

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Владимирский государственный университет имени Александра  
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ»**

Владимир 2017

УДК 53.086

ББК 22.3

Составители: Кутровская С.В., Шагурина А.Ю., Бухаров Д.Н., Новикова О.А.

Рецензент: Фуров Л.В. доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и прикладной физики

Печатается по решению редакционного совета ВлГУ

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Зондовая микроскопия» / Владим. гос. уни-т имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; С.В. Кутровская, А.Ю. Шагурина, Д.Н. Бухаров, О.А.Новикова – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2017. – 52 с.

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Зондовая микроскопия», в которых рассмотрены основные принципы работы сканирующего зондового микроскопа и методы исследования поверхности материала.

Данные указания способствуют развитию исследовательских навыков у обучающихся в процессе выполнения лабораторных работ.

Предназначены для проведения лабораторных занятий у студентов физико-математических факультетов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

Ил. 14. Библиогр.: 14 назв.

УДК 53.086

ББК 22.3

## Оглавление

Введение.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «Принцип работы атомно-силового микроскопа».....	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «Контактный режим сканирования атомно-силового микроскопа» .....	9
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «Латеральные силы и метод сопротивления растекания» .....	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 «Прерывисто контактный режим сканирования атомно-силового микроскопа» .....	15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «Анодно-окислительная литография»...	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «АСМ спектроскопия» .....	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 «Методы СТМ» .....	25
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 «Метод зонда Кельвина и магнитно-силовая микроскопия».....	28
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9 «Микроскопия ближнего поля».....	33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10 «Управление качеством АСМ-изображений» .....	36
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11 «Моделирование профиля АСМ-изображения» .....	39
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12 «Электрофизические свойства фрактальных структур» .....	43
Список используемой литературы .....	51

## Введение

В методических указаниях приведены лабораторные работы по курсу «Зондовая микроскопия».

Данный курс знакомит с принципами работы сканирующего зондового микроскопа и направлен на приобретение практического навыка по исследованию образцов, получению и анализу свойств наноразмерных структур на поверхности различных материалов.

В настоящее время зондовая микроскопия является одним из мощных современных методов исследования топологии и локальных свойств поверхности. Она дает возможность получать достоверные данные о высоте рельефа с нанометровым разрешением даже на воздухе. Одним из популярных методов зондовой микроскопии является атомно-силовая микроскопия, основанная на силовом взаимодействии между зондом и поверхностью. На базе зондовой микроскопии можно не только исследовать, но и создавать различные структуры на поверхности материала по заранее подготовленному шаблону [5,14]. Формирование металлических микроконтактов на поверхности – актуальная задача микро- и наноэлектроники [9]. Определение фрактальных характеристик комплексных изображений позволяет производить сравнение различных объектов по структурной сложности. Такой подход особенно оправдан при решении задачи определения свойств нанообъектов в сканирующей зондовой микроскопии.

Для успешного выполнения лабораторного практикума требуется хорошая теоретическая база, полученная на лекционных занятиях и при самостоятельном изучении дополнительного теоретического материала, рекомендованного лектором. Приведенная в начале работы краткая теория, способствует лучшему пониманию, как работы самого прибора, так и сути эксперимента, тем самым упрощая выполнение работ.

При выполнении лабораторных работ обучающиеся приобретают навыки экспериментальной деятельности, учатся обращаться с приборами, самостоятельно проводить исследование топологических и приповерхностных свойств образца, анализировать полученные результаты, проводить математическую обработку АСМ-данных, пользоваться справочными материалами, тем самым закрепляя и углубляя свои знания по данному курсу.

На вводном занятии все студенты проходят инструктаж по соблюдению правил техники безопасности в лаборатории. Студенты, не прошедшие инструктаж, не допускаются к работе.

Каждый отчет по лабораторной работе должен содержать:

- Номер и название работы.
- Цель работы.
- Ход работы.
- Полученные результаты, схемы, таблицы, расчетные формулы, графики и т.д.
- Вывод (краткий анализ полученных результатов и используемых методов).

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### «Принцип работы атомно-силового микроскопа»

Цель работы: ознакомиться с принципами функционирования АСМ и технологической реализации приборов Smena B и Ntegra Aura.

#### Краткая теория

Основными элементами микроскопа являются зонд, система регистрации отклонения зонда, пьезосканер, система обратной связи. Типичная схема взаимодействия основных элементов АСМ показана на рисунке 1.

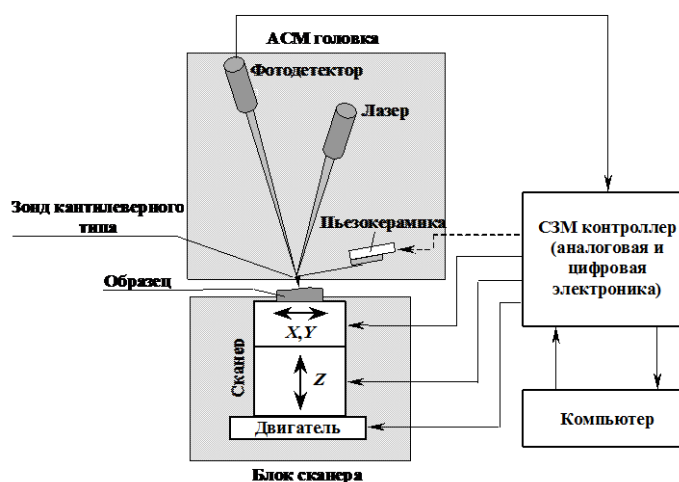


Рис.1 – Схема взаимодействия основных элементов микроскопа

Сканирование поверхности осуществляется при помощи пьезосканера, который двигает образец относительно зонда последовательно, строка за строкой (изменяются координаты  $X$  и  $Y$ ). При взаимодействии с поверхностью происходит изменение механического состояния зонда, например, отклонение кантилевера. В процессе сканирования величина отклонения кантилевера (или какого-либо другого параметра взаимодействия) от начально установленного значения измеряется при помощи регистрирующей системы. Сигнал, пропорциональный отклонению, поступает в систему обратной связи, которая управляет положением пьезосканера оси  $Z$  [8].

Измерительная головка содержит держатель зонда и оптическую систему детектирования его отклонений. Сканирование в приборе Ntegra Aura осуществляется образцом, поэтому зонд закрепляется на головке жестко, в отличие от систем (конфигурация Sмена В), в которых при сканировании перемещается зонд (кантилевер).

Регистрирующая система состоит из источника излучения, позиционно-чувствительного фотоприемника и оптической системы (рис. 2). Источником излучения является полупроводниковый лазер (длина волны — 670 нм, мощность — 0.9 мВт). Позиционно-чувствительным фотоприемником является четырехсекционный фотодиод. Оптическая система состоит из фокусирующего объектива и зеркальной поверхности кантилевера.

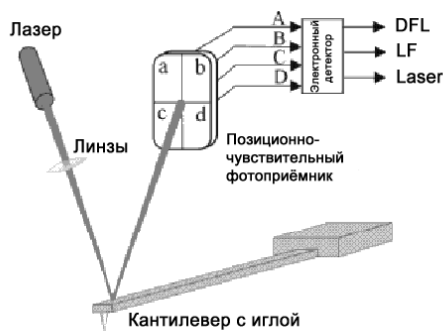


Рис. 2 – Оптическая схема регистрации отклонения кантилевера

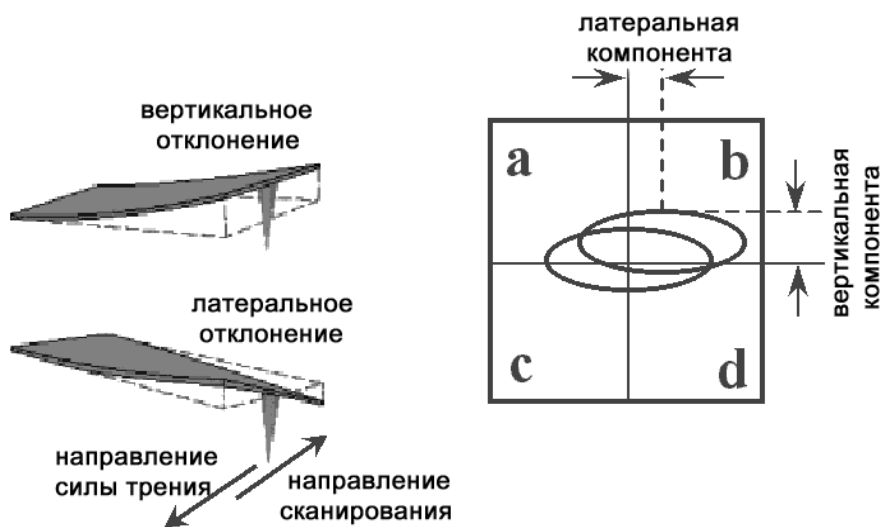


Рис. 3 – Смещение лазерного пятна при отклонении кантилевера

Луч лазера фокусируется объективом в эллиптическое пятно размером около 50 мкм на обратной стороне кантилевера в районе острия. Отраженный от кантилевера свет попадает на четырехсекционный фотодиод.

Отклонение кантилевера вызывает перемещение лазерного пятна относительно сегментов ( $a, b, c, d$ ) фотодиода (рис. 3), что вызывает изменение электрических сигналов ( $A, B, C, D$ ), поступающих с этих сегментов. Сигналы предварительно обрабатываются (усиливаются, складываются и вычитаются), и с выхода регистрирующей системы поступают три сигнала [5]:

1)  $DFL$  — сигнал, пропорциональный отклонению кантилевера в вертикальном направлении.  $DFL$  является разностным сигналом между верхней и нижней (рис. 7) половинами фотодиода:  $DFL = (A + B) - (C + D)$ .

2)  $LF$  — сигнал, пропорциональный боковому отклонению луча, который позволяет измерять крутильную деформацию кантилевера.  $LF$  является разностным сигналом между правой и левой (рис. 3) половинами фотодиода:  $LF = (A + C) - (B + D)$ .

3)  $LASER$  — сигнал, пропорциональный интенсивности света, отраженного от кантилевера.  $LASER$  является суммарным сигналом от всех четырех сегментов фотодиода:  $LASER = A + B + C + D$ . Данный сигнал используется при юстировке лазера.

Сканер обеспечивает два независимых движения образца относительно кантилевера: сканирование вдоль поверхности образца (в плоскости  $X, Y$ ) и перемещение в направлении, перпендикулярном к поверхности (по оси  $Z$ ). Сканер изготовлен из пьезоэлектрического материала. В микроскопе Smena B и Ntegra Aura используются несколько модификаций сканеров, имеющих некоторые отличия в конструкции и обеспечивающих различное максимальное поле сканирования:  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup>,  $50 \times 50$  мкм<sup>2</sup> и  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>. При этом размах максимально измеряемой высоты варьируется: 1 мкм, 2.5 мкм и 10 мкм соответственно. Сканер состоит из двух пьезотрубок разного диаметра, вставленных одна в другую. Пьезотрубка меньшего диаметра



обеспечивает сканирование в плоскости образца  $(X, Y)$ , большего — перемещение образца относительно кантилевера по нормали (по оси  $Z$ ).

### **Задание к работе:**

а. Включить компьютер, контроллер, запустить программу управления прибором Nova.

б. Ознакомится с расположением основных узлов прибора, расположением командных окон и кнопок программы Nova.

с. Установить кантилевер в измерительную головку. Произвести юстировку оптической системы (добиться максимального значения сигнала *LASER*,  $DFL = 0$ ,  $LF = 0$ ).

д. По результатам работы подготовить отчет.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Организация системы обратной связи.
2. Сканеры, пьезоэлектрический эффект.
3. Как должен располагаться кантилевер при значениях сигналов с оптической системы регистрации отклонения зонда  $DFL = 2$ ;  $LF = -5$ .

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2**

### **«Контактный режим сканирования атомно-силового микроскопа»**

Цель работы: Изучить работу АСМ в контактном режиме и получить изображения поверхности в данном режиме.

Краткая теория: В контактном режиме кантилевер непосредственно касается острием поверхности образца и работает на отталкивание от поверхности. Сила отталкивания  $F$ , действующая на кантилевер, связана с величиной отклонения кантилевера  $x$  законом Гука:

$$F = -kx \approx -k_0\theta,$$

где  $k$  и  $k_0$  — коэффициенты упругости,  $\theta$  — угол отклонения кантилевера от положения равновесия. Величина отклонения кантилевера в вертикальном направлении измеряется при помощи оптической регистрирующей системы и

преобразуется в электрический сигнал DFL. В контактном режиме сигнал DFL используется в качестве параметра, характеризующего силу взаимодействия острия с поверхностью.

Работа микроскопа в режиме поддержания постоянной силы взаимодействия острия с поверхностью образца является основой для измерения топографии поверхности, а также для измерения локальной вязкости и локальной силы трения.

В режиме «постоянной силы» сигнал DFL используется в качестве входного сигнала цепи обратной связи. Перед началом сканирования оператор задаёт некоторое значение силы взаимодействия между образцом и зондом, которое будет поддерживаться в процессе сканирования постоянным (параметр SP). Тем самым он устанавливает определенную величину отклонения кантилевера в подведенном состоянии. Затем происходит подвод образца к зонду с помощью двигателя. Пьезотрубка оси Z при этом полностью выдвинута, так как цепь обратной связи отрабатывает не равный нулю сигнал ошибки error. Подвод будет осуществляться до тех пор, пока сигнал DFL не станет равным значению SP, то есть пока сигнал error не обратится в ноль. В конечном итоге, по окончании подвода, пьезотрубка оси Z должна быть выдвинута на половину своей длины.

Поддержание заданной величины DFL, равной значению SP, происходит благодаря работе системы ОС. При сканировании величина отклонения кантилевера изменяется из-за рельефа поверхности. Соответственно текущее значение сигнала DFL изменяется относительно уровня SP. В каждой точке поверхности система ОС при помощи сканера перемещает образец относительно зонда по нормали к поверхности таким образом, чтобы вернуть текущую величину DFL к значению SP, т.е. величину отклонения кантилевера к исходной величине. Одновременно сигнал, пропорциональный вертикальному перемещению сканера, через усилитель поступает на аналого-цифровой преобразователь и через интерфейсную плату записывается в память компьютера. Таким образом формируется

массив  $\{Z_{ij} * F = \text{const}, X_i, Y_j\}$ , по данным которого восстанавливается топографический образ поверхности образца [5].

Наряду с режимом “постоянной силы” часто используется режим “постоянной высоты”, в котором обратная связь отключена (коэффициент усиления обратной связи  $FB_{\text{gain}}$  равен нулю), поэтому длина пьезотрубки остаётся неизменной. Регистрируется непосредственно разностный сигнал фотодиода, пропорциональный реальному отклонению кантилевера, взаимодействующего с неровностями поверхности. Разностный сигнал с фотодиода записывается в массив  $\{F_{ij} * Z = \text{const}, X_i, Y_j\}$ , по данным которого формируется изображение сигнала, пропорционального силе, действующей между кантилевером и образцом. В случае, когда образец достаточно жёсткий, получаемое изображение хорошо отображает топографию поверхности. Если предварительно для используемого кантилевера снята зависимость прогиба кантилевера от расстояния между зондом и образцом и если известна константа упругости используемого кантилевера, то изображение сигнала отклонения кантилевера можно пересчитать в изображение локальной силы, действующей на кантилевер. Такой метод используется преимущественно для исследования кристаллографических атомно-плоских поверхностей при полях сканирования нанометрового масштаба. Благодаря высокой чувствительности и малоинерционности этот метод позволяет получать ангстремное разрешение.

#### **Задание к работе:**

a. Установить кантилевер в измерительную головку. Произвести юстировку оптической системы (добиться максимального значения сигнала  $LASER$ ,  $DFL = 0$ ,  $LF = 0$ ).

b. Установить тестовый образец №1 в держатель сканера.

c. Настроить микроскоп для работы в контактном режиме ( $Set\ point = 2$ ;  $FB_{\text{gain}} = 0.5$ ).

d. Произвести подвод образца к кантилеверу, при этом необходимо зафиксировать изменения сигнала  $DFL(z)$  на осциллографе.

е. Исследовать топографию в режиме постоянной высоты и постоянной силы в двух взаимно перпендикулярных направлениях сканирования. Определить топографию тестового образца. Экспериментально оценить радиус закругления зонда.

f. Отвести образец от зонда на 1.0 мм.

g. По результатам работы подготовить отчет.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Сравнить электрические схемы организации обратной связи для режимов «постоянной высоты» и «постоянной силы».

2. Как меняется сигнал DFL при подводе зонда к образцу/образца к зонду.

3. Достоинства и недостатки контактного режима.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3**

### **«Латеральные силы и метод сопротивления растекания»**

Цель работы: Изучить работу АСМ в контактном режиме и получить картографирование приповерхностных свойств и соответствующего им рельефа поверхности в режиме исследования латеральных сил и методом сопротивления растекания.

Краткая теория: В контактном режиме сканирования кроме измерения топографии можно также исследовать распределение локальной силы трения по поверхности образца. Согласно установившимся понятиям и представлениям данная методика называется “микроскопией латеральных сил”. Данная методика позволяет различать области с различными коэффициентами трения, а также подчеркивать особенности рельефа поверхности. Эти возможности могут быть использованы одновременно с получением рельефа поверхности для более полной характеристики исследуемого образца.

Физическая сущность методики заключается в следующем. Во время сканирования в контактном режиме, кроме отклонения кантилевера, в

направлении нормальном к поверхности, возникает дополнительная крутильная деформация кантилевера (рис. 4). Угол кручения для небольших отклонений пропорционален боковой (латеральной) силе. Как указывалось выше, оптическая регистрирующая система формирует электрический сигнал LF, изменение которого пропорционально изменению крутильной деформации кантилевера, поэтому его используют для получения изображения локальной силы трения (рис. 5) [8].

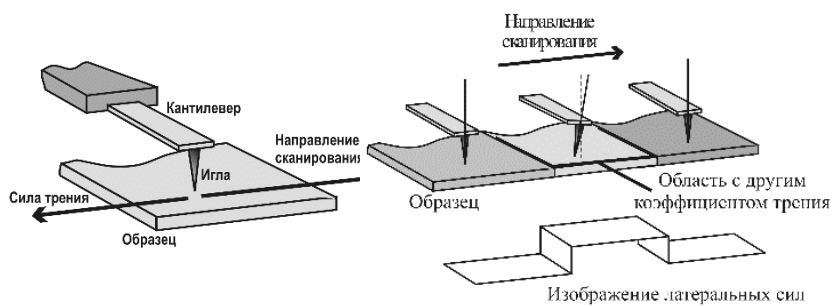
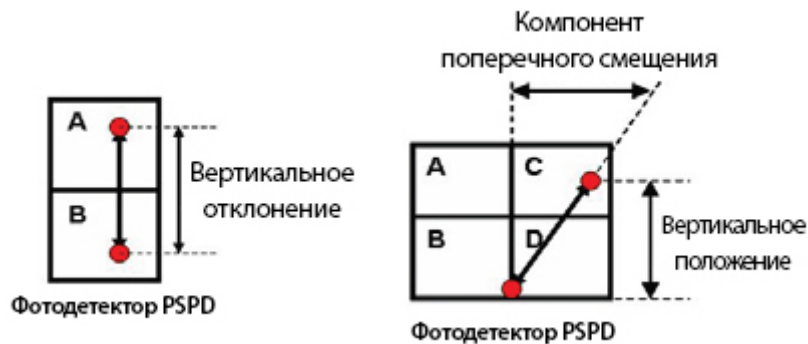


Рис. 4. Контактный режим работы

Рис. 5 – Сканирование в областях с различными коэффициентами трения

При сканировании гладкой поверхности с участками с различными коэффициентами трения угол скручивания меняется на каждом участке. Это позволяет проводить измерения локальной силы трения. Если же поверхность негладкая, то такая интерпретация затруднена. Для того, чтобы различить участки с различными коэффициентами трения и неоднородности рельефа необходимо фиксировать сигнал LF в двух противоположных направлениях. Кроме того, измерение латеральных сил позволяет относительно просто достигать атомарного разрешения на слюде и на других слоистых материалах.

Метод Латеральных Сил имеет важное значение при исследованиях полупроводников, полимеров, пленочных покрытий, запоминающих сред, при изучениях поверхностных загрязнений, химических особенностей и фрикционных характеристик, а также постоянно растущий ряд новых применений.

Отображение сопротивления растекания - метод АСМ, используемый при различных исследованиях таких как обнаружение дефектов в проводящих и слабо проводящих пленках, характеристики материалов в терминах локального сопротивления и т.п. Отображение сопротивления растекания возможно при использовании проводящего зонда, находящегося в контакте с поверхностью образца. К зонду прикладывается напряжение смещение и проводятся измерения результирующего тока через образец в зависимости от положения зонда одновременно с получением данных о рельефе по методу постоянной силы. В предположении постоянного контактного сопротивления зонд-поверхность при заданном смещении величина измеряемого тока пропорциональна локальному сопротивлению исследуемого образца.

Типичными применениями метода являются определение реальных размеров зазора исток-сток МДП-транзистора, глубины залегания р-п перехода, определение концентрации легирующих примесей в полупроводниковых структурах.

#### **Задание к работе:**

а. Установить кантилевер CSG10/Pt в измерительную головку. Произвести юстировку оптической системы (добиться максимального значения сигнала *LASER*,  $DFL = 0$ ,  $LF = 0$ ).

б. Установить образец в держатель сканера.

с. Настроить микроскоп для работы в контактном режиме ( $Set\ point = 2$ ;  $FB_{gain} = 0.5$ ).

д. Произвести подвод образца к кантилеверу.

е. Исследовать топографию, распределение латеральных сил и распределение сопротивления в двух взаимно перпендикулярных направлениях сканирования. Проанализировать полученные результаты.

f. Отвести образец от зонда на 1.5 мм.

g. По результатам работы подготовить отчет.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Выходные сигналы АСМ.

2. Как меняется сигнал DFL при отводе зонда от образца/образца от зонда.

3. Методики контактного режима АСМ.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4**

### **«Прерывисто контактный режим сканирования атомно-силового микроскопа»**

Цель работы: Изучить работу АСМ в прерывисто контактном режиме и получить изображения поверхности в данном режиме.

Краткая теория: В режиме прерывисто контактной или полуконтактной микроскопии сканирование производится кантилевером, колеблющимся около поверхности образца. Особенность состоит в том, что колеблющееся острие находится настолько близко к поверхности, что оно слегка «стучит» по образцу, контактируя с ним в нижней части своего размаха. При этом большую часть периода колебаний кантилевер не касается поверхности и вообще относительно слабо взаимодействует с образцом. Только при сближении иглы с поверхностью вплоть до попадания в область отталкивающего потенциала взаимодействие резко усиливается, и при этом соударении кантилевер теряет избыток энергии, накопленный за остальную часть периода. В зависимости от характера взаимодействия может меняться сдвиг фазы основной гармоники колебаний относительно возбуждающего сигнала, а также амплитуда и фаза высших гармоник.

Кантилевер является резонансной системой с большой добротностью и достаточно высокой резонансной частотой, обычно более 100 кГц. Возбуждение его механических колебаний производится при помощи пьезодрайвера, с которым непосредственно контактирует подложка кантилевера. На пьезодрайвер от генератора подаётся переменный сигнал  $U \sim \sin \omega t$ . Исследуя амплитудно-частотную характеристику кантилевера (зависимость сигнала MAG от частоты раскачки  $\omega$ ) экспериментально определяют резонансную частоту кантилевера. В последующих измерениях раскачку производят на резонансной частоте, при этом амплитуда колебаний имеет обычно величину в интервале от 1 нм до 100 нм.

Лазерный луч регистрирующей системы отражается от колеблющегося в вертикальном направлении кантилевера и вызывает осциллирующее движение лазерного пятна относительно верхней и нижней половины фотодиода. Это приводит к появлению на выходе регистрирующей системы переменного электрического сигнала на частоте  $\omega$ , амплитуда которого пропорциональна амплитуде колебаний острия кантилевера.

Таким образом, регистрирующая система преобразует колебания кантилевера в электрический сигнал DFL. На выходе из фотодетектора сигнал DFL имеет вид  $f(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + g(t)$ , где  $\varphi$  — сдвиг фазы колебаний кантилевера относительно раскачивающего сигнала (с точностью до некоторой «аппаратной» константы),  $g(t)$  — составляющая, связанная с наличием различных типов шумов и искажений. Среднее значение сигнала DFL за некоторый промежуток времени  $T$  определяется выражением

$$\langle f(t) \rangle = T^{-1} \int_0^T f(t) dt$$

и не зависит от амплитуды колебаний.

В приборе имеется несколько возможных вариантов обработки переменной составляющей сигнала DFL, любой из которых может быть выбран по желанию оператора. Сигнал DFL может быть направлен на вход: синхронного усилителя (Lock-In amplifier), среднеквадратичного детектора (RMS detector) или фазового детектора (Phase detector).



Синхронный усилитель формирует на выходе три электрических сигнала [8]:

1)  $MAG_{sin} = \langle f(t) \cdot \sin \omega t \rangle = A \sin \varphi / 2$  (усреднение производится за время  $T \gg 2\pi/\omega$ ),

2)  $MAG_{cos} = \langle f(t) \cdot \cos \omega t \rangle = A \cos \varphi / 2$ .

3) MAG — сигнал, соответствующий амплитуде переменной составляющей сигнала DFL на частоте модуляции.

Среднеквадратичный детектор формирует на выходе сигнал RMS, пропорциональный среднеквадратичному значению переменной составляющей сигнала DFL во всей частотной полосе детектора,

$$RMS = \sqrt{\langle (f - \langle f \rangle)^2 \rangle}.$$

Фазовый детектор формирует сигнал Phase =  $\varphi$ , изменение которого пропорционально изменению сдвига фазы колебаний кантилевера относительно возбуждающего сигнала.

В полуконтактном режиме амплитуда колебаний острия кантилевера используется в качестве параметра, характеризующего взаимодействие острия с поверхностью. Работа микроскопа в режиме поддержания постоянной амплитуды колебаний острия кантилевера является основой для измерения топографии поверхности. Поддержание постоянной амплитуды колебаний обеспечивается системой обратной связи, на вход которой подаются сигнал MAG или RMS. Оба сигнала пропорциональны амплитуде колебания. Однако использование сигнала MAG является предпочтительным, поскольку в этом случае можно достичь более низкого уровня шумов и, как следствие, увеличить разрешение.

Дальнейшая схема работы в режиме поддержания постоянной амплитуды колебаний кантилевера аналогична схеме работы прибора в контактном режиме (режим поддержания постоянной силы). На вход ОС подаётся сигнал MAG. Перед началом сканирования оператор задаёт определённый уровень взаимодействия острия и поверхности, который будет

поддерживаться в процессе сканирования постоянным (параметр SP). Тем самым устанавливается определенная величина амплитуды колебаний кантилевера. Топография поверхности регистрируется путем измерения сигнала, подаваемого цепью обратной связи на пьезодрайвер оси Z. Схема петли ОС приведена на рисунке 6.

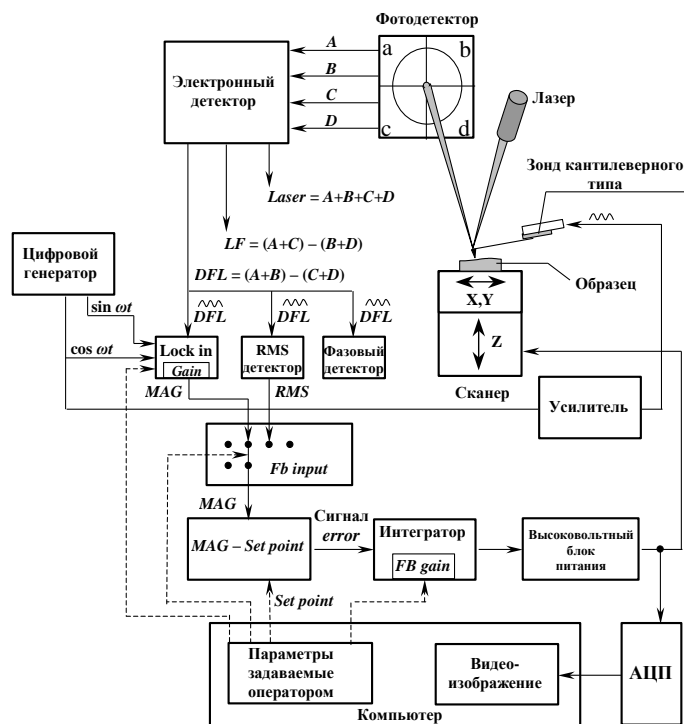


Рис. 6 – Схема петли обратной связи в полуконтактном режиме

Очевидно, что не только амплитуда колебаний острия, но и фаза колебаний является параметром, который зависит от величины взаимодействия колеблющегося острия и поверхности. Согласно экспериментальному опыту фаза колебаний является более чувствительной, по сравнению с амплитудой, к резким изменениям взаимодействия зонда и поверхности. Получение изображения сигнала Phase, сигнала  $MAG\sin$  или сигнала  $MAG\cos$  параллельно с топографическим изображением поверхности позволяют получить дополнительную информацию о деталях поверхностной структуры. Данная методика получила название «метод фазового контраста».

В числе общих преимуществ отдельных вибрационных методов по сравнению с контактной микроскопией можно назвать:

1) уменьшение сил взаимодействия, в частности боковых, между зондом и поверхностью;

2) использование резонансных свойств системы, что позволяет существенно повысить чувствительность по сравнению со статическим измерением;

3) возможность регистрировать дифференциальные характеристики, поддерживая постоянные средние значения величин;

4) уменьшение величины шумов с частотной зависимостью  $1/f$  (где  $f$  - частота) за счет переноса спектра сигнала в область высоких частот.

### **Задание к работе:**

a. Установить образец в держатель сканера.

b. Снять резонансную кривую кантилевера. Определить резонансную частоту. Убедиться в линейности колебаний.

c. Настроить микроскоп для работы в полуконтактном режиме. Подобрать значение амплитуды раскачивающего сигнала и коэффициент синхронного усилителя (Gain) таким, чтобы сигнал MAG составил около 16 нА. Установить значение Set point = MAG/2, FB gain = 1.

d. Произвести подвод образца к кантилеверу.

e. Исследовать топографию и “фазовый контраст” поверхности образца в двух взаимно перпендикулярных направлениях сканирования. Убедиться, что фаза колебаний кантилевера не изменяется при сканировании плоской поверхности, а поэтому полезна при визуализации резких неоднородностей.

f. Отвести образец от зонда на 1 мм.

g. По результатам работы подготовить отчет.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Схема петли обратной связи в прерывисто контактном режиме.

2. Как меняется сигнал MAG при подводе зонда к образцу/образца к зонду.

3. Методики сканирования, реализуемые в прерывисто контактном режиме.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### «Анодно-окислительная литография»

Цель работы: Реализовать анодно-окислительную литографию на базе зондовой нанолaborатории Ntegra Aura и получить изображение участка поверхности с литографическим рисунком.

Краткая теория: АСМ можно использовать в качестве инструмента для локальной модификации поверхности. В области контакта острия зонда с поверхностью образца могут возникать достаточно большие силы напряженности электрического поля, что приводит к существенной модификации поверхности образца и зонда. Режим литографии позволяет создавать на поверхности образца структуры по заранее заданному шаблону. Данный метод используется на воздухе посредством чего поверхность зонда и образца покрыты тонким слоем адсорбированной воды. Поэтому, при подаче напряжения между зондом и поверхностью происходит электрохимическая реакция. Соответственно, зонд используется как катод, подложка – анод, водный мениск между кончиком зонда и образцом является электролитической ячейкой (рис. 7).

Метод локального анодного окисления связан с протеканием электрохимической реакции в образующемся мениске адсорбированной воды на поверхности подложки, сопровождающейся процессами электро- и массопереноса ионизированных атомов подложки и гидроксильных групп с образованием оксидов и водорода, под проводящим зондом за счет приложения импульсов напряжения к системе зонд-подложка [14]. Окисел начинает расти в точке поверхности строго под зондом.

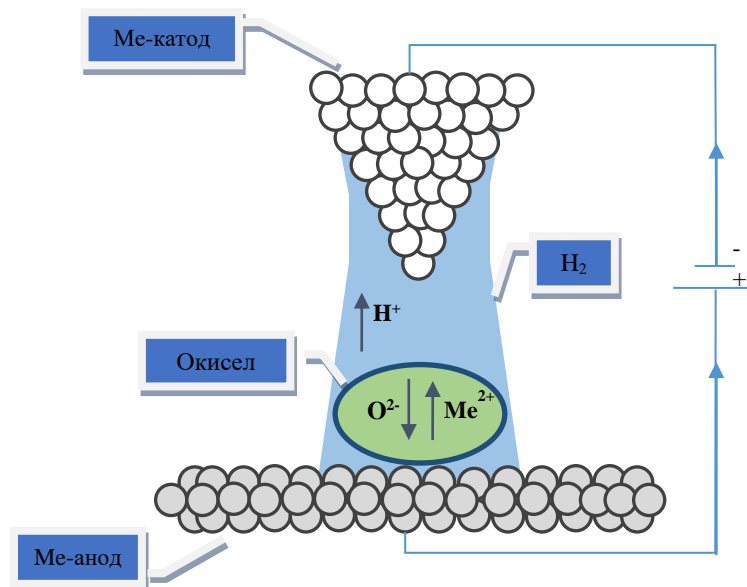


Рис. 7 – Схема АСМ литографии методом локального анодного окисления

Анодное окисление проходит в условиях с повышенной влажностью для этого под вакуумный колпак помещается емкости с водой [1]. Микроскоп оснащен специальным датчиком для контроля влажности среды, и через некоторое время за счет испарения под колпаком достигалось требуемое значение внешних условий.

Для формирования сложных рисунков может быть произведена растровая литография с использованием рсх-файла. Разница между прикладываемыми минимальным и максимальным электрическими потенциалами пропорциональна яркости, и, соответственно, будет меняться и толщина выращиваемого анодного окисла. Таким образом, изображение рельефа поверхности будет соответствовать изображению, представленному на рсх-файле.

#### **Задание к работе:**

а. Включить компьютер, контроллер, запустить программу Nova, управляющая прибором.

б. Установить проводящий кантилевер в измерительную головку. Произвести юстировку оптической системы (добиться максимального значения сигнала *LASER*,  $DFL = 0$ ,  $LF = 0$ ).

с. Подвестись к образцу, в контактном режиме осуществить предварительное сканирование поверхности для выбора области для литографии.

d. В программе Nova перейти на вкладку литографии, установить параметры: частоту сканирования, время накопления в точке, напряжение, подаваемое на зонд, количество проходов. Загрузить шаблон или создать векторный рисунок - траекторию движения зонда по поверхности образца (по решению преподавателя). Провести измерения прикладываемого потенциала при помощи внешнего мультиметра.

е. Произвести литографию и сканирование поверхности в АСМ режиме для наблюдения результатов.

f. По результатам работы подготовить отчет.

#### **Контрольные вопросы и задания**

1. Реализация растровой и векторной литографии на базе АСМ.
2. Зонды АСМ для проведения нанолитографических операций.
3. Параметры, влияющие на минимальный размер и качество профиля нанолитографического рисунка.
4. Классификация АСМ литографических методов. Разрешение метода.

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6**

#### **«АСМ спектроскопия»**

Цель работы: Изучить работу АСМ в режиме построения спектроскопических зависимостей.

Краткая теория: В режиме спектроскопии можно получать зависимость различных сигналов от расстояния между зондом и образцом, величины SP, величины приложенного напряжения и частоты колебаний кантилевера. В частности, может быть получена зависимость сигнала FVI от расстояния между зондом и образцом, что позволяет проверить правильность выбранного значения SP для контактного и полуконтактного режима.

Дополнительная полезная информация может быть получена из зависимости сигнала DFL от вертикального смещения образца  $Z$ , для измерения которой используется режим спектроскопии (рис. 8) [5]. Вид кривой, приведённой на рисунке 8, является типичным для наиболее часто используемых кантилеверов, например, кремниевых, которые являются гидрофильными (смачиваются водой). В этом случае при измерениях на воздухе между кантилевером и поверхностью образуется тонкий слой жидкости, который приводит к появлению дополнительных капиллярных сил (участок BC). В случае гидрофобных кантилеверов кривая, изображённая на рисунке 8, будет иметь несколько другой вид.

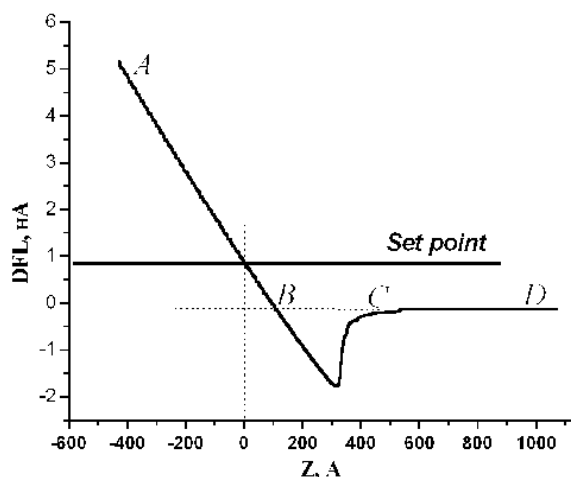


Рис. 8 — Зависимость сигнала  $DFL$  от смещения вдоль оси  $Z$ . Участок  $AB$  — действие упругих сил ( $F = -kx$ ),  $BC$  — действие капиллярных сил,  $CD$  — положение равновесия кантилевера (внешние силы отсутствуют)

При известном коэффициенте упругости кантилевера  $k$ , измерив зависимость  $DFL(Z)$ , можно пересчитать силу из условных единиц DFL (ток фотодетектора) в ньютоны. Сила, с которой образец действует на кантилевер, определяется выражением

$$F = \frac{k}{\beta} DFL, \quad (1)$$

где  $\beta$  — коэффициент наклона прямой  $AB$ . С помощью формулы (1) можно также оценить величину капиллярных сил.

Аналогично зависимости  $DLF(Z)$  можно измерить в полуконтактном режиме зависимость сигнала  $MAG$  от смещения вдоль оси  $Z$  (рис. 9).

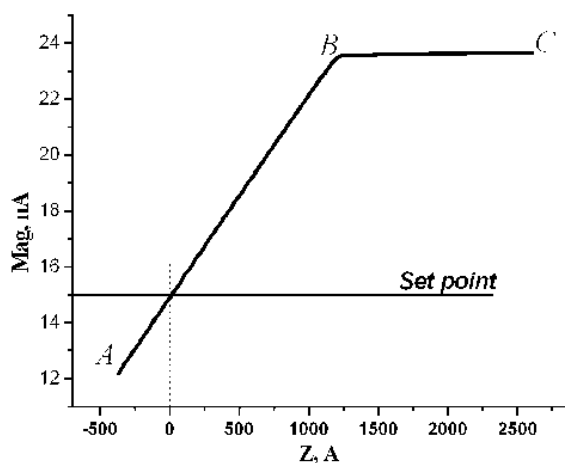


Рис. 9 – Зависимость сигнала  $MAG$  от смещения вдоль оси  $Z$ .  
Участок  $AB$  — кантилевер касается поверхности,  $BC$  — кантилевер не соприкасается с поверхностью

Вид кривой, приведённой на рисунке 9, является типичным для наиболее часто используемых кантилеверов. Участок  $AB$  соответствует пропорциональному изменению амплитуды колебаний кантилевера при изменении  $Z$ . Определив коэффициент наклона прямой  $AB$ , можно пересчитать амплитуды колебаний кантилевера из относительных единиц в нанометры. Эта информация необходима при анализе изображений в режиме «постоянной высоты».

#### **Задание к работе:**

- а. Установить кантилевер в измерительную головку. Произвести юстировку оптической системы.
- б. Установить подложку в держатель сканера.
- в. Настроить микроскоп для работы в контактном режиме ( $Set\ point = 2$ ;  $FB\ gain = 0.5$ ). Произвести подвод образца к кантилеверу.
- д. Произвести подвод образца к кантилеверу. Выполнить обзорное сканирование. В режиме спектроскопии снять зависимость  $DFL(Z)$  в 5 точках, лежащих на одной линии. Пользуясь формулой (1), вычислить величину капиллярных сил (принять  $k \approx 50$  Н/м) для одного измерения.



- e. Отвести образец от зонда.
- f. Снять резонансную кривую кантилевера. Определить резонансную частоту. Убедиться в линейности колебаний.
- g. Настроить микроскоп для работы в полуконтактном режиме. Подобрать значение амплитуды раскачивающего сигнала и коэффициент синхронного усилителя (Gain) таким, чтобы сигнал MAG составил около 16 нА. Установить значение Set point = MAG/2, FB gain = 1.
- h. Произвести подвод образца к кантилеверу. Выполнить обзорное сканирование. В режиме спектроскопии снять зависимость MAG(Height) по 9 узлам сетки. Определить амплитуду колебаний кантилевера.
- i. Отвести образец от зонда на 1.0 мм.
- j. По результатам работы подготовить отчет.

#### **Контрольные вопросы и задания**

1. Сравнить электрические схемы организации обратной связи для режимов «постоянной высоты» и «постоянной силы».
2. Как меняется сигнал DFL при подводе зонда к образцу/образца к зонду.
3. Достоинства и недостатки контактного режимов.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

#### **«Методы СТМ»**

Цель работы: Изучить работу сканирующего туннельного микроскопа и получить изображения поверхности в данном режиме.

Краткая теория: Сканирующая туннельная микроскопия предназначена для исследования свойств поверхностей проводящих материалов с разрешением вплоть до атомарного уровня. Туннельный ток, регистрируемый в процессе сканирования, достаточно мал (0.5пА-50нА), что дает возможность исследовать образцы с низкой проводимостью, в частности биологические объекты.

СТМ способен формировать изображения отдельных атомов на поверхностях металлов, полупроводников и других проводящих образцов путем сканирования образца остроконечной иглой на высоте порядка нескольких атомных диаметров, так что между острием и образцом протекает туннельный ток. Основными методами СТМ являются методы Постоянного Тока и Постоянной Высоты для получения данных о рельефе, дополняемые Методиками Спектроскопических измерений для получения распределений «работы выхода» («высоты барьера») и «локальной плотности состояний» (ЛПС),  $I(z)$  и  $I(V)$  кривые отображают химические и электронные свойства поверхности.

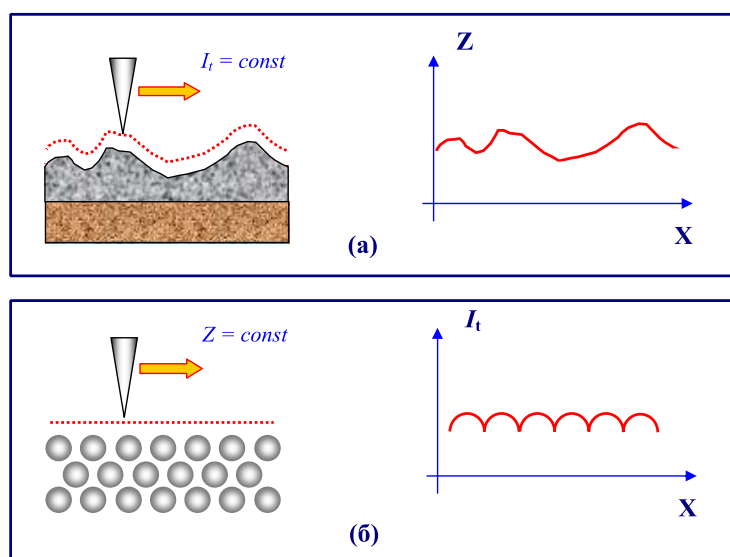


Рис. 10 – Формирование СТМ изображений поверхности по методу постоянного туннельного тока (а) и постоянного среднего расстояния (б)

По методу постоянного туннельного тока (рис. 10(а)) зонд перемещается вдоль поверхности, осуществляя растровое сканирование; при этом изменение напряжения на  $Z$  - электроде пьезоэлемента в цепи обратной связи (с большой точностью повторяющее рельеф поверхности образца) записывается в память компьютера в виде функции  $Z = f(x,y)$ , а затем воспроизводится средствами компьютерной графики.

При исследовании атомарно гладких поверхностей часто более эффективным оказывается получение СТМ изображения поверхности по методу постоянной высоты  $Z = \text{const}$ . В этом случае зонд перемещается над

поверхностью на расстоянии нескольких ангстрем, при этом изменения туннельного тока регистрируются в качестве СТМ изображения поверхности (рис. 10 (б)). Сканирование производится либо при отключенной ОС, либо со скоростями, превышающими скорость реакции ОС, так что ОС обрабатывает только плавные изменения рельефа поверхности [8]. В данном способе реализуются очень высокие скорости сканирования и высокая частота получения СТМ изображений, что позволяет вести наблюдение за изменениями, происходящими на поверхности, практически в реальном времени.

#### **Задание к работе:**

a. Изготовить зонд путем обрезки специальными ножницами вольфрамовой проволоки (W), длиной 8-10мм и диаметром от 0.25 до 0.5 мм. Для этого необходимо зажать проволоку широким пинцетом так, чтобы она выступала за край на 2-3 мм, надрезать проволоку под углом 10-15 градусов как можно ближе к краю проволоки и одновременно тянуть ножницы вдоль оси проволоки, чтобы «оторвать» отрезаемую часть (в этом случае получается острый скол на конце). Это делается для того, чтобы избежать контакта режущих кромок ножниц и непосредственно острия зонда.

b. Проверить форму полученного среза при помощи оптического микроскопа с 200-кратным увеличением или при помощи РЭМ. Если необходимо, повторить процесс обрезки.

c. Прокалить кончик проволоки в пламени спиртовки в течении 1-2 секунд. Вставить зонд тупым концом в держатель зонда так, чтобы острый конец не выступал за край держателя более, чем на 3-4мм.

d. Закрепить образец на подложке, имеющей электрический контакт для подачи на образец постоянного напряжения и установить в держатель.

e. Настроить микроскоп для работы в режиме постоянного тока (*Set point* = 0.1 нА, Bias  $V=0.1$  В; *FB gain* = 0.5).

f. Произвести подвод образца к кантилеверу.

g. Исследовать топографию в режиме постоянного тока в двух взаимно перпендикулярных направлениях сканирования. Определить топографию тестового образца.

h. Отвести образец от зонда на 1.0 мм.

i. По результатам работы подготовить отчет.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Оптимизация параметров сканирования: выбор скорости сканирования, коэффициента усиления обратной связи, параметра Set Point.

2. Сигналы для поддержания ОС: Iprlow и Iprlog.

3. Особенности СТМ режимов.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8**

### **«Метод зонда Кельвина и магнитно-силовая микроскопия»**

Цель работы: Получить изображение распределения магнитных сил образца в режиме микроскопии магнитных сил и распределение поверхностного потенциала в Кельвин-режиме.

Краткая теория: Режим магнитной микроскопии позволяет исследовать распределение магнитного поля по поверхности образца. Магнитно-силовая микроскопия (МСМ) реализуется с помощью бесконтактного режима сканирования, в основе которого лежит дальнедействующее взаимодействие магнитного зонда с локальным магнитным полем образца. Магнитный зонд представляет собой кремниевый кантилевер, покрытый тонкой плёнкой из ферромагнитного материала.

Одна из главных проблем магнитной микроскопии заключается в получении истинной картины распределения магнитных сил (отделение изображения магнитных сил от топографии). Решение этой проблемы осуществлено при помощи двухпроходной методики. При первом проходе определяется топография поверхности в контактном или полуконтактном режиме. Во втором проходе кантилевер колеблется и дополнительно

поднимается над поверхностью на выбранную высоту  $\Delta Z$  (расстояние между образцом и кантилевером). Высота  $\Delta Z$  поддерживается постоянной в процессе всего сканирования за счёт данных о топографии, полученных при первом проходе. Обратная связь на втором проходе выключена. Расстояние  $\Delta Z$  должно быть достаточно большим (10–500 нм), чтобы ван-дер-ваальсовыми силами можно было пренебречь, и на кантилевер действовали только дальнедействующие магнитные силы.

MCM измеряет распределение напряженности магнитного поля. Эта методика интенсивно используется для диагностики качества покрытий различных записывающих устройств и тонких магнитных плёнок. Возможность получения изображения с высоким разрешением позволяет проводить анализ плотности записи информации современных магнитных записывающих устройств, например, жёстких дисков, что особенно важно при создании новых технологий и покрытий для магнитозаписывающей техники.

Микроскопия электростатических сил (МЭС) включает в себя ёмкостную микроскопию и микроскопию электрического потенциала («Кельвин режим») [3]. В основе МЭС лежит действие электростатических сил между кантилевером и образцом. В данных режимах кантилевер находится на некотором расстоянии  $\Delta Z$  над поверхностью образца. Причём пьезодрайвер, раскачивающий кантилевер, отключен. Если образец и кантилевер изготовлены из проводящего электричество материала (поверхностная проводимость не требуется), то можно приложить между ними постоянное напряжение  $U_0$  и переменное  $U_1 \sin \omega t$  напряжение. Полное напряжение между образцом и кантилевером равно  $U = U_0 - \varphi(x, y) + U_1 \sin \omega t$ , где  $\varphi(x, y)$  — величина поверхностного потенциала в точке измерения. При этом появится сила электростатического притяжения между образцом и зондом.

Как хорошо известно, энергия конденсатора ёмкостью  $C$ , к которому приложено напряжение  $U$ , равна  $E = CU^2/2$ . При этом сила, с которой

кантилевер будет притягивается к поверхности, равна  $F = -\partial E / \partial Z = -0.5 U^2 \partial C / \partial Z$ .

В этом случае, для силы F получим выражение

$$F = -\left[ \frac{1}{2} \left( \Delta U^2 + \frac{U_1^2}{2} \right) + \Delta U U_1 \sin \omega t - \left( \frac{U_1^2}{4} \cos 2\omega t \right) \right] \frac{\partial C}{\partial Z}, \quad (2)$$

$$\Delta U = U_0 - \varphi(x, y).$$

Под действием силы F кантилевер будет колебаться и переменная составляющая сигнала DFL будет изменяться в соответствии с законом F(t). С помощью синхронного детектора можно выделить компоненты сигнала F на частоте  $\omega$  или  $2\omega$ .

В случае если частота изменения электрического поля  $\omega$  равна резонансной частоте кантилевера, то переменная составляющая сигнала DFL (сигнал MAG), детектируемая на первой гармонике возбуждающего сигнала, есть

$$MAG \sim [U_0 - \varphi(x, y)] U_1 \frac{\partial C}{\partial Z}. \quad (3)$$

Если частота изменения электрического поля  $\omega$  равна половине резонансной частоты кантилевера, то переменная составляющая сигнала DFL (сигнал MAG), детектируемая на второй гармонике возбуждающего сигнала, определяется как

$$MAG \sim \frac{U_1^2}{4} \frac{\partial C}{\partial Z}. \quad (4)$$

В обоих случаях добиваются резонансного возбуждения кантилевера, для того чтобы исследуемые сигналы имели возможно большую амплитуду [3,6].

МЭС реализуется в двухпроходном режиме. Во время первого прохода строки измеряется рельеф в обычном полуконтактном режиме, а при повторном сканировании строки регистрируется амплитуда резонансных

колебаний кантилевера. При этом второй проход осуществляется уже по известному рельефу в бесконтактном режиме, когда игла кантилевера проходит на заданном постоянном расстоянии  $\Delta Z$  от поверхности.

Согласно методу зонда Кельвина (МЗК) измерение сигнала, пропорционального выражению (3), позволяет получить картину распределения поверхностного потенциала  $\varphi(x, y)$ . В соответствии с (3), сигнал MAG обращается в нуль, если  $U_0 = \varphi(x, y)$  при любых значениях возбуждающего потенциала  $U_1$  и любых значениях  $\partial C / \partial Z$ . Таким образом, к каждой точке поверхности надо подобрать такое напряжение  $U_0$ , чтобы значение сигнала MAG равнялось нулю. Данная идея осуществляется с помощью обратной связи, которая управляет напряжением  $U_0$ .

Во втором проходе на вход обратной связи подаётся сигнал MAG, величина которого определяется выражением (3). Значение SP устанавливается равным нулю. Сигнал  $error = MAG - SP$  с выхода обратной связи подаётся на вход блока управления напряжением  $U_0$ . При работе системы обратной связи на кантилевер будет подаваться такое напряжение  $U_0$ , чтобы сигнал error равнялся нулю. Полученный таким образом массив измерений напряжения интерпретируется в соответствии с (3) как распределение поверхностного потенциала или работы выхода электронов. Данная методика получила название “Кельвин микроскопия” [5].

Следует отметить, что от выбора величины  $\Delta Z$  во втором проходе существенно зависит величина  $\partial C / \partial Z$  и соответственно величина MAG. Поэтому необходимо подобрать такое расстояние  $\Delta Z$ , чтобы величина  $\partial C / \partial Z$  не существенно изменялась при колебаниях кантилевера и не стремилась к нулю. Так же расстояние  $\Delta Z$  должно быть достаточно большим (10–500 нм), чтобы ван-дер-ваальсовыми силами можно было пренебречь.

Данная методика предназначена для исследования поверхностей материалов, имеющих области с различными поверхностными потенциалами. Используя данную методику, можно регистрировать

распределение зарядов на элементах поверхности, измерять и анализировать неоднородные заряженные области, определять работу выхода электронов.

**Задание к работе:**

a. Установить образец (фрагмент жесткого компьютерного диска) в держатель сканера.

b. Произвести подвод образца к кантилеверу (микроскоп настроен для работы в полуконтактном режиме).

c. Настроить блок-схему второго прохода для работы в МСМ. Установить амплитуду раскачивающего сигнала около 0.1 В, Gain ~ 20–40.

d. Исследовать распределение магнитного поля (сигнал MAG или MAGsin) по поверхности образца при  $\Delta Z \sim 1000 \text{ \AA}$ . В процессе сканирования подобрать такое значение  $\Delta Z$ , при котором изменение сигнала MAGsin будет максимальным. Определить характерные размеры магнитных доменов. Проанализировать, какие факторы могут влиять на величину сигнала MAGsin.

e. Отвести образец от зонда на 2.0 мм.

f. Установить тестовый образец (кремниевая подложка с нанесёнными плёнками двух различных металлов) в держатель сканера.

g. Произвести подвод образца к кантилеверу (блок-схема настроена для работы в полуконтактном режиме).

h. Настроить блок-схему второго прохода для работы в Кельвин режиме. На вход цепи обратной связи подать сигнал MAG. Подобрать значения амплитуды раскачивающего сигнала, коэффициента Gain,  $U_0$ , Phase так, чтобы на резонансной частоте сигнал MAG составлял около 1 нА (ОС при этом разомкнута).

i. Исследовать распределение электрического потенциала на границе двух различных материалов. В режиме спектроскопии снять зависимость сигнала MAG( $U_0$ ). По результатам спектроскопии оценить работу выхода кантилевера. Работу выхода исследуемых материалов узнать у преподавателя.



- j. Отвести образец от зонда на 2.0 мм.
- k. По результатам работы подготовить отчет.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Зонды для МСМ, МЭС.
2. Как реализуется режим емкостной микроскопии.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9 «Микроскопия ближнего поля»**

Цель работы: Изучить работу АСМ в режиме СБОМ и получить изображения поверхности и распределения интенсивности ЭЛМ вблизи поверхности образца в данном режиме.

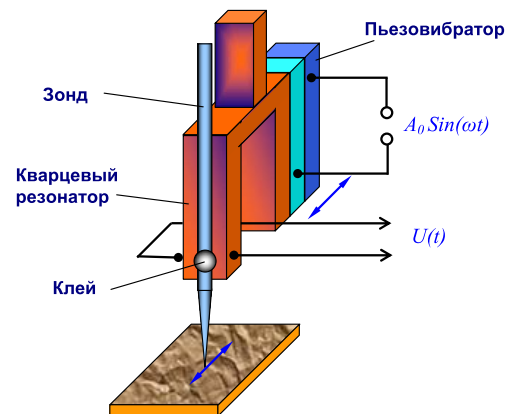
Краткая теория: Разрешение классических оптических микроскопов ограничивается дифракционным пределом Аббе на уровне примерно половины длины волны. Однако этот предел может быть преодолен. Изображение со сверхвысоким разрешением может быть получено путем регистрации излучения, проходящего через отверстие с размерами менее длины волны при сканировании объекта. Сканирующая ближнепольная микроскопия, основанная на этом принципе, было впервые предложена Syngge и продемонстрирована с применением микроволнового излучения Ash and Nicholls  $1/60$  длины волны. В световой области длин волн этот принцип (оптической стетоскопии, ближнепольная оптическая микроскопия, СБОМ) был продемонстрирован Pohl и др. Betzig и др. продемонстрировали использование оптического волокна для отображения ряда образцов с различными механизмами получения оптического контраста. Для того, чтобы такая система была практичной и могла быть использована для образцов с самым различным рельефом необходим механизм, обеспечивающий автоматизированный подвод малоразмерной диафрагмы к исследуемой поверхности на заданное расстояние и поддерживающий это расстояние постоянным в процессе сканирования. Был предложен целый ряд таких механизмов для СБОМ и соответствующих методик, основанных на

использовании затухающих волн, включая туннелирование электронов, фотонное туннелирование, измерения емкости, ближнепольное отражение и пр. В настоящее время наиболее используемый метод поддержания расстояния зонд-образец основывается на измерении поперечно-силового взаимодействия ближнепольного зонда и образца. Использование основанной на поперечно-силовом взаимодействии системы измерений позволяет проводить определение рельефа поверхности образца, или наряду с поперечно-силовой микроскопией проводить ближнепольные измерения с использованием Метода Пропускания для прозрачных образцов, Метода Отражения для непрозрачных образцов и Люминесцентного Метода для дополнительной характеристики образцов.

Для работы СБОМ необходимо удерживать зонд над поверхностью на расстояниях порядка 10 нм и менее. Существуют различные решения данной проблемы, однако наиболее широкое распространение получили СБОМ с так называемым "shear force" методом контроля расстояния между зондом и образцом [5].

Чаще всего применяются схемы "shear-force" контроля с использованием пьезодатчика на основе кварцевого резонатора камертонного типа. Зонд БОМ крепится к кварцевому резонатору с помощью клея. Вынужденные колебания камертона на частоте, близкой к

резонансной частоте системы зонд - кварцевый резонатор, возбуждаются с помощью дополнительного пьезовибратора. При этом зонд совершает колебательное движение параллельно поверхности образца. Измерение силы взаимодействия зонда с поверхностью производится посредством регистрации изменения амплитуды и фазы изгибных колебаний кварцевого резонатора на частоте возбуждения (по переменной составляющей напряжения на электродах резонатора  $U(t)$ ). Теория "shear force" контроля



достаточно сложна, и здесь мы ограничимся лишь качественными соображениями. При сближении зонда и образца наблюдаются несколько эффектов. Во-первых, появляется дополнительное диссипативное взаимодействие зонда с поверхностью за счет сил вязкого трения (в тонкой прослойке воздуха, прилегающего к поверхности, и в тонком слое адсорбированных молекул на поверхности образца). Это приводит к уменьшению добротности системы, а следовательно, к уменьшению амплитуды колебаний и уширению АЧХ И ФЧХ системы зонд-резонатор на резонансной частоте. Во-вторых, при малых расстояниях зонд-поверхность происходит изменение моды колебаний в системе зонд – резонатор. В свободном состоянии мода колебаний соответствует колебаниям стержня со свободным концом, а при сближении с образцом (в пределе при касании зонда поверхности) переходит в колебания стержня с закрепленным концом. Это приводит к увеличению резонансной частоты в системе зонд-резонатор, т.е. сдвигу АЧХ в сторону более высоких частот. Изменения амплитуды и фазы изгибных колебаний в системе зонд-резонатор используются в качестве сигналов обратной связи для контроля расстояния зонд-поверхность в ближнепольных оптических микроскопах.

Таким образом, поперечно-силовая микроскопия осуществляется следующим путем. Пьезовибратор через кварцевый резонатор возбуждает колебания волоконного зонда с некоторой начальной амплитудой, при этом величина выходного сигнала резонатора составляет  $A_0$ . При приближении к поверхности образца амплитуда колебаний волоконного зонда уменьшается и достигает некоторой предустановленной (set-point) величины  $A$ . После этого производится сканирование поверхности образца с поддержанием системой обратной связи этой величины амплитуды колебаний [8].

#### **Задание к работе:**

а. Установить тестовый образец. Столик и образец должны быть в горизонтальном положении.

- b. Установить измерительную головку на установку. Выровнить в горизонтальное положение при помощи винтов.
- c. Закрепить оптическое волокно на юстировочном столике.
- d. Настроить оптическую систему лазер-объектив. Перемещая предметный столик, добиться максимального выхода света.
- e. Установить следующие параметры: Drive Frequency 28-37 кГц; Drive Amp 1 В; Input Gain 1; Amplitude mode; SetPoint 70-90%.
- f. Произвести подвод к образцу.
- g. Исследовать топографию в режиме СБОМ. Определить топографию тестового образца. Получить распределение интенсивности электромагнитного излучения вблизи поверхности.
- h. Отвести зонд от образца.
- i. По результатам работы подготовить отчет.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Условия работы СБОМ.
2. За счёт чего достигается повышенное разрешение.
3. Что происходит с амплитудой и фазой при подводе.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10**

### **«Управление качеством АСМ-изображений»**

Цель работы: Изучить метод управления качеством измерений атомно-силового микроскопа.

Краткая теория: В процессе сканирования поверхности образца формирование СЗМ-изображения происходит следующим образом: пьезопривод передвигается в плоскости XY (плоскость изображения) в рамках прямоугольного поля, разбитого на ячейки раstra. В каждой точке заданного раstra происходит регистрация высоты рельефа (координата Z), а также других характеристик поверхности образца. Таким образом можно получать характерные профили измеренных двумерных карт рельефа (рис. 11).

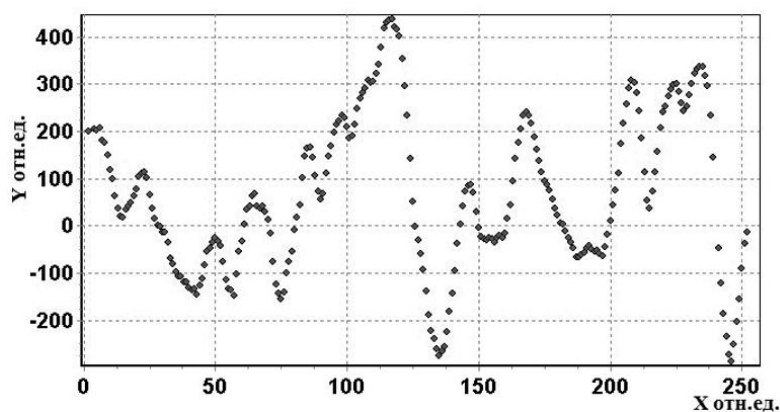


Рис. 11 – Пример профиля исследуемого рельефа поверхности

Методы фрактальной геометрии, основанные на вычислении фрактальных размерностей или определении показателя Херста для изображений, полученных с применением сканирующих атомно-силовых микроскопов, получают все большее распространение в задачах анализа наноразмерных объектов. Данные методы позволяют получать численные характеристики микрогеометрии исследуемого объекта и дают возможность сравнения различных объектов по степени упорядоченности и подобия.

Для расчета показателя Херста используется стандартный метод нормированного размаха, основанный на следующем эмпирическом отношении:

$$\frac{R(\Delta x)}{S(\Delta x)} \approx \Delta x^H, \quad (5)$$

где  $R(\Delta x)$  – размах накопленного на участке  $\Delta x$  отклонения;  $S(\Delta x)$  – среднеквадратичное отклонение высот на данном участке. Возможность определения показателя  $H$  указывает на наличие корреляции высот в выбранной области. Используя показатель Херста, рассчитанный по формуле (5), можно определить коэффициент корреляции высот в указанной области:

$$C(\Delta x) = 2^{2H-1} - 1. \quad (6)$$

Таким образом, при  $H = \frac{1}{2}$  имеется гауссово распределение; в других случаях в распределении высот имеется определенный тренд. Если  $\frac{1}{2} < H < 1$ , говорят о «персистентности» распределения, то есть имеет место «поддержка» тенденции; чем ближе значение показателя Херста к 1,

тем более монотонным будет поведение зависимости. Если  $\frac{1}{2} > H > 1$ , говорят об «антиперсистентности», то есть на исследуемом участке происходит частая смена тенденции; чем ближе значения показателя Херста к 0, тем более периодическим становится поведение исследуемой зависимости.

Данный факт открывает возможность использования показателя Херста для улучшения качества получаемых изображений [2]. Для этого можно использовать так называемый алгоритм случайных сложений Фосса [12]. Суть метода заключается в том, что, имея некоторую произвольную зависимость, можно построить случайный рельеф, используя следующий рекурсивный алгоритм.

Между исходными точками последовательности (рис. 12), путем случайного сложения добавляются новые точки последовательности (итог представлен в виде ломаной кривой, проведенной между круглыми маркерами); начальное значение точки соответствует среднеарифметическому значению двух соседних измерений (треугольники на графике). К этому значению случайным образом добавляют независимые приращения; при этом на каждом шаге генерации дисперсия ведет себя по следующему закону

$$\sigma^2(d_i) = r^{2H} \sigma^2(d_{i-1}), \quad (7)$$

где  $\sigma^2(d_i)$  – дисперсия приращений для  $i$ -го шага,  $r$  – коэффициент разбиения.

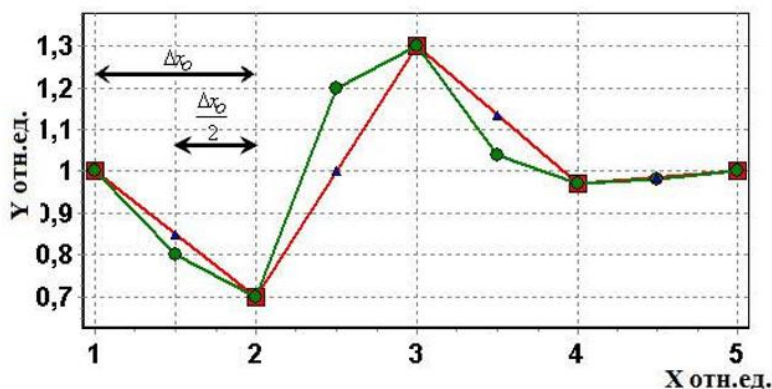


Рис.12 – Демонстрация примера построения фрактальной кривой методом случайного сложения Фосса

### **Задание к работе:**

- a. Установить кантилевер в измерительную головку. Произвести юстировку оптической системы (добиться максимального значения сигнала LASER, DFL = 0, LF = 0).
- b. Установить тестовый образец в держатель сканера.
- c. Настроить микроскоп для работы в контактном режиме (Set point = 2; FBgain = 0.5).
- d. Произвести подвод образца к кантилеверу. Провести сканирование поверхности в контактном режиме с разрешением 256 и 1024.
- e. Рассчитать показатель Херста.
- f. С помощью метода расчета фрактальной размерности, основанной на скейлинг-эффекте, восстановить рельеф для строки, просканированной с разрешением 256.
- g. Проанализировать изображение, полученное с разрешением 1024 и улучшенное изображение с разрешением 256 по предлагаемому методу.
- h. По результатам работы подготовить отчет.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Что такое скейлинг-эффект.
2. Какими параметрами можно улучшить качество АСМ-изображения.
3. Как определить оптимальное разрешение сканирования.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11

### **«Моделирование профиля АСМ-изображения»**

Цель работы: Методом компьютерного моделирования восстановить профиль АСМ-изображения.

Краткая теория: Для расчета показателя Херста, при моделировании, лучше подходит метод накопленной дисперсии. Тогда дисперсия имеет вид

$$\text{var}|(X(t_2) - X(t_1))^2| = \sigma^2 |t_2 - t_1|^{2H} ,$$

где  $H$  — показатель Херста, определяется как угловой коэффициент из отношения  $\log \sigma_{nns}(\Delta X) = c + H \log |s|$ , здесь  $\sigma_{nns}(\Delta X)$  — среднеквадратичное отклонение приращений  $\Delta X$  соответствующих временному интервалу  $s$ ;  $c$  — константа. При использовании этого метода требуется выполнение условия нормального распределения первых разностей (приращений) временного ряда [6].

Ниже рассмотрим пример таких приращений:

```
%максимальная длина приращения
pmax=10;
L=length (signal);
for p=1: pmax
for i=1: L-pmax
%набор приращений и их СКО
dX (i)=signal (i+p,2)- signal (i,2);
S (p)=std (dX);
end
E (p)=log (p);
N (p)=log (S (p));
end
plot (E, N,'o');
%коэффициенты МНК-прямой
H=polyfit (E, N,1);
%MНК-прямая
h=H (2)+H (1)*E;
hold on
plot (E, h,'r');
%полученный показатель Херста
```

Для вычисления фрактальных размерностей временных рядов можно использовать простой и быстрый алгоритм, предложенный Хигучи [13]. Пусть имеется кривая временного ряда из  $N$  точек. Кривая разбивается на  $n$  равных частей  $a$ . Длину кривой можно представить в виде  $n^{-d}$ , где  $d$  — Хаусдорфова размерность, величина которой находится в пределах  $1 < d < 2$ . Тогда пусть анализируемый участок кривой (выборка) состоит из  $N$  отсчетов. Величина  $a = \text{int}[N/n]$ , где функция  $\text{int}[x]$  является функцией выделения целой части. Из исходного ряда  $f(t)$ , в котором  $t$  принимает  $N$  дискретных значений, конструируем новые временные ряды  $f(m,a)$ :

$$f(m,a) = f(m), f(m + a), f(m + 2a), \dots$$



$f(m + \text{int}[(N - m)/a]a); m = 1, 2, \dots, a.$

Длина кривой в методе Хигучи определяется так:

$$L_m(a) = \frac{(N - 1)}{a \text{int}[(N - m)/a]} \cdot \sum_{i=1}^{\text{int}[(N-m)/a]} |f(m + ia) - f(m + (i - 1)a)| .$$

Далее нужно вычислить среднее значение  $L(a)$  по всем  $m$  и построить зависимость  $\log(L(a))$ , от  $\log(a)$ .

Затем эта зависимость аппроксимируется прямой линией по способу наименьших квадратов. Тангенс угла наклона этой прямой дает значение фрактальной размерности по методу Хигучи [11].

Для построения фрактальной кривой воспользуемся методом случайного сложения Фосса. Он включает в себя следующий пошаговый алгоритм [10]:

1. Исходные значения координат  $X(t_i)$  в моменты времени  $t_i = 0, 1/2, 1$  равны нулю.

2. Выбираются начальные значения аргумента в долях от длины реализации, равной единице  $x_i = 0, 0.5, 1$ . В этих точках значения функции принимаются равными нулю.

3. К значениям функции прибавляются случайные числа, выбранные из нормального распределения с нулевым средним и дисперсией, которая равна дисперсии значений моделируемого объекта.

4. Производится линейная интерполяция этих значений:

$$y\left(\frac{x_{i+(i+1)}}{2}\right) = \frac{y(x_i) + y(x_{i+1})}{2} .$$

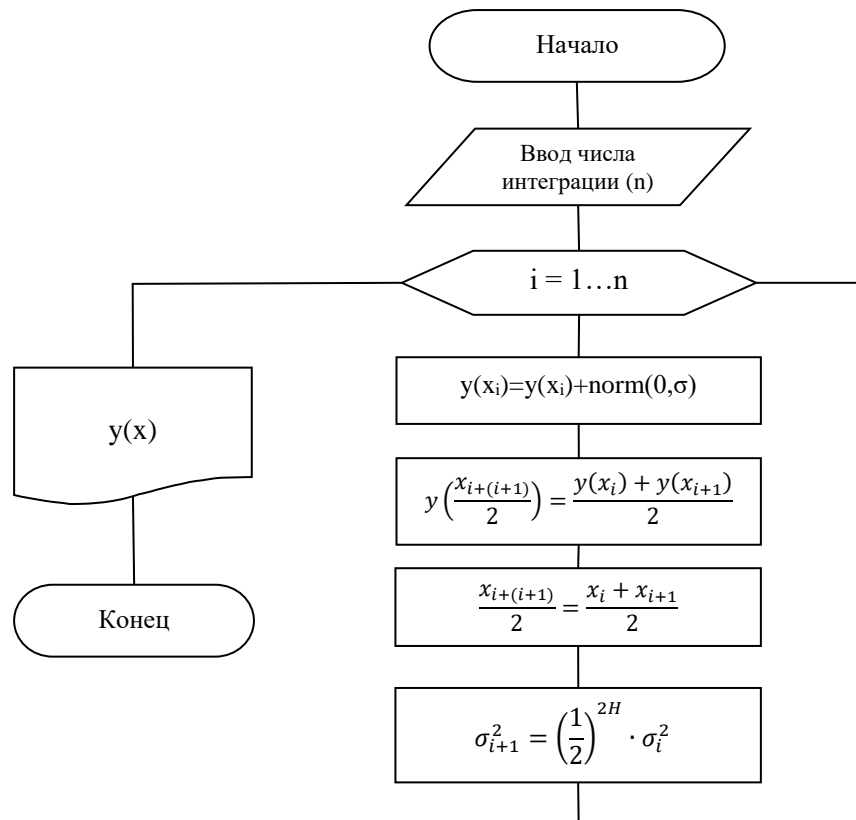
5. После интерполяции исходная дисперсия  $\sigma_i$  уменьшается согласно зависимости:

$$\sigma_{i+1}^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^{2H} \cdot \sigma_i^2 ,$$

где  $H$  – показатель Херста.

Показатель Хёрста связан с размерностью Хаусдорфа-Безиковича  $D$  следующим соотношением  $D=2-H$ .

6. Выбираются новые значения аргумента усреднением предыдущих.



Пример реализации стандартного алгоритма Фосса для одномерной фрактальной функции, сгенерированной на основе нормального распределения [10].

```

function [yn, xn] =vs(x,y,sigma,H,n)
for i=1:n
yn(i)=y(i)+normrnd(0,sigma);
y(i)=(y(i)-y(i+1))/2;
xn(i)=x(i)+x(i+1)/2;
sigma=sqrt((1/2)^(2*H)*sigma^2);
end

load relyef2.txt
data=relyef2(:,2)';
sigma=693.4743;
H=0.97;
r=5;
ng=5;

x=relyef2(:,1)';
y=relyef2(:,2)';
n=length(x)-1;
  
```

$y_n = v_s(x, y, \sigma, H, n)$   
 $\text{plot}(x_n, y_n)$

### **Задание к работе:**

- a. В программе MatLab рассчитать показатель Херста, фрактальную размерность и дисперсию по данным лабораторной работы №10.
- b. Смоделировать профиль методом Фосса.
- c. Определить погрешность метода.
- d. Проанализировать полученный результат.
- e. По результатам работы подготовить отчет.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Что такое фрактальная размерность.
2. Для каких задач используется компьютерное моделирование.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12**

### **«Электрофизические свойства фрактальных структур»**

Цель работы: Методом компьютерного моделирования рассчитать электрические свойства фрактальных структур.

Краткая теория: Проводимость фрактальной поверхности имеет неоднородное распределение. Один из способов аппроксимации среды состоит в моделировании ее слоисто-однородной моделью, когда каждый слой обладает однородными значениями электропроводности и диэлектрической проницаемости. Такие среды можно создать напылением молекулярных пучков на подложку, выращиванием химическими методами, а также сборкой тонких пластин в стопку, где каждая пластина имеет свои, отличные от других, значения проводимости и диэлектрической проницаемости. Для подобной модели сохраняется линейная связь между компонентами электромагнитного поля. Моделированием неоднородного строения среды однородными слоями, сохраняется линейность уравнений Максвелла, что в свою очередь означает, что можно ввести понятие

эффективного скин-слоя [7]. В случае однородной проводящей среды скин-слой дается выражением

$$H = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega \sigma}}, \quad (8)$$

или, ее частотная характеристика, выражением  $H \sim \omega^{1/2}$ , где  $\omega$  - круговая частота,  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума (размерная единица), проводимость  $\sigma$ .

Следующим шагом после моделирования среды однородными слоями будет также однородные слои, но каждый слой обладает только либо проводящими, либо диэлектрическими свойствами, причем эти свойства чередуются. На разных частотах разбиение на слои меняется, как показано на рисунке 13.

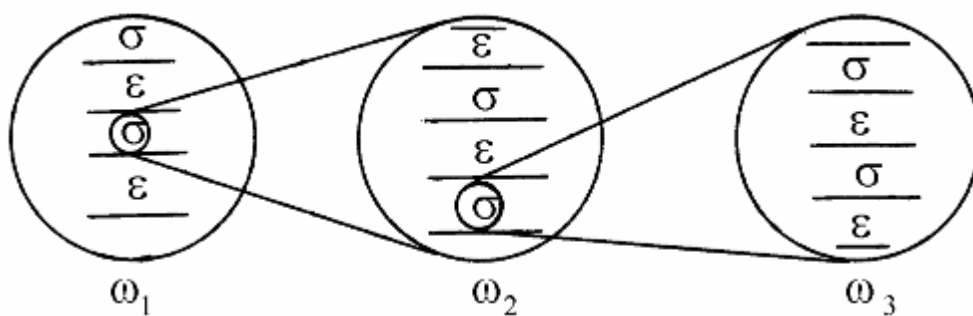


Рис.13 – Фрактальное распределение электрических параметров неоднородной среды

Фигуры на рисунке 13 под разным увеличением, т.е. на разных частотах, каждый слой подобен любому другому слою;  $\omega$ - круговая частота. Так как слои самоподобны под различным увеличением распределение проводящих и емкостных участков подобны друг другу. Если смотреть сквозь слои, то можно увидеть чередование проводящих участков, разделенных емкостными участками. С точки зрения фрактальной геометрии, проводящие участки образуют канторовское множество с фрактальной размерностью  $D$ , меньшей единицы. Многомасштабность и самоподобие означает, что проводящие участки на всех трех фигурах рисунке 13 обладают одной и той же фрактальной размерностью [3].

Полупроводящие среды в реальном случае состоят из чередующихся неоднородных проводящих и диэлектрических участков. Электромагнитное поле свободно пронизывает диэлектрические включения и затухает на проводящих участках. Проникновение поля приобретает характер диффузионного блуждания. Пространственное распределение электромагнитного поля эволюционирует с частотой, и это позволяет полю “прощупывать” распределение неоднородностей. Глубина “прощупывания” дается выражением (8) и называется скин-слоем. Согласно эвристическому принципу, частотную зависимость  $H \sim \omega^{-1/2}$ , в случае фрактального распределения электрических параметров необходимо заменить на следующее выражение:

$$H \sim \omega^{-1/h},$$

где  $h$  – размерность блуждания, которая связана с размерностью фрактала соотношением:  $h = 1/D$ .

Множитель, здесь не выписанный, зависит от проводимости и диэлектрической проницаемости, и излагаемым подходом определить невозможно.

Но можно предложить, с учетом размерностей, следующее выражение:

$$H = C \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu_0 \sigma}} \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon \omega} \right)^{\frac{1}{h}}, \quad (9)$$

здесь  $C$  – типичный для фрактальной геометрии неопределенный множитель. Наличие величин  $\sigma$  и  $\varepsilon$  отражает положение, что диффузия электромагнитных полей происходит в полупроводящей среде. Они имеют смысл эффективных параметров, отражающих иерархическое распределение проводимости и диэлектрической проницаемости. В асимптотическом пределе однородной среды, когда  $h = 2$  и  $C = \sqrt{2}$ , из (9) следует известный классический результат (8).

Геометрическое подобие оказывается важным и в моделировании, когда установленные законы для физической системы одного размера удается перенести на такую же систему, но в другом пространственно-

временном масштабе. Геометрическое подобие описываются следующими формулами:

$$r' = \eta r, \quad t' = \eta^h t, \quad (10)$$

где  $\eta$  - масштабный множитель,  $h$  – степенной показатель.

Чтобы выяснить, как геометрическое подобие (10) будет выглядеть в частотной области, перепишем частотную характеристику скин-слоя в следующем виде:

$$H \sim \omega^{-1/h}. \quad (11)$$

С другой стороны, исключая в (10) масштабный множитель, получаем:

$$r \sim t^{1/h}. \quad (12)$$

Выражение (12) означает, что во фрактальной среде за время  $t$  электромагнитное поле проникает на глубину  $r$ . Выражение (11) говорит, что электромагнитная волна с частотой  $\omega$  проникает во фрактальную среду на глубину скин-слоя  $H$ . Видим, что фактически  $r$  и  $H$  описывают одну и ту же ситуацию – глубину проникновения электромагнитного поля в среду.

Приравнявая (11) и (12), получаем

$$t^{1/h} \sim \omega^{-1/h}.$$

А это означает, что время проникновения поля в среду обратно пропорционально частоте этого поля:

$$t \sim \frac{1}{\omega}. \quad (13)$$

Мы еще раз получили выражение (11).

С учетом соотношения (13) законы геометрического подобия (10) приобретают следующий вид:

$$r' = \eta r, \quad \omega' = \eta^{-h} \omega, \quad (14)$$

Так, для компонент электромагнитного поля имеем:

$$\vec{E}' = \eta^e \vec{E}, \quad \vec{B}' = \eta^b \vec{B}. \quad (15)$$

Аналогичным образом масштабируются и электрические параметры:

$$\varepsilon' = \eta^\xi \varepsilon, \quad \sigma' = \eta^\eta \sigma. \quad (16)$$

Законы подобия (14)-(16) необходимо применить к уравнениям Максвелла.

Находим законы масштабного подобия, которым удовлетворяют уравнения Максвелла:

$$r' = \eta r, \quad \omega' = \eta^{-h} \omega, \quad (17)$$

$$\vec{E}' = \eta^e \vec{E}, \quad \vec{B}' = \eta^{e-1+h} \vec{B}, \quad (18)$$

$$\varepsilon' = \eta^{2(h-1)} \varepsilon, \quad \sigma' = \eta^{h-2} \sigma. \quad (19)$$

Преобразования (17)-(19) позволяют переходить от решений уравнений Максвелла для электромагнитной волны определенной частоты к полям другой частоты, распространяющимся во фрактальной среде. Фактически, соотношениями (17)-(19) создана теория математического моделирования электромагнитных процессов во фрактальных средах и материалах.

Из формул  $r' = \eta r$  и  $\varepsilon' = \eta^{2(h-1)} \varepsilon$  исключая масштабный множитель, находим

$$\varepsilon \sim r^{2(h-1)}. \quad (20)$$

Обычно для определения пространственного и частотного поведения электрических параметров неоднородных сред используют перколяционный подход [4]. Такой подход приводит к следующему пространственному поведению проводимости и диэлектрической проницаемости вещества соответственно:

$$\sigma \sim L^{-\tau/\nu}, \quad \varepsilon \sim L^{s/\nu},$$

здесь  $\tau$ ,  $s$  и  $\nu$  - критические индексы, ответственные за перколяционный переход системы из одного состояния в другое. Видно, что перколяционный подход характеризуется обилием степенных показателей.

Однако, используя инвариантность уравнения Максвелла относительно преобразований геометрического подобия, и представление о блуждании электромагнитного поля по проводящим и диэлектрическим участкам, можно получить законы (17)-(19) для электромагнитных процессов, в которых все

степенные показатели выражены через одну величину – размерность блуждания  $h$ .

Чтобы из законов (17)-(19) получить, например, пространственную характеристику проводимости, необходимо из них исключить масштабный множитель  $\eta$ . Для этого используем следующий прием:

$$\eta = \left( \frac{\sigma'}{\sigma} \right)^{\frac{1}{h-2}} = \frac{L'}{L}.$$

Отсюда уже следует, что  $\sigma \sim L^{-2+h}$ .

Поступая аналогичным образом для диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , в итоге находим пространственные и частотные характеристики проводимости и диэлектрической проницаемости:

$$\sigma \sim L^{-2+h}, \quad \sigma \sim \omega^{-1+2/h}, \quad (21)$$

$$\varepsilon \sim L^{2h-2}, \quad \varepsilon \sim \omega^{-2+2/h}, \quad (22)$$

Замечательно, что здесь все степенные показатели выражены через одну величину – размерность блуждания  $h$ . Ранее было установлено, что для электромагнитных процессов  $h = 1/D$ . Поэтому (21-22) можно переписать в следующем виде:

$$\sigma \sim L^{-2+1/D}, \quad \sigma \sim \omega^{-1+2D}, \quad (23)$$

$$\varepsilon \sim L^{2/D-2}, \quad \varepsilon \sim \omega^{-2+2D}, \quad (24)$$

В случайно неоднородной среде электрический ток течет по извилистым путям. Расстояние  $L$  же измеряется по прямой линии. Это приводит к увеличению значения сопротивления  $R$ . Из-за самоподобия это увеличение подчиняется степенному закону:

$$R \sim L^\beta. \quad (25)$$

Чтобы получить закон (25) и установить связь показателя  $\beta$  с фрактальной размерностью  $D$ , нужно промоделировать извилистый путь течения электрического тока триадной кривой Коха.



На рисунке 14 участок прямой длиной  $L$  обладает сопротивлением  $R(L)$ . Если длина участка прямой равна  $L/3$ , то ее сопротивление, очевидно, будет  $R(L/3)$ . Триадная кривая Коха состоит из 4 участков, поэтому ее общее сопротивление будет равно  $4R(L/3)$ . Составляя равенство  $R(L) = 4R(L/3)$ , находим его решение:  $R(L) = L^{\ln 4 / \ln 3}$  [3].

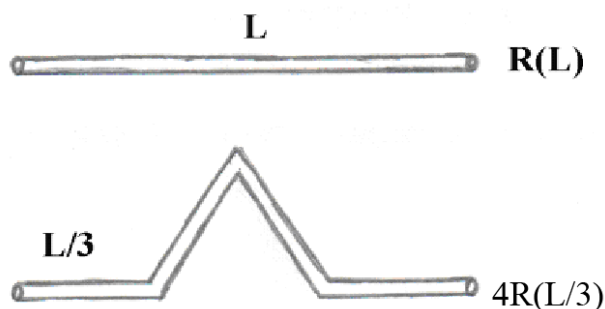


Рис.14 – Течение тока по триадной кривой Коха

Далее, для триадной кривой Коха известно, что ее фрактальная размерность  $D = \ln 4 / \ln 3$ . Тогда,

$$R \sim L^D. \quad (26)$$

### Задание к работе

1. Построить фрактальную кривую
2. Рассчитать длину фрактальной кривой  $L$
3. Рассчитать фрактальную размерность построенной кривой
4. Рассчитать  $\sigma, \varepsilon, \omega, R, N$  по формулам, приведенным в теории ( $C, \varepsilon_0, \mu_0$  - выбрать самостоятельно).

#### *Вариант 1*

Фрактал Коха

$L = z(4/3)^n$  где  $n$  – число итераций,  $z$  – высота образующего шаблона (длина исходного отрезка).

#### *Вариант 2*

Фрактал Дракон (Хартера-Хейтуэя)

$L = z(\sqrt{2})^n$ , где  $n$  – число итераций,  $z$  – высота образующего шаблона (длина исходного отрезка).

### *Вариант 3*

Фрактал Кривая Госпера

$L = z(\sqrt{7})^n$ , где  $n$  – число итераций,  $z$  – высота образующего шаблона (длина исходного отрезка).

### *Вариант 4*

Фрактал кривая Гильберта

$L = z(2^n - 1/2^n)$ , где  $n$  – число итераций,  $z$  – высота образующего шаблона (длина исходного отрезка).

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое скин-слой и как он вычисляется?
2. Как связаны размерность фрактала и случайные блуждания?
3. Как связано сопротивление и фрактальная размерность?
4. Каковы основные параметры при моделировании электрических свойств для фрактальных структур?

## Список используемой литературы

1. Агеев О.А. и др. Исследование процесса локального анодного окисления пленки титана при стимуляции ультрафиолетовым излучением / Материалы МНК «Тонкие пленки и наноструктуры», 22-26 ноября 2005 г. – М.: Изд-во МИРЭА, 2005. – Ч. 1 – С. 160-163
2. Аракелян С.М., Быков В.А., Кутровская С.В., и др. Применение методов фрактальной геометрии для управления качеством измерений атомно-силового микроскопа // Химическая физика и мезоскопия. 2011. Том 13. №1. С. 63-71
3. Балханов В.К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления/ от. ред. Ю.Б. Башкуев. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. 224 с.
4. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. 128 с.
5. Зондовая нанолаборатория ИНТЕГРА. Проведение измерений. АСМ и СТМ измерения, спектроскопия, многопроходные методы, литография. Руководство пользователя. Зеленоград, М.:НТ-МДТ, 2007. 353 с.
6. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории / Р. М. Кроновер. — М. : Постмаркет, 2000. 350 с
7. Курдюков В.И., Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Разработка фрактальной математической модели шероховатости поверхности // Вестник КузГТУ. - 2008. - №5. - С. 43-45
8. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005. 144 с.
9. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике.– М.: Техносфера, 2006. 160 с.

10. Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Моделирование кривой методом случайных сложений v 1.0. – М.: ВНИИЦ, 2008. - № 50200800790

11. Чумак О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных. — М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. 164 с.

12. Шитов В.В., Москалев П.В. О модификации алгоритма Фосса при моделировании внутренней структуры пористой среды // ЖТФ. 2005. Т.75, №.2. С.1-5.

13. Higuchi T. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory // Physica D. Vol. 31. 1988. P. 277–283.

14. Kutrovskaya S., Shagurina A., Skryabin I., and etc. Atomic force lithography of metal nanomassives on the silicon surface. 5-ая международная конференция «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства». Программа и тезисы докладов. Владимир/Суздаль, Россия, 12.11-15. 11.2016г. С.87-90.