

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)»

СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ ЛИТОГРАФИЯ НАНОМЕТРОВЫХ
СТРУКТУР В ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ СММ- 2000

Учебно-методическое пособие
к лабораторной работе

Москва 2011

Составитель: д-р техн. наук, проф. Б.Г. Львов, д-р физ.-мат.наук, проф.

Г.Г. Бондаренко, ассистент А.В. Николаевский

УДК 621.38

Сканирующая туннельная литография нанометровых структур в зондовом микроскопе СММ-2000 / Учебно-методическое пособие к лабораторной работе / Подготовлено для 2-й Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети «Функциональные наноматериалы для космической техники» // Моск. гос. ин-т электроники и математики; Сост.: Б.Г. Львов, Г.Г. Бондаренко, А.В. Николаевский. М., 2011. – 11 с.

Содержанием работы является практическое исследование процесса электрополевого воздействия туннельного зазора на поверхность наноструктурированного образца методом сканирующей туннельной микроскопии.

Учебно-методическое пособие к лабораторной работе написано в соответствии с заданием по Государственному контракту на выполнение работ в рамках направления 2 федеральной целевой программы «Развитие инфраструктурыnanoиндустрии в Российской Федерации на 2008-2011 годы» (Гос. Контракт № 16.647.12.2002 от 11 октября 2010 г.; Шифр: 2010-02-2.3-03; Тема: Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети «Функциональные наноматериалы для космической техники»).

ISBN 978-5-94506-284-9

1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

За последние 10 лет сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) превратилась в один из наиболее широко используемых методов исследования поверхности функциональных материалов для космической техники. В отличие от традиционных методов, зондовые микроскопы компактны, не требуют наличия вакуума для работы, способны осуществлять неразрушающий контроль над получаемой структурой в реальном режиме времени.

В Московском государственном институте электроники и математики совместно с ГНУ «НИИ перспективных материалов и технологий» проводятся исследования процессов влияния воздействия факторов космического пространства на структуру поверхности функциональных наноматериалов для космической техники методами сканирующей туннельной (СТМ) и атомно-силовой (АСМ) микроскопии. Полученные результаты были использованы при подготовке данного методического пособия.

Целью лабораторной работы является получение практических навыков в области сканирующей туннельной литографии; демонстрация возможностей метода зондовой литографии при создании микро- и наноструктур на поверхности тестового образца.

Содержанием работы является практическое исследование процесса электрополевого воздействия туннельного зазора на поверхность наноструктурированного образца методом сканирующей туннельной микроскопии.

Пособие рассчитано на учащихся, владеющих физическими основами и приемами эксплуатации оборудования сканирующей зондовой микроскопии [1,2].

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящее время в мире сформировался ряд «критических» направлений науки и техники, определяющих конкурентоспособность научноемких отраслей промышленности. Микроэлектроника и микротехнология, то есть сверхминиатюрные электронные приборы и способы их реализации на микроуровне, начиная со второй половины XX столетия, доминировали в обеспечении научно-технического прогресса.

Задача уменьшения линейных размеров элементов микросхем – одна из основных в микроэлектронике. В настоящее время уровень развития технологий в этой области достиг субмикронных размеров и переходит уже на наноуровень. Изменяется и физика работы элементов – теперь она основывается преимущественно на принципах квантовой механики.

Создание интегральных наноэлектронных квантовых схем, по существу, является конечной целью нанотехнологии. Нанотехнологию, таким образом, можно определить как совокупность способов и приемов создания функциональных элементов нанометровых размеров на поверхности твердых

тел, в том числе из отдельных молекул и атомов, с возможностью одновременной их визуализации и контроля.

Традиционный метод, включающий создание масок на поверхности полупроводниковой пластины с последующим применением различных видов микролитографии все более высокого разрешения, в том числе рентгено-, электроно- или ионной литографий, позволяет создавать элементы с нанометровыми поперечными размерами. Однако создание элементов на основе отдельных молекул или атомов традиционными путями невозможно.

Изобретение в 1981 г. Г. Биннигом и Х. Рорером сканирующего тунNELьного микроскопа (СТМ) открыло, прежде всего, новый путь для неразрушающего контроля проводящих материалов с разрешением вплоть до 0,01 нм. Еще большие возможности открылись с созданием атомного силового микроскопа (АСМ), с помощью которого стало возможным изучать рельеф не только проводящих, но и диэлектрических материалов.

Создатели сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) первыми предложили использовать его и в качестве инструмента для модификации поверхности образца. Действительно, в области локального контакта зонда с образцом могут возникать достаточно большие силы, напряженности электрического поля и плотности электрических токов. Раздельное или совместное действие этих факторов может приводить к заметной локальной модификации поверхности образца и зонда. Повышенный уровень взаимодействия между зондом и образцом, можно перевести СЗМ из измерительного режима работы с нулевым или минимальным уровнем разрушения исследуемой поверхности в литографический режим, обеспечивающий создание на поверхности образца заранее заданных структур с нанометровым уровнем пространственного разрешения. Таким образом, было открыто новое направление – зондовая нанотехнология.

К настоящему времени зондовая нанотехнология уже привела к созданию дискретных устройствnanoэлектроники в виде отдельных функциональных элементов (МОМ диод, одноэлектронный транзистор), устройств памяти со сверхплотной записью информации. При этом в полной мере могут быть реализованы идеи молекулярной электроники, когда в качестве элементной базы предполагается использование и модификация отдельных молекул.

Зондовая литография – один из новых методов локальной модификации поверхности с нанометровой точностью. Переход на наноуровень пространственного масштаба необходим для создания квантовых и одноэлектронных приборов, являющихся основой микро- и nanoэлектроники ближайшего будущего.

В зондовой литографии используют различные варианты локального воздействия на поверхность с помощью электрических токов большой плотности и электрических полей большой напряженности, механического давления, селективного оксидирования.

В соответствии с видами локального взаимодействия СЗМ зонда с поверхностью выделяют следующие виды зондовой литографии.

Сканирующая силовая литография (процарапывание)

В этом типе литографии зонд АСМ сканирует поверхность в контактном режиме и удаляет материал с поверхности в местах, определенных данными изображения. При этом позади острия остаются борозды, похожие на след, оставляемый плугом на земле. При работе с твердыми поверхностями этот метод приводит к быстрому разрушению зонда.

Динамическая силовая литография

В этом типе литографии зонд сканирует поверхность в «полуконтактном» силовом режиме, а модификация поверхности происходит в заданных точках вследствие силового воздействия колеблющегося зонда. Кратковременное «укачивание» поверхности защищает зонд от быстрого разрушения.

Локальное анодное оксидирование с использованием АСМ

В этом виде литографии изменяется не только рельеф образца, но и локальные электрофизические свойства его поверхности. Например, при подаче напряжения на проводящий зонд на поверхности образца может начаться электрохимический процесс, и металлический слой под зондом начнет окисляться. Этот метод используется на воздухе, когда зонд и поверхность материала покрыты тонким слоем абсорбированной воды. Когда зонд приближается достаточно близко к поверхности образца, эти абсорбированные слои соприкасаются, и вследствие капиллярного эффекта, между острием и образцом возникает водяная перемычка. Таким образом, при подаче напряжения возникает электрохимическая реакция между зондом и поверхностью образца в водной среде. Если поверхность имеет положительный заряд, а острие – отрицательный, то они будут электрохимически взаимодействовать соответственно как анод и катод, непосредственно под острием начнет расти оксидный слой. Для этого типа литографии в качестве данных может быть использовано растровое полутоновое изображение. Разница между наибольшим и наименьшим возможным напряжением на образце делится пропорционально в соответствии с наибольшим и наименьшим значениями яркости на исходном изображении, и в соответствии с этим будет меняться высота анодного оксидного слоя на поверхности образца, формируя на ней топографический контраст.

Сканирующая туннельная литография

С момента изобретения сканирующий туннельный микроскоп применяют в научных и практических исследованиях не только для изучения свойств поверхности объектов, но и для целенаправленной модификации поверхности различных материалов. С помощью иглы микроскопа можно осуществлять литографию – нанесение заданного рисунка на поверхность.

В этом типе литографии зонд сканирует поверхность при постоянном токе. В заданных точках происходит воздействие на поверхность либо путем вдавливания острия в поверхность, либо путем подачи импульсов тока. В первом случае на поверхности образуются вдавливания, но острие может быть разрушено. Подача импульсов тока – более щадящий для зонда режим. При этом участки поверхности в области контакта могут плавиться и испаряться. Зонд СТМ может перемещать частицы материала по поверхности образца либо удалять их оттуда, манипулировать большими молекулами и даже отдельными атомами. Контролируемое выполнение таких операций существенно расширяет возможности зондовой литографии. Яркой демонстрацией метода является осаждение и удаление отдельных атомов на поверхности, а также их перемещение по поверхности подложки. Так, в 1991 г. Эйглер с сотрудниками, перемещая зондом атомы ксенона по поверхности никеля, составил слово IBM. Для написания буквы I было использовано всего 8 атомов ксенона, а букв B и M – по тринадцать атомов!

3. ЗАДАНИЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ

- 1) Получить СТМ-изображение рельефа поверхности тестового образца.
- 2) Методом туннельной сканирующей литографии локально воздействовать на выбранную область тестового образца.
- 3) Исследовать зависимость характера модификации поверхности от величины импульса тока воздействия на образец в процессе литографии.

4. ОБОРУДОВАНИЕ И ОБРАЗЦЫ

- сканирующий зондовый микроскоп СММ – 2000;
- персональный компьютер с программным обеспечением проводимых исследований;
- образец для туннельной сканирующей литографии в виде фрагмента компакт-диска без записи информации со снятым защитным слоем;
- отрезок платиновой проволоки диаметром от 0.2 мм до 0.5 мм длиной от 12 до 14 мм;
- тонкостенная трубка из нержавеющей стали длиной от 8 до 12 мм с внешним диаметром 0.8(-0.05) мм;
- тестер;
- паяльник;
- припой ПОС-61;
- ортофосфорная кислота;
- бокорезы или ножницы для обновления кончика зонда.

5. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- изучите устройство, принципы изготовления и крепления СТМ-зонда, СТМ-столика и образца в СТМ режиме;
- установите образец и СТМ-зонд, выполняя действия, необходимые для функционирования микроскопа СММ-2000 в СТМ режиме;
- выполните действия по подготовке к сканированию в конфигурации СТМ в соответствии с особенностями устройства и конструкции СММ-2000.

Установите следующие параметры сканирования:

- назначьте значение быстродействия системы поддержания заданного сигнала – параметр Tau, 88 мс (флажок fast отключен);
- задайте параметр Dens меньше единицы;
- установите значение задержки Delay в интервале 10-30 мкс;
- выберите V (скорость сканирования) 5-10 мкм/с;
- задайте количество измерений в каждой точке сканирования – параметр Meas, 4;
- установите величину туннельного тока в диапазоне 0,5-1,0 нА;
- назначьте величину напряжения туннельного зазора U=250 мВ с полярностью «+» на образце и «-» на игле;
- выберите начальные координаты сканирования и размер площадки сканирования;
- подведите зонд к образцу;
- проведите процедуру сканирования (выполните сканирование участка поверхности образца с визуализацией рельефа, чтобы убедиться, что поверхность на участке, где будет проводиться литография, достаточно ровная и не содержит резких перепадов и существенных дефектов);
- после этого выберите на поверхности отсканированной площадки локальный участок (точку с координатами (x;y)), на котором будет производиться воздействие;
- переведите иглу в указанные координаты;
- установите значение величины напряжения туннельного зазора U=5000 мВ;
- удерживайте зонд в данной точке с выбранным напряжением в течение двух минут;
- установите прежнее значение величины напряжения туннельного зазора U=250 мВ;
- отведите зонд в исходные координаты;
- проведите сканирование той же площадки с теми же параметрами;
- сохраните кадр с результатом воздействия;
- повторите те же процедуры с большим напряжением между зондом и образцом или с меньшим напряжением, но при большей длительности воздействия;

- проведите процедуру локального воздействия на различных участках одного скана;
- проведите сканирование рельефа поверхности и получите изображение участка, на котором была выполнена литография; сохраните полученное изображение в заданной директории;
- сравните изображения, полученные до воздействия и после;
- получите профили шероховатости модифицированных областей и определите глубину литографии на разных участках изображения поверхности; сохраните полученные результаты измерения шероховатости по профилям сечений;
- сравните глубину литографии, проведенную при разных значениях напряжения и скорости сканирования;
- с помощью кнопки  на панели инструментов программы получите трехмерные изображения исследуемых участков поверхности и сохраните их.

6. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Сканирующий зондовый микроскоп не является источником повышенной опасности. Для стабильной и надежной работы микроскопа необходимо соблюдать следующие меры предосторожности:

- не подвергать микроскоп и основание, на котором он находится, механическим воздействиям (ударам, толчкам, тряске);
- не допускать попадания внутрь микроскопа посторонних предметов, жидкостей;
- не устанавливать СТМ-зонд или образец при включенном напряжении;
- при работе с паяльником во избежание ожогов не касаться жалом и нагревающим элементом открытых частей тела;
- припой содержит свинец, и поэтому работать с ним необходимо в хорошо проветриваемом помещении;
- работать с ортофосфорной кислотой необходимо под вытяжкой в резиновых перчатках во избежание химического отравления и кислотного ожога;
- при работе с ножницами и бокорезами соблюдать осторожность, так как эти инструменты являются колюще-режущими инструментами;
- соблюдать правила работы на персональном компьютере, управляющем микроскопом, в том числе и порядок включения.

7. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет составляется в соответствии с порядком выполнения заданий и должен включать в себя:

- наименование работы;
- цель работы;
- краткое описание оборудования, образцов, методики исследования;
- описание принципов выбора основных параметров литографии методом СТМ - воздействия;
- не менее двух распечаток изображения модифицированного рельефа поверхности тестового образца с указанными на них параметрами литографического воздействия.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое зондовая литография?
2. В чем заключаются преимущества зондовой литографии над традиционными методами?
3. Назовите некоторые виды зондовой литографии и расскажите, каким образом осуществляется модификация поверхности?
4. Расскажите об особенностях туннельной сканирующей и динамической силовой литографии.
5. Как влияет скорость сканирования на процесс модификации поверхности?

9. ЛИТЕРАТУРА

1. Львов Б. Г., Бондаренко Г. Г., Николаевский А. В. Сканирующая зондовая микроскопия в исследовании поверхностной структуры наноматериалов – МИЭМ. М., 2010. – 26 с.
2. Львов Б. Г., Бондаренко Г. Г., Николаевский А. В. Изучение приемов эксплуатации сканирующего зондового микроскопа СММ-2000 – МИЭМ. М., 2011. – 28 с.
3. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / Под ред. Роко М. К., Уильямса Р. С. и Аливисатоса П.: Пер. с англ. – М. : МИР, 2002. – 292 с.
4. Неволин В. К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии – М. : МИЭТ, 1996.
5. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. Учебное пособие. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 192 с.
6. Новиков Л.С., Воронина Е.Н. Перспективы применения наноматериалов в космической технике. Учебное пособие – М.: Университетская книга, 2008. – 188 с.

7. Акишин А.И., Бондаренко Г.Г., Быков Д.В. и др. Физика воздействия концентрированных потоков энергии на материалы. Учебник – М. : УНЦ ДО МГУ, 2004. – 418 с.

8. Готтлайт Г. Физико-химические основы материаловедения: Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 400 с.

9. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. -- М.: Техносфера, 2005. – 448 с.

Учебное издание

Сканирующая туннельная литография нанометровых структур
в зондовом микроскопе СММ-2000

Составители:

ЛЬВОВ Борис Глебович
БОНДАРЕНКО Геннадий Германович
НИКОЛАЕВСКИЙ Анатолий Владимирович

Редактор Е.С. Резникова
Технический редактор О.Г. Завьялова

Подписано в печать 29.03.2011г. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Печать-ризография.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,65. Тираж 50 экз.

Заказ 83. Изд. №32.

Московский государственный институт электроники и математики.

109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3.

Отдел оперативной полиграфии Московского государственного института
электроники и математики.
115054, Москва, ул. М. Пионерская, 12.