е., Федяев В.К., Чиркин М.В., Юткина А.В.// Сборник научных трудов конференции «Микроэлектроника СВЧ», СПб, 2012. – Т. 2. – С. 207 – 211.
16. Плешаков Н.С. Технологический контроль параметров шероховатости поверхности подложек и зеркал кольцевых лазеров [Текст]/ Плешаков Н.С., Серебряков А.Е.// Научные труды Международной молодежной конференции XXXIX Гагаринские чтения. Москва, 2013г. – Т. 3. – С. 108 – 109.
17. Серебряков А.Е. Линейно структурированные особенности поверхности зеркал и порог захвата в кольцевом лазере [Текст]/ Серебряков А.Е.// Научные труды Международной молодежной конференции XL Гагаринские чтения. Москва. 2014 г. – Т. 3. – С. 115–116.
18. Воробьев Ю.В. Порог чувствительности атомно-силового микроскопа при регистрации спектральной плотности флуктуаций высоты сверхгладкой поверхности [Текст]/ Воробьев Ю.В., Серебряков А.Е.// VII Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых учёных по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур», 2014 г. – Т. 3.– С. 185 – 190.

Серебряков Андрей Евгеньевич

**АНАЛИЗ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НАНОРЕЛЬЕФА ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.04.2015 г. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага ксероксная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.