

**Занавескин Максим Леонидович**

**АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ В  
ИССЛЕДОВАНИИ ШЕРОХОВАТОСТИ  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Москва – 2008 г.**

Работа выполнена в секторе сканирующей зондовой микроскопии Института кристаллографии имени А.В. Шубникова РАН.

Научный руководитель: Кандидат физико-математических наук  
Толстихина Алла Леонидовна

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,  
профессор  
Имамов Рафик Мамедович

Кандидат физико-математических наук  
Батурин Андрей Сергеевич

Ведущая организация: Физический факультет Московского  
государственного университета  
имени М.В. Ломоносова

Защита состоится 5 декабря 2008 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.114.01 в Институте кристаллографии имени А.В. Шубникова РАН по адресу 119333 г. Москва, Ленинский пр., д. 59, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института кристаллографии имени А.В. Шубникова РАН по адресу 119333 г. Москва, Ленинский пр., д. 59.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2008 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.114.01

Каневский В.М.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

Сверхгладкие поверхности с высотой шероховатости мене 1 нм являются одним из основных компонентов элементной базы современных нанотехнологий. Благодаря малой развитости рельефа сверхгладкие подложки со стохастическим и регулярным нанорельефом обладают рядом уникальных свойств, позволяющих объединить их в общий класс – *наноструктурированные* поверхности.

В первую очередь наноструктурированные поверхности используются в качестве подложек для создания различных пленочных покрытий, свойства которых зависят от рельефа поверхности. В связи с этим основными задачами являются исследование рельефа наноструктурированных поверхностей, а также изучение взаимосвязи рельефа пленочных покрытий с рельефом подложек.

Благодаря высокому пространственному разрешению основным инструментом для изучения рельефа поверхности в нанометровом масштабе на сегодняшний день является атомно-силовая микроскопия (АСМ). Однако при использовании этого метода при исследовании наноструктурированных поверхностей возникает ряд методологических проблем, связанных с крайне низкой развитостью их рельефа и необходимостью учета малых аппаратных искажений метода АСМ. Требуется развитие методов описания статистических свойств нанорельефа, так как наиболее распространенные параметры шероховатости сверхгладких поверхностей не используют в полной мере данные АСМ. При изучении диэлектрических материалов актуальной задачей является изучение влияние статического заряда поверхности на получаемые АСМ-изображения. Не существует однозначно определенного подхода к исследованию методом АСМ корреляции рельефов подложки и пленочного покрытия. Таким образом, развитие методологии метода АСМ при исследовании наноструктурированных поверхностей и пленочных покрытий является актуальной задачей.

### **Цели работы**

Целью работы является развитие методологии атомно-силовой микроскопии при исследовании параметров шероховатости наноструктурированного рельефа поверхности диэлектрических образцов, а также исследование корреляции рельефов подложки и пленочного покрытия в многослойных интерференционных зеркалах, используемых в лазерных гироскопах.

### **Задачи работы**

1. Разработать комплексную методику исследования статистических свойств рельефа наноструктурированных поверхностей, позволяющую на основе данных атомно-силовой микроскопии с высокой точностью измерять параметры шероховатости изотропных и анизотропных наноструктурированных поверхностей, а именно: выработать рекомендации по измерению наноструктурированных поверхностей, цифровой обработке АСМ-изображений и выбору наиболее информативных параметров шероховатости наноструктурированных поверхностей.
2. Исследовать влияние статического заряда поверхности диэлектрических материалов на АСМ-изображения. Определить критерии наличия статического заряда поверхности методом АСМ. Найти метод устранения заряда поверхности для повышения достоверности данных АСМ.
3. Провести комплексное исследование наноструктурированных поверхностей методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновского рассеяния и дифференциального рассеяния света с целью выяснения достоверности результатов отдельных методов при определении параметров шероховатости.
4. Изучить влияние наноструктурированного рельефа подложек различных типов, на формирование зеркального покрытия и эффективность работы сформированных многослойных интерференционных зеркал в кольцевых лазерных гироскопах. Для этого исследовать корреляцию рельефа границ

раздела фаз и рельефа подложки в многослойных интерференционных зеркалах.

### **Защищаемые положения**

1. Комплексная методика исследования статистических свойств рельефа поверхности диэлектрических материалов, позволяющая на основе данных атомно-силовой микроскопии с высокой точностью измерять параметры шероховатости изотропных и анизотропных наноструктурированных поверхностей.
  - a. Методика включает в себя рекомендации по АСМ-измерению, постэкспериментальной цифровой обработке изображений и выбору наиболее информативных параметров шероховатости наноструктурированных поверхностей.
  - b. Методика описывает процедуру диагностики статического заряда поверхности диэлектрических образцов методом АСМ и процедуру неразрушающего устранения статического заряда поверхности.
  - c. Результаты разработанной методики могут быть сопоставлены с данными других методов исследования рельефа поверхности, что показано на примере сопоставления с методами диффузного рентгеновского рассеяния и дифференциального рассеяния света.
2. Рассеивающие свойства многослойных интерференционных покрытий для кольцевых лазерных гироскопов, работающих на длине волны  $\lambda=633$  нм, при существующем методе нанесения их методом ионно-лучевого напыления определяются только степенью развитости рельефа подложки.

### **Научная новизна**

1. Впервые изучено и оценено влияние поверхностного электростатического заряда различных диэлектрических материалов на параметры шероховатости наноструктурированных поверхностей, измеряемые методом АСМ.

2. Впервые комплекс методов АСМ и РР был применен для определения периода регулярной поверхностной наноструктуры на микронном и сантиметровом масштабах.
3. Впервые с помощью разработанной методики изучена корреляция рельефов подложки и зеркального покрытия.
4. Впервые показано, что рассеивающие свойства многослойных интерференционных зеркал для кольцевых лазерных гироскопов ( $\lambda=633$  нм) при существующем методе нанесения их методом ионно-лучевого напыления целиком определяются только рельефом подложки.

### **Практическая значимость**

1. Разработанные в ходе настоящей работы методики ведения измерений аттестованы Государственным научным метрологическим центром (ГНМЦ) ОАО "НИЦПВ". Одна из методик доработана и послужила основой разрабатываемого Национального стандарта РФ.
2. Разработанная в ходе настоящей работы методика исследования статистических свойств рельефа наноструктурированных поверхностей по данным АСМ в комплексе с исследованиями методом РР применялась для контроля качества полированных подложек из ситалла и многослойных зеркал различных изготовителей. Проведение этих работ позволило улучшить параметры выпускаемых зеркал.
3. Разработанная в ходе настоящей работы методика исследования статистических свойств рельефа наноструктурированных поверхностей применялась для исследования качества полировки и параметров регулярных наноструктур на поверхности полированных сапфировых подложек, предназначенных для эпитаксиального роста GaN. Результаты данных исследований были необходимы для оптимизации технологии роста высококачественных эпитаксиальных слоев GaN.

### **Личный вклад соискателя**

Диссертант принимал участие в формировании цели и задач исследования, разработке этапов и направлений выполнения диссертации. Сбор и анализ первичных материалов, положенных в основу научного исследования, разработка необходимого программного обеспечения, проведение исследований методом АСМ, интерпретация полученных данных осуществлялись непосредственно соискателем. Подготовка печатных работ к публикации автором выполнена лично. Выдвинутые на защиту научные положения, выводы диссертации являются результатом самостоятельных исследований автора.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, включая 44 рисунка.

### **Публикации**

По результатам работы опубликовано 6 статей и сделано 30 докладов на международных и российских конференциях.

### **Содержание работы**

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, определены научная новизна и практическое значение полученных результатов.

Первая глава диссертационной работы является аналитическим обзором литературы. На основании отечественных и зарубежных литературных данных в ней проведен обзор основных особенностей атомно-силового микроскопа, связанных с его конструкцией и режимами работы, рассмотрены методики анализа статистических свойств наноструктурированных поверхностей по данным АСМ, представлены методы изучения рельефа поверхности, основанные на взаимодействии электромагнитного излучения с шероховатой границей раздела фаз, проведен обзор исследования и использования многослойных интерференционных зеркал. На основании проведенного анализа сформулирована цель и задачи научного исследования.

Вторая глава посвящена методике эксперимента. Приведено описание образцов и методик, использованных при их исследовании. Автор отмечает, что исследования проводились с использованием метрологического атомно-силового микроскопа, оборудованного емкостными датчиками регистрации перемещения сканера.

В третьей главе представлены основные экспериментальные данные, полученные в рамках диссертационной работы, а также приводится обсуждение полученных результатов.

Первой задачей работы является разработка комплексной методики исследования статистических свойств рельефа наноструктурированных поверхностей, позволяющей на основе данных атомно-силовой микроскопии с высокой точностью измерять параметры шероховатости изотропных и анизотропных наноструктурированных поверхностей, а именно: выработать рекомендации по измерению наноструктурированных поверхностей, цифровой обработке АСМ-изображений и выбору наиболее информативных параметров шероховатости наноструктурированных поверхностей.

Для решения этой задачи в работе обосновывается выбор методики описания статистических свойств рельефа наноструктурированных поверхностей. Рассмотрены следующие параметры шероховатости: среднеквадратичное отклонение (СКО) высоты ( $R_q$ ), автокорреляционная функция и функция спектральной плотности мощности (power spectral density – PSD) поверхности. Если  $z(\boldsymbol{\rho})$  - двумерная функция рельефа поверхности, то  $R_q$ :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{S} \int_S (z(\boldsymbol{\rho}) - R_{mean})^2 d\boldsymbol{\rho}}, \quad (1)$$

$$\text{где } R_{mean} = \frac{1}{S} \int_S z(\boldsymbol{\rho}) d\boldsymbol{\rho} - \quad (2)$$

средняя высота рельефа отсканированной площадки, а  $S$  – площадь АСМ-изображения, по которому производится вычисление. Двумерная автокорреляционная функция

$$C(\boldsymbol{\rho}) = \langle z(\boldsymbol{\rho} + \boldsymbol{\rho}') z(\boldsymbol{\rho}) \rangle \quad (3)$$

в случае изотропного рельефа может быть усреднена по углу:

$$C(\rho) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C(\rho, \alpha) d\alpha, \quad \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \text{ и } \alpha = \arctan\left(\frac{y}{x}\right). \quad (4)$$

Двумерная функция спектральной плотности мощности может быть рассчитана из двумерной автокорреляционной функции

$$PSD_{2D}(\mathbf{v}) = \int \exp(2\pi i \mathbf{v} \boldsymbol{\rho}) C(\boldsymbol{\rho}) d\boldsymbol{\rho}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{v}$  – вектор пространственной частоты, величина обратная радиус-вектору в прямом пространстве. Для изотропных поверхностей двумерная PSD-функция также может быть усреднена по углу:

$$PSD_{2D}(v) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} PSD_{2D}(v, \theta) d\theta. \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \theta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right). \quad (6)$$

Для анизотропных поверхностей можно рассчитать двумерную PSD-функцию в выбранном направлении:

$$PSD_{2D}^{anisotropic}(\mathbf{v}) = PSD_{2D}(v, \theta_{anisotropic}), \quad (7)$$

где  $\theta_{anisotropic}$  – угол, задающий направление расчета.

Возможно также рассчитать одномерную PSD-функцию. Между одномерной и двумерной PSD-функцией существует связь:

$$PSD_{1D}(v) = 2\pi PSD_{2D}(v)v. \quad (8)$$

Зная восстановленную по серии АСМ-изображений PSD-функцию можно рассчитать эффективную среднеквадратичную шероховатость поверхности:

$$\sigma_{eff}^2 = 2\pi \int_{v_{min}}^{v_{max}} PSD_{2D}(v)v dv, \quad (9)$$

где минимальная и максимальная частоты лежат в области определения восстановленной PSD-функции и могут быть выбраны с учетом специфики конкретной задачи. Так, например, параметр  $R_q$  АСМ-изображения и его PSD-функция связаны:

$$R_q^2 = 2\pi \int_{v_{min}}^{v_{max}} PSD_{2D}(v)v dv, \quad (10)$$

$$\text{где } v_{min} = \frac{1}{L} \text{ и } v_{max} = \frac{1}{\Delta L}, \quad (11)$$

$L$  – линейный размер полученного АСМ-изображения,  $\Delta L$  – расстояние между соседними измеренными точками АСМ-изображения.

Для расчета описанных выше параметров шероховатости по данным АСМ автором разработан и реализован специализированный пакет программного обеспечения.

На примере серии АСМ-изображений разного размера (1x1 мкм, 10x10 мкм и 100x100 мкм) сверхгладкой полированной подложки из ситалла рассмотрены особенности масштабного поведения среднеквадратичного

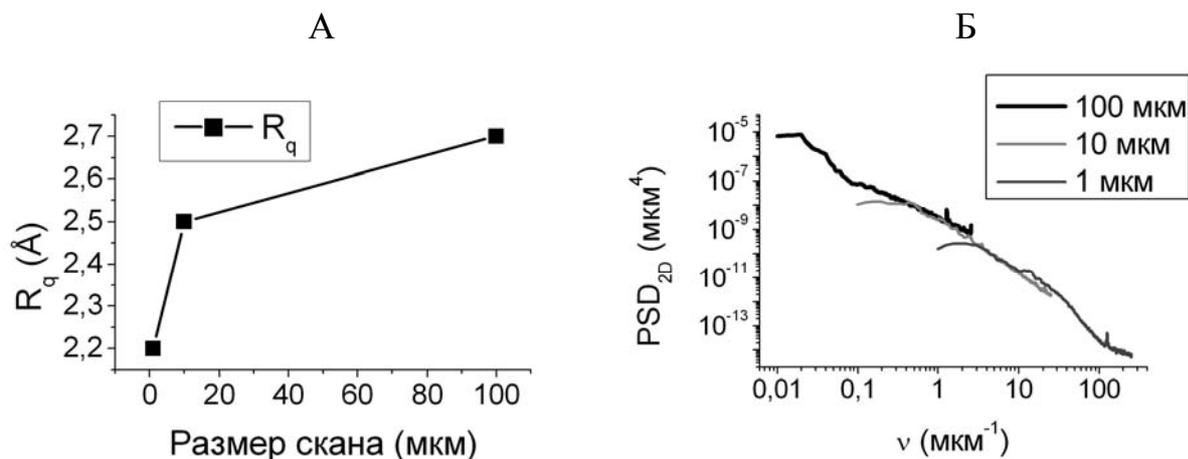


Рисунок 1. Параметры шероховатости серии АСМ-изображений полированной подложки из ситалла: (А) –  $R_q$ , (Б) – двумерная PSD-функция.

отклонения высоты, функции спектральной плотности мощности и функции автокорреляции поверхности.

На рисунке 1 А представлена масштабная зависимость параметра  $R_q$ . Величина  $R_q$  зависит от размера области сканирования и растет с ростом области сканирования, не выходя на насыщение. PSD-функции (рис. 1 Б) хорошо совпадают друг с другом в области перекрытия пространственных частот, что позволяет восстановить единую PSD-

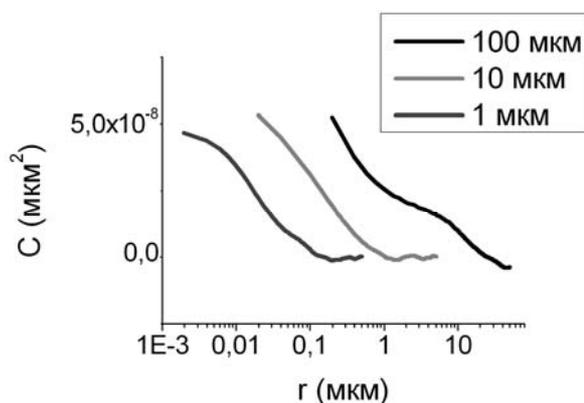


Рисунок 2. Функции автокорреляции серии АСМ-изображений полированной подложки из ситалла.

функцию во всем диапазоне возможностей метода АСМ. Хотя имеется и систематическое отклонение в области малых пространственных частот каждой

из функций. Автокорреляционные функции (рис. 2) в области перекрытия линейных размеров совершенно не совпадают, что делает невозможным восстановление единой автокорреляционной функции в диапазоне возможностей метода АСМ. Исходя из представленного анализа масштабной зависимости параметров шероховатости автор диссертации делает вывод о целесообразности использования параметров PSD-функции и эффективной шероховатости ( $R_q$ ) для описания статистических свойств рельефа наноструктурированных поверхностей.

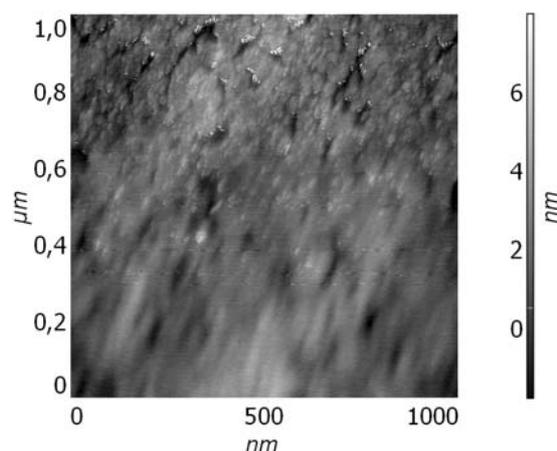
На основании последовательного рассмотрения артефактов АСМ-измерений выработаны рекомендации по цифровой обработке изображений, позволяющие избавиться от влияния артефактов и минимально искажающие рельеф поверхности. Описан разработанный автором алгоритм, позволяющий вырезать крупные частицы из АСМ-изображений гладких поверхностей. Реализованная программа на основе данного алгоритма применяется в работе для исследования гладких поверхностей без учета их загрязнения. В работе обосновываются рекомендации по проведению АСМ-измерений наноструктурированных поверхностей. Так с использованием программы, позволяющей вырезать крупные частицы из АСМ-изображений, показано влияние загрязнения поверхности на PSD-функцию и величину СКО высоты. Представлен опыт показывающий, что благодаря использованию чистого помещения 100 класса эксперимент проводится в условиях, когда загрязнения поверхности из окружающей среды не происходит. Изучено влияние порядка полинома, который вчитается из строк АСМ-изображения на PSD-функцию и величину СКО высоты. Показано, что с ростом порядка вычитаемого полинома PSD-функция имеет все более существенное занижение значений в области низких частот и величина СКО высоты уменьшается. Продемонстрирована возможность восстановления реальной PSD-функции поверхности с использованием серии АСМ-изображений разного масштаба. Произведена оценка занижения параметра СКО высоты из-за обработки изображения, которая показала занижение примерно на 10%. Показано, что ориентация

анизотропного рельефа по  $45^\circ$  к направлению сканирования приводит к минимальной потере данных о рельефе в результате последующей обработки.

Таким образом, в диссертации разработан комплексный метод исследования наноструктурированных поверхностей с помощью АСМ: приведены рекомендации по выбору наиболее информативных параметров шероховатости наноструктурированных поверхностей, цифровой обработке АСМ-изображений и измерению наноструктурированных поверхностей.

Все образцы, изучавшиеся в диссертационной работе, являлись диэлектриками. Поэтому следующей задачей работы является изучение влияния статического заряда поверхности на разрешение АСМ и на рассчитываемые параметры шероховатости, а также поиск методики регистрации и устранения заряда с поверхности диэлектрических материалов.

Для решения поставленной задачи в работе изучаются искажения АСМ-изображений, связанные с равномерным статическим зарядом поверхности. Наличие равномерно распределенного статического заряда на поверхности диэлектрического образца сказывается на четкости изображения в целом. Примером может служить полученное в прерывисто-контактном режиме

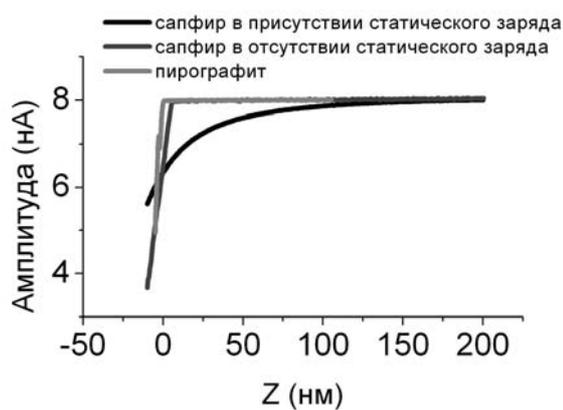


*Рисунок 3. АСМ-изображение ситалловой пластины во время стекания поверхностного заряда.*

топографическое изображение поверхности полированной пластины ситалла (рис. 3). Во время получения изображений происходило стекание статического заряда с поверхности.

В диссертации описывается разработанный автором способ определения заряда поверхности с помощью АСМ, по анализу спектроскопических кривых. На рисунке 4 представлены амплитудные спектроскопические кривые, полученные для заряженной поверхности сапфира, поверхности пирографита и

сапфировой поверхности заряд с которой был устранен. Из рисунка видно, что в случае заряженной поверхности сапфира кривая подвода идет под более пологим углом и не имеет ярко выраженного перехода на полку, соответствующую потере контакта с поверхностью. Это вызвано тем, что кулоновское взаимодействие между заряженной поверхностью и наведенным на зонд



*Рисунок 4. Амплитудная спектроскопия поверхности сапфира в заряженном и незаряженном состоянии и спектроскопия поверхности пирографита.*

зарядом более дальнедействующее, чем взаимодействие Ван-дер-Ваальса, которым описывается взаимодействие поверхности и зонда в отсутствие заряда. Для сравнения была получена спектроскопическая кривая для поверхности заземленного пирографита, так как пирографит обладает металлической проводимостью и на нем статического заряда быть не может. Видно, что кривая подвода для пирографита и сапфира в отсутствие статического заряда немного отличаются. Это отличие может быть объяснено тем, что спектроскопические кривые были получены зондами с различными характеристиками. Однако общее поведение кривых схоже, что указывает на то, что заряд с поверхности сапфира был устранен.

В работе приводится описание разработанной неразрушающей методики устранения статического заряда с поверхности диэлектрических материалов. Суть метода заключается в том, что повышение относительной влажности воздуха приводит к стеканию статического заряда с поверхности диэлектрических материалов. Автор отмечает, что время стекания заряда отличается для различных материалов, при различных способах обработки поверхности и при различном размере детали и может варьироваться от нескольких часов до нескольких суток.

Автор описывает результаты изучения влияния искажений, вносимых в АСМ-изображения статическим зарядом поверхности, на параметры шероховатости. На рисунке 5 приведены графики PSD-функций поверхности ситалла, рассчитанных в присутствии заряда поверхности и когда заряд был устранен. Из рисунка видно, что кривая, соответствующая изображению, полученному при наличии заряда поверхности, идет ниже кривой, рассчитанной по изображению незаряженной поверхности. Пространственная частота, где графики функций расходятся, составляет  $8 \text{ мкм}^{-1}$ , что соответствует размеру  $125 \text{ нм}$  в прямом пространстве. Таким образом, можно сделать вывод, что детали изображения с размером менее  $125 \text{ нм}$  размываются из-за влияния статического заряда. Автор отмечает, что в случае другого материала и другой величины заряда поверхности критический масштаб влияния может отличаться. Так при исследовании заряженных пластин сапфира зачастую невозможно получить адекватные АСМ-изображения размером  $100 \times 100 \text{ мкм}$ , что указывает на то, что масштаб влияния статического заряда составляет десятки микрон.

Таким образом, в диссертации подробно исследовано влияние статического заряда диэлектрических наноструктурированных поверхностей на получаемые АСМ-изображения и параметры шероховатости. Предложены методики регистрации и устранения статического заряда поверхности.

Следующей задачей диссертации является проведение комплексных исследований поверхностных наноструктур методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновского рассеяния (РР) и дифференциального рассеяния света (ДРС). Работа по сравнению различных методик исследования рельефа поверхности преследует две цели. Первая – это

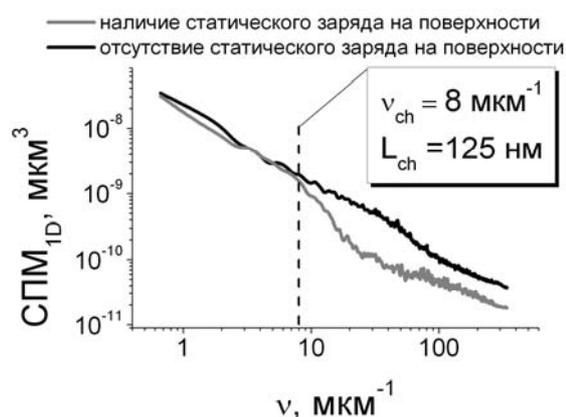


Рисунок 5. PSD-функции полированной ситалловой пластины, полученным в условиях заряженной и не заряженной поверхности.

повышение достоверности результатов исследования. АСМ и методы РР и ДРС основаны на различных физических принципах взаимодействия с рельефом поверхности. Кроме того в основе интерпретации данных методов РР и ДРС лежит теоретическая модель, опирающаяся на ряд предпосылок, и сравнение с прямым методом АСМ способно подтвердить их истину. Вторая цель – изучение равномерности обработки поверхности. Дело в том, что метод АСМ позволяет получать изображения вплоть до 100x100 мкм, в то время как метод РР получает усредненную информацию о рельефе с площади в 1000 раз большей. Использование комплекса методик открывает широкие возможности и для изучения регулярных поверхностных наноструктур. С помощью АСМ можно детально изучить их структуру, а с помощью РР получить информацию о регулярности наноструктуры в масштабе сантиметров.

В диссертации приведены экспериментальные результаты сравнения данных методов атомно-силовой микроскопии, рентгеновского рассеяния и

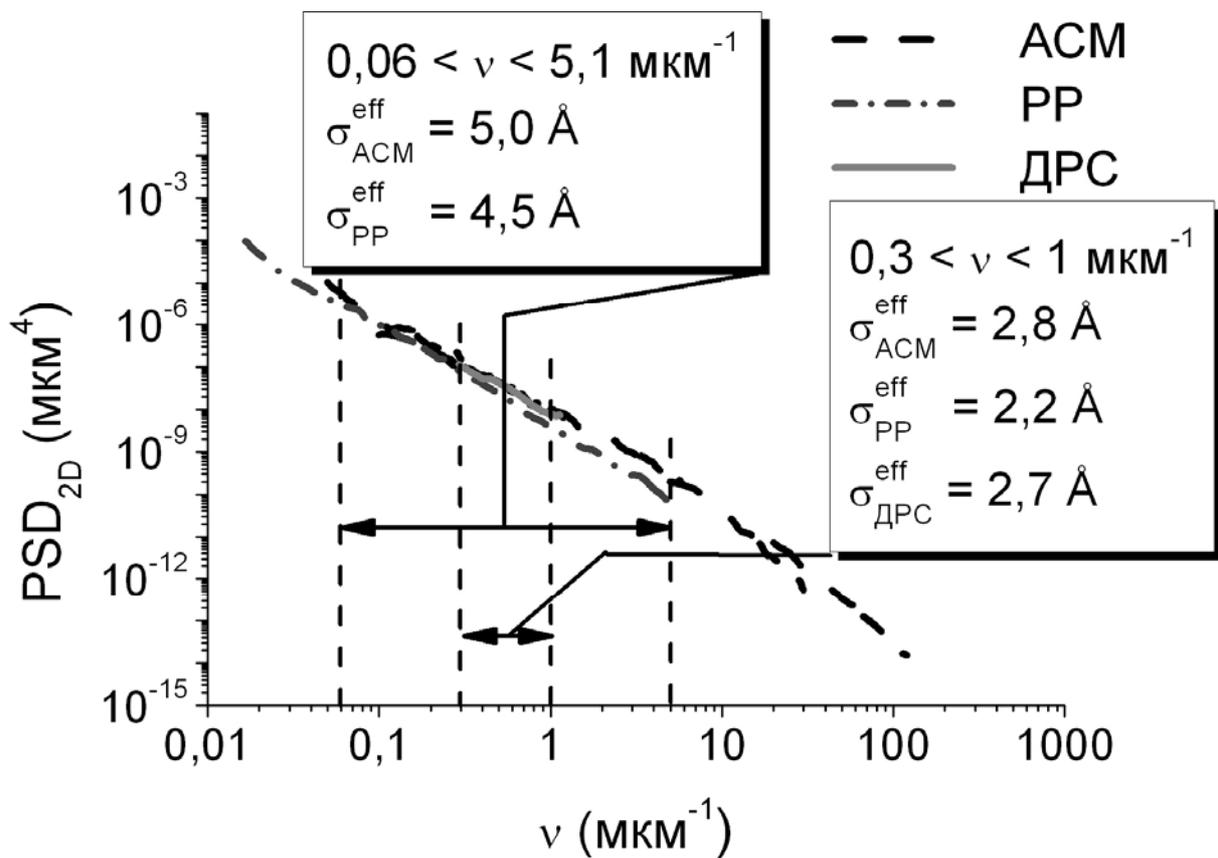


Рисунок 6. Двумерные PSD-функции поверхности полированной кварцевой пластины, рассчитанные по данным методов АСМ, РР и ДРС.

дифференциального рассеяния света. Полированная кварцевая пластина была изучена всеми тремя методами. Методом АСМ была получена серия изображений размером от 250x250 нм до 100x100 мкм. По данным методик были рассчитаны PSD-функции (рис. 6).

На рисунке видно хорошее совпадение хода PSD-функций рассчитанных по данным трех методов. Для количественной оценки расхождения методик был произведен расчет значений эффективной шероховатости по полученным PSD-функциям. Значение эффективной высоты шероховатости в частотном диапазоне  $0,3 \div 1,1 \text{ мкм}^{-1}$  составило  $2,8 \text{ \AA}$  по данным АСМ,  $2,2 \text{ \AA}$  по данным РР и  $2,7 \text{ \AA}$  по данным ДРС. В узком диапазоне пространственных частот, определяемом возможностями метода ДРС, максимальный разброс значений эффективной высоты шероховатости не превышает 15%. В более широком диапазоне  $0,06 \div 5,1 \text{ мкм}^{-1}$ , определяемом возможностями метода РР, значения эффективной высоты шероховатости составили  $5,0 \text{ \AA}$  по данным АСМ и  $4,5 \text{ \AA}$  по данным РР. В этом диапазоне пространственных частот расхождение методов составило 10%.

В работе описан эксперимент по использованию комплекса методов для определения параметров регулярных поверхностных наноструктур. Поверхность образца с регулярной поверхностной наноструктурой (рис. 7) сначала исследовалась методом АСМ. В результате была определена ориентация наноструктуры. Далее образец измерялся методом РР в направлении, перпендикулярном направлению структуры.

По данным обоих методов были рассчитаны PSD-функции (рис. 8). Наличие периодической наноструктуры привело к образованию особенностей на PSD-функции, рассчитанной по данным

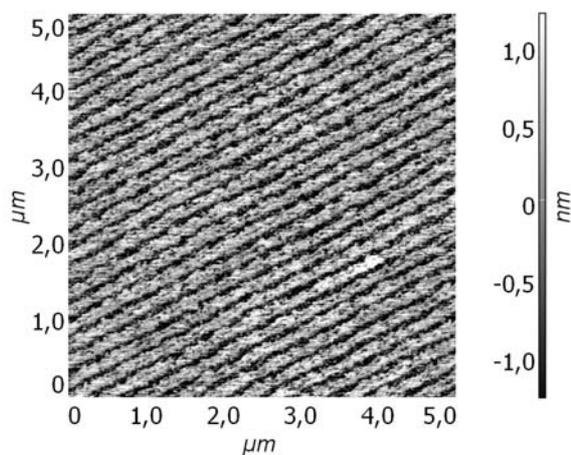


Рисунок 7. АСМ-изображение регулярной наноструктуры на поверхности сапфира.

АСМ. Пик, отвечающий наличию регулярного рельефа, своим положением указывает период структуры, а интенсивность и ширина его зависят от совершенства структуры. Интересен тот факт, что и на PSD-функции, рассчитанной по данным РР, наблюдается особенность на тех же пространственных частотах. Наличие этого пика на PSD-функции РР говорит о том, что даже на масштабе 1x1 см (площадь засветки в РР) поверхностная наноструктура все еще обладает хорошей степенью регулярности. Интенсивность пика много меньше, чем в случае АСМ, однако его положение и ширина очень близки.

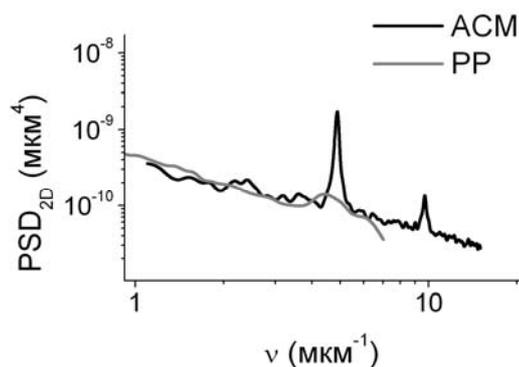


Рисунок 8. PSD-функции наноструктурированной поверхности сапфира.

Таким образом, в диссертации приведены результаты комплексного исследования шероховатости наноструктурированных поверхностей методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновского рассеяния и дифференциального рассеяния света. Впервые комплексом методов АСМ и РР был определен период регулярной поверхностной наноструктуры на поверхности сапфира.

Следующей задачей диссертационной работы является изучение корреляция рельефа пленочного покрытия и подложки в интерференционных зеркалах оптического диапазона. В кольцевых лазерных гироскопах (КЛГ) используются многослойные интерференционные зеркала оптического диапазона, причем основные характеристики КЛГ определяются потерями света на зеркалах из-за рассеяния. В диссертационной работе изучались особенности формирования таких зеркал на поверхности полированных подложек из ситалла. Подход состоял в проведении сравнительного анализа PSD-функций подложки и пленки.

В работе изложены результаты исследования подложек с различным типом нанорельефа, сформированного в результате различной обработки

поверхностей: полировке, травлению хромпиком и магнитореологической обработке. Соответственно формируются три типа нанорельефа (рис. 9): изотропный, зернистый и анизотропный.

Далее приводятся результаты сравнения PSD-функций рельефов подложке и зеркал, изученных методом ACM (рис. 10). Как видно из рисунка PSD-функции зеркальных покрытий идут ниже PSD-функций подложек на пространственных частотах выше  $5 \text{ мкм}^{-1}$ . В случае наследования рельефа подложки пленочным покрытием границу спада PSD-функции покрытия следует объяснить тем, что начиная с определенного масштаба пленка «сглаживает» детали рельефа подложки. Если критическую пространственную частоту составляет  $5\text{-}10 \text{ мкм}^{-1}$ , то это означает, что сглаживаются детали рельефа подложки с характерными размерами меньше  $200\text{-}100 \text{ нм}$ .

Таким образом, в диссертации изучена корреляция рельефа зеркальных покрытий и подложек с различным типом нанорельефов. Впервые был определен критический масштаб корреляции подложки и

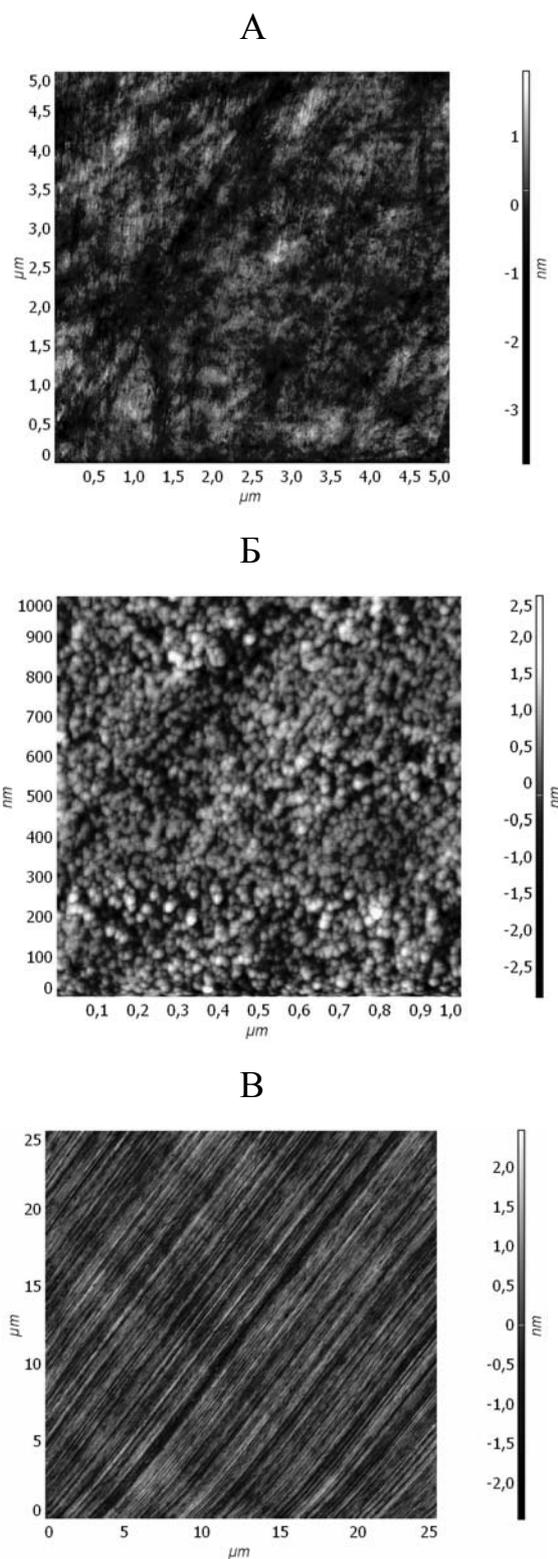


Рисунок 9. Три типа нанорельефа силикатных подложек: А – изотропный, Б – зернистый и В – анизотропный.

пленочного покрытия, ниже которого рельеф подложки сглаживается рельефом пленочного покрытия. Этот масштаб не превышал 200 нм для всех исследованных типов наноструктурированных подложек.

С точки зрения вопросов использования исследованных многослойных покрытий в кольцевых лазерных гироскопах, критичным параметром зеркал является величина рассеяния света на них. Длина волны, используемая в лазерном гироскопе  $\lambda = 633$  нм, что в два-три раза превышает определенный нами критический размер, больше которого рельеф подложки полностью повторяется пленкой. Вообще говоря, рассеяние происходит на всех границах раздела фаз многослойного интерференционного покрытия. Однако выше был сделан вывод о том, что рельеф подложки наследуется и всеми межфазными границами. Таким образом, в диссертационной работе впервые показано, что рассеивающие свойства многослойных интерференционных покрытий для

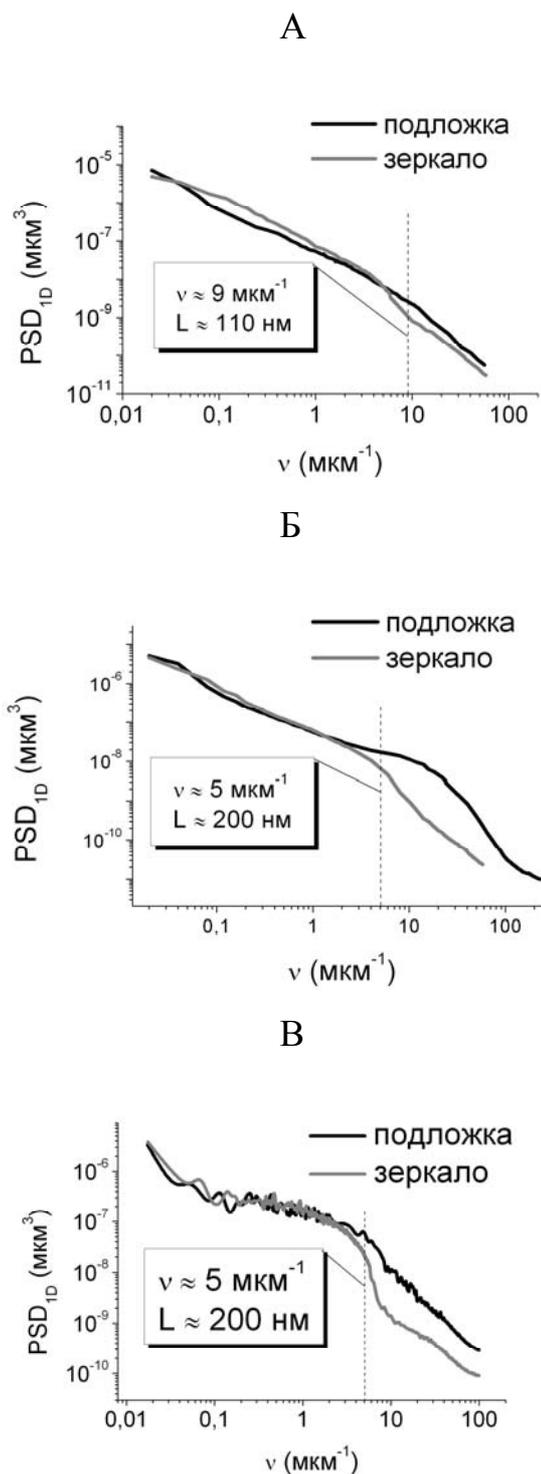


Рисунок 10. PSD-функции поверхностей подложек и зеркал для трех типов нанорельефа ситалловых подложек: А – изотропного, Б – зернистого и В – анизотропного.

КГЛ ( $\lambda=633$  нм) при существующем методе нанесения их методом ионно-лучевого напыления определяются только степенью развитости рельефа подложки.

Полученный результат согласуется с данными измерения оптических характеристик зеркальных покрытий. На рисунке 11 представлена зависимость рассеивающей способности

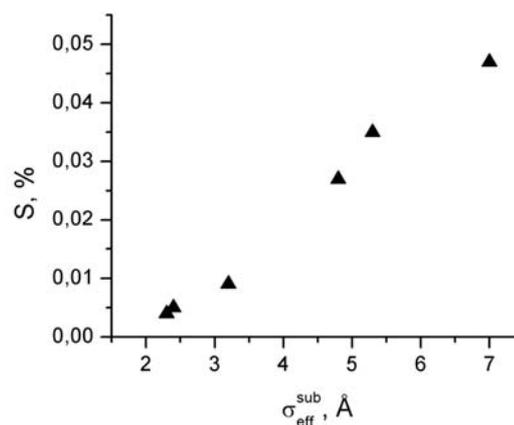


Рисунок 11. Зависимость рассеивающей способности многослойного зеркального покрытия от шероховатости подложки.

многослойного зеркального покрытия от шероховатости подложки. Из рисунка видно, что величина рассеяния на зеркале напрямую зависит от шероховатости подложки.

### **Основные результаты и выводы**

1. Разработана комплексная методика исследования статистических свойств рельефа поверхности, позволяющая на основе данных атомно-силовой микроскопии с высокой точностью измерять параметры шероховатости изотропных и анизотропных наноструктурированных поверхностей. Методика включает в себя рекомендации по АСМ-измерению, постэкспериментальной цифровой обработке изображений и выбору наиболее информативных параметров шероховатости наноструктурированных поверхностей.
2. Изучено и оценено влияние поверхностного электростатического заряда различных диэлектрических материалов на измеряемые методом АСМ параметры шероховатости наноструктурированных поверхностей. Определены критерии наличия статического заряда на поверхности по данным атомно-силовой микроскопии. Определен критический масштаб, при котором статический заряд поверхности не оказывает влияния на рассчитываемую высоту шероховатости.

3. Для воздушной атомно-силовой микроскопии разработан новый эффективный неразрушающий способ снятия статического заряда с поверхности диэлектриков, основанный на управлении параметрами искусственного климата. Он позволяет снизить погрешности измерений методом АСМ и устранить характерные артефакты топографических изображений наноструктурированных поверхностей диэлектриков.
4. Проведено комплексное исследование шероховатости наноструктурированных поверхностей методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновского рассеяния и дифференциального рассеяния света. Показано, что разброс параметров шероховатости, определенных по данным разных методов составляет 10%, что главным образом определяется равномерностью обработки поверхности. Впервые комплексом методов АСМ и РР был определен период регулярной поверхностной наноструктуры на поверхности сапфира. При этом АСМ дает информацию о том, как выглядят наноструктуры, их высоте и ширине и периоде на масштабе десятков микрон, а метод РР позволяет обнаружить периодичность наноструктур на сантиметровых масштабах.
5. С помощью АСМ был исследован рельеф поверхности наноструктурированных подложек различных типов и сформированных на них многослойных интерференционных зеркал, используемых в кольцевых лазерных гироскопах. Впервые был определен критический масштаб корреляции подложки и пленочного покрытия, ниже которого рельеф подложки сглаживается рельефом пленочного покрытия. Этот масштаб не превышал 200 нм для всех исследованных типов наноструктурированных подложек.
6. Впервые показано, что рассеивающие свойства многослойных интерференционных покрытий для КГЛ ( $\lambda=633$  нм) при существующем методе нанесения их методом ионно-лучевого напыления определяются только степенью развитости рельефа подложки.

#### **Список основных публикаций по теме диссертационной работы**

1. Zanaveskin M.L., Grishchenko Yu.V., Tolstikhina A.L., Asadchikov V.E., Roshchin B.S., Azarova V.V. The surface roughness investigation by the atomic force microscopy, x-ray scattering and light scattering. // SPIE. 2006. Vol. 6260, pp. 62601A-1 - 62601A-9
2. Занавескин М.Л., Занавескина И.С., Рошин Б.С., Асадчиков В.Е., Кожевников И.В., Азарова В.В., Грищенко Ю.В., Толстихина А.Л. Исследование шероховатости поверхности методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновского рассеяния и дифференциального рассеяния света. // Вестник московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2006, 3, ст.80-82
3. Занавескин М.Л., Рошин Б.С., Грищенко Ю.В., Азарова В.В., Асадчиков В.Е., Толстихина А.Л. Связь шероховатости подложки с потерями света на интерференционных зеркальных покрытиях. // Кристаллография.2008. Т.53. №4. С.730-736.
4. Zanaveskin M.L. , Grishchenko Yu.V. , Tolstikhina A.L., Asadchikov V.E., Roshchin B.S., Azarova V.V. The surface roughness investigation by the atomic force microscopy, x-ray scattering and light scattering. //The International Conference “Micro- and nanoelectronics – 2005” (ICMNE-2005) Book of Abstracts. P2-15;
5. Занавескин М.Л., Грищенко Ю.В., Калачикова Е.С., Толстихина А.Л. Влияние режимов получения и способов обработки АСМ изображений на рассчитываемую высоту шероховатости. /Тезисы доклада на XI Международном симпозиуме "Нанофизика и нанoeлектроника" (Нижний Новгород, 10-14 марта 2007 г.) с.486-487.
6. Толстихина А.Л., Гайнутдинов Р.В., Занавескин М.Л., Сорокина К.Л., Белугина Н.В., Грищенко Ю.В. Влияние статического заряда на формирование топографического контраста АСМ-изображений поверхности диэлектриков./ Тезисы докладов на XI Международной конференции "ФИЗИКА ДИЭЛЕКТРИКОВ" (ДИЭЛЕКТРИКИ - 2008). 3-7 июня 2008 Санкт-Петербург, Россия Т.1. С.127.