
5. Сканирующая зондовая литография

Содержание

5. СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ.....	5-1
5.1. ЦЕЛИ РАБОТЫ.....	5-2
5.2. ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ.....	5-2
5.3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....	5-2
5.4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	5-12
5.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ.....	5-12
5.6. ЗАДАНИЕ.....	5-12
5.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	5-15
5.8. ЛИТЕРАТУРА.....	5-16

Лабораторная работа была разработана Нижегородским Государственным Университетом им. Н.И. Лобачевского

5.1. Цели работы

1. Изучение физических основ зондовой нанотехнологии.
2. Изучение различных видов литографии, выполняемых с помощью сканирующего зондового микроскопа.
3. Получение практических навыков выполнения динамической силовой литографии.

5.2. Информация для преподавателя¹

Работа состоит из двух частей и выполняется каждым студентом индивидуально. Обязательная практическая часть работы выполняется на одном занятии и занимает 4 часа. Выполнение литографии авторского изображения (по желанию студента) выполняется на втором занятии и занимает 4 часа.

Образец для выполнения литографии: фрагмент компакт-диска без записи информации со снятым защитным слоем.

До начала работы необходимо подобрать зонды для каждого студента и выполнить литографию тестового изображения на одном из приборов.

5.3. Содержание работы

Физические основы зондовой нанотехнологии. Изучение видов сканирующей зондовой литографии.

Нанесение тестового изображения (samples\litho\nanoworld.bmp) на полимерную поверхность в режиме динамической силовой литографии, выбор оптимальных условий литографии.

Выполнение литографии авторского изображения (по желанию студента).

Введение

В настоящее время в мире сформировался ряд «критических» направлений науки и техники, определяющих конкурентоспособность наукоемких 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

¹ Прибор NanoEducator полноценно работает только в учетной записи пользователя «Администратор компьютера».

физика работы элементов – теперь она основывается преимущественно на принципах квантовой механики [[Лит. 5-1](#)].

Создание интегральных наноэлектронных квантовых схем, по существу, является конечной целью нанотехнологии [[Лит. 5-2](#)]. 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 туннельного 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. То есть, повышая 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 устройств наноэлектроники в виде отдельных функциональных элементов (МОМ диод, одноэлектронный транзистор [[Лит. 5-3](#)]), устройств памяти со сверхплотной записью информации [[Лит. 5-4](#)]. При этом в полной мере могут быть реализованы идеи молекулярной электроники [[Лит. 5-5](#)], когда в качестве элементной базы предполагается использование и модификация отдельных молекул.

Физические основы зондовой нанотехнологии [[Лит. 5-6](#)]

В сканирующем туннельном микроскопе при напряжении между игольчатым электродом и подложкой 5 В и зазоре между ними 0,5 нм возникают электрические поля приблизительно 10^8 В/см, сравнимые с внутриаомными. Преимуществами таких полей являются их локальность, определяющаяся степенью заострения зонда, и низкие приложенные напряжения, которые не могут вызывать ионизацию молекул и атомов в межэлектродном зазоре. При таких полях возможны плотности токов электронной эмиссии до 10^8 А/см², которые можно оценить по формулам Фаулера-Нордхейма:

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp\left(-6,836 \cdot 10^7 \frac{\Theta \cdot \phi^{3/2}}{E}\right), \quad \Theta = 0,935 - 10,79 \cdot 10^{-8} \frac{E}{\phi^2},$$

где E – напряженность электрического поля (В/см), ϕ – работа выхода электрона из электрода, к которому приложено электрическое поле (В). Сверхплотный пучок электронов из игольчатого электрода может вызвать на подложке локальный разогрев. Локальное повышение температуры по радиусу r вдоль поверхности от оси пучка для изотропных подложек можно оценить по формуле:

$$\delta T(r) = \frac{UI}{4\pi k l} \left(2 \frac{l}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{l}} \right) - e^{-\frac{r}{l}} \right),$$

где U – напряжение, приложенное к электродам, I – туннельный ток, k – коэффициент термической проводимости подложки, l – длина неупругого рассеяния электронов в подложке.

Электростатическое поле порождает также нормальное к поверхности электродов механическое напряжение:

$$\sigma = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды между электродами, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Это поле может быть достаточным для локальных упругих и пластических деформаций поверхности металлических электродов. Например, на воздухе при полях $E > E_0$ (E_0 – электростатическое поле порога пластической деформации), где $E_0 = 2,1 \cdot 10^3 \tau^{1/2}$ В/см, (τ – механическое напряжение, при котором наблюдается пластическая деформация, Па), возможна локальная пластическая деформация металлической подложки в виде бугорков. При этом более жесткий игольчатый электрод может оставаться неизменным.

Для полупроводниковых подложек, когда внешнее электрическое поле проникает в объем полупроводника, ситуация усложняется, при этом возможна, в частности, локальная глубинная деформация подложек.

С помощью сильного электрического поля в межэлектродном зазоре возможна заметная поляризация молекул среды и их перестройка (например, геометрическая изомерия), а за счет диполь-дипольного взаимодействия молекул и примесей возможно образование проводящих молекулярных мостиков из адсорбата электродов, либо из жидкой диэлектрической фазы, находящейся в межэлектродном зазоре.

С помощью СТМ или АСМ иглы возможно и прямое механическое воздействие на подложку. Тогда при превышении порога пластической деформации подложки при локальном царапании или постукивании зондом возможна ее необратимая механическая деформация.

Таким образом, основными факторами, определяющими процессы нанотехнологии, являются: локальные электрические поля, сравнимые с внутримолекулярными и атомными; сверхбольшие плотности токов и их электродинамическое воздействие; сверхплотные локальные потоки тепла, вызванные протекающими токами; локальные механические деформации.

Виды сканирующей зондовой литографии

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

- СТМ литография;
- АСМ анодно-окислительная литография;
- АСМ силовая литография;
- Другие специфические виды (электростатическая зарядовая литография, литография с помощью зонда ближнепольного оптического микроскопа и др.).

СТМ литография

Существует множество разновидностей СТМ литографии. Наиболее простой способ модификации поверхности с помощью СТМ заключается в непосредственном контактном воздействии СТМ зонда на поверхность. Это приводит к появлению ямки на поверхности образца, но при этом может повреждаться и сам зонд. Более щадящий способ воздействия на поверхность заключается в подаче на образец импульса тока высокой плотности или электрического поля высокой напряженности. Поверхность образца под зондом при этом может расплавляться и даже частично испаряться (Рис. 5-1). СТМ зонд может перемещать частицы материала по поверхности образца, либо удалять их оттуда, манипулировать большими молекулами и даже отдельными атомами (Рис. 5-2).

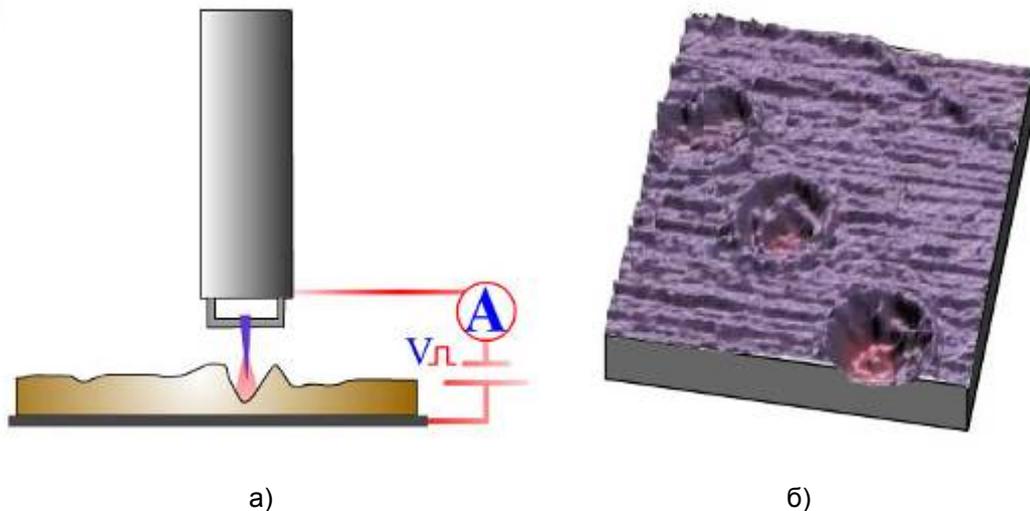


Рис. 5-1. Пример СТМ литографии. На СТМ изображении (размер скана $256 \times 256 \text{ nm}^2$) трехмонослойной проводящей пленки Ленгмюра-Блоджет (б) видны кратерообразные дефекты глубиной в один монослой после локального приложения трех импульсов напряжения (а)

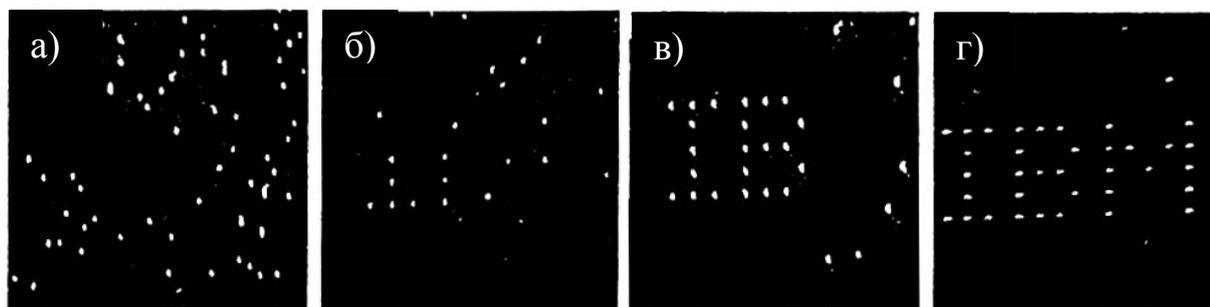


Рис. 5-2. Пример СТМ литографии. Название фирмы IBM составлено из атомов ксенона (светлые точки), осажденных на поверхность никеля. Игла подводилась к выбранному атому Хе, и на нее подавалось электрическое напряжение, которое заставляло атом прилипнуть к игле. Затем игла перемещалась в заданное место, и подачей отрицательного импульса напряжения атом стряхивался с иглы обратно на подложку. На рисунках а) – г) показаны последовательные стадии поатомной сборки самой маленькой в мире рекламы (размер скана $\sim 10 \times 10 \text{ нм}^2$)

Локальное анодное окисление

В этом виде литографии изменяется не только рельеф образца, но и локальные электрофизические свойства его поверхности. Например, при подаче напряжения на проводящий АСМ 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, и непосредственно под острием начнет расти оксидный слой (Рис. 5-3).

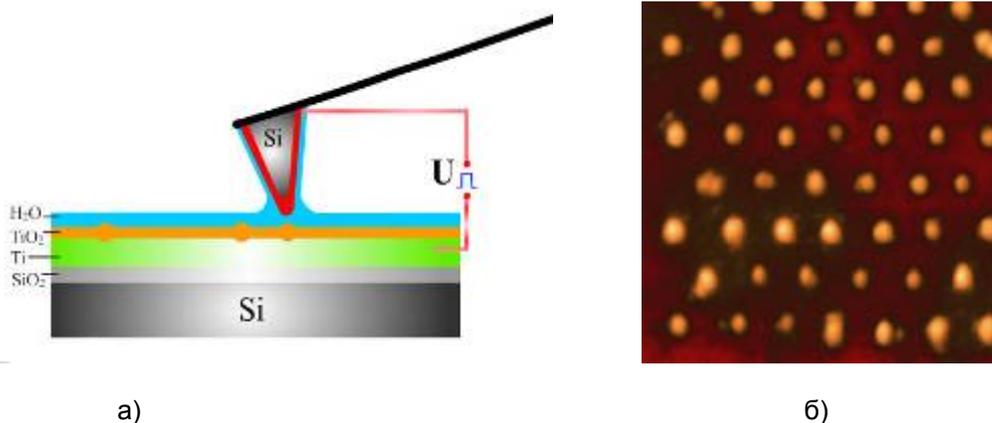


Рис. 5-3. Схема процесса локального анодного окисления с помощью проводящего АСМ зонда (а) и изображение (размер скана $200 \times 200 \text{ нм}^2$) сверхтонкой пленки титана на поверхности кремния (б), окисленной в заданных точках

Необходимо отметить, что диаметр оксидных наночастиц, измеренный по полувысоте, составляет 8-10 нм. При использовании таких наночастиц в качестве элементов записи эффективная плотность записи информации может составить 1 Тб/кв. дюйм.

Наномодификация поверхности не ограничивается только формированием точек. Используя соответствующее программное обеспечение можно организовать перемещение зонда вдоль заданных векторов и формировать линии и более сложные объекты.

На (Рис. 5-4 а) представлен пример векторной литографии на пленке титана, осуществленной путем локального окисления с помощью проводящего зонда. Ширина окисной полоски 8-10 нм позволяет формировать туннельно-прозрачные барьеры для электронов, а также одноэлектронные устройства, функционирующие по квантово-механическим законам при комнатной температуре.

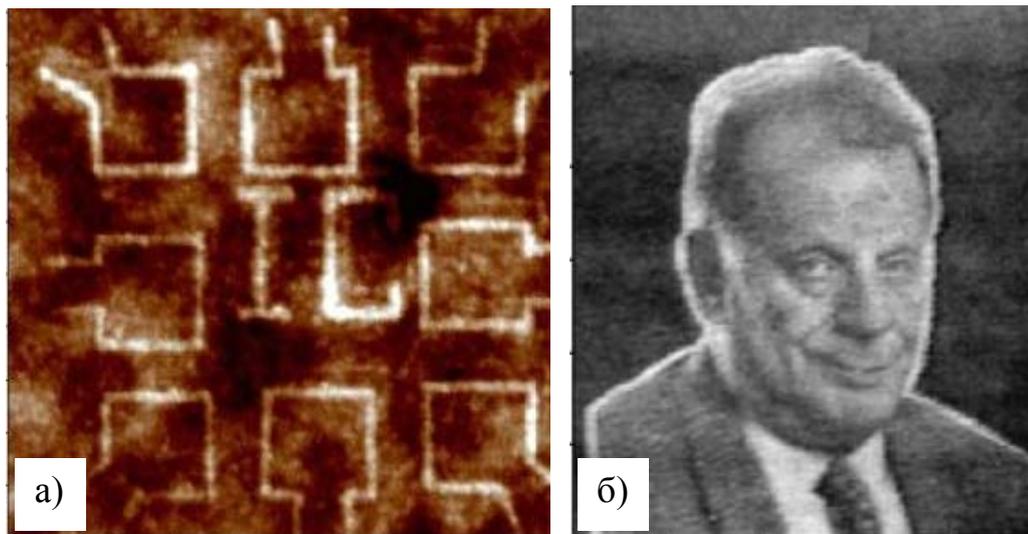


Рис. 5-4. Пример векторной (а) (размер скана $500 \times 500 \text{ нм}^2$) и растровой (б) (размер скана $2,5 \times 3,0 \text{ мкм}^2$) литографии, осуществленной путем локального окисления с помощью проводящего зонда

Для сложных рисунков можно проводить растровую литографию, которая осуществляется в процессе сканирования поверхности. То есть зонд проходит по всем точкам выбранной области сканирования, а не только по точкам и линиям, соответствующим рисунку шаблона, как в векторной литографии. В качестве шаблона в растровой литографии служит заранее загружаемый графический файл. 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. Пример растровой литографии приведен на Рис. 5-4 б, на котором изображен нобелевский лауреат Жорес Алферов.

Силовая литография

СЗМ позволяет осуществлять непосредственное силовое воздействие зондом на поверхность образца. Это может производиться двумя способами – статическим воздействием (наногравировка) и динамическим воздействием (наночеканка).

Процесс гравировки хорошо известен как средство формирования рисунка на поверхности предмета. Реализация такого процесса с использованием методов сканирующей зондовой микроскопии позволяет осуществлять наногравировку с нанометровым разрешением. При осуществлении наногравировки с использованием методики обычной контактной силовой микроскопии зонд микроскопа перемещается по поверхности подложки с достаточно большой силой прижима, так что на подложке (или на расположенном на ней слое резиста) формируется рисунок в виде углублений (царапин) (Рис. 5-5). Такая методика использует принцип вспашки: материал извлекается из подложки вполне определенным образом, оставляя канавки с характерным сечением, определяемым формой кончика зонда.

Для проведения силовой литографии необходимо, очевидно, чтобы твердость материала зонда была выше твердости образца. При этом не должно происходить залипание кантилевера и налипание частиц материала подложки на зонд. Шероховатость образца должна быть небольшой (обычно не более 1-10 нм). Также необходимо, чтобы поверхность была чиста от загрязнений. Для осуществления силовой литографии хорошо подходят некоторые полимеры, такие как поликарбонат и полиэтилен.

Такая технология нанолитографии достаточно проста и дешева, однако у нее есть определенные недостатки. При формировании наноканавки статическим воздействием зонда случайные торсионные изгибы кантилевера приводят к краевым неоднородностям рисунка. Кроме того, при работе с твердыми поверхностями этот метод приводит к быстрому разрушению зонда.

С использованием динамической силовой литографии (наночеканки) модификация поверхности происходит за счет формирования углублений на поверхности образца колеблющимся зондом (Рис. 5-6), при этом используется прерывисто-контактный метод сканирования. Такой метод нанолитографии свободен от торсионных искажений и позволяет производить визуализацию сформированного рисунка без серьезного воздействия на поверхность подложки или резиста. Кратковременное «укалывание» поверхности также защищает зонд от быстрого разрушения.

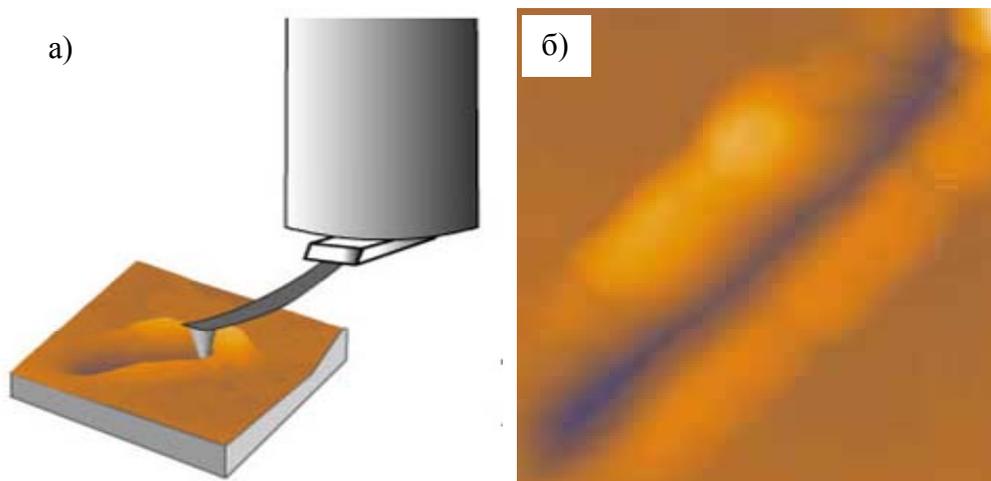


Рис. 5-5. Схематическое изображение процесса статической силовой литографии (а) и изображение поверхности алюминия (размер скана $1,6 \times 1,6 \text{ мкм}^2$) с нанесенной на нее царапиной (б)

Динамическая литография может производиться с использованием векторного (Рис. 5-6 а) или растрового (Рис. 5-6 б) сканирования. Векторная литография осуществляется по заранее заданному рисунку, ее преимущество заключается в относительно большой скорости, однако она не позволяет варьировать силу воздействия на подложку в процессе литографии. Растровая литография осуществляется более медленно, поскольку при ее проведение сканирование осуществляется по всей площади участка подложки, на которой формируется рисунок, однако она позволяет осуществлять различное (в зависимости от рисунка шаблона) по силе воздействие зонда на подложку.

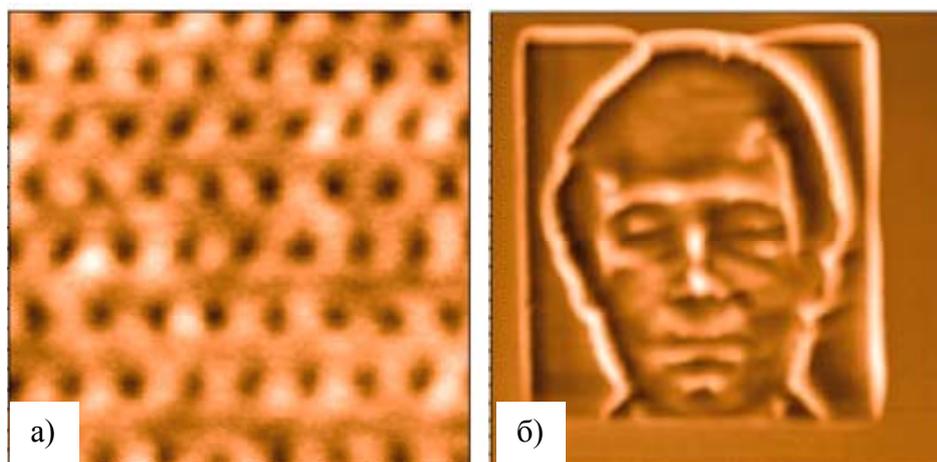


Рис. 5-6. Пример векторной динамической силовой литографии (а) (размер скана $220 \times 220 \text{ нм}^2$) в виде регулярного массива углублений (питов) и растровой литографии (размер скана $2.5 \times 2.6 \text{ мкм}$)

В получении хороших результатов в растровой литографии с использованием наночеканки большую роль играет предварительная подготовка графического изображения-шаблона. Белому цвету на изображении соответствует отсутствие воздействия на образец, черному цвету – воздействие с максимальной силой. При подготовке изображения наиболее важные детали необходимо окрашивать в черный цвет таким образом, чтобы области черного цвета были достаточно большими и не чередовались с малыми белыми участками, а фон и ненужные детали, как правило, заливаются белым цветом. Также иногда бывает полезно повысить контрастность изображения.

Выполнение растровой динамической силовой литографии на приборе NanoEducator

Перед выполнением литографии необходимо провести сканирование участка поверхности, предназначенного для нанесения литографического рисунка. Для успешного проведения литографии необходимо, чтобы рабочая поверхность образца была достаточно гладкой и не имела существенных поверхностных дефектов и загрязнений. Поэтому при первом сканировании обычно выбирается размер площади сканирования превышающей размер области, в которой предполагается провести литографию. Это дает возможность быстро найти наиболее подходящий участок. Рабочий участок рекомендуется выбирать в середине доступного поля сканирования.

Затем производится сканирование рабочего участка, на котором планируется проводить литографию. Рекомендуется выбирать участок, подходящий по соотношению

сторон под изображение-шаблон, для этого необходимо задать количество точек сканирования по направлениям X,Y соответствующим количеству пикселей в рисунке шаблона.

Процесс растровой литографии занимает достаточно длительное время, за которое в результате дрейфа сканер может смещаться относительно выбранного участка поверхности, при этом формируемый в соответствии с шаблоном рельеф поверхности может быть сильно искажен. Во избежание этого следует отсканировать рабочую поверхность несколько раз, убедиться в отсутствии дрейфа и только после этого проводить процесс литографии.

Чеканка изображения на поверхности образца осуществляется на приборе NanoEducator растровым способом путем сканирования определенного участка и воздействия на образец в заданных точках с силой, зависящей от яркости соответствующих пикселей изображения-шаблона.

Для определения максимальной глубины воздействия рекомендуется выполнить процедуру Спектроскопии и оценить по кривой зависимости амплитуды колебаний зонда от расстояния (Рис. 5-7) зазор между зондом и образцом

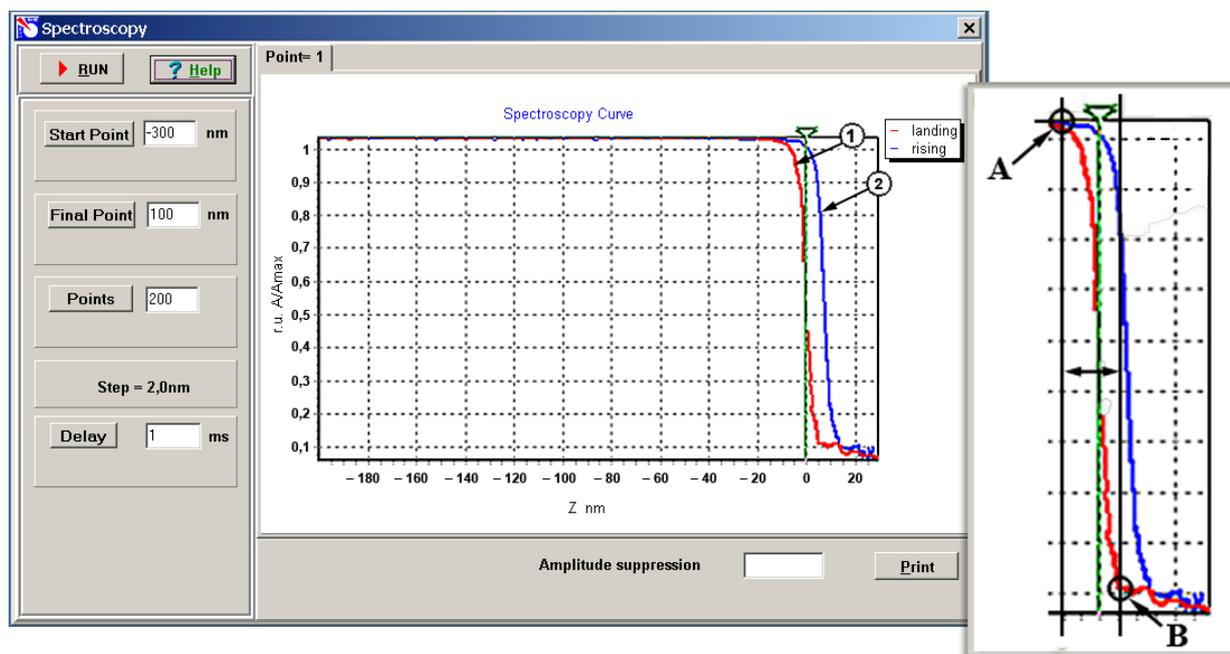


Рис. 5-7. Кривая спектроскопии в точке контакта для оценки расстояния между зондом и образцом

Процедура литографии вызывается при выборе закладки **Lithography** в правом нижнем поле окна **Scanning**. В левом нижнем поле окна **Scanning** при этом появляются управляющие элементы процедуры литографии (Рис. 5-8).

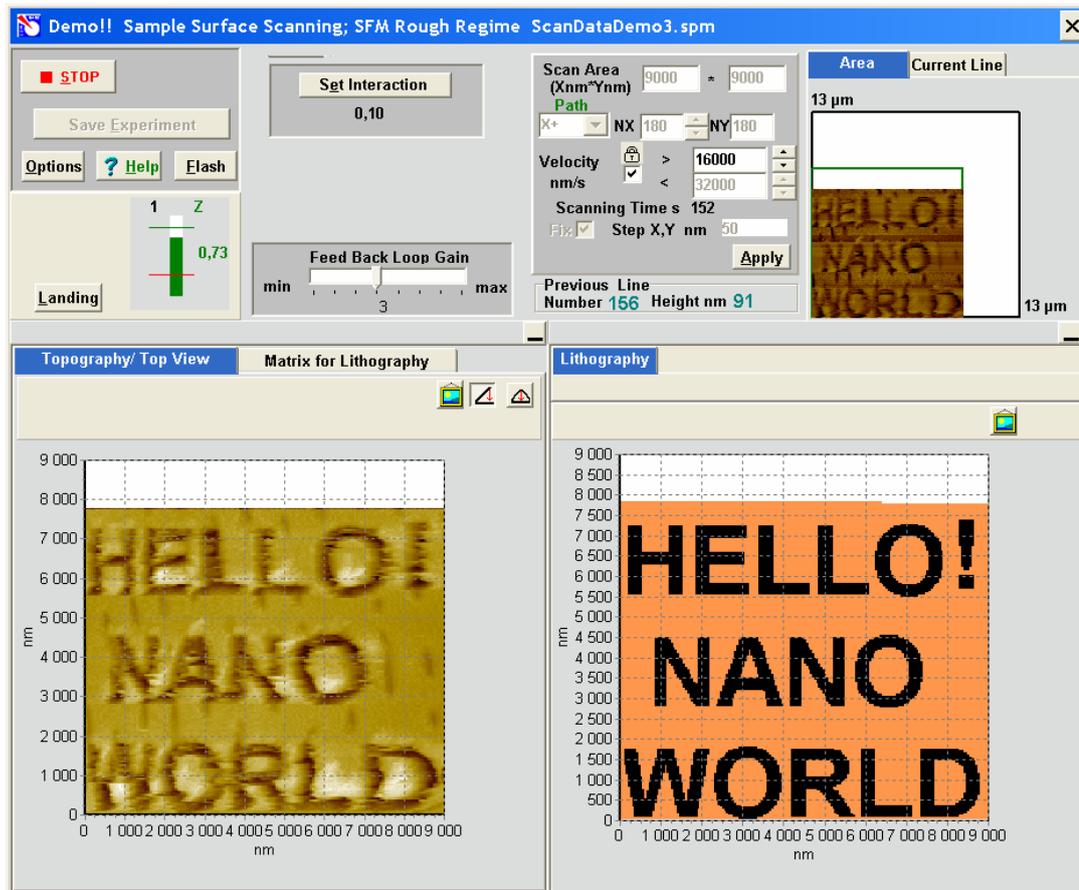


Рис. 5-8. Окно процедуры литографии

Выполнение процедуры литографии состоит из следующих шагов:

1. Введите изображение-шаблон, которое будет наноситься на поверхность образца. Изображение должно быть заранее сформировано и сохранено в графическом формате (*.bmp). Диалог выбора и ввода изображения вызывается при нажатии кнопки **Load Image**.
2. Установите величину максимально возможной глубины воздействия зонда на образец **Action, nm**. Эту величину рекомендуется установить на 10÷50 % больше, чем полученный результат оценки расстояния между зондом и образцом с учетом шероховатости поверхности.
3. Установите величину времени воздействия **Action Time** в мкс. По умолчанию величина **Action Time** установлена **22 мкс**.
4. Установите расстояние между точками изображения на поверхности образца (шаг литографии) **Step X,Y nm**. По умолчанию этот параметр равен шагу сканирования в предыдущем измерении рельефа поверхности. Изменение шага литографии **Step X,Y nm** влечет за собой изменение площади поверхности, на которой формируется литографическое изображение.
5. Нажмите кнопку **Projection**, при этом происходит проецирование изображения-шаблона на поле сканирования и формирование матрицы воздействия на поверхность. После этого пользователь может изменять положение участка, на котором будет выполняться литография, перемещая рамку, показывающую его границы, в пределах полного поля сканирования, что делать, однако, не рекомендуется. Если новое поле сканирования не совпадает с ранее заданным

полем, то кнопка **Apply** индицируется красным цветом, и ее необходимо нажать для подтверждения заданных параметров.

6. Нажмите кнопку **RUN** окна **Scanning**. После этого начинается процесс литографии, постепенное выполнение которого условно отражается в правом нижнем поле окна **Scanning**. В точках, соответствующих черному цвету на изображении-шаблоне зонд будет постукивать по поверхности с амплитудой, равной величине максимально возможной глубины воздействия **Action**, при этом будет слышен характерный звук.

В левом поле окна **Scanning** выводится изображение поверхности, измеряемое при обратном ходе сканера. Таким образом, пользователь имеет возможность динамически контролировать результат воздействия на поверхность образца, производимого при литографии.

В процессе выполнения литографии можно увеличить максимальную глубину воздействия на образец (**Action**) в 2 или 4 раза.

После выполнения процедуры Литографии необходимо проверить результат произведенного воздействия, для чего необходимо выполнить сканирование участка поверхности, на котором была проведена литография, или большего поля.

На приборе NanoEducator рекомендуется выполнять литографию зондом, имеющим радиус вершины не более 100 нм, при следующих параметрах: скорость сканирования 2000 нм/с, величина воздействия **Action** от 100 до 1000 нм, шаг между точками литографии ~ 100 нм.

5.4. Методические указания

Прежде чем приступить к работе на сканирующем зондовом микроскопе NanoEducator следует изучить руководство пользователя прибора.

5.5. Техника безопасности

Прибор управляется напряжением 220 В. Эксплуатацию сканирующего зондового микроскопа NanoEducator производить в соответствии с ПТЭ и ПТБ электроустановок потребителей напряжением до 220 В.

5.6. Задание

Часть 1

1. Выбор участка на поверхности образца для выполнения литографии.
 - 1.1. Установите на держатель образца исследуемый образец.
 - 1.2. Установите зондовый датчик в гнездо измерительной головки прибора NanoEducator.

- 1.3. Запустите управляющую программу прибора NanoEducator. Выберите режим сканирующего силового микроскопа (ССМ).
- 1.4. Определите амплитудно-частотную характеристику зондового датчика и установите рабочую частоту.
- 1.5. Осуществите сближение зонда с образцом с помощью винта ручного подвода до расстояния примерно 1 мм.
- 1.6. Осуществите захват взаимодействия при значениях:
 - **Amplitude Suppression = 0,3;**
 - **Feed Back Loop Gain = 3.**
- 1.7. Откройте окно сканирования. Задайте необходимые параметры сканирования, исходя из данных об изображении-шаблоне для выполнения литографии (nanoworld.bmp, Рис. 5-9). Рекомендуется установить размер рабочей области сканирования 10x10 мкм², число точек сканирования, равное числу пикселей на изображении.



Рис. 5-9. Изображение-шаблон для выполнения динамической силовой литографии. Изображение в файле nanoworld.bmp имеет размер 180x180 пикселей

- 1.8. Получите СЗМ изображение рабочего участка поверхности образца. Сохраните полученные результаты.
 - 1.9. Выполните спектроскопию в точке текущего расположения зонда. Оцените расстояние между зондом и образцом.
2. Выполнение литографии тестового изображения.
- Осуществите процесс литографии изображения **nanoworld.bmp** на выбранный рабочий участок поверхности.
- Величину максимально возможной глубины воздействия зонда на образец **Action** установите больше величины шероховатости поверхности (глубины дорожек на поверхности компакт-диска) и на 10÷50 % больше оцененного расстояния между зондом и образцом.
3. Получение изображения топографии участка поверхности, на котором была выполнена литография.

- 3.1. После окончания процесса литографии выберите закладку **Topography** в правом нижнем поле окна **Scanning**.
- 3.2. Не изменяя параметров сканирования и не смещая поле сканирования, произведите измерение топографии участка поверхности, на который была проведена литография. В случае частичного смещения литографированного изображения вследствие дрейфа сканера, увеличьте поле сканирования так, чтобы оно полностью охватывало рабочий участок, на котором была проведена литография.
- 3.3. Получите СЗМ изображение (Рис. 5-10) рабочего участка поверхности образца. Сохраните полученные результаты.
- 3.4. Оцените качество литографированного изображения. На Рис. 5-10 а изображение еле видно, т.е. глубина вдавливания была недостаточной. На (Рис. 5-10 б) изображение четко видно, но в некоторых областях наблюдается выдавливание материала на поверхность, что несколько смазывает изображение, т.е. глубина воздействия была немного излишней.
- 3.5. При необходимости повторите процесс литографии при изменении (увеличении или уменьшении) параметра максимально возможной глубины воздействия зонда на образец **Action**.

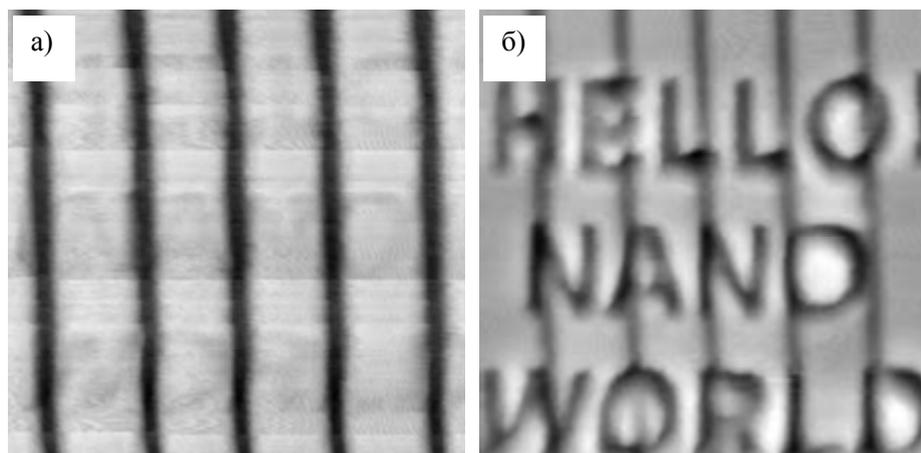


Рис. 5-10. СЗМ изображение участка поверхности (размер скана $10 \times 10 \text{ мкм}^2$), на который была осуществлена литография с глубиной воздействия 300 нм (а) и 1000 нм (б)

Часть 2

4. Литография авторского изображения.
 - 4.1. Подготовьте изображение для литографии со следующими характеристиками: черно-белый рисунок (две градации цвета), размер 200×200 пикселей, разрешение $50 \div 100$ пикселей/дюйм, сохраненный в формате ***.bmp**. Варианты возможных изображений-шаблонов с АСМ изображениями топографии участка поверхности, на котором была выполнена литография, показаны на Рис. 5-11.

- 4.2. Осуществите все необходимые действия Части 1 Задания для осуществления литографии авторского изображения с наиболее оптимальными подобранными в первой части работы параметрами.

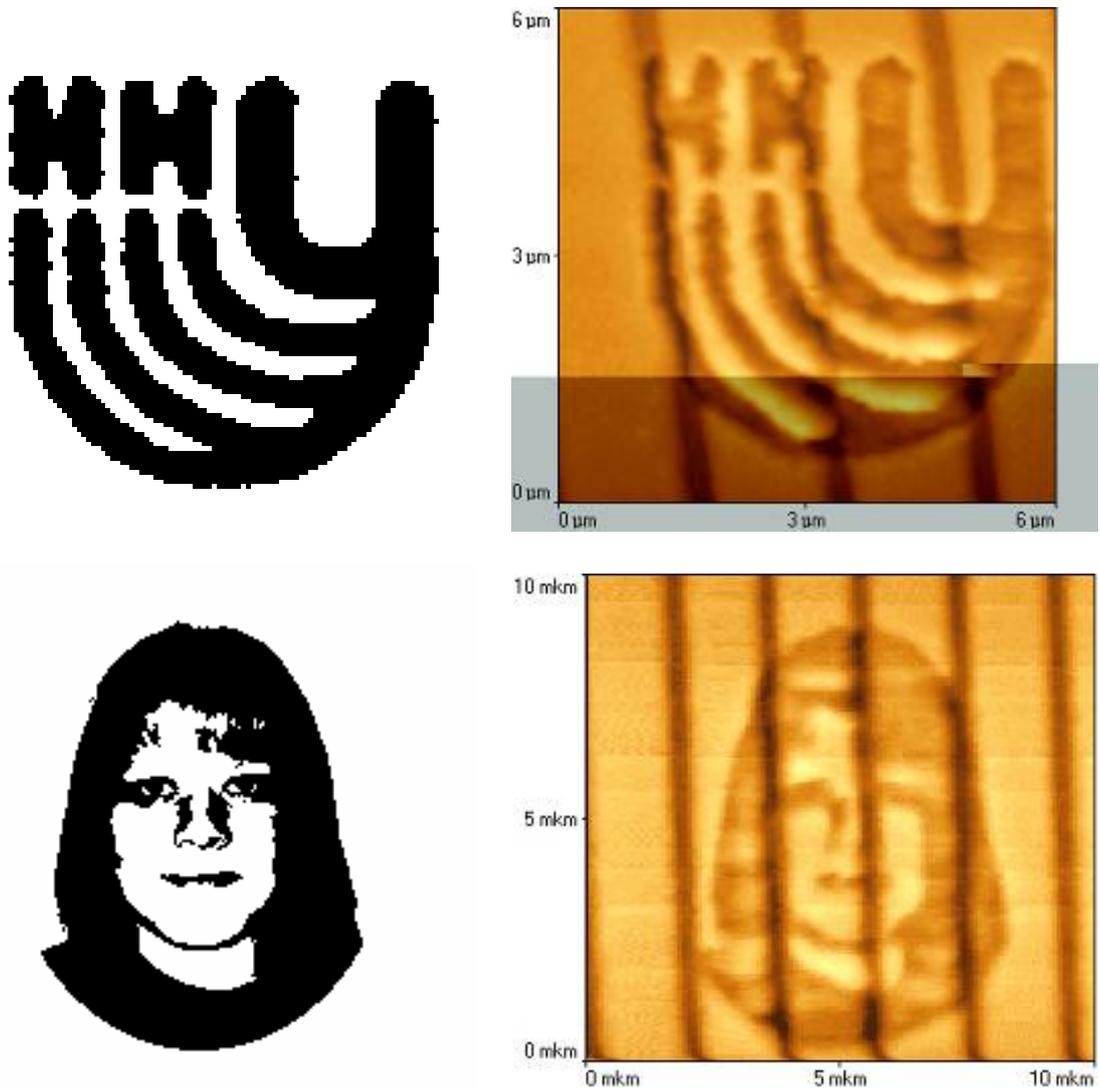


Рис. 5-11. Возможные варианты шаблонов (слева) и топография (справа) участка поверхности, на котором была выполнена литография на приборе NanoEducator

5.7. Контрольные вопросы

1. Сканирующий зондовый микроскоп как инструмент для считывания и записи информации. Расскажите о физических основах зондовой нанотехнологии.
2. Что такое сканирующая зондовая литография? Расскажите об основных ее видах.
3. Расскажите об особенностях динамической силовой литографии на приборе NanoEducator.
4. Назовите критерии выбора образцов для проведения динамической силовой литографии.

5.8. Литература

- Лит. 5-1. Никишин В.И., Лускинович П.Н. Нанотехнология и наноэлектроника // Электронная промышленность. – 1991, № 3, с. 4.
- Лит. 5-2. Неволин В.К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии. Учебное пособие – М.: МИЭТ, 2000 г.
- Лит. 5-3. Matsumoto K., Ishii M., Segawa K., Oka Y., Vartanian B.J., Harris J.S. Room temperature operation of single electron transistor made by the scanning tunneling microscope nanooxidation process for the TiO_x/TiO system. Appl. Phys. Lett., 68, 34 (1996).
- Лит. 5-4. Cooper E.B., Manalis S.R. Fang H., Dai H., Matsumoto K., Minne S.C., Hunt T., Quate C.F. Terabit-per-square-inch data storage with the atomic force microscope. Appl. Phys. Lett., 75, 3566 (1999).
- Лит. 5-5. Рамбиди Н.Г., Замалин В.Н. Молекулярная микроэлектроника: физические предпосылки и возможные пути развития // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1986, № 8, с. 5.
- Лит. 5-6. Неволин В.К. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии // Электронная промышленность. – 1993, № 10, с. 8.