

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет

Е. В. Волкова
И. Ю. Забавичев
С. В. Оболенский

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НЕМТ-СТРУКТУРЫ
МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ
МИКРОСКОПИИ**

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки

011800 «Радиофизика и электроника»

010400 «Информационные технологии»

654700 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем»

Нижний Новгород
2015

УДК 53.082, 538.95

ББК 32.85

В67

В67 Волкова Е.В., Забавичев И.Ю, Оболенский С.В. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПОУПРОВОДНИКОВОЙ НЕМТ-СТРУКТУРЫ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 17 с.

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент **А.С. Пузанов**

В пособии описаны физические принципы работы атомно-силового сканирующего зондового микроскопа. Изложена методика анализа топографии поверхности полупроводниковой структуры с использованием контактного способа измерений.

Практикум предназначен для студентов дневного отделения магистратуры радиофизического факультета ННГУ в качестве пособия при подготовке и проведении лабораторных работ по специализированному курсу «Сканирующая зондовая микроскопия».

Ответственный за выпуск:

председатель методической комиссии радиофизического факультета
ННГУ,

к.ф.-м.н., доцент **Н.Д. Миловский**

зам. председателя методической комиссии радиофизического факультета
ННГУ,

д.ф.-м.н., профессор **Е.З. Грибова**

УДК 53.082, 538.95

ББК 32.85

© Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что высокочастотные характеристики планарных приборов, активная область которых расположена вблизи границ раздела материалов полупроводниковой структуры, в частности, транзисторов с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor - НЕМТ), существенно зависит от качества этой границы, в том числе, от степени ее гладкости. В данной работе для анализа последней студентам предлагается освоить основы техники сканирующей зондовой микроскопии – одной из самых современных методик экспериментальных исследований поверхности полупроводниковых структур.

На самом деле термин «Сканирующая зондовая микроскопия» объединяет в себе достаточно большое количество методик исследования различных характеристик поверхности, спецификой которых является высокое (вплоть до атомарного) пространственное разрешение. Общим для всех сканирующих зондовых микроскопов, как следует из названия, является наличие зонда – иголки, остриё которой каким-либо образом взаимодействует с поверхностью, и прецизионного пьезоэлектрического сканирующего устройства, которое может перемещать зонд над образцом (или сам образец) в трех измерениях. Взаимодействие зонда с поверхностью может носить различный характер. Тип указанного взаимодействия определяет и тип зондового микроскопа (туннельный, атомно-силовой, магнитно-силовой, электро-силовой и др.). В предлагаемой лабораторной работе исследование топографии поверхности полупроводниковой структуры НЕМТ проводится с помощью атомно-силового сканирующего зондового микроскопа.

Данное методическое пособие предназначено для студентов магистратуры радиофизического факультета и является экспериментальной поддержкой специализированного курса лекций «Основы сканирующей зондовой микроскопии».

1.1. Структура транзисторов с высокой подвижностью электронов

Подробное описание физических принципов работы полевых транзисторов и, в частности, приборов НЕМТ, можно найти в соответствующем методическом пособии [1]. Здесь мы лишь кратко напомним основные понятия и формулы.

1.1.1 Контакт Шоттки

Как транзистор НЕМТ является трехэлектродным прибором и, следовательно, имеет в своей структуре три контакта между металлом и полупроводником. Среди них выпрямляющим является лишь управляющий контакт затвор-канал. Напомним, что выпрямляющим называется контакт с нелинейной ВАХ, аналогичной изображенной на рисунке 1.

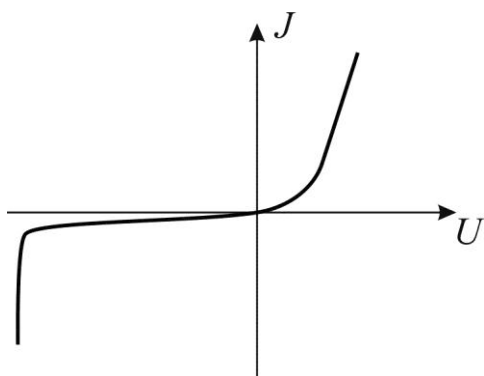


Рис. 1. ВАХ выпрямляющего контакта

Для получения выпрямляющего контакта между металлом и полупроводником n -типа работа выхода электронов из полупроводника должна быть меньше, чем из металла. В этом случае часть электронов переходит из полупроводника в металл, а в полупроводнике появляется обедненный слой, содержащий положительный заряд ионов доноров. Равновесное состояние характеризуется определенными значениями высоты потенциального барьера и толщины обедненного слоя, который целиком расположен в полупроводнике из-за предельно высокой концентрации свободных электронов в металле (рис. 2).

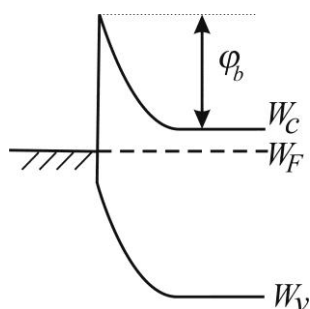


Рис. 2. Зонная диаграмма контакта металла и n – полупроводника в равновесном состоянии. Обозначения: φ_b – контактная разность потенциалов

При прямом смещении (“плюс” к металлу) энергетический барьер для электронов полупроводника снижается, что приводит к увеличению тока. При обратном напряжении ток определяется электронами, переходящими из металла в полупроводник. Для них барьер высок и почти не зависит от прикладываемого напряжения, поэтому ток обратно смещенного диода Шоттки незначителен по величине.

Аналитическое выражение для ВАХ имеет вид:

$$J = J_S \left[\exp \left\{ \frac{e(U - JR_{\bar{\sigma}})}{kT} \right\} - 1 \right],$$

$$J_S = A^* T^2 \exp \left\{ - \frac{e\varphi_b}{kT} \right\}.$$

Здесь j – плотность тока, k – постоянная Больцмана, U – внешнее напряжение, $A^* = 4\pi m^* e k^2 / h^3$, m^* – эффективная масса электронов, h – постоянная

Планка, $R_{\bar{\sigma}}$ – сопротивление базы,

Ширина области пространственного заряда (ОПЗ) контакта Шоттки задается выражением:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(U_k - U)}{eN_d}},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, N_d – концентрация доноров, U_k – контактная разность потенциалов, e – модуль заряда электрона.

1.1.2 Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов

Современный уровень развития технологии позволяет формировать в канале полевого транзистора двумерный электронный газ. Приборы с двумерным электронным газом, как упоминалось выше, принято называть транзисторами с высокой подвижностью электронов. Пример НЕМТ структуры приведен на рисунке 3.

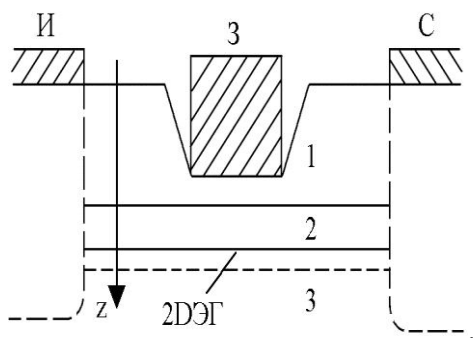


Рисунок 3. Пример структуры транзистора типа НЕМТ с полупроводниковыми слоями: 1 - n-AlGaAs, 2 - i-AlGaAs (спейсер), 3 - GaAs

Управление током исток-сток в таком транзисторе осуществляется за счет уменьшения (увеличения) заселенности энергетических уровней в потен-

циальной яме двумерного электронного газа при изменении напряжения на затворе.

Из-за меньшего, чем в трехмерном случае, рассеяния носителей заряда в двумерном канале подвижность и скорость электронов в активной области НЕМТ будет больше, чем в приборе классического типа. Поэтому основные характеристики НЕМТ транзисторов – крутизна, коэффициент усиления и шума – будут лучше.

Однако, все вышесказанное справедливо лишь при наличии качественных границ раздела материалов в многослойной полупроводниковой структуре. Даже шероховатости подложки могут существенно повлиять на параметры канала, а значит, и характеристики прибора, который будет сформирован на данной структуре. В нулевом приближении можно считать, что неоднородности канала повторяют неоднородности подложки.

1.1.3 Методика оценки тока стока транзистора

Подробный вывод зависимости тока стока от напряжений на затворе и стоке $J_c(U_{зи}, U_{си})$ представлен в соответствующем пособии [1]. В данной работе мы остановимся на методике оценки, не требующей решения дифференциального уравнения и не претендующей на высокую точность. Рабочую часть полевого транзистора можно представить в упрощенном виде (рис. 4):

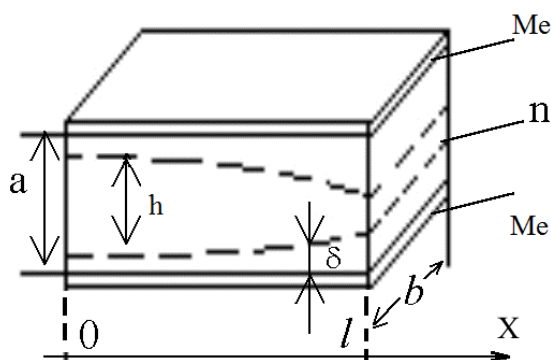


Рис. 4. Структура рабочей части полевого транзистора с двумя управляющими переходами Шоттки представляет собой «удвоенный» транзистор, как будто он зеркально отражен относительно канала

Плотность тока в канале:

$$j = e \cdot n \cdot V,$$

где e – модуль заряда электрона, n – концентрация носителей заряда, V – скорость носителей заряда. Для слабых полей (напряженностью менее 10^3 В/см) справедливо:

$$V = \mu \cdot E,$$

где μ – подвижность носителей заряда в канале, E – напряженность электрического поля.

Ток в канале, одинаковый в любом сечении, равен:

$$J_c = e \cdot n \cdot b \cdot h(x) \cdot V,$$

где b - ширина канала. Толщина канала h зависит от толщины обедненной области:

$$h = a - 2\delta.$$

Толщина ОПЗ зависит от поданного напряжения. Учитывая распределение потенциала в канале, возникающее из-за прохождения тока по каналу от истока к стоку, и пренебрегая U_K , получим:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{eN_d}(\varphi - U_{ЗИ})},$$

где $U_{ЗИ}$ - абсолютная величина разности потенциалов между затвором и истоком, ε - диэлектрическая проницаемость, ε_0 - диэлектрическая постоянная; e - абсолютная величина заряда электрона; N_d - концентрация примесей.

Для более компактной записи найдем $U_{ЗИ.отс.}$ из условия, что толщина около стока при этом напряжении равна нулю:

$$\delta = \frac{a}{2} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{eN_d}} |U_{ЗИ.отс.}|^{3/2},$$

$$|U_{ЗИ.отс.}| = \frac{eN_d a^2}{8\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Таким образом

$$h = a \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi - U_{ЗИ}}{|U_{ЗИ.отс.}|}} \right).$$

В результате

$$J_C = e \cdot nba \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi - U_{ЗИ}}{|U_{ЗИ.отс.}|}} \right) \cdot V.$$

1.2. Принцип работы атомно-силового микроскопа

Принцип работы атомно-силового микроскопа основан на регистрации силового взаимодействия между атомами (молекулами) образца и зонда [2].

Напомним, что если два атома находятся на достаточно большом расстоянии друг от друга, то между ними будет действовать сила притяжения, которая может иметь ориентационную, поляризационную, дисперсионную и др. природу. На малых расстояниях, когда электронные оболочки атомов начинают перекрываться, доминирующей становится сила отталкивания. При этом существует некоторое расстояние r_0 , при котором потенциальная энергия взаимодействия атомов имеет минимум, а система находится в равновесии (рис. 5). Качественно данная зависимость сохраняется и в случае взаимодействия зонда с образцом: на больших расстояниях они испытывают притяжение, а на малых – отталкивание.

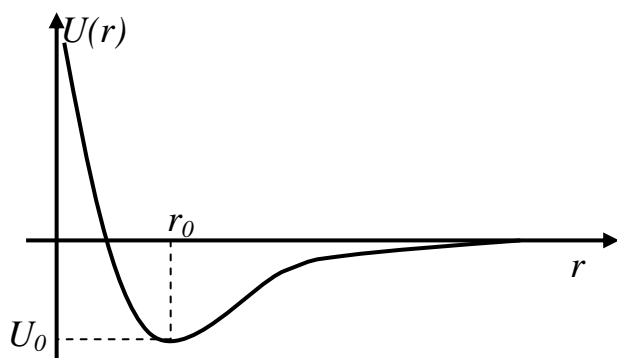


Рисунок 5. Качественный вид потенциала взаимодействия между двумя атомами, находящимися на расстоянии r друг от друга. r_0 – равновесное расстояние между атомами, U_0 – значение энергии в минимуме

Важно, что зависимость силы взаимодействия зонда с образцом от расстояния между ними является достаточно резкой. В сочетании с малым радиусом кривизны острия иглы-зонда (≤ 10 нм) и высокой точностью контроля его перемещений это обеспечивает очень высокое пространственное разрешение метода. Фактически, можно говорить о том, что основной вклад во взаимодействие зонда и образца вносят лишь несколько атомов, расположенных непосредственно на самом кончике иглы и под ней – на поверхности образца.

Для регистрации малых сил взаимодействия в АСМ используется специальный микромеханический зондовый датчик, который называют *кантилевером*. Он представляет собой упругую микроразмерную балку малой жесткости ($k \sim 0,01 \dots 10$ Н/м). Один конец балки закреплен в держателе, а на втором, свободном, конце находится пирамидальный зонд-игла (см. рис. 6). Длина кантилевера составляет $100 \dots 200$ мкм, ширина – $10 \dots 40$ мкм, а толщина – $0,1 \dots 5$ мкм.

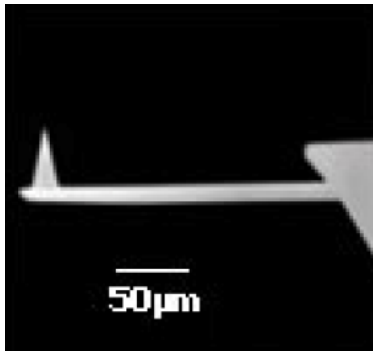


Рисунок 6. Электронно-микроскопическое изображение кантилевера

Сила, действующая на зонд со стороны образца, приводит к изгибу балки. При сканировании исследуемой поверхности рельеф под остриём изменяется, а значит, меняются сила взаимодействия и величина изгиба кантилевера. В итоге, регистрируя величину изгиба, можно сделать вывод о рельефе поверхности.

На рисунке 7 представлено схематическое изображение устройства АСМ.



Рисунок 7. Схематическое изображение АСМ

Степень отклонения кантилевера от положения равновесия регистрирует оптическая система, состоящая из лазера и позиционно-чувствительного фотодетектора, в качестве которого в современных устройствах выступает четырехсекционный фотодиод (А, В, С, D). Луч лазера направляется на кончик кантилевера и отражается от специально нанесенного микрозеркала. Отраженный луч детектируется фотоприемником (рис. 7). При этом изменение значений фототоков в секциях несет однозначную информацию о смещении луча, а, следовательно, о величине и направлении изгиба балки. С фотодиода выходной сигнал подается на электронный блок управления и далее в компьютер для формирования цифрового изображения, отражающего рельеф поверхности образца с нанометровым разрешением.

Для контролируемого перемещения зонда на очень малые расстояния используются пьезокерамические двигатели, принцип работы которых основан на обратном пьезоэффекте – изменении размеров пьезоэлектрика под действием электрического поля.

Существует большое разнообразие методов получения информации о рельефе поверхности с помощью методики атомно-силовой микроскопии. В данной работе для ознакомления предлагается проводить сканирование поверхности образца в контактных квазистатических режимах.

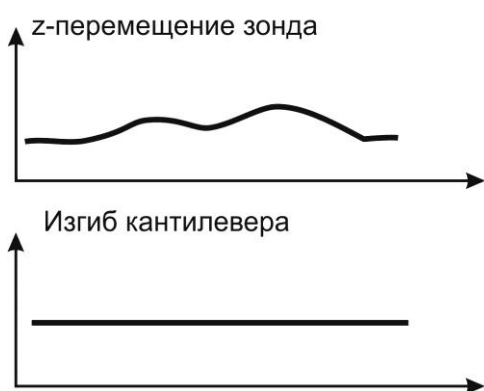
В контактных методиках остриё зонда находится в непосредственном соприкосновении с поверхностью, при этом силы отталкивания, действующие со стороны образца, уравниваются силой упругости консоли. Во избежание повреждения зонда и/или образца при работе микроскопа в таких режимах необходимо использовать кантилеверы с относительно малыми коэффициентами жесткости. В квазистатическом режиме АСМ изображение рельефа исследуемой поверхности формируется либо при постоянной силе взаимодействия зонда с поверхностью, либо при постоянном расстоянии между основанием зондового датчика и подложкой образца.

1.2.1 Метод постоянной силы взаимодействия

В режиме постоянной силы при сканировании образца система обратной связи поддерживает постоянной величину изгиба кантилевера, а, следовательно, и силу взаимодействия зонда с образцом (рис. 8). То есть при перемещении в следующую точку над поверхностью система обратной связи начинает отодвигать зонд (или, наоборот, приближать его), пока величина изгиба кантилевера не достигнет предустановленного значения, которое задается оператором. В такой ситуации управляющее напряжение, подающееся на электрод пьезосканера, пропорционально рельефу поверхности образца [3].



Рисунок 8. Схема движения кантилевера в методике постоянной силы взаимодействия между зондом и поверхностью



Основным недостатком методики является существенное ограничение скорости сканирования временем отклика системы обратной связи. Кроме того, при исследовании относительно мягких неоднородных материалов локальный

прогиб поверхности образца меняется в процессе сканирования, что приводит к искажениям получаемого рельефа поверхности. Возможное наличие существенных капиллярных сил, обусловленных наличием слоя воды при измерении в атмосфере, также приводит к ухудшению разрешения.

1.3.2. Метод постоянной высоты

При исследовании заведомо гладких образцов с малыми (порядка единиц ангстрем) перепадами высот рельефа можно использовать режим сканирования при постоянном расстоянии между основанием зондового датчика и подложкой. В этом случае держатель кантилевера движется на некоторой постоянной высоте над подложкой образца (рис. 9), при этом в каждой точке регистрируется изгиб консоли, пропорциональный силе, действующей на зонд со стороны поверхности. АСМ изображение в этом случае характеризует пространственное распределение силы взаимодействия зонда с поверхностью.

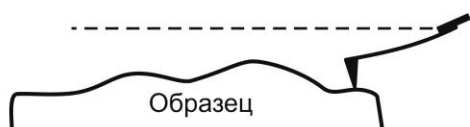
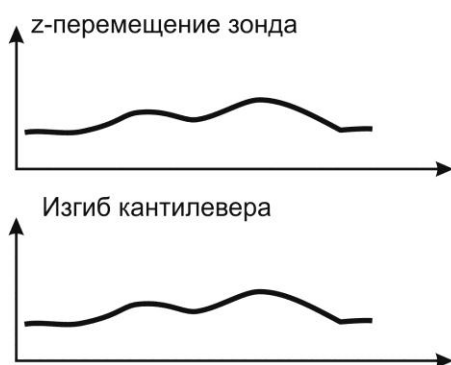


Рисунок 9. Схема движения кантилевера в методе постоянного расстояния между зондом и подложкой («методе постоянной высоты»)



Основным достоинством метода постоянной высоты является высокая скорость сканирования. Практически, она ограничивается только резонансными свойствами кантилевера.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Описание экспериментальной установки

Анализ топографии поверхности полупроводниковой структуры проводится на СЗМ Solver-Pro фирмы NT-MDT[4]. Фотография универсальной измерительной головки приведена на рисунке 10.

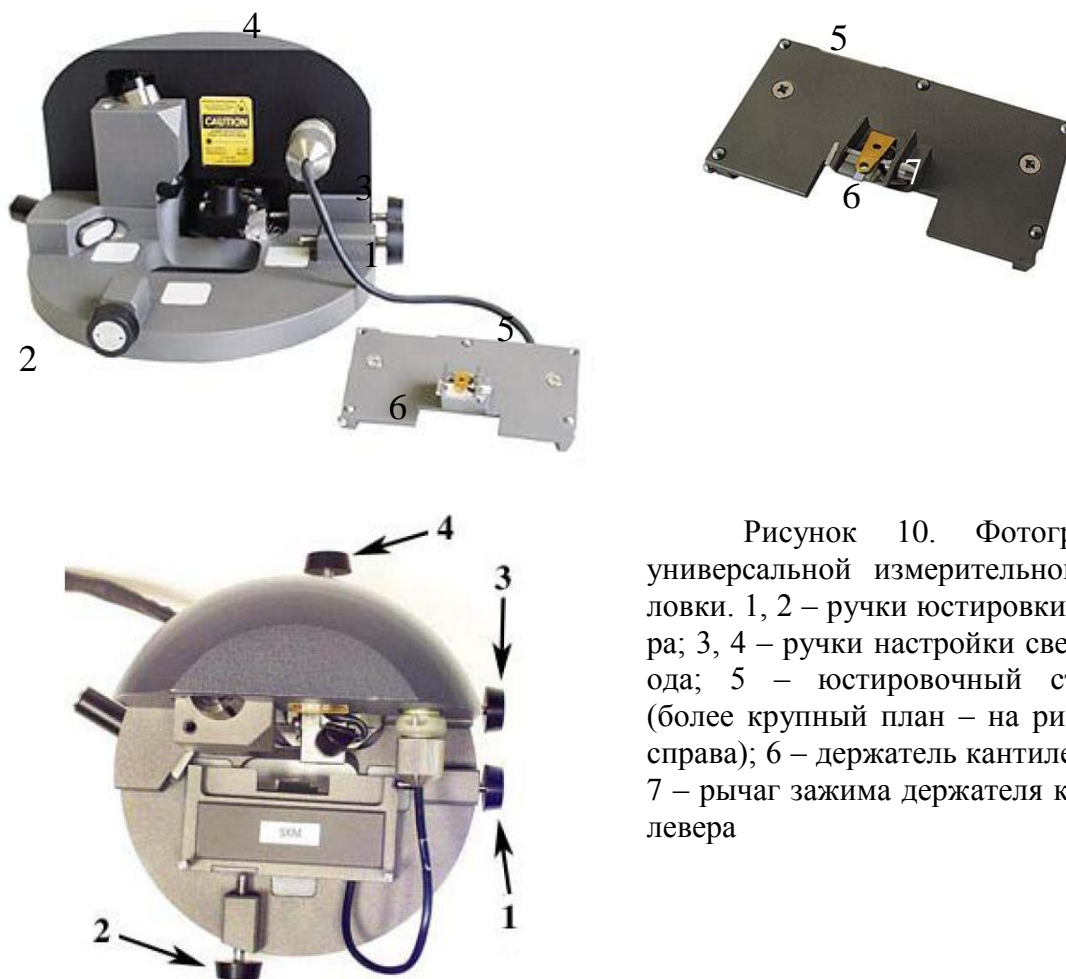


Рисунок 10. Фотография универсальной измерительной головки. 1, 2 – ручки юстировки лазера; 3, 4 – ручки настройки светодиода; 5 – юстировочный столик (более крупный план – на рисунке справа); 6 – держатель кантилевера; 7 – рычаг зажима держателя кантилевера

Величина вертикальных смещений кантилевера измеряется с помощью оптической системы регистрации и преобразуется в электрический сигнал DFL. В контактных методах значение сигнала DFL прямо пропорционально силе взаимодействия.

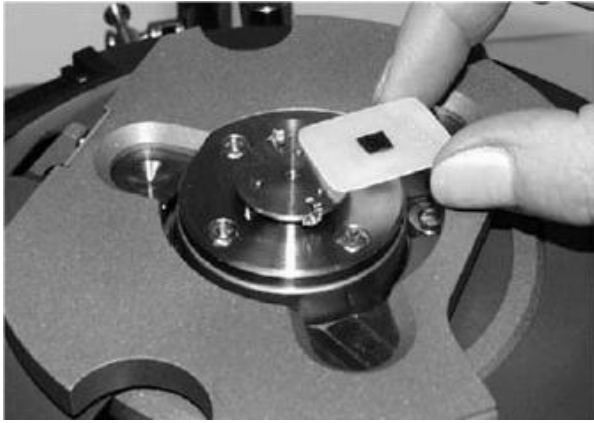


Рис. 11. Установка подложки с образцом на измерительный столик



PHOTODIODE	
VER DFL	0.0
LAT DFL	-0.0
LASER	33.9

Рис. 12. Схема юстировки оптической системы контроля положения зонда

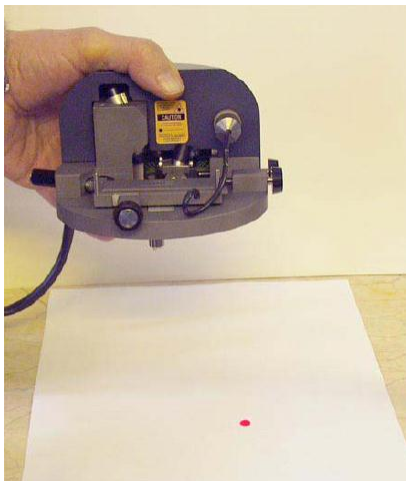




Рис. 13. Основные блоки атомно-силового микроскопа

Установка включает в себя следующие составные элементы (рис. 13):

измерительный блок:

- блок подвода и сканирования;
- измерительная головка;
- сканер;
- платформа с виброизолирующей системой;
- защитный колпак (не изображен на рисунке);

система управления:

- СЗМ контроллер;
- компьютер с интерфейсной платой.

Основные этапы измерений (см. рис. 10-13):

1. Закрепите образец на подложке. Вставьте подложку в держатели образца (рис. 11).

2. Вставьте кантилевер в держатель и закрепите, нажав пинцетом на рычаг 7 (рис. 10).

3. Загрузите программу S47. Включите прибор. Программными средствами включите лазер и фотодиод.

4. Вращая ручки 1, 2 добейтесь, чтобы лазерный луч отражался от кончика кантилевера. При этом от прошедшего луча формируется характерная дифракционная картина, увидеть которую можно, приподняв измерительную головку над плоскостью (рис. 10).

5. Ручками 3, 4 настройте фотодиод так, чтобы лазерное пятно одинаково засвечивало все 4 части фотодиода (т.е. чтобы оно находилось в центре). При этом сигналы VER DFL и LAT DFL должны быть равны нулю. Ручками 1, 2 подстройте лазер: добейтесь максимального значения сигнала Laser, следя за тем, чтобы луч оставался на кончике кантилевера.

6. С помощью ручки 3 добейтесь отрицательного значения VER DFL равного ~ -10 .

7. В окне программы S47 задайте значение Set Point равным половине значения VER DFL (Operation -> Scanning -> Set Point).

8. Включить систему обратной связи. Это можно сделать двумя способами: либо в меню, описанном в пункте 7, либо в верхней панели рядом с индикатором сканера «нажать» виртуальную кнопку FB.

9. Подвести образец к сканеру. Для этого выбрать Operation -> Approach -> Landing. Образец будет подводиться к зондовому устройству с заданной скоростью, пока значение VER DFL не станет равным параметру Set Point.

10. Запустить процедуру сканирования. Для этого в левой панели меню выбрать Scan -> Run.

2.2. Задания

1. Ознакомьтесь с основными блоками АСМ (блок управления, компьютер, рабочая головка, трансляционный столик).
2. Ознакомьтесь с устройством рабочей головки АСМ. Найдите регулировочные винты настройки лазера и фотодетектора, держатель кантилевера.
3. С помощью преподавателя подготовьте оборудование к проведению измерений, как описано в пункте 2.1.
4. С помощью преподавателя снимите АСМ-изображения поверхности НЕМТ-структуры для размеров кадра 0.1×0.1 мкм, 10×10 мкм в режимах постоянной силы и постоянной высоты.
5. Проведите первичную цифровую обработку полученных АСМ изображений: удаление постоянной составляющей и постоянного наклона, медианную фильтрацию.
6. Вычислите дисперсию изображения поверхности.
7. Оцените величину отклонения тока стока транзистора.

2.3. Контрольные вопросы к лабораторной работе

1. Структура транзистора с высокой подвижностью электронов.
2. Общие принципы работы сканирующих зондовых микроскопов. За счет чего обеспечивается высокое разрешение?
3. Взаимодействие зонда с исследуемой поверхностью в случае атомно-силовой микроскопии.
4. Принцип организации оптического датчика смещений.
5. Основные методики получения АСМ-изображений в контактном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю.А. Битюрин, С.В. Оболенский, А.П. Чириманов, Н.В. Демарина, Е.В. Киселева, А.П. Шитвов. Измерение статических характеристик полевого транзистора – Описание к лабораторной работе. Н.Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского. –2004. – 32 с.
2. В. Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Н.Новгород: ИФМРАН. – 2004. – 114 с.
3. С. А. Рыков. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур. СПб: Наука. – 2001. – 53 с.
4. Программа управления СЗМ – Справочное руководство. Москва, НИИФП, ЗАО «НТ-МДТ»

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НЕМТ-СТРУКТУРЫ
МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

Составители:

Екатерина Валерьевна **Волкова**,
Илья Юрьевич **Забавичев**
Сергей Владимирович **Оболенский**.

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Нижегородский государ-
ственный университет им. Н.И. Лобачевского».

603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л.

Заказ № . Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Нижегородского госуниверситета
им. Н.И. Лобачевского

603600, г. Нижний Новгород, ул. Большая Покровская, 37