МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(Национально-Исследовательский Университет)
Институт Естественных и точных наук
Кафедра «Физическая электроника»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент: к.х.н. доцент

_____.Д.А. Винник

«21» июня 2017г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой:
д.т.н. профессор

_____С.Ю. Гуревич

«22» июня 2017г.

Зондовая микроскопия в наноэлектронике

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ – 110404.2017.1464. ПЗ ВКР (ВКП)

Руководитель проекта

к.т.н., доцент

_____ Забейворота Н.С.

«19» 06 2017 года

Автор проекта

студент группы ЕТ-263

_____ Аль-Хайдери Вадха Хуссуйн Али

«16» 06 2017 года

Нормоконтролер

к.т.н., доцент

_____Н.С.Колмакова

«19» 06 2017 года

Челябинск 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Южно-Уральский государственный университет»

(Национально-Исследовательский Университет)

Институт Естественных и точных наук

Кафедра «Физическая электроника»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

д.т.н. профессор

_____С.Ю.Гуревич

«__22__» ____июня____2017г

Задание

на выпускную квалификационную работу студента

Аль-Хайдери Вадха Хуссуйн Али

ЕТ-263

1 Тема работы

Зондовая микроскопия в наноэлектронике.

Утверждена приказом по университету от 28.04 2017г.
№ 835
(утверждена _____ от 28.04 2017г.
№____)

2 Срок сдачи студентом законченной работы 19.06 2017г.

3 Исходные данные к работе

Литературные данные для обработки результатов

4 Перечень вопросов, подлежащих разработке

Литературный обзор сканирующей зондовой микроскопии. Исследование с применением сканирующей зондовой микроскопии. Измерение толщин в многослойных структурах полимерных плёнок на микроскопе JEOL JSM – 7001F с системой микроанализа

5 Иллюстративный материал
Электронная презентация

6 Дата выдачи задания 3.02.2017

Руководитель _____

Задание принял к исполнению _____

Календарный план

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
Литературный обзор методов сканирующей зондовой микроскопии	17.02.17	
Исследование с применением сканирующей зондовой микроскопии	23.04.17	
Измерение толщин в многослойных структурах полимерных плёнок на микроскопе JEOL JSM – 7001F с системой микроанализа	25.05.17	

Заведующий кафедрой _____ / С.Ю. Гуревич

Руководитель работы _____ / заведующая НС

Студент _____ / Аль Хайдери Вадха

АННОТАЦИЯ

Аль-Хайдери Вадха Хуссейн Али. Зондовая микроскопия в наноэлектронике. - Челябинск: ЮУрГУ, ФЭ; 2017, 56 с., 39 ил., библиогр. список – 12 наим..

Проведен литературный обзор сканирующей зондовой микроскопии. Рассмотрены принцип работы, элементы и защита сканирующих зондовых микроскопов. Так же рассмотрены основные методы зондовой микроскопии, такие как сканирующая туннельная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, ближнепольная оптическая микроскопия, электронная микроскопия, магнитно-силовая микроскопия, электросиловая микроскопия для изучения нанообъектов.

Проведено исследование наноструктур с применением сканирующей зондовой микроскопии.

Получены результаты измерений толщин в многослойных структурах полимерных плёнок на микроскопе JEOL JSM – 7001F с системой микроанализа:

а) многослойной пленки ПЭТ + ПВД + ЭВА,

б) железной окалины (Fe_3O_4) в стеклоуглероде,

в) полимеров электронных изображений многослойной пленки,

г) оксида кобальта (Co_3O_4) при 1000°C,

д) электрода литий-ионного аккумулятора.

					110404.2017.1464 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата			
Разраб		Вадха		19.06 2017	Дипломная работа	Лит.	Лист 4 / Листов 56
Пров							
Реценз.						Физическая электроника	
Н. Контр.		Комакова					
Утв							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 7

1.Литературный обзор сканирующей зондовой микроскопии.

1.1.1Принцип работы сканирующих зондовых микроскопов 8

1.1.2.Сканирующие элементы зондовых микроскопов 10

1.1.3.Устройства для прецизионных перемещений зонда и образца 15

1.1.4.Защита зондовых микроскопов от внешних воздействий 19

1.2.Сканирующая туннельная микроскопия 21

1.3.Атомно-силовая микроскопия 26

1.4.Электросиловая микроскопия 27

1.5.Магнитно-силовая микроскопия 31

1.6.Ближнепольная оптическая микроскопия 33

1.7.Электронная микроскопия 36

2.Исследование с применением сканирующей зондовой микроскопии.

2.1Формирование и обработка СЗМ изображений 45

2.2 Измерение толщин в многослойных структурах на микроскопе JEOL JSM – 7001F с системой микроанализа.

2.2.1 Сканирующий электронный микроскоп JSM-7001F (JEOL) 47

2.2.2 Порядок проведения работы 48

2.2.3 Примерыполученных изображений 49

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 55

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 56

Цели и задачи:

Целью данной работы является изучение сканирующей зондовой микроскопии, выявления преимуществ и недостатков различных методов.Измерение толщин в многослойных структурах намикроскопе JEOL JSM – 7001F с системой микроанализа.

К задачам относятся:

-Изучение принципов работы СЗМ
-Рассмотрение существующих методов СЗМ
-Изучение микроскопа JSM-7001F (JEOL) и методики исследований
-Представление полученных изображений.

Актуальность дипломной работы:

С развитием современной электроники переводит ее на уровень наноразмерных структур, для изучения различных свойств которых требуются более совершенные и технологичные приборы и методы. Необходимо применение методов, позволяющих всесторонне исследовать поверхности объектов, как химического состава, так и физических свойств.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) получила широкое распространение. Методы, которые входят в эту группу, являются незаменимыми при исследовании морфологии и локальных свойств поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением. В сканирующих зондовых микроскопах при помощи игл и зондов, имеющих размеры порядка нанометров, исследуются топология поверхности и её локальные свойства. При помощи различных систем возможна регистрация взаимодействия зонда и любой точкой, исследуемого образца, с точностью до долей нанометра. Точное прецизионное перемещение зонда выполняется устройствами на основе пьезокерамики.

На сегодняшний день существует множество видов сканирующей зондовой микроскопии, например, Атомно-силовая микроскопия, электросиловая микроскопия, ближнепольная оптическая микроскопия и т.д. Наиболее всего распространены методы сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Сканирующая туннельная микроскопия имеет ограничения, связанные только с проводящими или полупроводящими поверхностями. Современные атомно-силовые микроскопы дают возможность работать в различных фазах (водяной, воздушной).

Увеличение интереса к (СТМ) объясняется рядом преимуществ. Во-первых, появились различные приставки, позволяющие проводить исследования при низких (до – 150°С) и высоких (до 1200°С) температурах, наблюдать рентгеновские спектры микроучастков объектов до 1 мкм и менее, регистрировать деформацию объектов непосредственно в микроскопе. Во-вторых, существенно повысилась разрешающая способность микроскопов, и появилась возможность проводить микроскопические исследования совместно с изучение свойств поверхности, например, диффузное рассеяние электронов.
[2].

1. Литературный обзор сканирующей зондовой микроскопии

1.1.1Принцип работы сканирующих зондовых микроскопов

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) – это один из самых мощных и востребованных современных методов исследования свойств поверхности наноструктур. На сегодняшний день практически все исследования в области физики поверхности и нанотехнологий используют методы СЗМ [1].

В качестве основы для развития технологий формирования твердотельных наноструктур (1нм= 10 А) могут использоваться основные принципы СЗМ. Использования принципов атомной сборки при изготовлении изделий позволяет создавать устройства, состоящих из ограниченного числа атомов

Исследование микрорельефа и локальных свойств поверхности в сканирующих зондовых микроскопах проводится с использованием специального устройства для считывания информации – зонда игольчатого типа. В основном в качестве зонда используется игла, изготовленная из алмаза, с радиусом закругления рабочей части порядка 10 нм. Характерное расстояние между зондом и поверхностью образцов в зондовых микроскопах по порядку величин составляет 0,1–10 нм.

Основой работы зондовых микроскопов служат различные физические взаимодействия зонда с атомами на поверхности образца. Например, на явлении туннельного между образцом и зондом основана работа туннельной микроскопии; различные силового взаимодействия лежат в основе работы атомно-силового, магнитно-силового и электросилового микроскопов.

Далее рассмотрим общие аспекты различных зондовым микроскопов

Если взаимодействие зонда с поверхностью характеризуется параметром P и существует четкая зависимость параметра P от расстояния между зондом и образцом P = P(z), то этот параметр можно использовать для создания системы обратной связи (ОС), при помощи которой возможно осуществлять контроль расстояния между зондом и образцом. На рис. 1 изображен общий принцип построения обратной связи сканирующего зондового микроскопа.

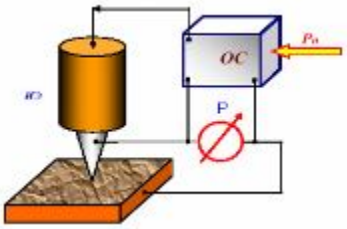


Рис. 1. Схема системы обратной связи зондового микроскопа

При помощи Системы обратной связи возможно осуществлять поддерживание значение параметра P постоянным и равным величине P_o, которое задает оператор. При изменении расстояния между зондом и поверхностью, например, уменьшение, происходит и изменение параметра P (уменьшение). Далее система ОС формирует сигнал, пропорциональный $P = P - P_o$, который изменяется до необходимой величины. Этот сигнал подается на исполнительный элемент ИЭ, который обрабатывает данный сигнал – приближает зонд к поверхности или отдаляет до того момента, как сигнал не станет равен нулю. Таким способом возможно осуществлять поддержку расстояние между зондом и образцом с высокой точностью. На сегодняшний день в современных зондовых микроскопах точность удержания расстояния между зондом и поверхностью достигает ~ 0,01 Å. Параметр P также изменяется при параллельном перемещении зонда вдоль поверхности. Это вызвано тем, что поверхность обладает рельефом. Система ОС отрабатывает эти изменения, таким образом, что при перемещении зонда в плоскости X,Y сигнал, поступающий на исполнительный элемент пропорционален рельефу поверхности.

Получение изображения в сканирующей зондовой микроскопии – это организованный специальным образом процесс сканирования образца.

Сначала зонд движется над образцом по определенной линии (строчная развертка), при этом сигнал, который поступает на исполнительный элемент, и пропорционален рельефу поверхности, записывается в память компьютера. Далее зонд возвращается в исходную точку и переходит на следующую строку сканирования (кадровая развертка) и снова повторяет сканирование. Записанный при сканировании сигнал обратной связи обрабатывается компьютером, и при помощи средств компьютерной графики создается СЗМ изображение рельефа

поверхности Z = f(x,y). Зондовая микроскопия также позволяет исследовать различные свойства поверхности, например, механические, магнитные, электрические и т.д.

1.1.2 Сканирующие элементы зондовых микроскопов

При работе сканирующих зондовых микроскопов важно осуществлять контроль расстояния между зондом и поверхность и перемещать зонд в плоскости поверхности с очень высокой точностью, составляющей доли ангстрем. Специальные манипуляторы (сканирующие элементы) позволяют выполнять эту задачу. Материалом для их изготовления служат пьезоэлектрики. Пьезоэлектрики способны изменять свои размеры в зависимости от величины внешнего электрического поля. Уравнение обратного пьезоэффекта для кристаллов записывается в виде:

$$u_{ij} = d_{ijk} * E_к$$

где U_{ij}– тензор деформаций, $E_к$– компоненты электрического поля, d_{ijk}– компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов.

Тип симметрии кристалла определяет вид тензора пьезоэлектрических коэффициентов. Широкое применение для различных технических приложений получили преобразователи, сделанные из пьезокерамических материалов.

Пьезокерамика – это поликристаллический материал, обладающей поляризацией и получаемый из кристаллических сегнетоэлектриков методом спекания порошка.

Поляризация пьезокерамики осуществляется следующим методом. Сначала керамика нагревается до температуры, превышающей температуру Кюри, для большинства пьезокерамических материалов она составляет менее 300°C. Далее, при наложении сильного электрического поля, порядка 3 кВ/см, происходит медленное охлаждение материала. Полученная таким образом пьезокерамика будет обладать наведенную поляризацию и может увеличивать или уменьшать в зависимости от взаимного направления вектора поляризации и вектора внешнего электрического поля. Пьезокерамики являются пьезоэлектрическими текстурами.

Для пьезокерамических материалов вид тензора пьезоэлектрических констант упрощается. Так от нуля отличаются только три коэффициента d_{33}, d_{31}, d_{15}, которые характеризуют продольные, поперечные (по отношению к вектору поляризации) и сдвиговые деформации. На рис. 2 представленная плоская пластина из пьзокерамики с наложением внешнего поля. Направим векторы поляризации P и электрического поля E вдоль оси X. Тогда, обозначив $d_{\square} = d33$ и $d_{\square} = d_{31}$, получим следующее: деформация пьезокерамики в параллельном полю направлении равна $U_{xx} = d_{\square}E_x$, а в перпендикулярном к полю направлении $U_{rr} = d_{\square}E_x$

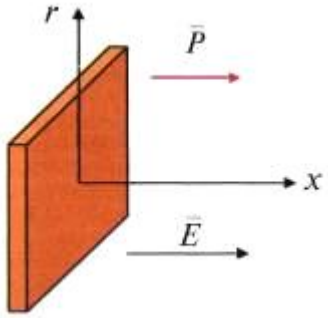


Рис. 2. Пластина из пьезокерамики во внешнем электрическом поле.

Также широкое распространение в сканирующей зондовой микроскопии получили пьзоэлементы в форме трубок (рис.3). С их помощью возможно осуществлять большие перемещения, используя при этом невысокие управляющие напряжения.

Трубчатые пьезоэлементы выполняются в виде, изготовленных из пьезокерамики, тонкостенных цилиндров.

На внутреннюю и внешнюю поверхности трубки наносят тонкие слои металла- электроды, при этом ее торцы остаются непокрытыми.

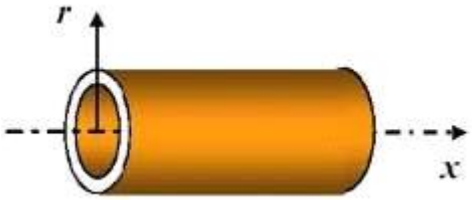


Рис. 3. Трубчатый пьезоэлемент

Изменение продольных размеров происходит подействием разности потенциалов между внешними и внутренними электродами. Величина продольной деформации, вызванная воздействием радиального электрического поля, записывается в виде:

$$u_{xx} = \frac{\Delta x}{l_0} = d_{\perp} E_r$$

где L_0– длина трубки в недеформированном состоянии. Абсолютное удлинение трубки из пьезокерамики записывается в виде

$$\Delta x = d_{\perp} \frac{l_0}{h} V,$$

где h – толщина стенки пьезотрубки, V – разность потенциалов между внутренним и внешним электродами.

Чем больше длина пьезотрубки и меньше толщина стенки, тем более высокое удлинение трубки будет получено, при одном уровне напряжения. Взаимно перпендикулярное прецизионное перемещение зонда можно создать путем обьединения трех пьезотрубок в один узел, как показано на рис. 4. Этот тип сканирующего элемента получил название трипод. Данный сканер обладает рядом недостатков. К ним относятся сильная асимметрия устройства и сложность его Общий вид трубчатого сканера и схема

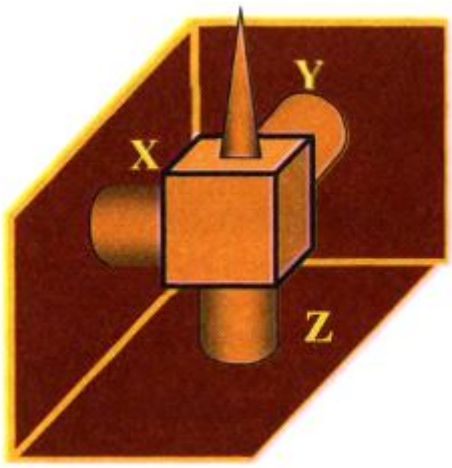


Рис. 4. Сканирующий элемент в виде трипода, собранный на трубчатых пьезоэлементах.

. В настоящий момент наиболее широкое применение нашли сканеры на основе одного пьезотрубчатого элемента. На рис. 5 показаны расположения электродов. Материал трубки имеет радиальное направление вектора поляризации.

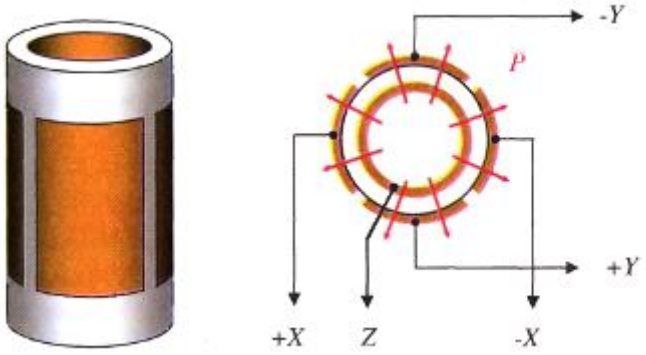


Рис. 5. Трубчатый пьезосканер

Обычно электрод, расположенный внутри – сплошной. Электрод, расположенный на внешней стороне сканера делится на четыре секции. Если на противоположные секции внешнего электрода подать противофазные напряжения, то произойдет сокращение участка трубки, у которого совпадет направление поля с направлением поляризации, и удлинение того участка, где эти направления противоположны. Это позволяет изгибать трубку в необходимом направлении. Данное свойство позволяет осуществляеть сканирование в плоскости X, Y. Изменение длины трубки по оси Z осуществляется изменением потенциала внутреннего электрода относительно всех внешних секций. Данным способом возможна реализация трехординатного сканера на базе одно трубки. В реальных условиях сканирующие элементы обладают более сложной конструкцией, но принципы, по которым они работают остаются неизменными.

На сегодняшний день также широко распространены сканеры, в основе которых лежат на биморфные пьзоэлементы. Биморф является двумя пластинами пьезоэлектрика, склеенных между собой так, что вектора поляризации в каждой из них имеют противоположные направления, как показано на рис. 6.

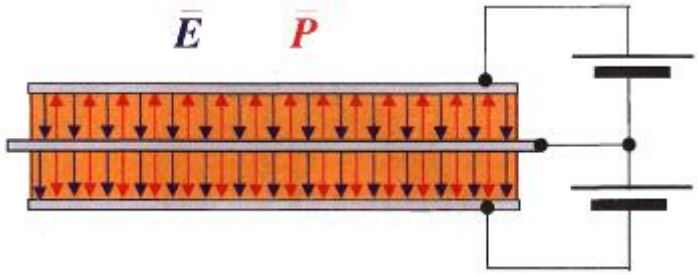


Рис. 6. Устройство биморфного пьезоэлемента.

При подаче на электроды биморфного пьезоэлемента напряжения, как показано на рисунке 6, одна из пластин будет сжиматься, а другая расширяться, из-за чего произойдет изгиб элемента. В сканерах на основе биморфных элементов необходимо создать разность потенциалов между внутренним общим и внешними электродами таким образом, чтобы в одном элементе поле было противоположно с направлением вектора поляризации, а в другом совпадало.

В основе сканеров из биморфных пьезоэлементов положен изгиб вод воздействием электрического поля.

Возможно создание трипода на биморфных пьезоэлементах, путем объединения трех биморфных элементов, как показано на рис. 7.

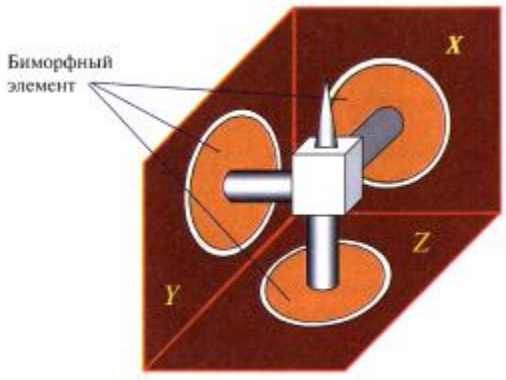


Рис. 7. Трехкоординатный сканер на трех биморфных элементах

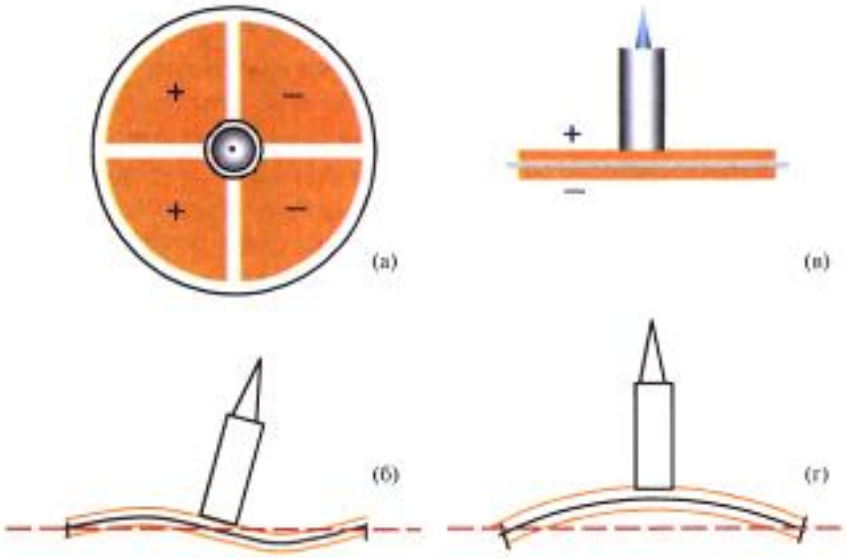


Рис. 8. Схематическое изображение работы биморфного пьезосканера

Организация движения зонда на одном элементе в плоскости X,Y и по оси Z возможна путем разделения внешних электродов биморфа на четыре сектора (Рис. 8).

Разделив на четыре сектора внешние электроды биморфного сканера, становится возможным движение зонда вдоль образца по осям X,Y и по оси Z на одном элементе (рис.8). На рис. 8(а,б) показано, что если на противоположные пары секций подавать противофазные напряжения, то зонд будет двигаться по осям X,Y, за счет изгиба биморфа. При измении потенциала внутреннего электрода относительно всех секций внешних электродов, возможно изгибать биморф так, что зонд будет перемещаться по сои Z (рис.8 (в, г)).

1.1.3.Устройства для прецизионных перемещений зонда и образца

Прецизионное перемещение зонда и образца для формирования рабочего расстояния является важной проблемой при осуществлении сканирующей зондовой микроскопии важной проблемой. Ее решение возможно при использовании различных механических редукторов, в котором тонкому движению образца соответствует грубое перемещение исходного движителя. Существует много способов реализации такого перемещения. Например, широго используются устройства на основе рычага, в которых редукция величины перемещения осуществляется за счет разницы длины плеч рычагов.

На рисунке 9 изображена схема такого рычажного редуктора.

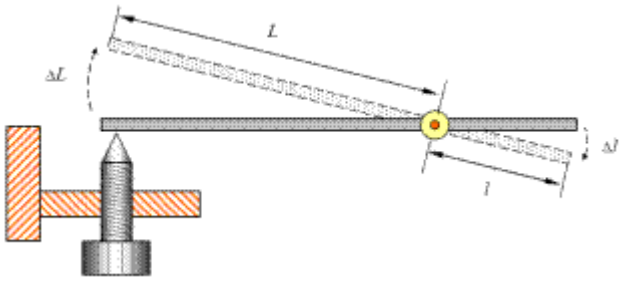


Рис. 9. Схема рычажного редуктора перемещений

Коэффициент перемещения для механического рычага рассчитывается по следующей формуле

$$R = \frac{\Delta L}{\Delta l} = \frac{L}{l}$$

Из нее следует что, точность контроля процесса сближения зонда с образцом можно увеличить через увеличение отношения плеча L к плечу l.На рис. 10 показана реализация механических редукторов, в которых перемещение основано на разности коэффициентов жесткости двух элементов, соединенных последовательно.

В конструкции используется жесткое основание, пружина и упругая балка. Жесткость упругой балки K и пружины k должны быть подобраны так, чтобы выполнялось условие k < K.

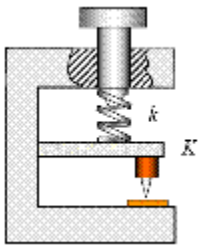


Рис. 10. Схема пружинного редуктора перемещений

Из условия равновесия следует, что

$$F_{\text{упр}} = k * \Delta l = K * \Delta L$$

где Δl и ΔL – смещения пружины и упругой балки.

Тогда коэффициент редукции высчитывается через коэффициенты жесткости упругих элементов:

$$R = \frac{\Delta l}{\Delta L} = \frac{K}{k}$$

В этом случае точность контроля смещения зонда повышается за счет увеличения жесткости балки к жесткости пружины.

Шаговые электродвигатели

Также для реализации перемещения используются шаговые электродвигатели. Шаговый электродвигатель – это устройство, которое преобразует электрический импульс в дискретное механическое перемещение. Шаговые электродвигатели обладают важным преимуществом. Положение ротора имеет зависимость от входных импульсов тока, из этого следует, что число импульсов определяет угол поворота ротора. На практике реализуются шаговые электродвигатели способные обеспечить один оборот ротора за 100 – 400 шагов (угол шага 3,6 – 0,9 град). Точность позиционирования порядка 0,25 – 1 мкм можно получить используя данный двигатель вместе с резьбовым соединением с шагом резьбы порядка 0,1 мм.

Дополнительные механические редукторы позволяют увеличить точность. За счет возможности электрического управления (ШЭД) активно используется в автоматизированных системах сближения зонда и образца.

Шаговые пьезодвигатели

Широкое применение в зондовой микроскопии получили устройства из пьезоэлектрических преобразователей, с помощью которых возможно осуществление дистанционного управления перемещения объекта. Их использование также позволяет достигнуть необходимых требований изоляции приборов от внешних вибраций, а также преодолеть ограничение на работу чисто механических устройств перемещений в условиях вакуума.

На рис. 11 изображен один и вариантов конструкции инерционного пьезодвигателя.

Данное устройство содержит основание (1), на котором закреплена пьезоэлектрическая трубка (2). На внутренней и внешней поверхностях трубки имеются электроды (3). На конце трубки укреплена разрезная пружина (4), представляющая собой цилиндр с отдельными пружинящими лепестками. Держатель устанавливается в пружину установлен (5) и представляет собой достаточно массивный цилиндр с полированной поверхностью. Крепление объекта к держателю при помощи пружины или накидной гайки дает возможность устройству работать независимо от ориентации в пространстве.

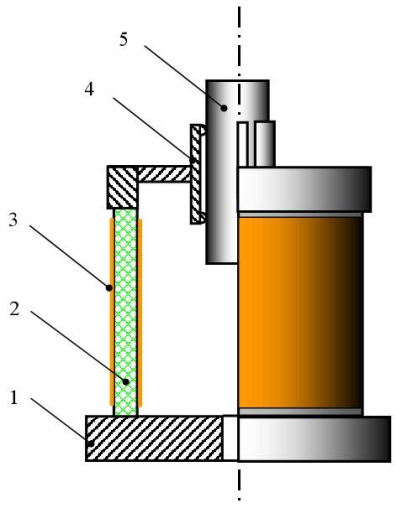


Рис. 11. Шаговый пьезодвигатель

На рисунке обозначены: 1 – основание; 2 – пьезоэлектрическая трубка; 3 – электроды; 4 – разрезная пружина; 5 – цилиндрический держатель объекта.

Принцип работы устройства заключается в следующем. Прикладывая импульсное напряжения пилообразной формы к электродам пьезотрубки осуществляется перемещение держателя по оси Z. При этом трубка плавно удлиняется или сжимается в зависимости от полярности напряжения, и ее конец вместе с пружиной и держателем объекта смещается на некоторое расстояние B момент сброса пилообразного напряжения трубка возвращается в исходное положение с ускорением a. При выполнении условия $F_{упр}<ma$ (m – масса держателя объекта, Fтр – сила трения между держателем объекта и разрезной

пружиной), держатель объекта, проскальзывает относительно разрезной пружины, в силу своей инерционности. Из-за чего держатель объекта перемещается относительно исходного положения на шаг K Δl Коэффициент K определяется соотношением масс деталей конструкции и жесткостью разрезной пружины. Изменение направления движения держателя осуществляется сменой полярности импульсов управляющего напряжения. Данным способом, используя различные полярности пилообразного напряжения, происходит перемещение объекта в пространстве и осуществляется сближение зонда с поверхностью.

1.1.4.Защита зондовых микроскопов от внешних воздействий

Любой сканирующий зондовый микроскоп является колебательной системой с целым набором собственных резонансных частот ωK. Явление резонанса измерительных головок с внешними механическими воздействиями приводит к колебаниям зонда. Данное воздействие искажает и размывает СЗМ изображение, и считается паразитным периодическим шумом. Для уменьшения этого шума, измерительные головки изготавливают из больших металлических деталей с более высокими частотами, более 100кГц. Сканирующие элементы зондовых микроскопов имеют наименьшие резонансные частоты. В конструкциях современных микроскопов приходится идти на компромисс между величиной максимального поля обзора сканирующего элемента и его резонансной частотой. Для сканеров наиболее частыми являются резонансные частоты в диапазоне 10 – 100 кГц.

Для защиты приборов от внешних вибраций применяются различные типы виброизолирующих систем. Системы виброизоляции разделяются на активные и пассивные. Основная идея в пассивных виброизолирующих системах, заключается в том, что возможно быстро снизить амплитуду вынужденных колебаний, увеличив разницу между собственной резонансной частотой системы и частотой возбуждающей силы. Что бы защита была эффективной необходимо, чтобы система виброизоляции имела как можно меньшую резонансную частоту,

что на практике очень трудно реализуется. Для пружинных платформ и упругих подвесов резонансная частота равна

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

где k – жесткость пружины (или упругого подвеса), m – масса виброизолирующей платформы вместе с СЗМ головкой.

Активные системы подавления внешних воздействий используются для защиты головок СЗМ. Данные устройства являются электромеханической системой с отрицательной обратной связью, обеспечивающей стабильное положение платформы виброизоляции, как показано на рис. 12.

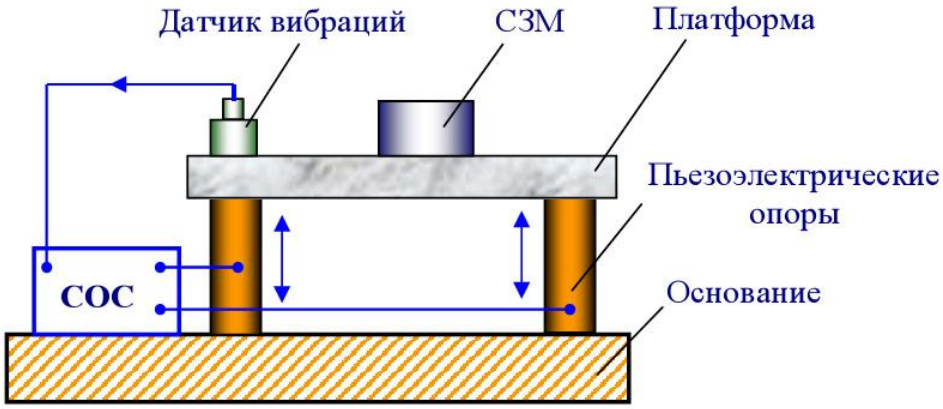


Рис. 12. Схема активной виброизолирующей системы

Также акустические шумы являются источником вибрации элементов в сканирующих зондовых микроскопах. Их особенность заключается в том, что акустические волны воздействуют на элементы головок СЗМ, что и приводит к колебаниям зонда. Использование различных защитных колпаков позволяет снизить уровень акустических воздействий в области рабочего промежутка микроскопа. Размещая измерительную головку зондового микроскопа в вакуумной камере достигается наиболее эффективная защита от акустических помех.

Стабилизация зонда на поверхности образца – одна из важнейших проблем СЗМ. Главный источник нестабильного положения является разогрев элементов микроскопа во время работы или изменение температуры окружающей среды.

Температурные изменения в твердом теле являются причиной термоупругих деформаций:

$$U_{ik} = \alpha_{ik}\Delta T$$

где U_{ik}– тензор деформаций, α_{ik}– тензор коэффициентов теплового расширения материала, ΔT– приращение температуры. Для изотропных материалов коэффициент теплового расширения – величина скалярная, так что

$$\alpha_{ik} = \alpha \cdot \delta_{ik}$$

где δ_{ik}– единичный тензор Кронекера, α– абсолютная величина коэффициента теплового расширения.

Чтобы компенсировать явление термодрейфа к конструкции измерительных головок добавляют компенсирующие элементы с различными коэффициентами терморасширения. Должно выполняться условие равенство нулю суммы расширений в различных плечах устройства. Самый простой способ уменьшить положения зонда по направлению оси Z заключается в добавлении компенсирующих элементов из материала основной конструкции с характерными размерами.

1.2.Сканирующая туннельная микроскопия

В 1982 г сотрудниками фирмы IBM Г. Биннигом и Х. Рёрером был создан первый сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). Его создание открыло большие перспективы и возможности в исследования в области наноразмерных устройств, также с его помощью впервые осуществили наглядную визуализацию атомов и молекул. За свое изобретение в 1986 годы Беннинг и Ререр удостоились Нобелевской премии в области физики [12].

Принцип работы СТМ заключается в следующем: на характерное межатомное расстояние Z к поверхности образца подводится зонд, который является очень тонким металлическим острием (иглой). Если приложить разность потенциалов U~ 0,1÷1В, то появляется ток, вызванный явлением туннелирования электронов через зазор между ними, как показано на рис. 14.

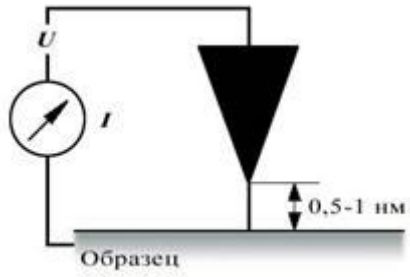


Рис. 14. Схема цепи образованной образцом и иглой

Величина туннельного тога составляет ~1÷10нА, что позволяет его экспериментальное измерение.

Т.к. вероятность туннелирования через потенциальный барьер имееет экспоненциальную зависимость от ширины барьера, то ток с увеличением зазора между иглой и поверхностью образца Z уменьшается по экспоненте. Происходит уменьшение на порядок при увеличении Z примерно каждые 0,1 нм. Чрезвычайно высокая разрешающая способность СТМ обеспечивается экспоненциальной зависимостью тока от расстояния. Вдоль оси Z, перпендикулярной к поверхности образца, разрешающая способность СТМ составляет ~10^{-3} нм, а вдоль осей X,Y, параллельных поверхности образца, ~10^{-1} нм. Сканирование происходит путем перемещения иглы вдоль поверхности. Это позволяет получать информацию о рельефе поверхности с атомным пространственным разрешением.

Существуют два варианта режима работы СТМ: режим постоянной высоты и режим постоянного тока. Если работа СТМ в режиме постоянной высоты, то перемещение острия иглы происходит горизонтально относительно плоскости поверхности (рис. 15а). При этом величина туннельного тока изменяется и регистрируя эти изменения можно определить рельеф поверхности образца.

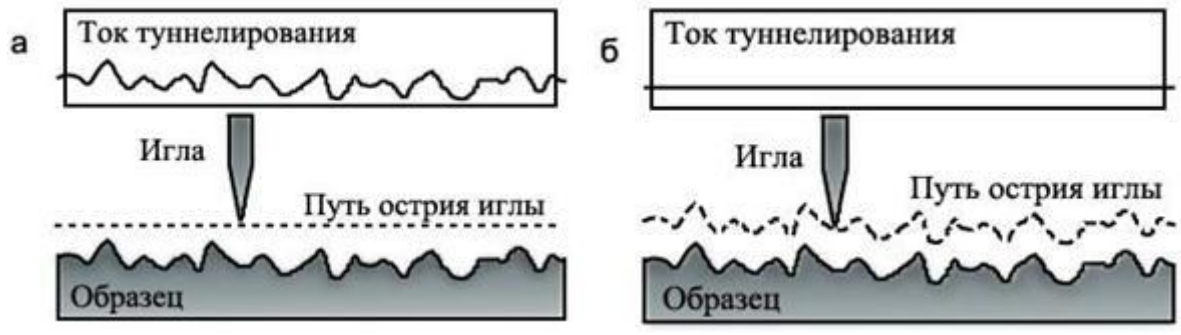


Рис. 15. Режимы работы сканирующего туннельного микроскопа

Если СТМ работает в режиме постоянного тока, рис. 15б, то используется система обратной связи. Она позволяет поддерживать туннельный ток постоянным, перемещая острие иглы в направлении оси Z. Записываются данные о перемещении иглы, что дает представление о рельефе.

Игла приближается к поверхности на расстояние ~ 0,1 мкм при помощи системы грубого подвода и позиционирования. Далее специальное сканирующее устройство осуществляет перемещение иглы и исследование образца. Сканирующее устройство выполнено из пьезоэлектрического материала. Выбор этого материала позволяет достигнуть высокой точности перемещения иглы над поверхностью, т.к. пьезоэлектрик способен изменять линейные размеры при воздействии внешнего электрического поля.

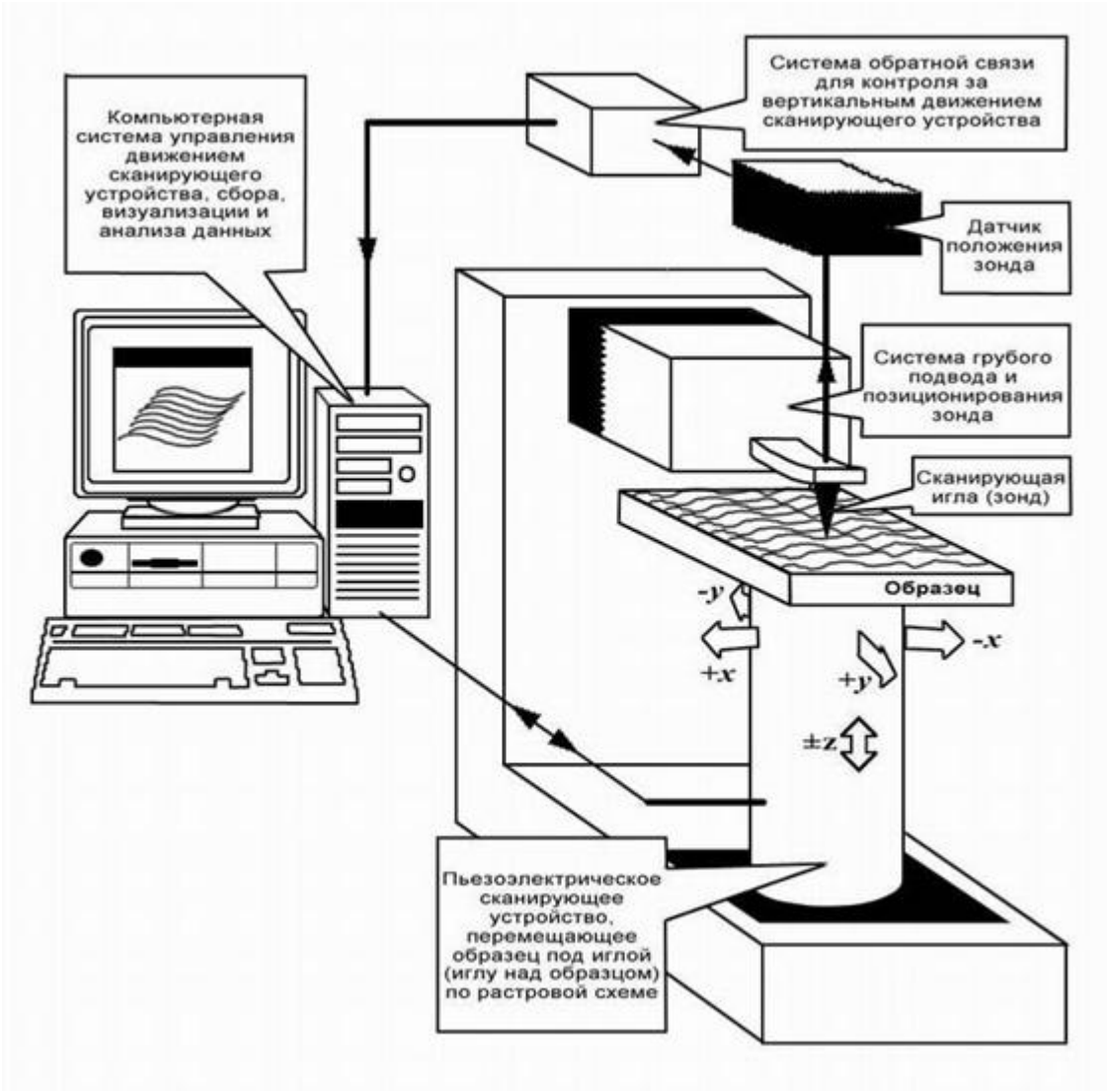


Рис. 16. Общая схема СТМ

Игла является важнейшим компонентом СТМ. В качестве этой иглы используется проволока из проводящего материала, например, ванадия или вольфрама. При помощи электрохимического травления достигается улучшение характеристик кончика острия. Как показали эксперименты, для обеспечения разрешения на атомном уровне, необходимо острие с радиусом кончика $\leq 0{,}2$ мкм.

При помощи компьютера происходит управление движением устройства сканирования и контроль работы системы обратной связи. Также он записывает и обрабатывает результаты измерений. На рис. 17 изображен результат исследования молекул C_{60}, адсорбированных на поверхности кристалла меди

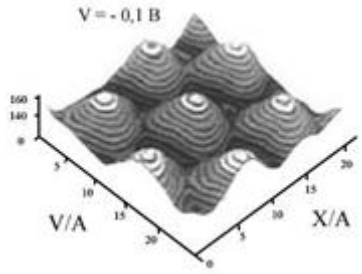


Рис. 17. Изображение молекул C_{60}, адсорбированных на поверхности кристалла меди, выполненное с помощью СТМ

Изображения, получаемые в СТМ не искажаются аберрацией, т.к. в его конструкции отсутствуют линзы, в сравнении с другими электронными микроскопами. Также важно низкая энергия электронов, которые формируют изображение. Ее значение меньше нескольких электронвольт, что меньше, чем характерная энергия химической связи. Данная особенность позволяет контролировать образец не разрушая его. Из-за энергии электронов в сотни килоэлектронвольт в электронной микроскопии высокого разрешения происходит образование радиационных дефектов.

В настоящее время перспективны следующие области применения СТМ:

- химия и физика поверхности;
- нанометрия – исследование процессов образования зародышей при формировании пленок, процессов ионного и химического травления, осаждения и других явлений и процессов в наноэлектронике

– нанотехнология – исследование и изготовление наноэлементов электронных приборов;
– исследование макромолекул, вирусов и других биологических структур.

На рис. 18 представлено изображение «квантового кораллового рифа" диаметром 14,3 нм, сформированного атомами Fe на кристалле Cu.

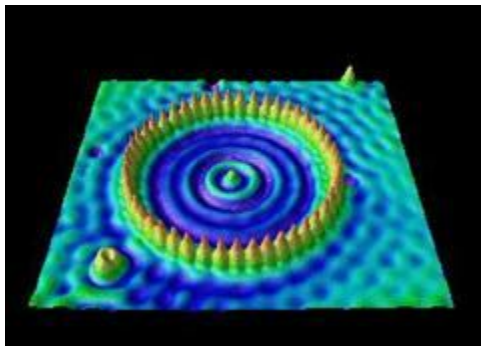


Рис. 18. Двумерная квантовая яма (электронные потенциальные поверхности).

Также при помощи СТМ возможно осуществить перемещение атомов вдоль поверхности и создание из них искусственных структур нанометровых размеров. Это возможность выходит далеко за рамки исследовательских задач в микроскопии.

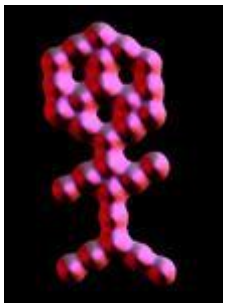


Рис. 19. Микро-механическая сборка в СТМ (молекулы CO на платине)

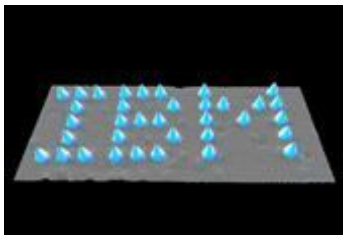


Рис. 20. Микро-механическая сборка в СТМ (атомы ксенона на никеле)

СТМ является очень перспективным инструментов в разработке и создании будущих поколений нанотехники. Также создание СТМ открыло науке целое семейство современных и более совершенных сканирующих зондовых микроскопов.

Атомно-силовой микроскоп, созданный на основе СТМ, дает возможность производить исследования непроводящих веществ. Также был создам магнитно-силовой микроскоп, который дает возможность изучать магнитные свойства поверхности.

1.3.Атомно-силовая микроскопия

Принцип работы атомно-силового микроскопа (АСМ) схематично представлен на рис.21. Луч лазерного диода падает под углом на поверхность кантилевера и, отражаясь от зеркала, попадает в центр четырехсекционного фотодиода. Величина изгиба детектируется прецизионным датчиком

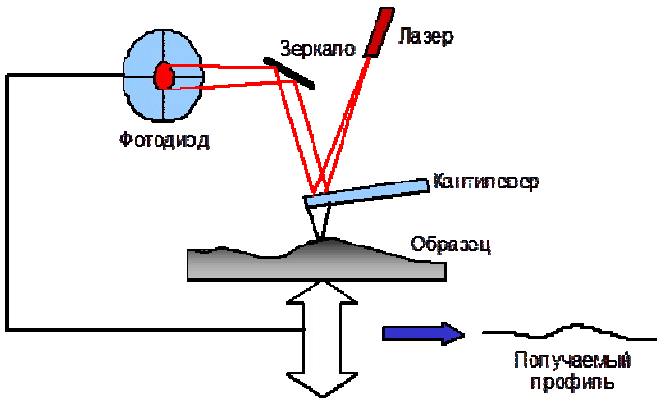


Рис. 21. Принцип действия атомно-силового микроскопа

В зависимости от знака силы, микроскоп может работать в «контактном» (Contact Mode или режим отталкивания) и «бесконтактном» (Non-Contact Mode или режим притяжения) режимах (рис.22).

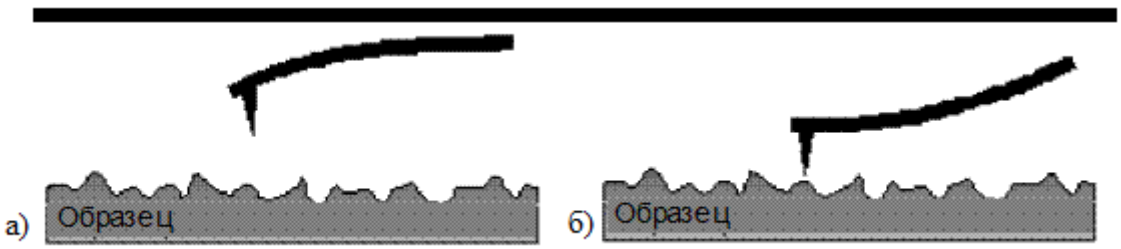


Рис. 22. Прогиб кантилевера в контактном (б) и бесконтактном (а) режимах АСМ

На кантилевер действует упругая сила, которая изгибает его. Она имеет направление либо в сторону объекта, что соответствует контактному режиму, либо в обратную от него сторону – бесконтактный режим. Если моделируются

колебания, то данный режим называется динамическим, в ином случае – статическим.

В статическом режиме силы взаимодействия между острием иглы и поверхностью образца вызывают отклонение измерительной консоли, изгибая ее до достижения статического равновесия. В процессе сканирования образца происходит сбор информации об отклонениях консоли и формируется набор данных о топографии.

Динамические режимы часто называют модуляционными, поскольку в данных режимах к зонду прикладывается осциллирующая сила, заставляющая его совершать вынужденные колебания.

Однако, при возможностях высокого пространственного разрешения, данные, полученные, методами зондовой микроскопии могут неточно отображать особенности поверхности объекта. Это вызвано тем, что зонд оказывает влияние на образец и искажает получаемый сигнал.

Искажения могут возникать из-за загрязнения образца, неправильной установке образца, деформации образца из-за его низкой твердости, слипания образца с зондом, высокой шероховатости поверхности, вследствие чего кантилевер будет ложиться на поверхность образца.

1.4.Электросиловая микроскопия

Электросиловая микроскопия (ЭСМ) является специальным режимом атомно-силовой микроскопии, позволяющим получать информацию о градиенте электрического поля над поверхностью образца, а также о величине и знаке локализованных на ней зарядов. ЭСМ может применяться для проверки качества контактов и поиска дефектов в электрических схемах, обнаружения связанных зарядов, чтения и записи информации посредством изменения расположения зарядов на поверхности. Обычно ЭСМ используется для исследований на масштабах ~100 нм – 1 мкм. Описаны лишь единичные примеры ее применения для изучения наноразмерных объектов. В частности, остается открытым вопрос о

том, какую информацию об одиночных наночастицах на подложке можно получить, исходя из данных ЭСМ. В силу данного обстоятельства проверка применимости метода для определения свойств объектов нанометрового размера остается актуальной задачей, т.е. важно знать, насколько информативен сигнал, который можно зарегистрировать в режиме ЭСМ от отдельной наночастицы. Две особенности ЭСМ осложняют поиск ответа на этот вопрос. Во-первых, получение корректных данных в режиме ЭСМ требует аккуратного выбора настроек и параметров сканирования, поскольку общепринятого алгоритма для этих целей не существует. По этой причине необходима разработка протокола проведения эксперимента, позволяющего получать корректные и воспроизводимые результаты. Во-вторых, ЭСМ обычно используется как качественный метод, а получение количественных данных требует использования полуэмпирических расчетных моделей, которые, хотя и применимы для некоторых конкретных систем, не универсальны и очень сложны. В ряде исследований, например, в наноэлектронике и нанобиобезопасности, возникает необходимость идентифицировать одиночные наночастицы, причем часто определение их химического состава и структуры не так важны, как принципиальная возможность регистрации разницы между ними. Проведенные эксперименты свидетельствуют, что ЭСМ позволяет в некоторых системах различать нано- объекты одного размера из разных материалов.

В электросиловой микроскопии зонд и поверхность образца образуют конденсатор с емкостью С. На зонд предварительно наносят проводящее покрытие. Затем на него подают переменное напряжение различной частоты и на поверхности объекта появляется потенциал, который зависит от диэлектрических характеристик. Это позволяет изучать свойства поверхности и высоким разрешением.

Основой электросиловой микроскопии является электрическое взаимодействие между зондом и поверхностью. Данное явление позволяет получать информацию о поверхности образца.

Рассмотрим систему, состоящую из зондового датчика, у которого зонд имеет проводящее покрытие, и образца, представляющего собой тонкий слой материала на хорошо проводящей подложке.

Пусть между зондом и образцом подано постоянное напряжение U0 и переменное напряжение $U \approx U_1 \cdot \mathrm{Sin}(\omega t)$. В случае, когда тонкий слой выполнен из полупроводникового или диэлектрического материала, возможно появление на нем поверхностного заряда и распределение потенциала φ(x,y).

Напряжение между зондом и поверхностью образца можно представить в виде

$$U = U_0 + U_1 Sin(\omega t) - \varphi(x, y).$$

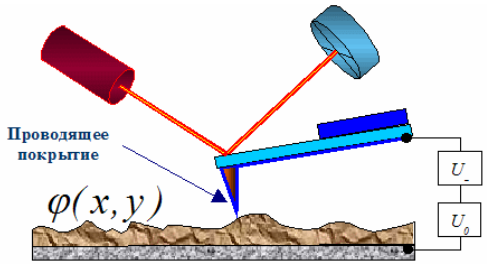


Рис. 23. Схема измерения электрического взаимодействия зонда с образцом

Система зонд – образец обладает некоторой электрической емкостью C, так что энергия такой системы может быть представлена в следующем виде: $E = \frac{CU^2}{2}$

Тогда электрическая сила взаимодействия зонда и образца равна $\vec{F} = -grad(E)$ А ее Z-компонента может быть представлена в виде:

$$F_z = -\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{1}{2} U^2 \frac{\partial C}{\partial z}.$$

Детектирование амплитуды колебаний кантилевера на частоте 2ω позволяет исследовать распределение вдоль поверхности величины $C_z'(x, y)$ - производной от емкости по координате z. Данный метод позволяет исследовать локальные диэлектрические свойства приповерхностных слоев образцов. Если электрическая сила в система зонд-поверхность определяется, в большей части, взаимодействием между зондом и образцом, то возможно получение высокого разрешения в данном методе.

Учитывая, что величина $\frac{\partial C}{\partial z}$ зависит от рабочего расстояния, то применяют двухпроходную методику исследования диэлектрических свойств образцов. В каждой строке сканирования производится следующая процедура. На первом проходе с помощью пьезовибратора возбуждаются колебания кантилевера на частоте, близкой к резонансной частоте ω_0 . Снятие АСМ изображения рельефа образца происходит в так называемом«полуконтактном» режиме. Далее зонд поднимается над поверхностью на расстояние z_0, между зондом и образцом подается переменное (на частоте $\omega = \omega_0$) напряжение, и осуществляется повторное сканирование. На данном этапе зондовый датчик имеет траекторию движения над образцом, повторяющую рельеф поверхности. Расстояние в каждой точки между зондом и образцом при сканировании постоянно. Из этого следует, чтоизменения амплитуды колебаний кантилевера на частоте 2ω будут связаны с изменением емкости между датчиком и поверхностью вследствие изменения диэлектрических свойств поверхности исследуемого образца

.

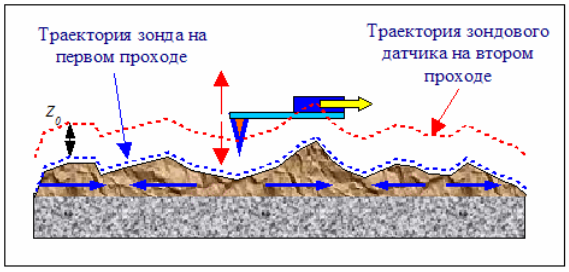


Рис. 24. Двухпроходная методика ЭСМ.

Итоговое ЭСМ изображение является двумерной функцией $C_z^{'}(x, y)$, которая характеризует локальные диэлектрические свойства образца.

Детектирование сигнала на частоте ω позволяет изучать распределение поверхностного потенциала $\varphi(x, y)$ (так называемый метод Кельвина).

Для осуществления этого метода при сканировании поверхности на повторном проходе применяют следующие действия. С помощью перестраиваемого источника постоянного напряжения подбирают величину

U_0такчтобы амплитуда колебаний кантилевера на частоте ω становилась равной нулю. Это возможно, если $U_0 = \varphi(x, y)$ в данной точке поверхности.

1.5.Магнитно-силовая микроскопия

Магнитно-силовая микроскопия, основана на магнитном взаимодействии иглы и поверхности исследуемого образца. Игла представляет собой заостренный микромагнит, который перемещается над поверхностью образца и регистрирует силы взаимодействия иглы и образца.

Магнитно-силовой микроскоп (МСМ) отображает пространственные вариации магнитных сил на поверхности образца. Острие сканирующей иглы покрывается тонкой пленкой из ферремагнита, что является особенностью МСМ. Магнитно-силовой микроскоп регистрирует изменения резонансных частот, которые обусловлены изменением магнитного поля в зазоре между острием иглы и поверхностью образца. Исследование в МСМ происходит без прямого контакта иглы и образца. Возможности МСМ позволяют осуществлять визуализацию доменных структур в магнитных материалах.

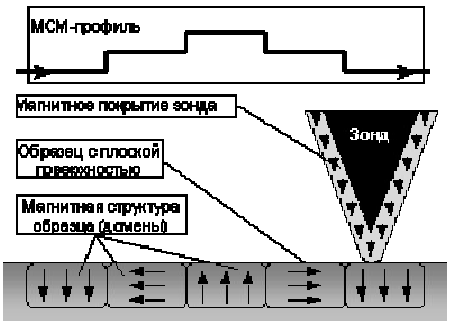


Рис. 25. Схема работы магнитно-силового микроскопа

МСМ-профиль отображает магнитную структуру поверхностного слоя образца

Заостренная игла, представляющая собой микромагнит, перемещается около поверхности исследуемого образка, регистрируются силы её взаимодействия с образцом. Устройством перемещения иглы относительно поверхности является

трехкоординатный манипулятор. Этот манипулятор изготавливаются, в основном, из пьезокерамической трубки, обладающей внешними и внутренними электродами. Перемещение по оси Z и вдоль поверхности происходит при подаче пилообразного напряжения на электроды. Под действием напряжения трубка изгибается.

Максимальное перемещение зависит от размера пьезотрубки, и может достигать от 1-100 микрон. Также имеется очень высокая точность в позиционировании, порядка сотых долей нанометра. Острие распологается на кантиливере – миниатюрной консоли. Регистрируя его изгиб, при помощи, например, оптических систем, возможно определение силы взаимодействия между иглой и поверхностью. В магнитно-силовой микроскопии при сканировании поверхности игла дважды проходит над одним и тем же местом.

При первом прохождении игла перемещается в контакте с образцом и компьютер регистрирует ее траекторию. Она показывает профиль поверхности образца. Если не принимает во внимание деформации поверхности, то магнитные свойства исследуемой поверхности не оказывают значительного влияния на траекторию.

Далее игла перемещается на некотором удалении от поверхности, но той же траекторией на этим же участком. В отличии от перового этапа, на иглу не будут действовать контактные силы. Отведя иглу на 10-50 нм, начинают действовать даьнодействующие магнитные силы. В этом случае именно магнитные свойства образца будут отклонять иглу от траектории.

При проведении исследований кантилевер приводят в состояние резонанса для получения максимальной чувствительности. Игла при этом дважды проходит образец. В первый раз отслеживается профиль поверхности в режиме прерывистого контакта, а во-второй - - при свободных колебаниях, в удалении от поверхности. Регистрируя данные при измерении амплитуды, фазы или частоты колебаний можно получить более точную информацию о магнитных свойствах (доменах, кластерах) исследуемого образца.

Данным вид сканирующей зондовой микроскопии широко используется в создании магнитных носителей информации, например, жестких дисков, магнитных лент и т.д. МСМ дает возможность увидеть отдельные магнитные области, размером до 10нм.

Получаемые изображения содержат информацию как о топографии, так и о магнитных свойствах поверхности. От величины рабочего расстояния зависит какой тип информации будет преобладать на изображении. Это связанно с тем, что магнитная сила между атомами при больших зазорах, чем для Ван-дер-Ваальсовой силы. Топография на изображении МСМ будет преобладать в режиме бесконтактного АСМ, если острие находится очень близко к поверхности (рабочее расстояние <10 нм). Увеличив зазор до 30 – 300 нм, появляются магнитные эффекты. Подробный анализ ряда изображений, полученных при разные рабочих расстояниях, позволяет без особого труда определить влияние топографии и магнитных эффектов. Такая же тенденция характерна и для электростатических сил.

1.6.Ближнепольная оптическая микроскопия

У традиционных методов получения оптических изображений обладают ограничениями, которые связанны с дифракцией света. Существует дифракционный предел, один из основных законов, устанавливающий минимальный размер образца, визуализацию которого можно построить оптической системой с использованием света с длинной волны λ:

$$R \approx \frac{\lambda}{2n}$$

где n – показатель преломления среды.

У оптического диапазона длин волн существует предельный размер порядка 200÷300 нм. Для преодоления трудностей, связанных с дифракцией света, и возможности реализовать разрешение на уровне 10 нм, ближнепольная оптическая микроскопия использует другие принципы построения изображения образца.

Данный прибор основан на прохождении света сквозь субволновые диафрагмы.

Физической основой Ближнепольной Сканирующей Оптической Микроскопии (БСОМ) является присутствие в дальней зоне следов взаимодействия объекта и света. При этом образец находится в ближнем световом поле, которое локализовано на расстояниях много меньших длины волны. БСОМ сочетает в себе элементы СЗМ и обычной оптики. Оптический зонд является отличительной особенность ближнепольных микроскопов (рис.26). Оптический зонд обычно представляет заостренное оптическое волокно, у которого наружная поверхность, кроме вершины острия, покрывается непрозрачным слоем металла.

.

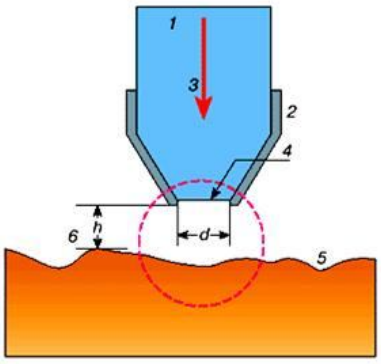


Рис. 26. Схема волоконно-оптического ближнепольного зонда.

1– заострённое оптическое волокно;
2– металлическое покрытие;
3– проходящее через зонд излучение;
4 – выходная апертура зонда, $d<<\lambda$;
5–поверхность исследуемого образца и расстояние до зонда, $h<<\lambda$. Штрихами очерчена область ближнепольного контакта

При сканировании зонд собирает оптическую информацию с поверхности образца с разрешением равным диаметру апертуры.

На практике используются несколько конструктивных схем ближнепольного оптического микроскопа. На рис. 27 схематично представлены основные конфигурации БОМ. Наиболее часто реализуемойсхемой является та, в которой оптическое излучение локализуется в пространстве с помощью волоконного зонда. Данная схема дает возможность получения максимальной мощности излучения в области субволнового отверстия и проведения исследованийобразцов

как на отражение (рис. 27 а)), таки на просвет (рис. 27 б)). Чтобы увеличить чувствительность излучения, отраженного от образца или прошедшего сквозь образец, оно при помощи фокусирующих зеркал и линз собирается на фотоприемнике. Данная конфигурация БОМ нашла применение в экспериментах ближнепольной оптической литографии.

При исследованиях, связанных с высоким уровнем оптической накачка, например, изучении локальных нелинейных свойств, используется схема когда мощное лазерное излучение направляется на исследуемую структуру, а прием осуществляет ближнепольный зонд.

.

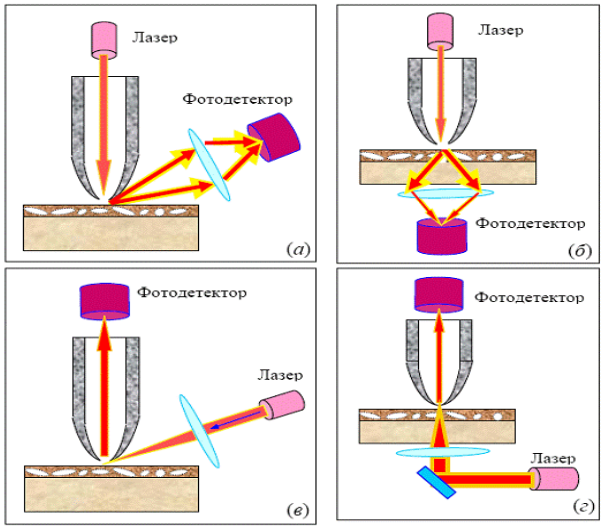


Рис. 27. Возможные конфигурации ближнепольного оптического микроскопа.

1.7 Электронная микроскопия

При облучении поверхности объекта тонко сфокусированным пучком электронов (зондом), как показано на рис. 28 образуется зона генерации (груша взаимодействия) из этой зоны генерируются различные сигналы основными из них являются поток электронов: отраженных, вторичных, оже-электронов, по глощённых, прошедших через образец, и также излучений: катодолюминесцентного и рентгеновского [9].

Разрешающая способность микроскопа является важнейшим параметром любого СТМ. Его определяют:

1) площадь сечения или диаметр острия зонда,

2) контраст, создаваемый образцом и детекторной системой,

3) область генерации сигнала в образце.

Диаметр зонда в основном зависит от конструктивных особенностей и качества узлов микроскопа и прежде всего электронной оптики. Совершенствование конструкции компонентов позволило уменьшить диаметр зонда в современных РЭМ до 5-10 нм.

Рис. 28. Зона взаимодействия электронного пучка с объектом

Влияние контраста на разрешающую способность проявляется в следующем: формирование контраста в РЭМ определяется разностью детектируемыхсигналов от соседних участков образца, чем она больше, тем выше

контрастизображения. Топография поверхности, химический состав образца, поверхностные локальные магнитные и электрические поля, кристаллографическая ориентация элементов структуры оказывают влияние на контраст. Топография поверхности и химический состав при этом являются наиболее значимыми. Эффективность преобразования подающего на детектор излучения, создающего выходной сигнал, определяет уровень контраста. Существует возможность увеличения уровня контраста, увеличивая ток зонда. При этом из-за особенности электронной оптики, невозможно сфокусировать большой поток электронов, то есть снижается разрешающая способность, так как увеличивается диаметр зонда.

Также разрешение ограничивается зависимостью от размера областигенерации сигнала в образце. Проникая в образец, первичные электроны рассеиваются во всех направлениях, что приводит к расширению пучка электронов. Первичные электроны тормозятся до энергии равной нулю на участке грушевидной формы. Даже при диаметре зонда 10 нм, боковое расширение имеет величину 1-2 мкм. Рассеивание электронов в образце приводит к тому, что площадь выхода на поверхность образца электронов будетбольше фокуса электронного пучка. Вследствие этого, разрешающая способность изображений, которые получаются во вторичных, отраженных и поглощенных электронах сильно зависит от рассеивания электронов в образце.

Отраженные электроны.

При многократном рассеивании на малые углы или при однократном рассеивании на большие углы (до 90^{o}) первичных электронов, образуются отраженные электроны. Первичные электроны взаимодействуют с атомами образца и при этом теряют энергию, что приводит к их вылету с поверхности образца. Область, в которой генерируются электроны весьма значительна, и ее размер зависит от длины пробега электронов в материале. Если увеличить ускоряющее напряжение и также уменьшить средний атомный номер элементов в образце, то протяженность этой области возрастает. Ее размер может с 0,1 до 1 мкм. Электроны, которые потеряли часть энергию при отражения,

покидаютобразец на относительно больших расстояниях от места падения электронногозонда. Из-за этого сечение зонда будет ощутимо меньше, что сечение, с которого регистрируют сигнал. В итоге в режиме регистрации РЭМ будет иметь низкое разрешение, при регистрации отраженных электронов небольшое и изменяется от десятков нанометров при работе с невысокими ускоряющими напряжениями и тяжелыми материалами до сотен нанометров при работе с большими ускоряющими напряжениями и легкими материалами. Также очень важно, что эмиссия отраженных электронов зависит от атомного номера элементов. Если в точку падения атомы легкие, то есть обладают маленьким атомным номером, то отраженных электронов с малой энергией образуется меньше.В областях образца, содержащих высокую концентрацию атомов,обладающих большим атомным номером (тяжелые атомы), большее число электроновотражается от этих атомов и на меньшей глубине в образце, в связи с этим потериэнергии при их движении к поверхности меньше. Для получения изображений в отраженных электронах используются эти свойства и закономерности.

Вторичные электроны. Проникая в образец, первичные электронывзаимодействуют с электронами внешних оболочек атомов объекта, тем самым передают часть своей энергии.

Происходит ионизация атомов образца, а высвобождающиеся в этом случае электроны могут покинуть образец и быть выявлены ввиде вторичных электронов. Они выходит из близких к поверхности участков из-за своей очень малой энергии до 50 эВ. Глубина этого слоя от 1 до 10 нм. Разрешающая способность во вторичных электронах определяется в основном диаметром первичного зонда, так как в пределах этого стоя рассеивание электронов пренебрежимо мало. Если сравнивать с другими сигналами, то вторичные электроны обеспечивают максимальную разрешающую способность порядка 5-10 нм. В связи с этим, в РЭМ они являются главным источником информации для получения изображения поверхности объекта, и именно дляэтого случая

приводятся паспортные характеристики прибора. Важно, что атомный номер не влияет на количество вторичных электронов.

А угол падения электронного пучка на поверхность образца является основным параметром, который определяет выход вторичных электронов. Из этого следует, что вариации наклона наноуасчтков влекут за собой резкое изменение в выходе вторичных электронов и данный эффект используется для получения данных о топографических особенностях поверхности. На практике, объект часто располагается под углом к оси зонда, чтобы увеличить эмиссию вторичных электронов. Однако, это приводит к размытию по краям изображения и ухудшению резкости. Для ее исправления в РЭМ существует система компенсации угла наклона. Метод наклона поверхности объекта применяется для исследования плоских образцов. Однако, если у образцов сильно развит рельеф, то полностью коррекцию угла наклона не произвести.

Поглощённые электроны. Когда зонд воздействует на образец в его объемеостается часть генерируемых электронов. Если первичный пучок имеет энергию 10-20 кэВ, то около 50% отраженных и вторичных электронов достигают поверхности образца и затем покидают ее. Те электроны, что остались, образуют ток поглощенных электронов. Он равняется разности между зондовым током и токами вторичных и отраженных электронов. Композиционные и топографические эффекты оказывают влияние на эту разность, которая в свою очередь является сигналом для получения информацию

Поглощенные электроны генерируются в большом объёме. Разрешающаяспособность при получении изображений в этом случае имеет такой же порядок, как и для отраженных электронов. Из-за малой разрешающей способности этот метод не получил широкое распространение.

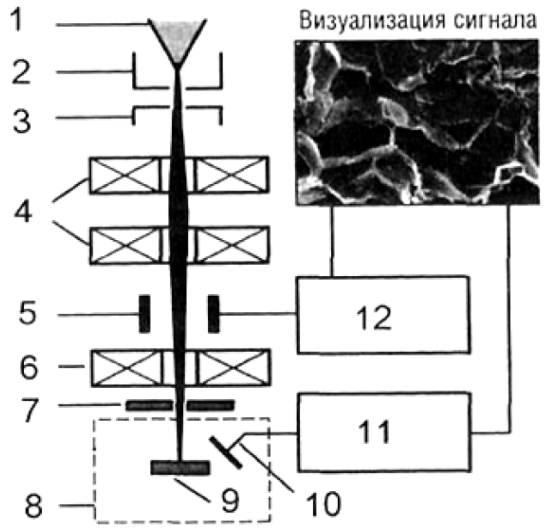
На рис. 29 приведена схема растрового электронного микроскопа.

Катод представляет собой вольфрамовую проволоку V-образной формы, которая разогревается током до $T = 2700$ K для получения интенсивной термоэлектронной эмиссии. Так как управляющий электрод обладает отрицательным потенциаломотносительно Катода, то он ограничивает

эффективную площадь эмиссии катода.За счет создания электрического потенциала между цилиндром Венельта и катодом (ток смещения) происходит управление диаметром первичного пучка электронов.

Анод представляет собой заземленную пластину с отверстием для прохождения пучка электронов. Ускоряющее напряжение имеет интервал вариации 0,3-30 кВ, который определяет кинетическую энергию первичных электронов. Электронный пучок фокусируется на поверхности про помощи электромагнитных линз.

Узкий зонд на поверхности, который определяет пространственное



разрешение прибора.

Рис. 29. Схема растрового электронного микроскопа: 1 – катод, 2 – управляющий электрод (цилиндр Венельта), 3 – анод, 4 – конденсаторные линзы, 5 – система отклонения электронного луча, 6 – объективная линза, 7 – диафрагма, 8 – рабочая камера, 9 – образец, 10 – детектор эмитированных из образца электронов, 11 – усилитель видеосигнала, 12 – генератор сканирования

При проведении спектрального микроанализа в систему РЭМ (рис. 29) вводится рентгеновский спектрометр 11. Существуют различные типы спектрометров. Они различаются по типу определяемой физической величины. Например, те, что определяют интенсивность излучения как функцию длины волны относятся к спектрометрам волновой дисперсии.

В спектрометрах волновой дисперсии (СВД) происходит взаимодействие рентгеновского излучения и кристалла-анализатора по закону Вульфа-Брэгга. Рентгеновское излучение отражается от кристалла под различными углами. Излучение, которое отразилось, детектируется пропорциональным счетчиком. С помощью спектрометра можно определить элементы с порядковыми номерами от Z = 4 (Be) до Z = 92 (U). Для этого требуетсяпроизводить идентификацию излученийс большим интервалом длин волн и, как следует из данного требования, применять легко заменяемый набор кристаллов.

Полупроводниковый детектор является основой энергетического дисперсионного спектрометра (ЭДС). Сигнал, регистрируемый детектором, идет на многоканальный анализатор. Он в свою очередь дает возможность регистрировать и просматривать на экране монитора спектр, включающий пики от всех элементов, входящих в образец.

Энергетические дисперсионные спектрометры обладают большим преимуществом заключающегося в том, что возможна одновременная обработка энергии всех падающих квантов. В итоге, для регистрации рентгеновского спектра необходимо несколько минут. Недостатком ЭДС является невозможность регистрации элементов с порядковым номером ниже 11 из-за меньшего энергетического разрешения.

Основным элементом спектрометра является кремний-литиевый твердотельный детектор. Принцип работы спектрометра основан на том, что энергияквантов *характеристического* рентгеновского излучения преобразуется полупроводниковым Si (Li) детектором в электрический ток, при этом импульс токапропорционален энергии кванта.Схема спектрометра с энергетической дисперсией приведена на рис. 3. Si(Li) детектор представляет собой полированную кремниевую пластинку толщиной около 3 мм с площадью 10 мм^2 (хотя этот параметр может быть и больше). Лицевая поверхность детектора покрывается тонким слоем золота, котороеслужит контактом для приложения напряжения смещения. К задней частикремниевой пластины присоединяется

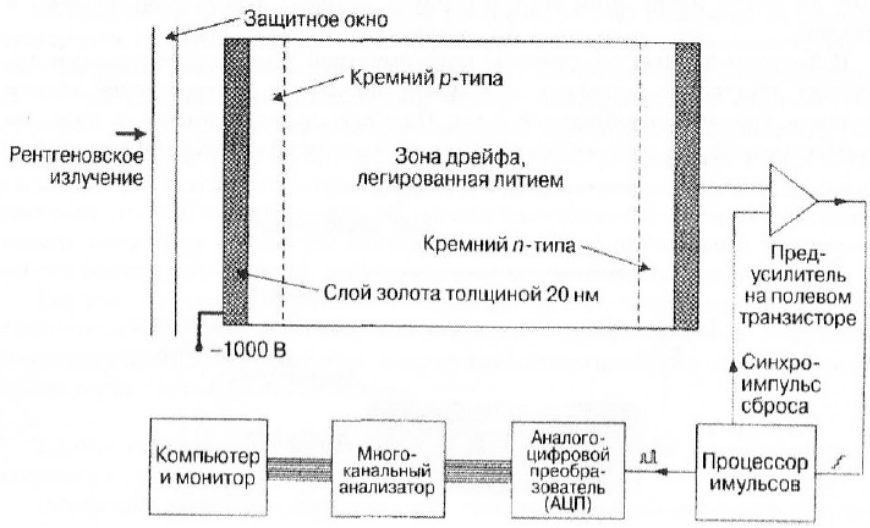
полевой транзистор (ПТ), действующийкак предусилитель. Детектор и ПТ крепятся к медному стержню, другой конецкоторого погружается в жидкий азот, и вся сборка помещается внутрь вакуумированного «криостата». В «криостате», в котором размещен детектор, постоянно сохраняют вакуум лучше 104 Па, так как поверхность детектора крайне чувствительна к загрязнениям.

Рентгеновское излучение входит в объем криостата через тонкое «окно»,обычно из бериллия. Для регистрации рентгеновского излучения более низкихэнергий, чем 1 КэВ, используются тонкие полимерные «окна». «Окно» изолирует детектор от окружающей среды и при напуске воздуха в колонну микроскопа оно должно выдерживать перепад давлений, сохраняя внутри «криостата» вакуум.

Альтернативным типом детектора является «кремниевый дрейфовый детектор» (SDD), который отличается по конструкции и не содержит Li («дрейф» вданном контексте относится к подвижности носителей заряда). Основным преимуществом является возможность работы при скоростях счета выше 105 имп/с,при этом детектору достаточно умеренного термоэлектрического охлаждения,что позволяет избавиться от жидкого азота.

При проведении микрорентгеноспектрального анализа используют понятия *рабочего* и *мёртвого времени.*

Рабочим временем называют долю времени анализа, в течение которогосистема в состоянии принимать и обрабатывать импульсы



рентгеновского излучения.

Рис. 30. Блок-схема детектора энергодисперсионного спектрометра с системой обработки сигнала

Мёртвое время – это интервал времени, в течение которого система не регистрирует последующий импульс после регистрации предыдущего. Мёртвоевремя обусловлено инерционностью электронных регистрирующих схем и работой детекторов.

В качестве кристалл-анализаторов используются тонкие пластинки монокристаллов с соответствующими межплоскостными расстояниями или искусственно приготовленные многослойные пленочные анализаторы. Выбор кристалла для данной длины волны излучения определяется, прежде всего, межплоскостным расстоянием *d.* Наиболее часто используемые кристаллы-анализаторыследующие: LiF (фтористый литий LiF), PET (пентаэритрит $C_5H_{12}O_4$), КАР (монофталат калия $C_8H_5O_4K$).

В качестве приемника излучения применяется газовый проточный пропорциональный счетчик. Счетчик представляет собой металлический цилиндр, наполненный газом (аргон-метановая смесь 90% Ar + 10% CH_4), вдоль оси цилиндра натянута проволока (анод), оба конца которой укреплены на

изоляторах.Регистрация рентгеновских квантов, попадающих в счетчик, основана на производимой ими ионизации молекул газа. Чем больше квантов (больше интенсивность), тем соответственно больше молекул газа будет ионизовано. Рентгеновские лучи попадают в счетчик через входное окно, закрытое достаточнопрочной плёнкой, способной выдержать перепад давления в счетчике и окружающем объёме. К проволоке приложен положительный потенциал относительно корпуса счётчика. Свободные электроны, возникающие в объеме счётчика в результате ионизации, производимой рентгеновскими квантами, движутся к проволоке, а положительно заряженные ионы медленно перемещаютсяк катоду.

2. Исследование с применением сканирующей зондовой микроскопии

2.1 Формирование и обработка СЗМ изображений

Сканирование поверхности в работе зондового микроскопа схоже с движением электронного луча по экрану в электроннолучевой трубке телевизора. Сначала зонд перемещается по линии (строка) в прямом направлении, далее – в обратном. Затем переходит на следующую строку. Под воздействием пилообразных напряжений происходит направленное движение зонда небольшими шагами. Пилообразные напряжения формируются цифро-аналоговыми под преобразователями. Обычно информация о рельефе образца регистрируется на прямом проходе.

Информация, полученная с помощью сканирующего зондового микроскопа, хранится в виде СЗМ кадра - двумерного массива целых чисел a_{ij} (матрицы). Физическая величина оцифровывания является определяющей физического смысла сканируемых данных. Каждой точке на поверхности соответствуют пары индексов ij. При помощи умножения индекса на величину расстояния вычисляются координаты точек, в которых происходиа запись информации:

$$x_i = x_0 \cdot iy_j = y_0 \cdot j$$

Здесь x_0 и y_0 – расстояния между соседними точками вдоль оси X и Y, в которых производилась запись информации. В основном, СЗМ кадры представляются в виде квадратных матриц, имеющих размер 2n (в основном 256x256 и 512x512 элементов). Компьютерная графика позволяет визуализировать СЗМ кадры в трехмерных (3D) и двумерных яркостных (2D) изображениях. При помощи пикселей или линий строятся трехмерное изображение поверхности Z = f(x,y), соответствующей СЗМ данным, в перспективе аксонометрии. Различная высота рельефа поверхности обозначается разными способами подсвечивания пикселей. На рис. 31 показан наиболее эффективный способ раскраски 3D изображений – моделирование условий подсветки поверхности точечным источником. Это позволяет акцентировать внимание на неровностях рельефа. Средства компьютерной обработки и графики позволяют производить вращение и

масштабирование трехмерных СЗМ изображений. Для двумерной визуализации поверхности каждой точки точке присваивается соответствующий цвет
Обычно в СЗМ изображениях содержится постоянная составляющая, не несущая полезной информации о рельефе. Она лишь показывает точности подвода образца в середину динамического диапазона перемещений сканер по оси Z.
Программные методы позволяют удалить постоянную составляющую из кадра.
Таким образом занчания высот рельефа в кадре равны:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \overline{Z}, \text{где } \overline{Z} = \frac{1}{N^2}\sum_{ij} Z_{ij}$$

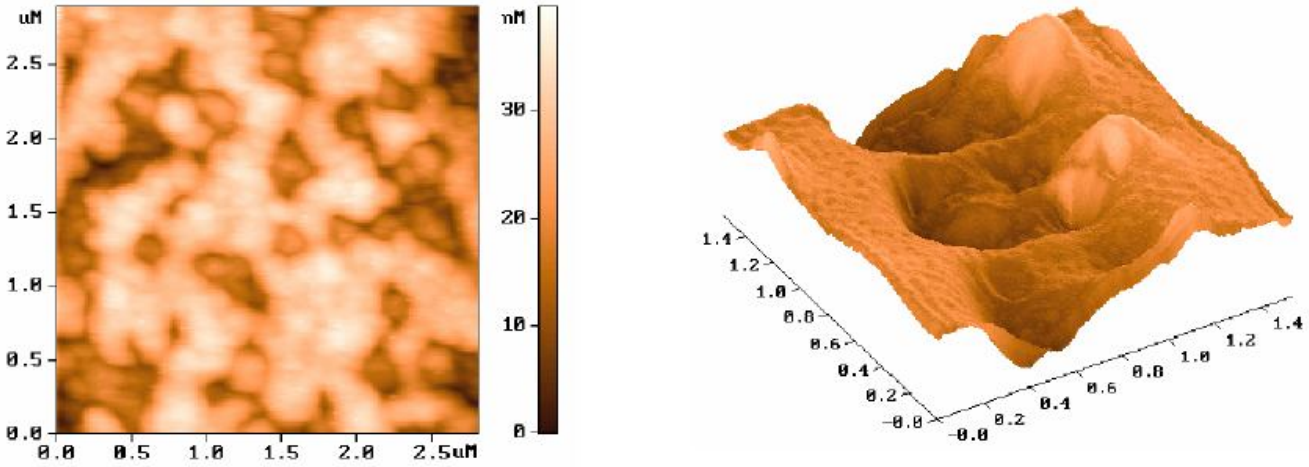


Рис. 31. Изображение рельефа поверхности: а) 2D визуализация, б) 3D визуализация

2.2 Измерение толщин в многослойных структурах на микроскопе JEOL JSM – 7001F с системой микроанализа.

2.2.1 Сканирующий электронный микроскоп JSM-7001F (JEOL)

Модель JSM-7001F (JEOL) представляет собой автоэмиссионный растровый электронный микроскоп, который благодаря использованию в нем электронной пушки с полевой эмиссией (катодом Шотки) (T-FE), передовой технологии формирования изображения и компьютерной технологии дает не только возможность наблюдения тонкой структуры поверхности образца с высоким разрешением (2нм), но и выполнения различных анализов:локальный анализ элементного состава (1мкм^2) методом энергодисперсионной спектрометрии (EDX),катодолюминесцентный анализ (CLD).

В данном микроскопе используется электронная пушка T-FE, позволяющая размещать различные приборы для анализа и получать устойчивый ток зонда с порядком величины от пикоамперов (пА) до сотен наноамперов (нА). Кроме того, первая конденсорная линза, расположенная непосредственно под эмиттером электронной пушки, обеспечивает высокое разрешение даже при высоком токе зонда, превышающем наноампер (нА). Экран управления позволяет переключаться между режимами наблюдения в зависимости от задачи, например, наблюдение изображения, проведение анализа или сравнение изображений.

Рис. 32. Автоэмиссионный растровый электронный микроскоп

2.2.2 Методика исследования

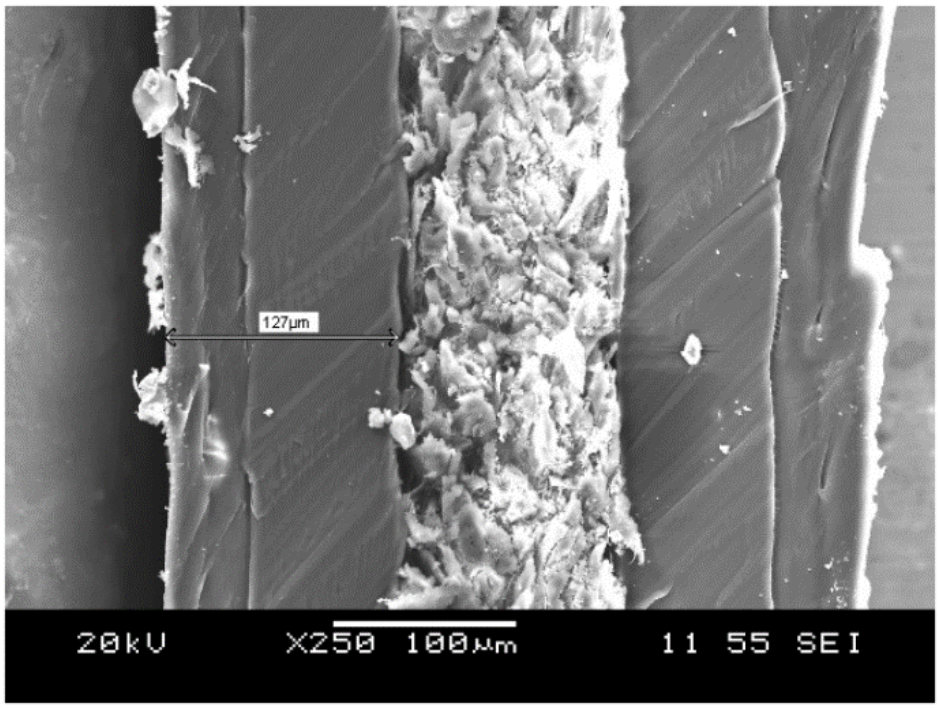
Проведение измерений толщин в многослойнных структурах полимерных плёнок проходит в следующем порядке:

1. Приготовить исследуемый объект и зажать его в специальное приспособление.
2. На поверхность исследуемого объекта напылить тонкий токопроводящий слой (золотом, серебром, алюминием и т.д.).
3. Закрепить объект в рабочем столике микроскопа и поместить в шлюзовую камеру.
4. По достижению необходимого вакуума в шлюзовой камере, переместить, используя механизм перемещения объектов в рабочую камеру.
5. Дождавшись восстановления рабочего вакуума в колонне, открыть пушку и получить сфокусированное изображение объекта.
6. Подобрать рабочей режим и ускоряющее напряжение и увеличение в зоне исследования.
7. По полученному электронному изображению провести измерение толщины исследуемого объекта.
8. Провести микрорентгеноспектральный анализ объекта по линии сканирования, по интересующим элементам.
9. По результатам микрорентгеноспектрального анализа определить границы многослойных структур и вычислить их толщины.
10. Сопоставить результаты исследований по спектральному и электронному анализу и сделать выводы по работе.

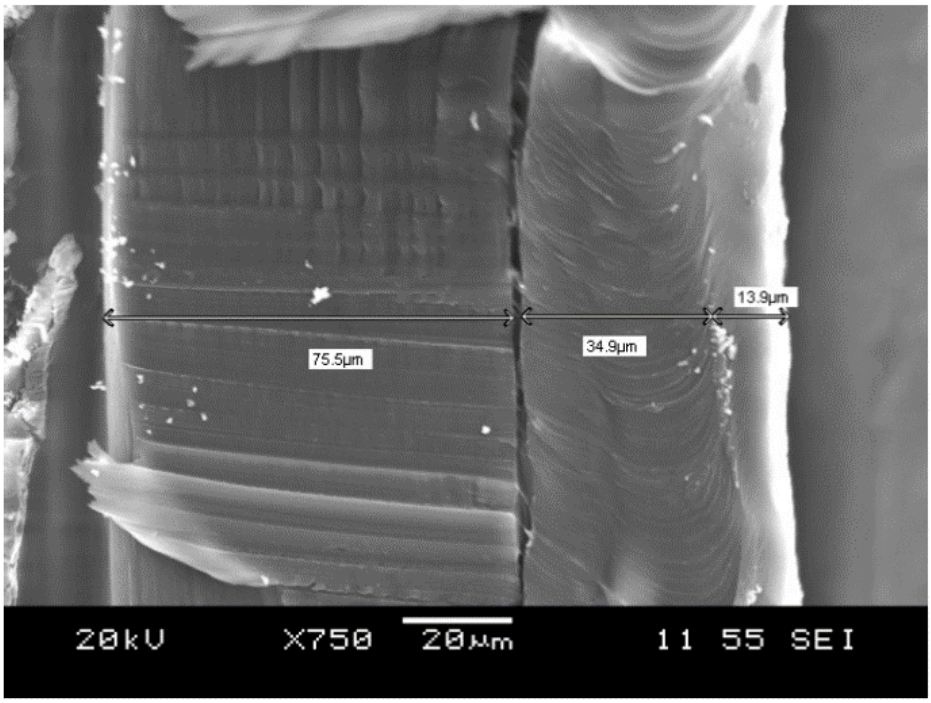
2.2.3 Примеры полученных изображений

Представлены примеры изображения для материалов широко используемых в наноэлектронике.

Рис. 34. Полимеры электронных изображений многослойной пленки с увеличением а)х250 и б) х750:

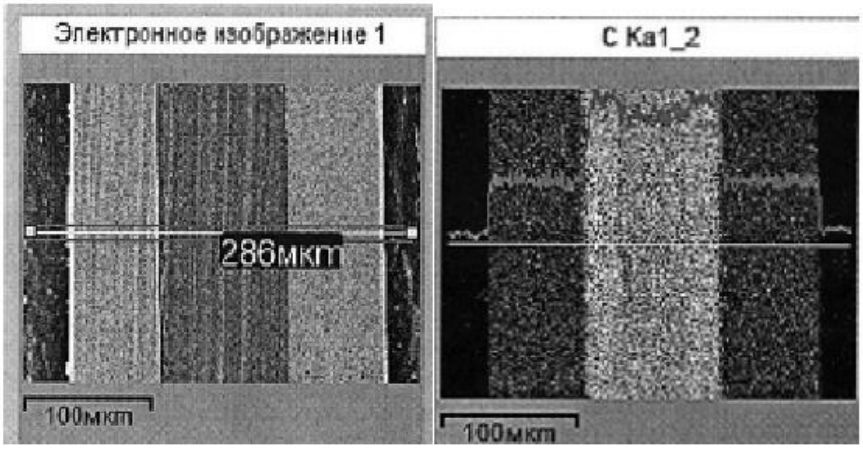


а)

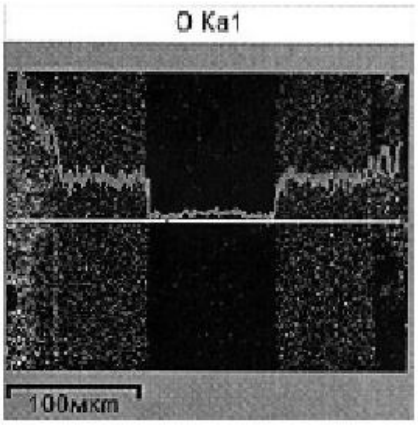


б)

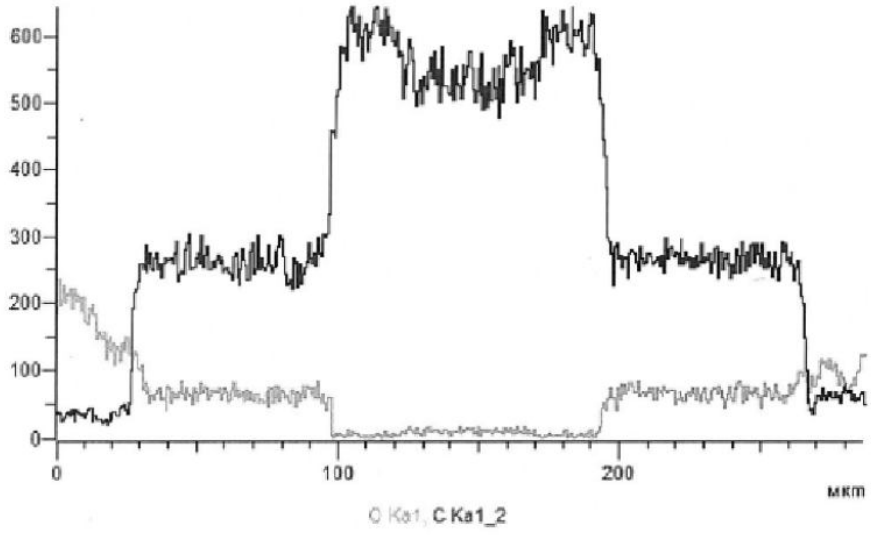
Рис. 35. Многослойная пленка ПЭТ + ПВД + ЭВА: а) электронной изображение, б) и в) распределение элементов в пленке, г) профиль распределения концентрации элементов по линии сканирования:



а) б)

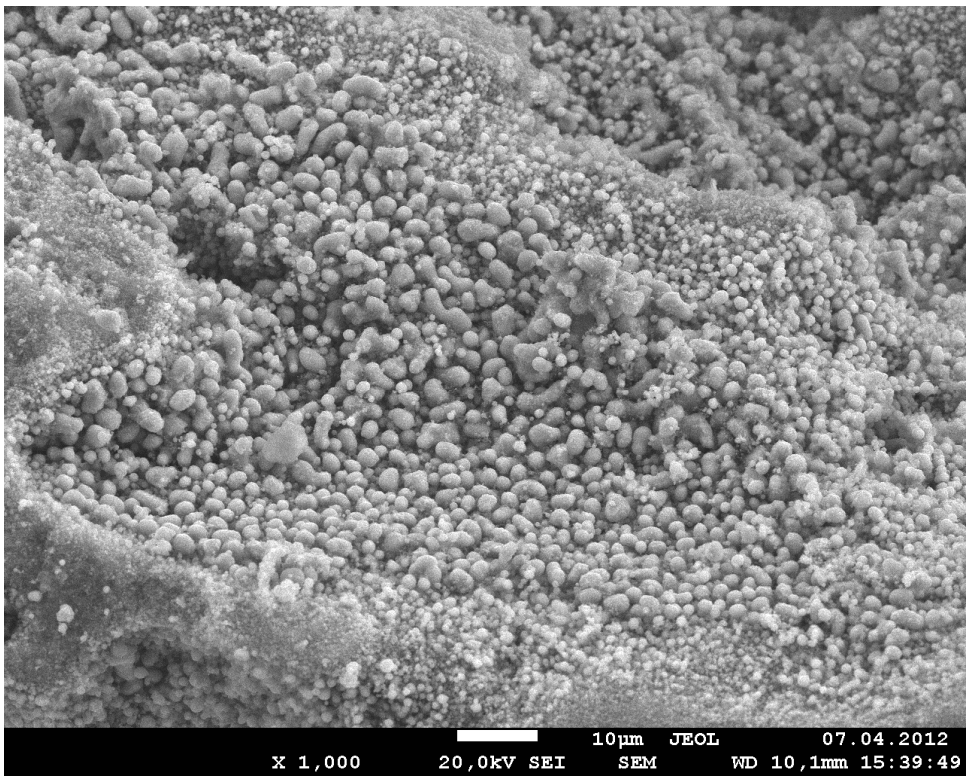


в)

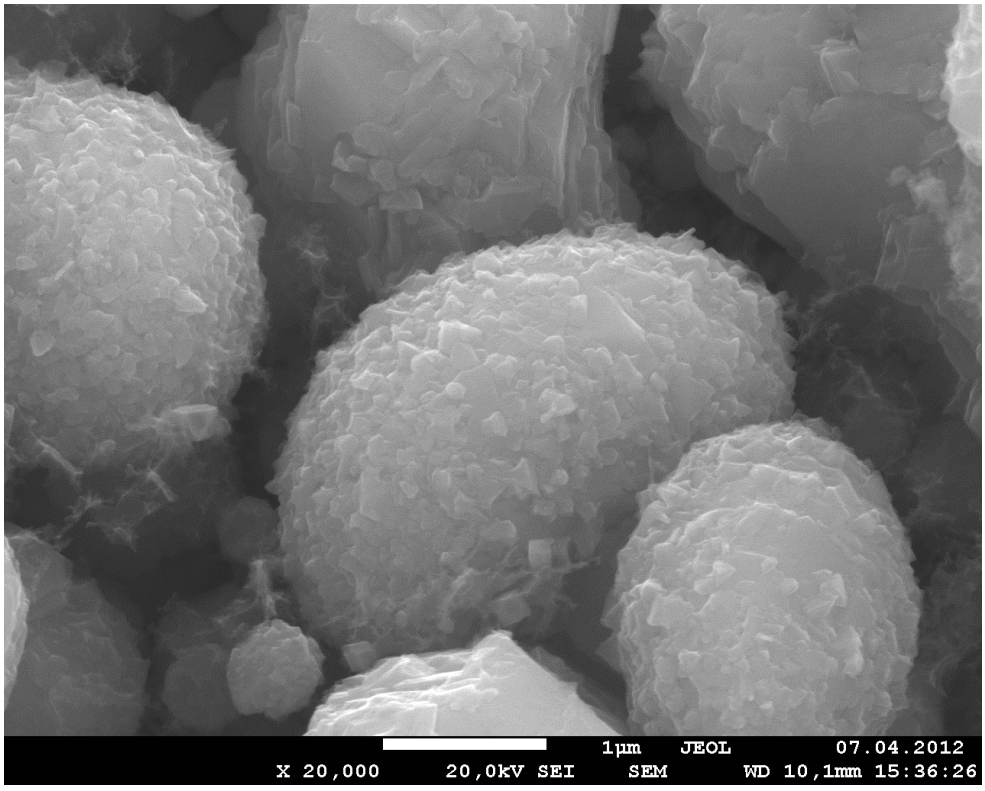


г)

Рис. 36. Магнитный материал наноэлектроники (Fe_3O_4) в стеклоуглероде с увеличением а)х2,000 и б) х20,000:

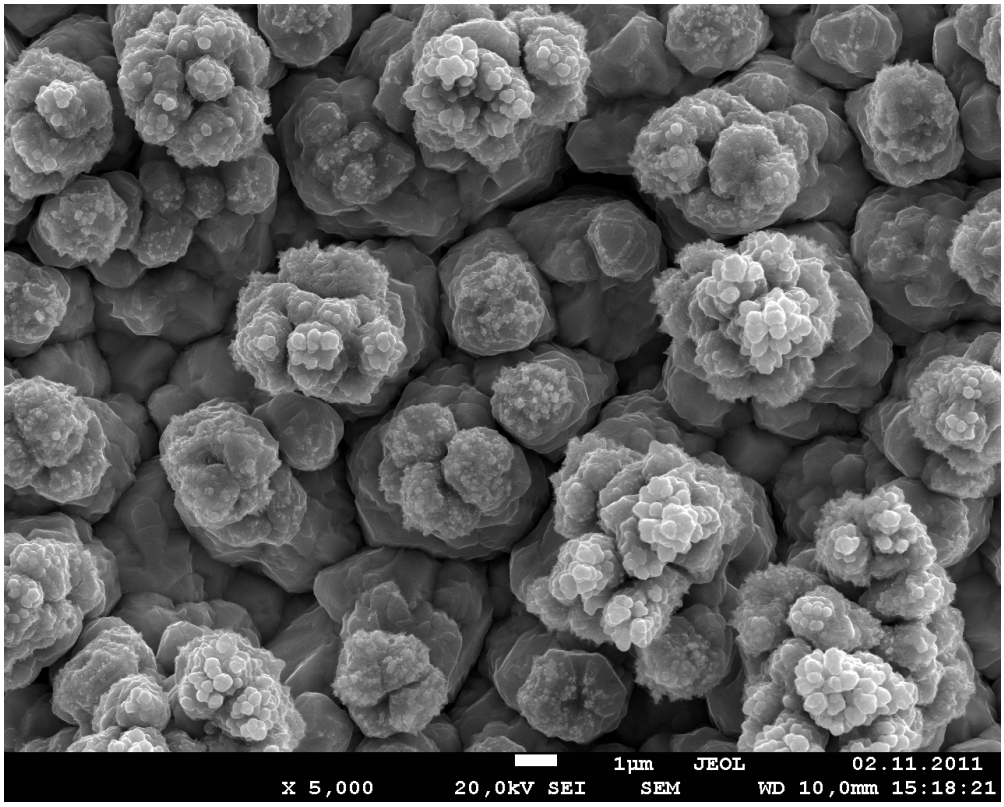


а)

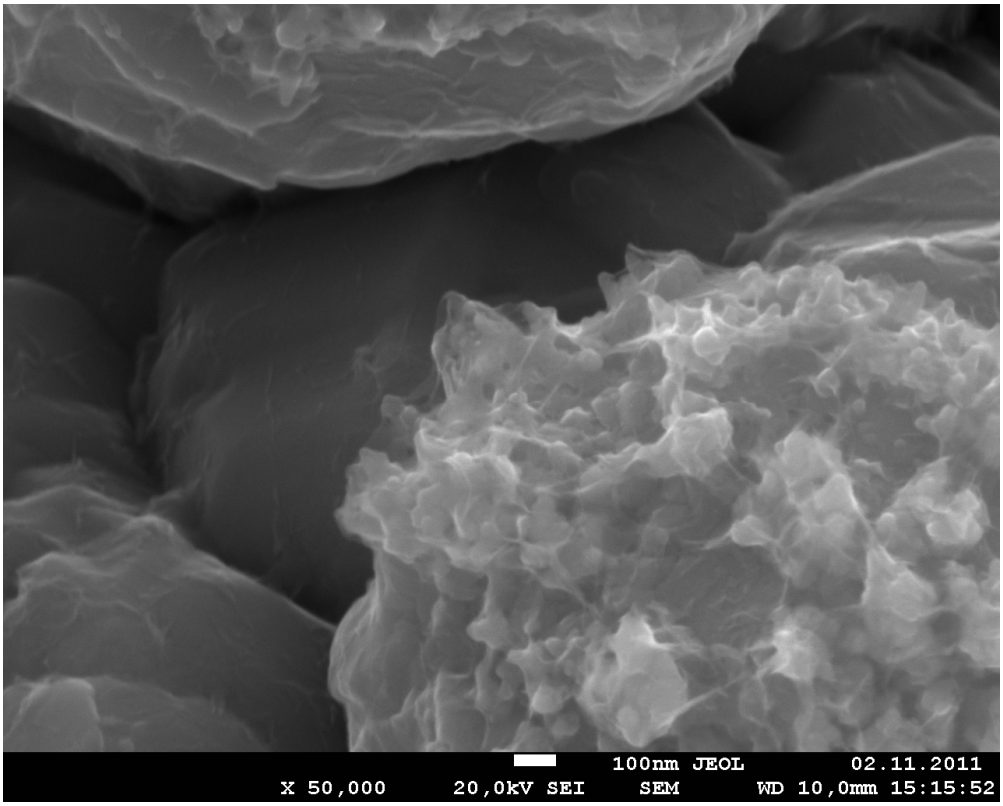


б)

Рис 37. Медная электролитическая фольга (проводниковый материал) с увеличением а) x5,000 и б) x50,000:

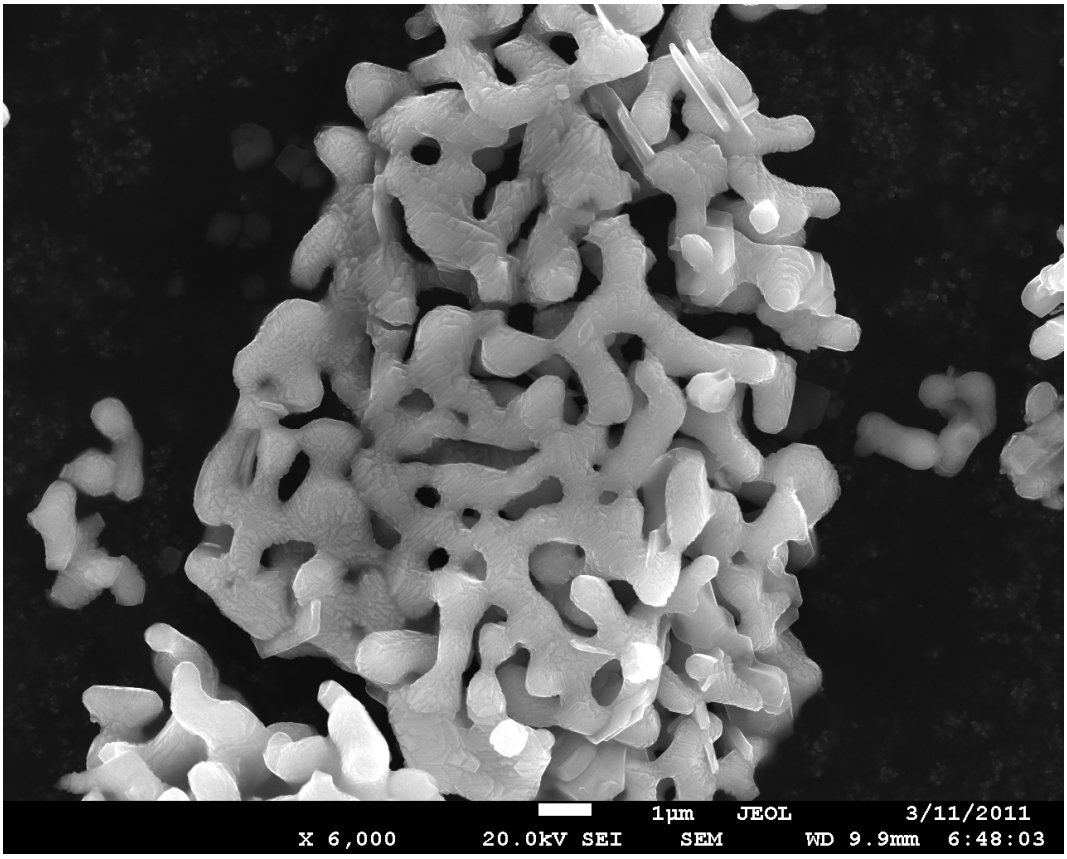


а)

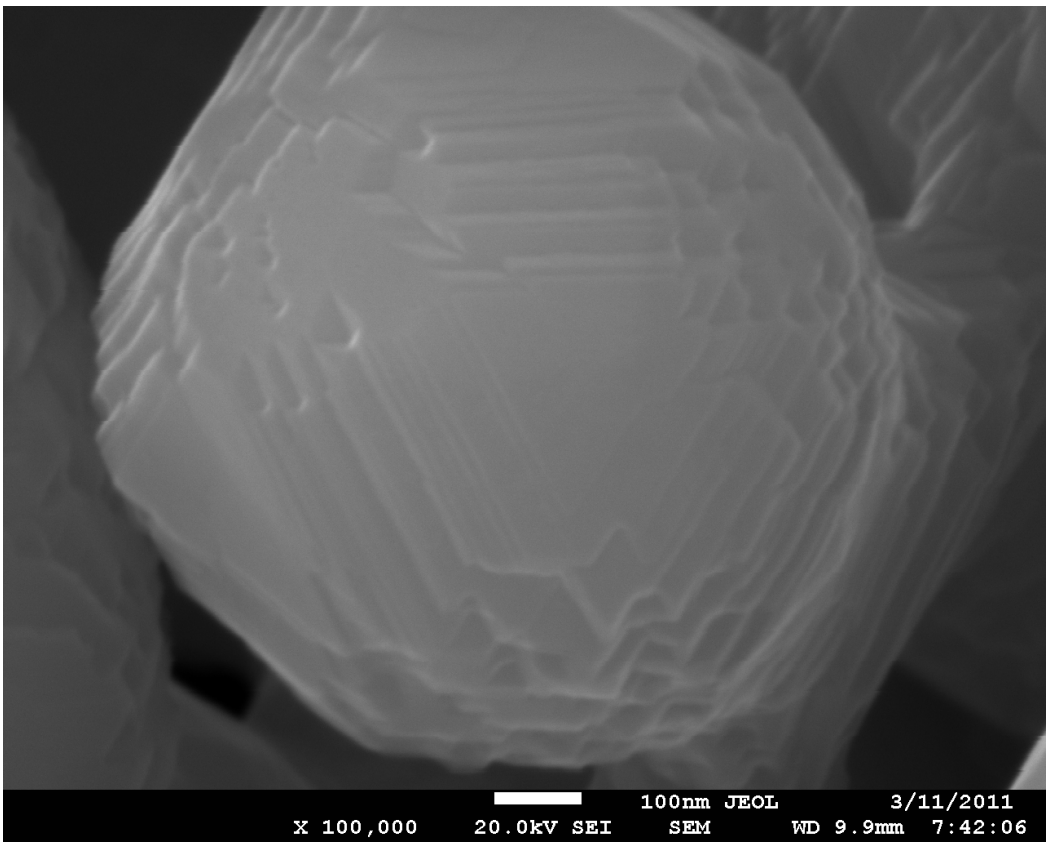


б)

Рис. 38. Оксид кобальта при 1000°С с увеличением а) х6,000 и б) х200,000:

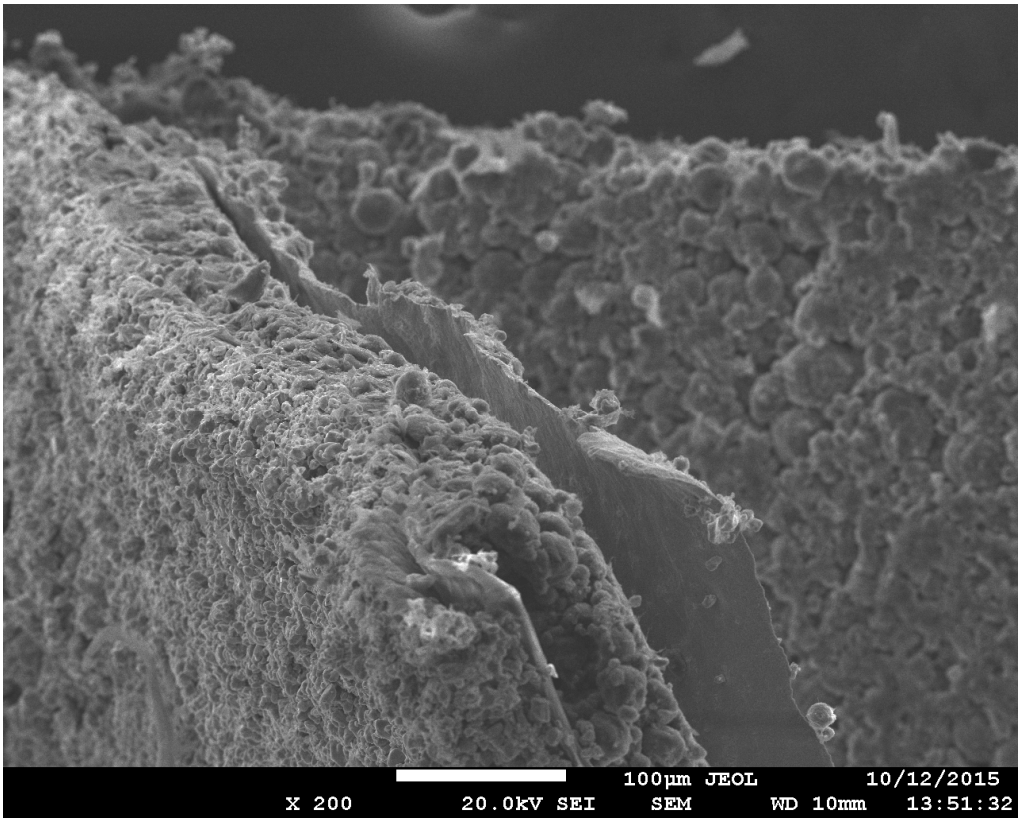


а)

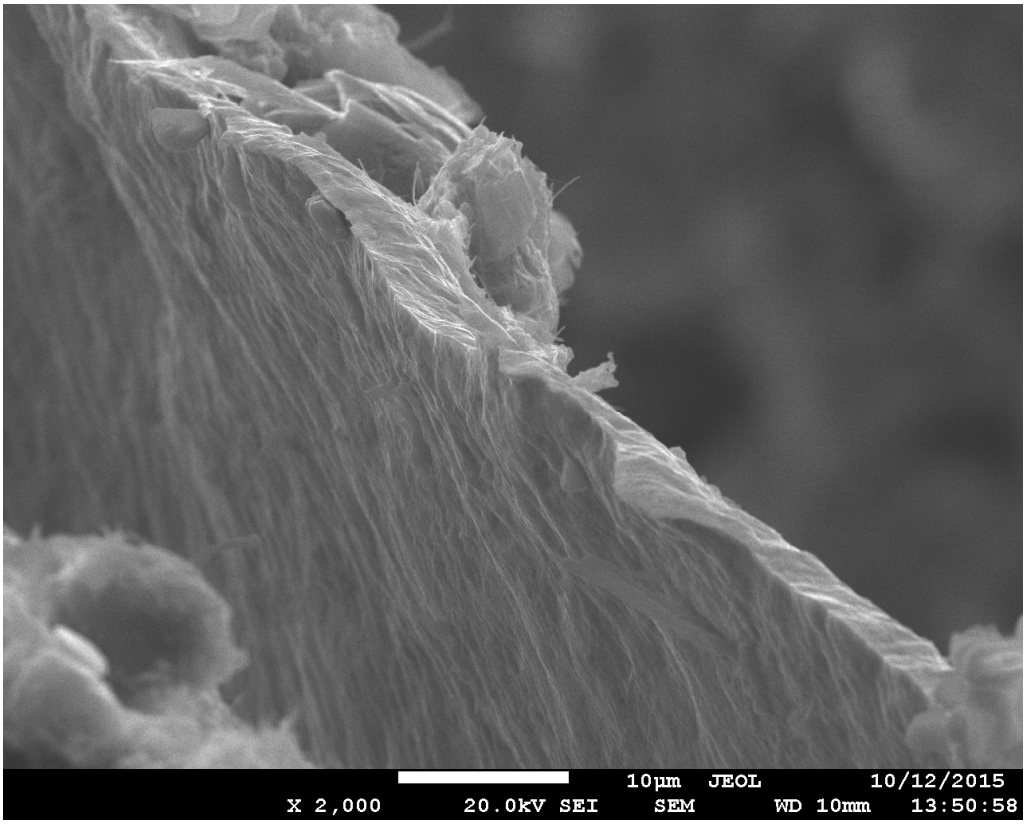


б)

Рис. 39. Электрод литий-ионного аккумулятора с увеличением а) x200 и б) x2,000:



а)



б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной магистерской работы получены следующие результаты:

- выполнен аналитический анализ основных принципов работы сканирующих зондовых микроскопов и типов сканирующей зондовой микроскопии;

-показаны основные преимущества методов сканирующей зондовой микроскопии являются: высокая локальность, которая определяется взаимодействием зонда и поверхности; возможность использования зонда для модификации поверхности объектов наноструктуры;

-в свою очередь, основными недостатками сканирующей зондовой микроскопии являются: сильная зависимость результатов от формы и природы зонда; низка скорость, в связи с механической системой сканирования;

-получены результаты исследования на микроскопе JEOL JSM – 7001F с системой микроанализадля:

а) многослойной полимерной пленки ПЭТ + ПВД + ЭВА,

б) железной окалины (Fe_3O_4) в стеклоуглероде,

в) оксида кобальта (Co_3O_4) при 1000^{o}C,

г) материала электрода литий-ионного аккумулятора.

-показана возможность исследования размеров, структуры, формы нанообъектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учебное пособие для вузов. – Н. Новгород: Физматлит, 2004. – 114 с.
2. Б.М. Балоян, А.Г. Колмаков, М.И. Алымов, А.М. Кротов. НАНОМАТЕРИАЛЫ. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения. Москва. 2007 / Учебное пособие. 125с.
3. Багров Д. Яминский И. Электросиловая микроскопия наноразмерных объектов. 2011 НаноИндустрия.
4. Храмцов Ю.В. Атомно-силовая микроскопия как метод изучения с нанометровым разрешением морфологии поверхности объектов. 2013. Методическое пособие. Москва.
5. Томас Г., Горинж М. Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов: Пер. с англ./Под ред. Б.К. Вайнштейна – М: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983 – 320с
6. Электронная микроскопия в минералогии: Пер. с анг./Под общей ред. Г.-Р. Венка. – М.: Мир, 1979. – 485с., ил.
7. Неволин В.К. Основы тунельно-зондовой нанотехнологии: учебное пособие для вузов. – М.: МГИЭТ (ТУ), 2002. – 96 с.
8. Рэков С.А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур. – СпБ.: Наука, 2001. – 53 с.
9. Забейворота, Н.С. Физико-химические методы анализа материалов и элементов электронной техники: учебное пособие / Н.С. Забейворота, Ф.В. Подгорнов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 47 с.
10. Годымчук А.Ю. Исследование поверхности наноматериалов с помощью сканирующей зондовой микроскопии. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Отрасли наноиндустрии. Области применения наноматериалов» для магистрантов, обучающихся по направлению 150600 «Материаловедение и технология новых материалов». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 16 с.

11. Е.Г. Дедкова, А.А Чуприк Приборы и методы зондовой микроскопии. / Учебное пособие. Москва: 2011. 160с.

12. Вольф, Е. Принципы электронной туннельной спектроскопии. / Е. Вольф ; - Киев : Наукова Думка, 1990. - 454 с.

Уважаемый пользователь!
Обращаем ваше внимание, что система Антиплагиат отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение. Также важно отметить, что система находит источник заимствования, но не определяет, является ли он первоисточником.

Информация о документе:

Имя документа: MANDAG.docx
Дата проверки: 13.06.2017 12:04
Модули поиска: Интернет (Антиплагиат), Диссертации и авторефераты РГБ, Южно-Уральский государственный университет, Кольцо вузов

Текстовые статистики:
Индекс читаемости: сложный
Неизвестные слова: в пределах нормы
Макс. длина слова: в пределах нормы
Большие слова: в пределах нормы

Источник	Ссылка на источник	Коллекция/ модуль поиска	Доля в отчёте	Доля в тексте
[1] Скачать *.pdf	http://www.unn.ru/chem/ism/files/applecture20.pdf	Интернет (Антиплагиат)	11.54%	11.54%
[2] Курсовая: "Основы ск...	http://westud.ru/work/253607/Osnovy-skaniruyushhej-zondovoj-...	Интернет (Антиплагиат)	0.61%	5.52%
[3] Сканирующая зондовая...	http://bigreferat.ru/369164/1/%D0%A1%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B8...	Интернет (Антиплагиат)	0.25%	5.19%
[4] Сканирующая зондовая...	http://knowledge.allbest.ru/radio/2c0a65625a2ac78b5c43b88421...	Интернет (Антиплагиат)	0%	5.11%
[5] скачать/┴√ъют └.т. ┼...	http://gendocs.ru/v33760/?download=file	Интернет (Антиплагиат)	0.47%	5%
[6] Всовременной науке с...	http://gigabaza.ru/doc/26473-pall.html	Интернет (Антиплагиат)	0.16%	4.96%
[7] Амосов МЛ - Стр 2	http://www.studfiles.ru/preview/4521407/page:2/	Интернет (Антиплагиат)	1.23%	3.7%
[8] Основы сканирующей з...	http://window.edu.ru/library/pdf2txt/535/73535/52502/page3	Интернет (Антиплагиат)	0.05%	3.43%
[9] технических принципо...	http://samzan.ru/218713	Интернет (Антиплагиат)	0.41%	3.38%
[10] Растровый электронны...	http://knowledge.allbest.ru/physics/2c9a65625a2ad78b5c43b884...	Интернет (Антиплагиат)	3.05%	3.05%
[11] Зьюнг Ван Зунг Зьюнг...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003318000/rsl01003318...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	3.02%
[12] Основы сканирующей з...	http://window.edu.ru/library/pdf2txt/535/73535/52502/page2	Интернет (Антиплагиат)	0.21%	2.87%
[13] Гатин, Андрей Конста...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004871000/rsl01004871...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	2.34%
[14] Коровкина, Наталья М...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003303000/rsl01003303...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	1.86%
[15] Низамеев, Ирек Рашат...	http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005521000/rsl01005521...	Диссертации и авторефераты РГБ	0.01%	1.85%
[16] Пшеченков, Павел Але...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003341000/rsl01003341...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	1.8%
[17] Тагаченков, Александ...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004891000/rsl01004891...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	1.77%
[18] Павлов, Александр Юр...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003302000/rsl01003302...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	1.75%
[19] Малиновская, Ольга С...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004625000/rsl01004625...	Диссертации и авторефераты РГБ	0.6%	1.69%
[20] Козюхин, Сергей Алек...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003313000/rsl01003313...	Диссертации и авторефераты РГБ	0.01%	1.5%
[21] Амосов МЛ - Стр 3	http://www.studfiles.ru/preview/4521407/page:3/	Интернет (Антиплагиат)	0.81%	1.47%
[22] Борин, Дмитрий Юрьев...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003343000/rsl01003343...	Диссертации и авторефераты РГБ	0.11%	1.44%
[23] Кравцова, Юлия Георг...	http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005107000/rsl01005107...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	1.39%
[24] Исследование поверхн...	http://window.edu.ru/library/pdf2txt/536/73536/52503	Интернет		

		(Антиплагиат)	0.58%	1.36%
[25] Соколов, Игорь Викто...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004635000/rsl01004635...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	1.29%
[26] Фомин, Дмитрий Влади...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004886000/rsl01004886...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	1.26%
[27] Зилова, Ольга Сергее...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002615000/rsl01002615...	Диссертации и авторефераты РГБ	0.9%	1.19%
[28] Ландышев, Владимир А...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004235000/rsl01004235...	Диссертации и авторефераты РГБ	0.06%	1.09%
[29] Гончаров, Игорь Юрье...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002739000/rsl01002739...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	1.02%
[30] Миронов, Виктор Леон...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004659000/rsl01004659...	Диссертации и авторефераты РГБ	0.15%	0.99%
[-] Дедкова, Елена Георг...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004160000/rsl01004160...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0.9%
[32] Движение частицы в о...	http://rudocs.exdat.com/docs/index-24935.html	Интернет (Антиплагиат)	0.76%	0.76%
[33] Алексейчук, Андрей В...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003407000/rsl01003407...	Диссертации и авторефераты РГБ	0.01%	0.74%
[34] Высокоскоростная кри...	http://www.dslib.net/elektro-texnika/vysokoskorostnaja-krist...	Интернет (Антиплагиат)	0.68%	0.68%
[35] скачать	http://bib.convdocs.org/v23708/?download=file	Интернет (Антиплагиат)	0%	0.67%
[36] Электроника НТБ - на...	http://www.electronics.ru/tag/639/	Интернет (Антиплагиат)	0.58%	0.58%
[37] Миронов, Виктор Леон...	http://dlib.rsl.ru/rsl01000000000/rsl01000322000/rsl01000322...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0.55%
[38] Фещенко.doc		Южно-Уральский государственный университет	0.3%	0.46%
[39] Диплом Совершенствов...		Южно-Уральский государственный университет	0%	0.46%
[40] Курсовая работа: Сов...	http://bestreferat.ru/referat-215687.html	Интернет (Антиплагиат)	0.45%	0.45%
[41] Источник 41	http://video.nano.msu.ru/problems/data.xml?483/#11	Интернет (Антиплагиат)	0.45%	0.45%
[42] Матвеева Ю.В. МН510....		Южно-Уральский государственный университет	0%	0.44%
[43] Источник 43	http://window.edu.ru/resource/277/63277/files/nano.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0.37%	0.37%
[44] ВКР.rar/ФИЛАТОВА (ГА...		Кольцо вузов	0%	0.24%
[45] РТУ 2015 Митрошин Не...		Кольцо вузов	0%	0.24%
[46] ОстроуховДиссертация...		Южно-Уральский государственный университет	0%	0.23%
[47] МоисеенкоНА 12-ГБ-РС...		Кольцо вузов	0%	0.19%
[48] 221215172902_Северги...		Кольцо вузов	0%	0.16%
[49] ИнЭТМ/Текстовая част...		Кольцо вузов	0%	0.16%
[50] Men_k_r_K_dolg_Otopk...		Кольцо вузов	0%	0.16%
[51] Коженков.pdf		Кольцо вузов	0%	0.16%
[52] 14-15_КР_РыбаковаМВ_...		Кольцо вузов	0%	0.14%

Оригинальные блоки: 75.21%

Заимствованные блоки: 24.79%

Заимствование из "белых" источников: 0%

Итоговая оценка оригинальности: **75.21%**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

«Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)

Институт естественных и точных наук

Кафедра физической электроники

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ

ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

«Зондовая микроскопия в наноэлектронике» студента Аль-ХайдериВадхаХуссуйн Али, группы ЕТ-263.
Работа проверена на заимствование. Оценка оригинальности работы 75.21%.
Выпускная квалификационная работа Аль-ХайдериВадхаХуссуйн Али посвящена зондовой микроскопии в наноэлектронике. Работа содержит 56 страниц текста, 39 иллюстраций и 12 источников литературы.

Работа Аль-ХайдериВадхаХуссуйн Алисодержит введение, литературный обзор по проблеме, исследование с применением сканирующей зондовой микроскопии, заключение и библиографический список.

В литературном обзоре дан анализ принципов работы сканирующих зондовых микроскопов, принцип работы, устройства и некоторые особенности микроскопии.

В исследовательской части выполнена работа с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-7001F, выполнена работа и получены результаты исследования для измерения многослойных полимерных пленок железной окалины в стеклоуглероде, оксида кобальта и материал электрода литий-ионного аккумулятора. Показана возможность исследования структуры размеров и формы нанообъектов. Отмечено, что основными недостатками зондовой микроскопии являются сильная зависимость результатов от формы и природы зонда.

В работе отражены все поставленные перед автором задачи. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, оформлена аккуратно и технически грамотно.

За время выполнения дипломной работы студент Аль-ХайдериВадхаХуссуйн Али проявил себя как квалифицированный специалист в области исследования зондовой микроскопии. Показал как дисциплинированный, ответственный исполнитель порученных заданий.

В целом считаю, что работа Аль-ХайдериВадхаХуссуйн Ализаслуживает оценки «хорошо», а ее автор присвоения степени «магистр» по специальности 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника».

Ф.И.О. руководителя проекта:Забейворота Николай Семенович

Ученая степень:канд.тех.наук.

Место работы:ЮУрГУ, каф. ФЭ

Занимаемая должность: доцент кафедры ФЭ

«16» июня 2017г. **Подпись** _____

С отзывом руководителя ВКР ознакомлен.

Студент Аль Хайдери/ Вадха _____ / Дата « 23 » 06 2017 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗИЯ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Квалификационная работа выполнена

Студентом (кой) Аль-Хайдери Вадха Хуссейн Али

Факультет/Институт/Школа/Филиал ИЕТН

Кафедра физической электроники Группа ЕТ-263

Направление подготовки /специальность физическая электроника и наноэлектроника
(код) (наименование)

Наименование темы Зондовая микроскопия в наноэлектронике

Рецензент Винник Ф.А. ЮУрГУ, доц., к.т.н.
(Фамилия, И., О., место работы, должность, ученое звание, ученая степень)

ОЦЕНКА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Показатели[1]	Оценка				
	5	4	3	2	*
1 Актуальность тематики работы	+				
2 Степень полноты обзора состояния вопроса и корректность постановки задачи	+				
3 Уровень и корректность использования в работе методов исследований, математического моделирования, инженерных расчетов		+			
4 Степень комплексности работы		+			
5 Ясность, четкость, последовательность и обоснованность изложения		+			
6 Применение современного математического и программного обеспечения, компьютерных технологий в работе	+				
7 Качество оформления пояснительной записки (общий уровень грамотности, стиль изложения, качество иллюстраций, соответствие требованиям стандартов)	+				
8 Объем и качество выполнения графического материала, его соответствие тексту записки и стандартам		+			
9 Оригинальность и новизна полученных результатов, научных, конструкторских и технологических решений	+				

* трудно оценить.

[1] Перечень показателей может быть изменен в соответствии с требованиями к содержанию, объему и структуре ВКР (п. 3.2 утвержденной программы ГИА по ФГОС ВО (3.4 по ФГОС ВПО)).

Отмеченные достоинства: Работа выполнена на высоком научном уровне и современной приборной базе

Отмеченные недостатки: Не отражены обнаруженные по туннельной и ёмкостно-силовой микроскопии

Заключение [2] Работа отвечает всем требованиям к подобным работам и заслуживает оценки "хорошо" а ее автор присвоения квалификации магистра по специальности "Физическая электроника и нанотехнологии"

Рецензент _____ 21 июня 2017 г.
(подпись) (дата)

С рецензией на ВКР ознакомлен.

Студент _____ / _____ / Дата « ____ » _____ 20___ г.
подпись И.О. Фамилия

[2] Указывается оценка выпускной квалификационной работы и рекомендации о присвоении выпускнику соответствующей квалификации.