

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского

Национальный исследовательский университет

Учебно-научный и инновационный комплекс  
"Новые многофункциональные материалы и нанотехнологии"

Круглов А.В.

# **АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ САМООРГАНИЗОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР**

(Описание лабораторной работы)

Мероприятие 2.2. Развитие сетевой интеграции с ведущими университетами страны, научно-исследовательскими институтами Российской академии наук, предприятиями-партнерами, создание новых форм взаимодействия

Учебные дисциплины: «Сканирующая зондовая микроскопия»

Специальности, направления: «Физика», «Нанотехнология», «Нанотехнология в электронике», «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы», «Электроника и наноэлектроника»

УДК 53.086, 538.9

ББК 22.3с

К-84

К-84 Круглов А.В.. **Атомно-силовая микроскопия самоорганизованных полупроводниковых наноструктур: Описание лабораторной работы.** – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2010. – 21 с.

Одним из приоритетных направлений науки в настоящее время являются исследования в области принципиально новых материалов со структурой нанометрового масштаба. Эти материалы составляют основу для создания твердотельных электронных и оптоэлектронных приборов нового поколения для систем оптоволоконной связи, нанoeлектроники, телекоммуникаций, квантовых компьютеров. Особенно пристального внимания заслуживают структуры, выращивание которых возможно с использованием механизма самоорганизации. Поскольку механизм самоорганизации позволяет получать массивы практически бездефектных нанообъектов, с ним связан качественный прорыв в создании низкоразмерных структур.

Для создания приборов нано- и оптоэлектроники с заранее заданными свойствами, необходимо знание закономерностей, связывающих условия формирования, структуру, состав и свойства твердотельных наноструктур. Большинство данных о структуре наноструктурированных материалов в последнее время получают методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), в частности методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Данная лабораторная работа входит в Учебно-методический комплекс работ по сканирующей зондовой микроскопии, проводящихся в лаборатории СЗМ Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур».

Описание лабораторной работы представляет собой изложение проблемы исследования структуры самоорганизованных полупроводниковых наноструктур методом АСМ. Приводится описание свойств квантоворазмерных структур, методов получения самоорганизованных полупроводниковых наноструктур, а также методики АСМ измерений наноструктурированных объектов и численной характеристики полученных изображений.

Описание лабораторной работы предназначено для студентов, обучающихся по специальности 210601 - нанотехнология в электронике, бакалавров и магистров, обучающихся по направлению подготовки 210600 - нанотехнология, аспирантам, слушающим курсы по сканирующей зондовой микроскопии и проводящим самостоятельные исследования.

УДК 53.086, 538.9

ББК 22.3с

© Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, 2010

## Введение

Последняя треть прошлого века и начало нынешнего проходят под знаком все возрастающего влияния электроники на общество. Сложно себе представить жизнь современного человека без бытовой техники, аудио и видео систем, мобильных телефонов и компьютеров. Это связано с небывалыми достижениями областей техники, целиком базирующихся на полупроводниковой микроэлектронике.

А между тем еще в 1965 году (через шесть лет после изобретения интегральной схемы) американский ученый, основатель корпорации Intel, Гордон Мур сформулировал эмпирическое наблюдение, широко известное теперь как закон Мура – «Число транзисторов на кристалле микросхемы удваивается каждые два года». Происходит это, в первую очередь, за счет уменьшения размеров транзисторов и других элементов микросхемы. Удивительно, но вплоть до настоящего времени не наблюдается замедления этого темпа роста, и закон Мура остается справедливым. Современные заводы по производству процессоров производят элементы микросхем на базе 45-нм технологического процесса, причем предсказывают уменьшение отдельных элементов до 30 нм. Это тот фундаментальный предел, за которым начинается нанoeлектроника, и в полной мере начинает появляться квантоворазмерный эффект.

Эффект размерного квантования состоит в том, что ограничение движения частицы в пространстве в каком-либо направлении стенками потенциальной ямы приводит к квантованию соответствующей компоненты ее кинетической энергии: она перестает изменяться непрерывно, как в классической механике, а принимает только строго определенные дискретные значения.

Согласно квантовой механике, не только волны проявляют свойства частиц, как впервые предположил М. Планк, но и микрочастицы проявляют волновые свойства, которые характеризуются длиной волны частицы  $\lambda_c = h/(2m_c E)^{1/2}$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $m_c$  – эффективная масса частицы,  $E$  – ее кинетическая энергия. Эффект размерного квантования становится существенным, когда ширина потенциальной ямы  $d$  соизмерима с  $\lambda_c$ , составляющей от 3 до 30 нм. Нанометровый масштаб и определяет характерный размер структур, в которых проявляется размерное квантование. От него и произошло название электроники таких структур – нанoeлектроника.

Дискретный энергетический спектр частиц в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме (ограниченной по оси  $z$  размером  $d$ ) имеет наиболее простой вид:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_c d^2} n^2, \quad (1)$$

где  $\hbar = h/2\pi$ ,  $n$  – квантовое число, принимающее целочисленные значения 1, 2, 3, ...

Выражение (1) определяет квантовые положения дна подзон с непрерывным для движения в плоскости  $x, y$  энергетическим спектром. Хотя подобная модель потенциальной ямы не обеспечивает необходимой точности расчетов энергетического спектра реальных квантовых объектов, она правильно передает его основные качественные особенности.

В базовой работе\* ещё в 1968 году предсказывалось: размерное квантование может приводить к заметному увеличению ширины запрещенной зоны в полупроводниках и к переходу полуметалла в диэлектрик, к появлению резонансного поглощения света в пленках, к осцилляционной зависимости сопротивления пленки от продольного электрического поля и т. д.

Все эти, и многие другие, теоретически предсказанные особенности квантоворазмерного эффекта были впоследствии продемонстрированы экспериментально. Подлинный бум в этой области начался в 1980-х годах, когда технологи научились контролируемо выращивать на поверхности кристаллов одних полупроводников совершенные монокристаллические слои других полупроводников (гетеропереход) толщиной всего в несколько слоев атомов, т.е. порядка нанометра, и создавать неоднородные структуры (гетероструктуры) с такими слоями. Центральным объектом исследования стали гетеронаноструктуры с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми сверхрешетками из таких ям на основе арсенида галлия и его твердых растворов ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ) разного состава  $x=0,1-1$ . С начала 1990-х годов интерес исследователей переместился на гетероструктуры с квантовыми точками (КТ), особенно после того, как была продемонстрирована возможность самоорганизованного роста КТ.

Увидеть нанообъекты в обычный оптический микроскоп невозможно, т.к. их размеры значительно меньше длины волны видимого света. Для их исследования могут применяться методы электронной микроскопии, однако наибольших результатов в последнее десятилетие удалось получить с использованием методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), в частности метода атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Метод АСМ, подобно механическому профилометру, основан на использовании механического зонда для получения увеличенного изображения поверхности. Этим методом можно получать трехмерное изображение (проводить измерения как в плоскости образца, так и по высоте) на воздухе, в жидкости и в вакууме с разрешением вплоть до атомного. В тоже время, применительно к исследованию полупроводниковых наноструктур, размеры которых сравнимы с радиусом зонда (составляющим от 5 до 50 нм), для правильной количественной интерпретации полученных результатов необходимо учитывать влияние формы зонда. Эффект

---

\* Тавгер Б.А., Демиховский В. Я. Квантовые размерные эффекты в полупроводниковых и полуметаллических пленках. - Успехи физических наук, 1968, т. 96, с. 61-86.

конволюции проявляется в том, что получаемое АСМ изображение всегда представляет собой свертку реальной топографии поверхности и формы АСМ зонда.

**Цели работы:**

1. Изучение свойств и методов получения самоорганизованных полупроводниковых наноструктур;
2. Получение АСМ изображения структур с самоорганизованными КТ (GeSi/Si, Si на сапфире, InAs/GaAs);
3. Обработка и численная характеристика полученных АСМ изображений с целью определения размеров саморганизованных КТ.

Отчет по работе должен содержать общие сведения об объекте исследования и методе АСМ измерений. В практической части необходимо отразить полученные навыки обработки и анализа экспериментальных результатов.

## Эффект размерного квантования и типы квантовых наноструктур

Как было сказано во введении, квантово-размерный эффект – это эффект связанный с дискретизацией энергии носителей заряда, движение которых ограничено в области локализации  $d$ , соизмеримой с длиной волны  $\lambda_c$ . Среди низкоразмерных структур можно выделить три элементарные структуры – это квантовые ямы, квантовые нити (или проволоки) и квантовые точки (рис. 1). Эти элементарные структуры представляют собой кристаллический материал, пространственно ограниченный в одном, двух и трех измерениях соответственно.

Пространственное ограничение приводит к тому, что энергетический спектр объемного материала трансформируется. Зонные спектры расщепляются на подзоны размерного квантования для квантовых ям и нитей и на дискретные уровни для квантовых точек (рис. 2).

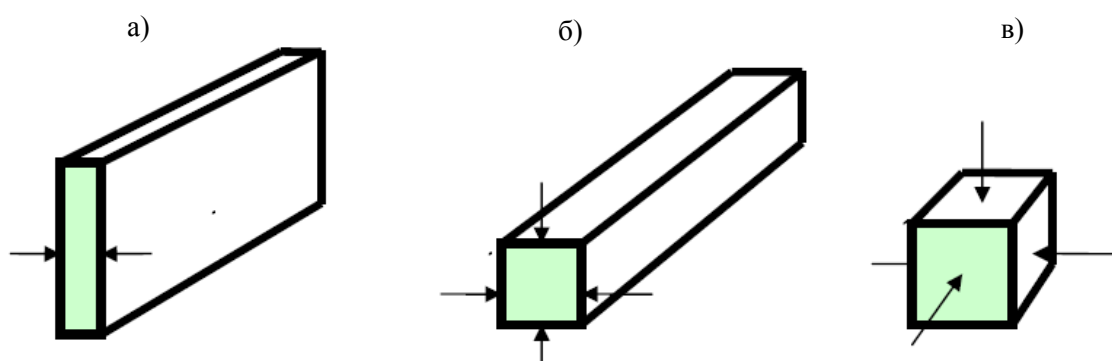


Рис. 1. Схематическое изображение: а) квантовой ямы, б) квантовой нити, в) квантовой точки.

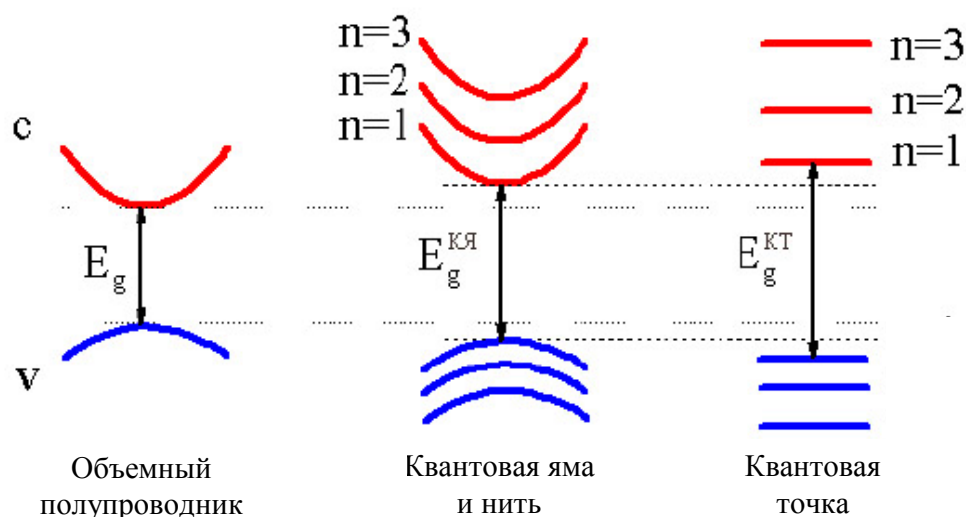


Рис. 2. Трансформация энергетического спектра в наноструктурах.

Квантовые ямы создают на основе гетероструктур, помещая тонкий слой полупроводника с узкой запрещенной зоной между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной. В результате электроны оказываются запертыми в одном направлении, что и приводит к квантованию энергии поперечного движения. В то же время в двух других

направлениях движение электронов будет свободным, поэтому можно сказать, что электронный газ в квантовой яме становится двумерным. В квантовой нити носители заряда ограничены в двух направлениях и свободно перемещаются только вдоль оси проволоки, образуя одномерный электронный газ. В квантовой точке движение носителей ограничено в трех направлениях и энергетический спектр полностью дискретный, как в атоме. Поэтому квантовые точки называют еще искусственными атомами, хотя каждая такая точка состоит из тысяч или даже сотен тысяч настоящих атомов.

### **Методы получения квантоворазмерных наноструктур**

Прогресс в экспериментальном изучении физических свойств квантоворазмерных структур тесно связан с развитием технологии их получения. Изготовление наноструктур в большинстве случаев требует создания полупроводниковых гетеропереходов с необходимыми свойствами. Для этого, прежде всего, необходимо подобрать подходящую пару полупроводниковых материалов.

Для создания структур с КЯ основным условием является требование равенства постоянных решетки у обоих полупроводников. Нарушение этого условия может привести к образованию высокой плотности дислокаций несоответствия вблизи гетерограницы, что резко ухудшает свойства переходов и делает невозможным наблюдение эффектов размерного квантования.

Гетеропереход  $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  наиболее часто используют для изготовления квантово-размерных структур. Эти материалы обладают хорошим согласием решеток при любом составе твердого раствора и потому позволяют создавать гетеропереходы с различными разрывами зон на границе.

Другим важным требованием к технологии является возможность получения сложных профилей состава и легирования. При изготовлении тонких КЯ и сверхрешеток из ям необходимо строго контролировать состав растущего слоя, причем для сверхрешеток период изменения может составлять лишь несколько десятков ангстрем. При выращивании  $\delta$ -слоев и структур с модулированным легированием необходимо со столь же высокой точностью менять концентрацию легирующих примесей.

Далеко не всякая эпитаксиальная технология удовлетворяет приведенным требованиям. В настоящее время наиболее часто для изготовления качественных гетероструктур применяют методы молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений.

### Молекулярно-лучевая эпитаксия.

Молекулярно-лучевая или молекулярно-пучковая эпитаксия (МВЕ – Molecular Beam Epitaxy) представляет собой усовершенствованную разновидность метода термического напыления материалов в условиях сверхвысокого вакуума. Идею метода МВЕ можно пояснить с помощью блок-схемы технологической установки, изображенной на рис. 3. Потoki атомов или молекул создаются в зоне генерации (I) за счет испарения жидких или сублимации твердых материалов, помещенных в эффузионные<sup>†</sup> ячейки (источники). Потoki атомов (молекул) направляются на подложку, проходя зону смешивания (II), и осаждаются на ней в зоне роста (III), образуя пленку из вещества требуемого состава.

Температура эффузионной ячейки определяет величину потока частиц, поступающих на подложку, и поэтому тщательно контролируется. Управление составом выращиваемого материала и концентрацией легирующих примесей осуществляется с помощью заслонок, которые перекрывают тот или иной поток частиц. Если при выращивании структуры нужно резко менять концентрацию одной и той же примеси, то используют несколько эффузионных ячеек с легирующим веществом, нагретых до различных температур. Однородность состава пленки по площади и ее кристаллическая структура определяется однородностью молекулярных пучков. Для повышения однородности, во многих случаях, подложка с растущей пленкой постоянно вращается.

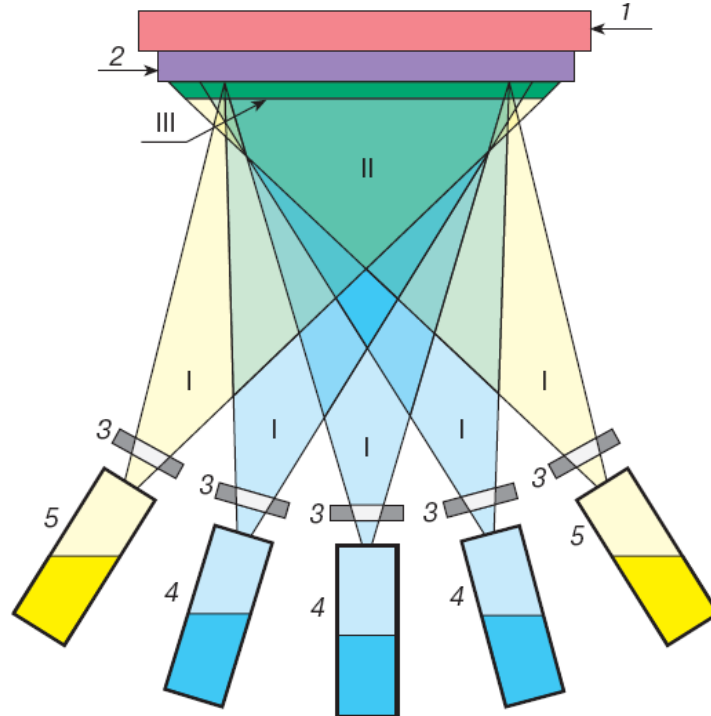


Рис. 3. Схема МВЕ установки: 1 – подложка, 2 – растущая пленка, 3 – заслонки, 4 – эффузионные ячейки основных компонентов, 5 – эффузионные ячейки легирующих примесей; I – зона генерации молекулярных пучков, II – зона смешивания пучков, III – зона кристаллизации на подложке (зона роста).

<sup>†</sup> Эффузия – медленное истечение газов через малые отверстия, исследованное в 1911 году датским физиком М. Кнудсеном.



### Газофазная эпитаксия.

Эпитаксиальный рост материалов путем осаждения на подложку продуктов термического разложения (пиролиз) молекул органических газов, содержащих необходимые химические элементы, называется методом осаждения металлоорганических соединений из газообразной фазы (MOCVD – Metalorganic Chemical Vapour Deposition). В отличие от MBE при MOCVD рост происходит не в вакууме, а в присутствии газа при умеренных давлениях. При комнатных температурах металлоорганические соединения находятся в жидком или даже твердом состоянии. Поскольку эти вещества, как правило, имеют высокое давление паров, их можно легко доставить в зону химической реакции путем продувки газа носителя через жидкости или над твердыми телами, играющими роль источников. В качестве газа носителя используют водород или инертные газы (гелий, аргон). Идею метода MOCVD можно проиллюстрировать с помощью рис. 4, схематически изображающего реактор, в котором происходит эпитаксиальный рост структуры.

Кристаллизация материала на нагретой подложке, расположенной в реакторе с холодными стенками, осуществляется при пропускании над ней однородной газовой смеси реагентов с газом-носителем. В результате пиролиза, при котором газообразные соединения разлагаются на компоненты на горячей поверхности, образуется стабильное твердое полупроводниковое соединение. Методом MOCVD могут быть последовательно выращены многослойные, многокомпонентные эпитаксиальные структуры в едином ростовом цикле, поскольку к реактору можно подключить несколько источников различных материалов и изменять состав газовой смеси в реакторе.

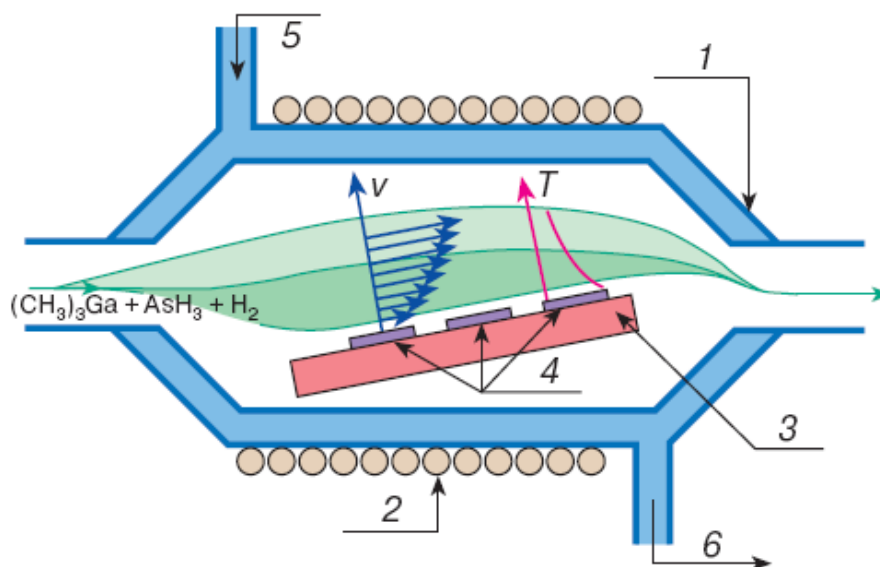


Рис. 4. Схема горизонтального реактора открытого типа с охлаждаемыми стенками для MOCVD: 1 – кварцевый корпус, 2 – катушка высокочастотного генератора для нагревания подложки, 3 – блок нагревания, 4 – подложки, 5 – водяное охлаждение (впуск), 6 – водяное охлаждение (выпуск). Схематически показано распределение скоростей  $V$  и температуры  $T$  в газовой смеси в диффузионном слое вблизи подложки.

## Самоорганизованное формирование полупроводниковых наноструктур

Совершенствование методов молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии позволило технологам еще в 1980-х годах контролируемо выращивать тонкие слои полупроводника с узкой запрещенной зоной между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной, создавая, таким образом, структуры с квантовыми ямами (КЯ) и сверхрешетками из КЯ (рис. 5).

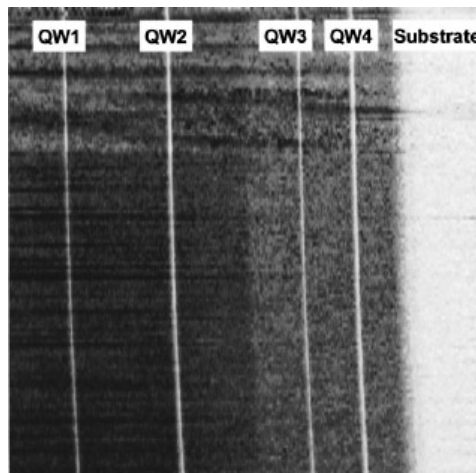


Рис. 5. Изображение структуры выращенной методом MOCVD с четырьмя КЯ  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ , полученное на поперечном сколе структуры с помощью микроскопии сопротивления растекания, одной из разновидностей метода СЗМ. Размер скана –  $3,5 \times 3,5$  мкм. (K.Maknys et al. – APL, 2003, v. 83, № 11, pp. 2184-2186).

Первые попытки получения квантовых нитей (КН) и квантовых точек (КТ) заключались в использовании литографической техники высокого разрешения для непосредственного «вырезания» на структуре с КЯ узкой полоски или области в форме круга с размером порядка 100-500 нм. Однако естественные ограничения оптической литографии не дали развития подобной техники для получения истинных квантоворазмерных структур.

Настоящий прорыв в этой области произошел около 20 лет назад, когда выяснилось, что существует природный процесс самоорганизации твердотельных наноструктур. В основе процесса самоорганизации лежит свойство неравновесных физических систем при приближении к термодинамическому равновесию переходить в состояние с минимальной свободной энергией.

Представим себе, что каким-либо из методов, описанных выше, на поверхность монокристалла из материала А (подложка) осаждается тонкий однородный слой материала В. Если температура и время выдержки системы обеспечивают установление термодинамического равновесия, то в слое В возникает атомная структура и он принимает форму, при которой свободная энергия системы будет минимальна. Важнейшими факторами, определяющими направление и конечный результат процесса самоорганизации является рассогласование постоянных решеток А и В, создающих упругие напряжения в системе и

повышающие ее внутреннюю энергию, а так же толщина слоя, величины свободной энергии поверхности подложки, границы раздела и осаждаемого слоя, граней и ребер кристаллических кластеров, которые могут образоваться, и некоторые другие. Как показывают теоретические расчеты, при определенных значения параметров может образовываться однородный по структуре и толщине слой материала В, повторяющий структуру подложки (эпитаксиальный слой). При других значениях параметров может оказаться энергетически более выгодным, чтобы материал В образовал массив напряженных трехмерных кластеров определенных размеров и формы или собрался в один большой кластер.

Экспериментально уже давно было установлено, что при осаждении из паровой фазы наблюдаются три типа начальной стадии роста слоя на подложке (рис. 6, *а–в*):

*а*) послойный (двумерный) рост слоя по механизму Франка – ван дер Мерве. Он происходит, если материал В «смачивает» подложку, т.е. обладает большим сцеплением с ней, и его постоянная решетки мало отличается от постоянной решетки материала А;

*б*) островковый (трехмерный) рост слоя по механизму Фольмера – Вебера. Он имеет место при плохом смачивании;

*в*) промежуточный механизм роста по механизму Странски – Крастанова, когда сначала происходит послойный рост слоя В, который при некоторой толщине смачивающего слоя сменяется островковым ростом. Этот механизм наблюдается при наличии смачивания и значительном рассогласовании решеток А и В (несколько процентов).

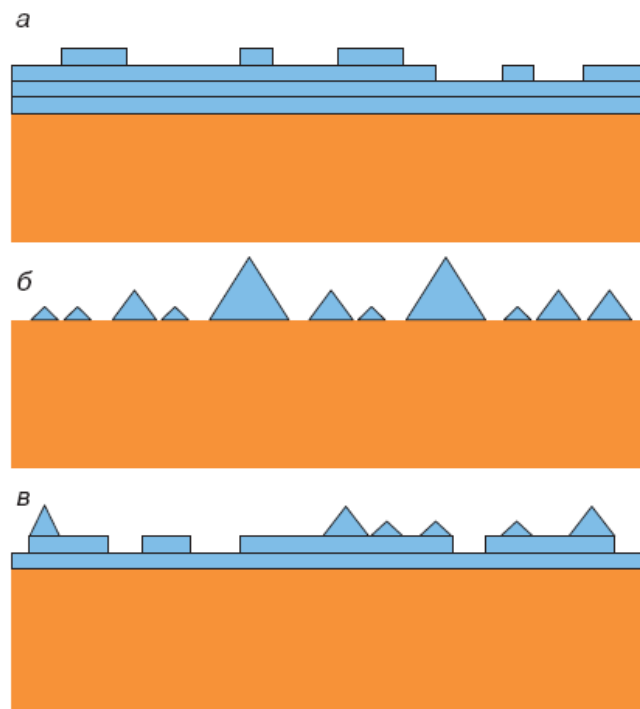


Рис. 6. Механизмы самоорганизованного роста тонкого слоя на поверхности подложки: *а* – механизм Франка – ван дер Мерве, *б* – механизм Фольмера – Вебера, *в* – механизм Странски – Крастанова.

Механизм Странски – Крастанова широко используется для создания массивов когерентных нанокластеров, обладающих дискретным (0-мерным) энергетическим спектром (квантовых точек) на основе Ge/Si и полупроводников  $A_3B_5$  (рис. 7). Особенностью механизма Странски – Крастанова является однородность размеров квантовых точек и образование правильной прямоугольной решетки из КТ в плоскости растущего слоя.

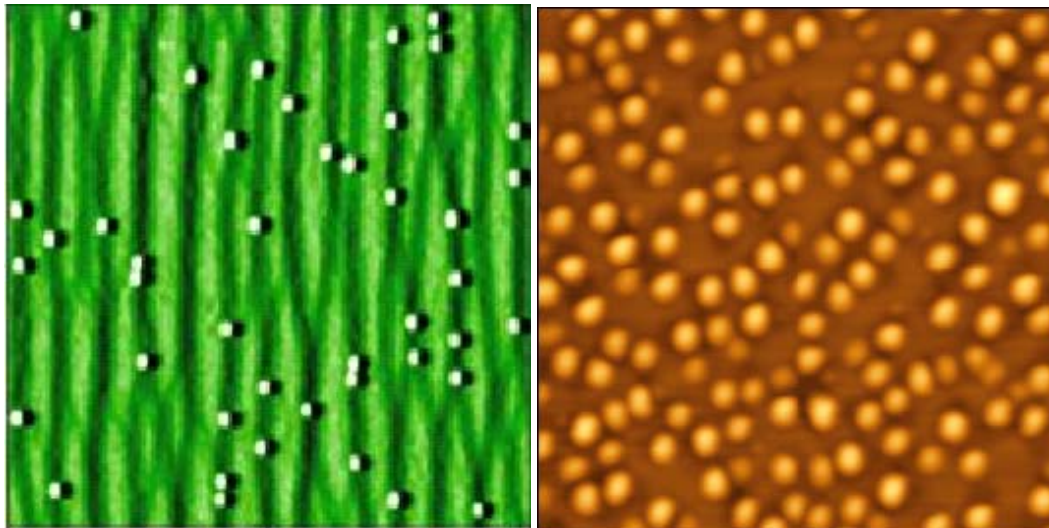


Рис. 7. АСМ изображение самоорганизованных по механизму Странски – Крастанова КТ InAs/GsAs (слева) и  $Ge_{0,6}Si_{0,4}/Si$  (справа), полученные в лаборатории СЗМ НОЦ ФТНС. Размеры сканов –  $2,5 \times 2,5$  мкм.

Также было установлено, что при выращивании многослойных структур с массивами КТ, кластеры в первом слое создают поле упругих напряжений, передающееся сквозь спейсерный слой на значительное расстояние (до 20 нм). Оно стимулирует формирование КТ в последующих слоях точно над вершинами кластеров первого слоя (Рис. 8). Это открывает возможности формирования трехмерных упорядоченных систем КТ (так называемых «суперкристаллов»).

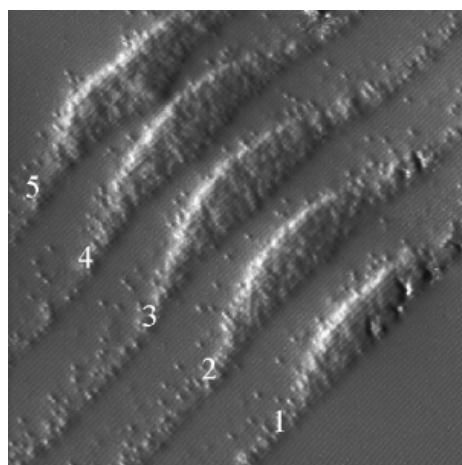


Рис. 8. Изображение массива вертикальносвязанных квантовых точек InAs/GaAs, полученное на поперечном сколе структуры методом сканирующей туннельной микроскопии, одним из разновидностей метода СЗМ. Размер скана –  $0,3 \times 0,3$  мкм. (D.M.Bruls at al. – APL, 2003, v. 82, № 21, pp. 3757-3760).

### Атомно-силовая микроскопия самоорганизованных полупроводниковых наноструктур

Метод атомно-силовой микроскопии, подобно механическому профилометру, основан на использовании механического зонда для получения изображения поверхности. Традиционным датчиком силового взаимодействия является кремниевая микробалка, консоль или кантилевер (от англ. cantilever) с оптической схемой регистрации величины изгиба кантилевера, возникающего вследствие силового взаимодействия между образцом и зондом, расположенным на конце кантилевера (рис. 9).

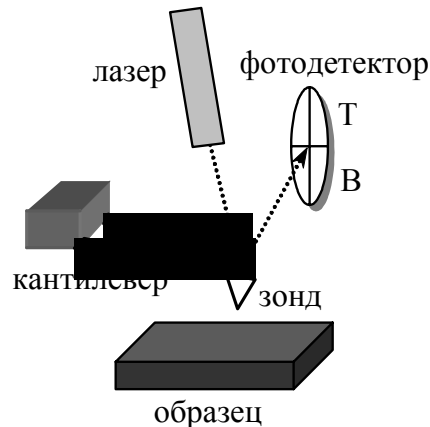


Рис. 9. Схема силового сенсора.

Различают контактный, неконтактный и прерывисто-контактный («полуконтактный») способы проведения силовой микроскопии. Использование контактного способа предполагает, что зонд упирается в образец. При изгибе кантилевера под действием контактных сил отраженный от него луч лазера смещается относительно центра квадрантного фотодетектора. Таким образом, отклонение кантилевера может быть определено по относительному изменению освещенности верхней и нижней половинок фотодетектора.

При использовании неконтактного способа зонд удален от поверхности и находится в области действия дальнедействующих притягивающих сил. Силы притяжения и их градиенты слабее отталкивающих контактных сил. Поэтому для их детектирования обычно используется модуляционная методика. Для этого с помощью пьезовибратора кантилевер раскачивается по вертикали на резонансной частоте. Вдали от поверхности амплитуда колебаний кантилевера имеет максимальную величину. По мере приближения к поверхности вследствие действия градиента сил притяжения резонансная частота колебаний кантилевера изменяется, при этом уменьшается амплитуда его колебаний. Эта амплитуда регистрируется с помощью оптической системы по относительному изменению переменной освещенности верхней и нижней половинок фотодетектора.

При «полуконтактном» способе измерений также применяется модуляционная методика измерения силового взаимодействия. В «полуконтактном» режиме зонд частично

касается поверхности, находясь попеременно как в области притяжения, так и в области отталкивания.

Для исследования структуры самоорганизованных полупроводниковых наноструктур методом атомно-силовой микроскопии может быть использован любой режим работы АСМ – контактный, неконтактный или полуконтактный. Контактный способ измерений наиболее удобен с точки зрения детектирования силового взаимодействия, т.к. величины сил отталкивания в области контакта могут значительно превышать величины сил притяжения. Однако при его использовании существует опасность быстрого износа или даже поломки зонда. При бесконтактном способе измерений разрушение зонда менее вероятно, однако малы и измеряемые сигналы. Поэтому наиболее часто для визуализации различных свойств поверхности в силовой микроскопии используется «полуконтактный» способ детектирования взаимодействия. При этом вследствие кратковременности контакта воздействие зонда на поверхность минимально, а измеряемые сигналы достаточны для их надежного детектирования. Дополнительным преимуществом «полуконтактного» способа является отсутствие сдвиговой составляющей силы воздействия на исследуемую поверхность, что существенно уменьшает искажения получаемых изображений.

### **Определение геометрических параметров самоорганизованных КТ из результатов АСМ измерений**

Основной задачей исследования самоорганизованных поверхностные квантовых точек методом АСМ является получение изображения участка поверхности с КТ, обработка и анализ изображения, включающие определение следующих параметров:

1. Высота квантовых точек  $h$
2. Латеральные размеры квантовых точек  $d$
3. Построение гистограмм распределения указанных параметров и определение средних величин
4. Поверхностная плотность квантовых точек  $N_s$ .

Для достоверного определения средних величин геометрических параметров квантовых точек, а так же их поверхностной плотности, выбор размера скана необходимо производить таким образом, чтобы на изображении было видно порядка 20-50 одиночных КТ.

Для определения геометрических параметров КТ может быть предложен следующий алгоритм:

1. Определите среднюю высоту поверхности смачивающего слоя  $h_c$ , на котором расположены КТ. Для этого воспользуйтесь функцией Гистограмма (Histogram) или Критические размеры (Critical Dimensions) программы SPM Lab (рис. 10). При этом

будет построена гистограмма высот изображения. На нем должен быть хорошо виден пик, соответствующей высотам основания, на котором располагаются КТ. Максимум этого пика будет характеризовать среднюю (по всей площади скана) высоту смачивающего слоя.

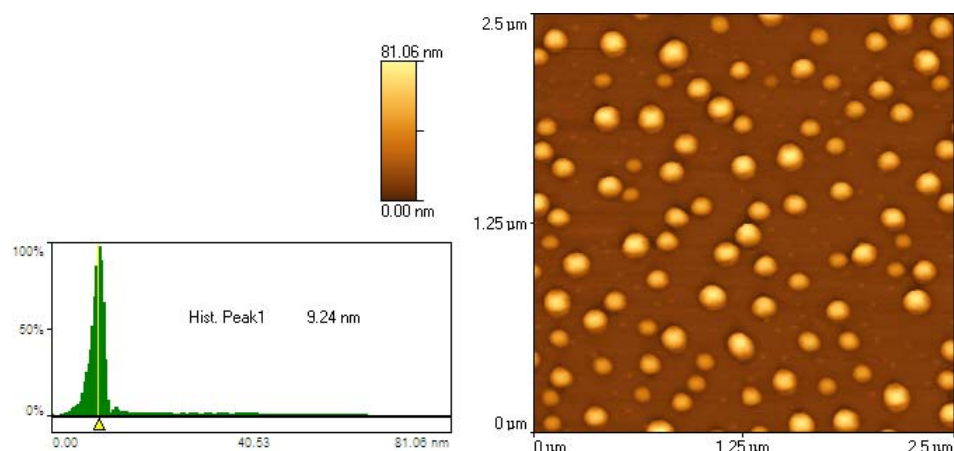


Рис. 10. Использование функции Гистограмма (Histogram) программы SPMLab для определения средней высоты поверхности смачивающего слоя.

2. Измерьте полную высоту  $h_t$  каждой КТ как максимальную высоту на ее вершине, используя функцию измерения линии (Line Measure) программы SPMLab (рис. 11).

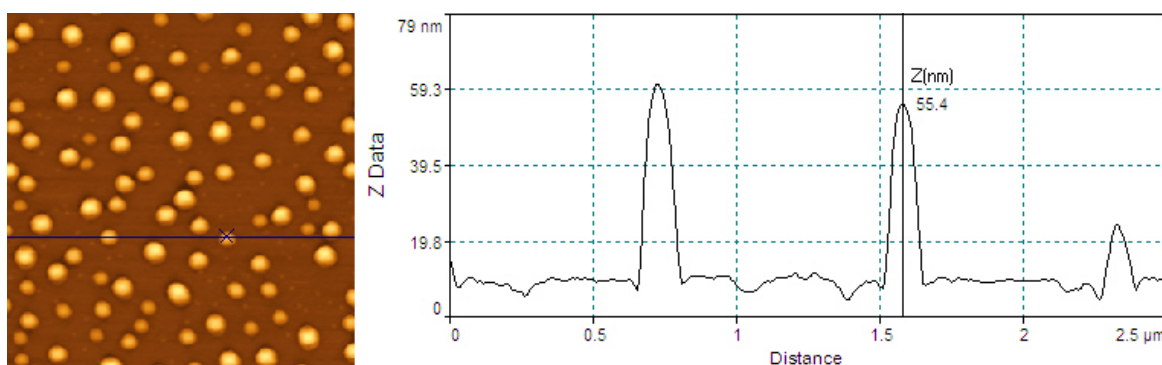


Рис. 11. Использование функции измерения линии (Line Measure) программы SPMLab для определения высоты квантовой точки.

*Примечание: АСМ исследования показали, что поверхностные КТ, как правило, окружены кольцеобразными канавками (см. рис. 11), возникающими в результате разрыва смачивающего слоя в процессе роста островков.*

3. Вычислите высоту каждой КТ без учета высоты смачивающего слоя  $h = h_t - h_c$ .
4. Если квантовые точки имеют симметричную форму, как на рис. 7, то для определения латерального размера КТ достаточно одного измерения, проведенного, например, вдоль оси X.



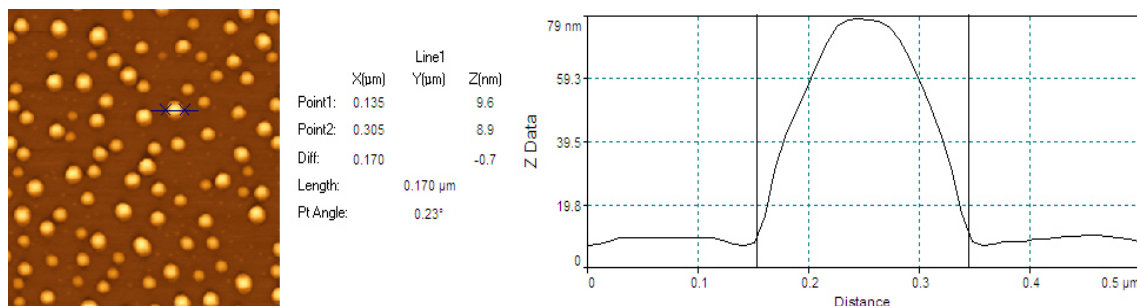


Рис. 12. Использование функции измерения линии (Line Measure) программы SPM Lab для определения латеральных размеров квантовой точки. Отсечки, между которыми производится измерение, выбраны на средней высоте поверхности смачивающего слоя  $h_c \approx 9$  нм, определенной на рис 10.

Для измерения латеральных размеров КТ, воспользуйтесь функцией измерения линии (Line Measure) программы SPM Lab (рис. 12). Проведите профиль линии через середину КТ. Примите за латеральный размер квантовой точки  $d$  ее размер от края до края, определенный на средней высоте смачивающего слоя (см. рис. 12).

5. Занесите результаты измерения высоты и латеральных размеров КТ в программу для численного анализа данных, например Origin<sup>‡</sup>.
6. Постройте гистограммы распределения высот и латеральных размеров КТ, определите среднее значение измеренных величин и стандартное отклонение.
7. Поверхностную плотность квантовых точек  $N_s$  определите как отношение количества попавших в пределы скана КТ на его площадь.

### Влияние радиуса закругления зонда на результаты АСМ измерений

Несмотря на возможность достижения методом АСМ высокого пространственного разрешения, информация о рельефе исследуемой поверхности может неадекватно отображать реальные особенности поверхности вследствие эффекта конволюции или эффекта "уширения профиля". Любое АСМ изображение является комбинацией поверхности образца и зонда, который используется для отображения поверхности. Этот артефакт, как правило, легко учитывается на качественном уровне при интерпретации результатов (особенно если размеры поверхностных особенностей намного превышают радиус кончика зонда), однако для количественных оценок важно знание методов восстановления реальной геометрии объектов.

Наиболее эффективным методом восстановления поверхности является метод численной деконволюции, использующий форму зонда, получаемую экспериментально при сканировании тестовых (с хорошо известным рельефом поверхности) структур. Рассмотрим данный метод в одномерном случае (рис. 13).

<sup>‡</sup> Для построения гистограммы данных и определения среднего размера зерна возможно использование программы Microsoft Excel.



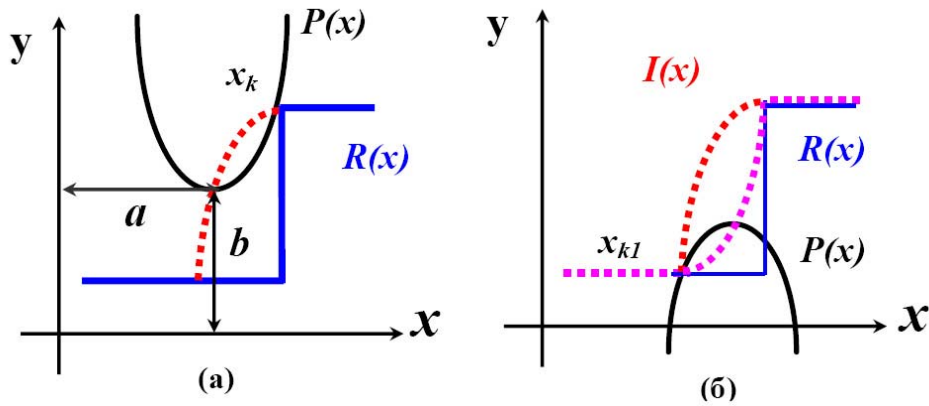


Рис. 13. Схематическое изображение процесса получения изображения в АСМ (а) и процесса частичного восстановления рельефа с учетом конечных размеров и формы зонда (б).

Если форма зонда описывается функцией  $P(x)$ , а форма истинного рельефа поверхности описывается функцией  $R(x)$ , то АСМ изображение поверхности получается в виде:

$$I(a) = R(x_k) - P(x_k - a), \text{ при условии } dR/dx = dP/dx \text{ в точках касания } x_k,$$

где  $a$  – смещение зонда в системе координат, связанной с поверхностью.

Восстановление исходного рельефа поверхности в данном методе производится путем обратного преобразования. Суть этого метода состоит в том, что полученное СЗМ изображение поверхности повторно (но уже численно, с помощью специальной программы на компьютере) сканируется с обратной стороны инвертированным зондом. Тогда изображение восстановленного рельефа поверхности получится в виде:

$$R'(x) = I(x_{kl}) - P(x - x_{kl}), \text{ при условии } dI/dx = dP/dx \text{ в точках касания } x_{kl}.$$

Здесь  $x_{kl}$  – абсцисса точки касания функции СЗМ изображения и функции зонда, инвертированной по оси  $y$  и по оси  $x$ .

Следует отметить, что полное восстановление поверхности образца возможно лишь при соблюдении двух условий: зонд в процессе сканирования коснулся всех точек поверхности, и в каждый момент зонд касался только одной точки поверхности. Если же зонд в процессе сканирования не может достигнуть некоторых участков поверхности (например, если образец имеет нависающие участки рельефа), то происходит лишь частичное восстановление рельефа. Причем, чем большего числа точек поверхности касался зонд при сканировании, тем с большей достоверностью при деконволюции происходит реконструкция поверхности.

Для проведения процесса численной деконволюции необходимо знание формы сканирующего зонда, что является самостоятельной задачей, требующей проведения сканирования тестовых объектов. В большинстве случаев, влияние формы зонда может быть численно оценено из простых геометрических моделей, представленных на рис. 14.

*Радиус зонда приблизительно равен радиусу закругления поверхностных особенностей.*

Рассмотрим случай взаимодействия исследуемого объекта и АСМ зонда (рис. 14а) в случае, когда кончик зонда характеризуется радиусом  $R$ , приблизительно равным радиусу закругления  $r$  поверхностных особенностей –  $R \approx r$ . В данном случае движение зонда по поверхности объекта можно рассматривать как движение шара радиуса  $R$  по поверхности шара радиуса  $r$ , то есть зонд будет описывать дугу радиусом  $R+r$ .

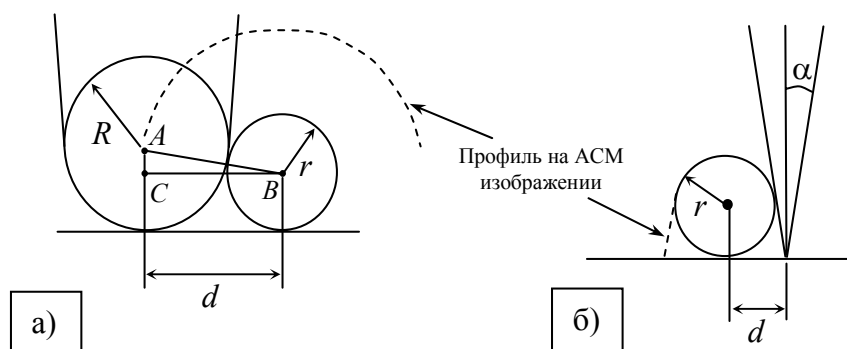


Рис. 14. Схема профиля поверхности и зонда: а)  $R \approx r$ , б)  $R \ll r$ .

Рассматривая прямоугольный треугольник ABC на рис. 14а для его сторон по теореме Пифагора можно записать соотношение  $AB^2 = AC^2 + BC^2$ . Длина стороны  $AB = (R+r)$ , стороны  $AC = (R-r)$ , стороны  $BC = d$ . Тогда для ширины продольного размера поверхностных особенностей  $d$  можно получить соотношение:

$$d = 2\sqrt{Rr}.$$

Расчеты показывают, что при отображении поверхностных особенностей размером  $r=20$  нм зондом с радиусом  $R=20$  нм, размер особенностей на топографии поверхности составит 40 нм, т.е. в два раза превысит истинный размер.

*Радиус зонда намного меньше радиуса закругления поверхностных особенностей.*

На рис. 14б изображена геометрия исследуемого объекта и конического зонда в случае, когда  $R \ll r$ . Исходя из рассматриваемой геометрии можно показать, что в данном случае ширина продольного размера объекта  $d$  будет равна:

$$d = r(\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha + (1 + \sin \alpha) \left( \frac{\tan \alpha}{\cos \alpha} - 1 \right) + \tan^2 \alpha},$$

где  $\alpha$  – половина угла раствора конуса. Расчеты показывают, что при отображении поверхностных особенностей размером  $r=130$  нм стандартным АСМ зондом с углом раствора конуса  $2\alpha=36^\circ$ , размер особенностей на топографии поверхности составит 174 нм, т.е. уширение профиля составит 25%.

Таким образом, для правильной количественной интерпретации полученных АСМ результатов необходим учет влияния формы зонда.

## Методические указания

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

### Техника безопасности

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

### Задание

1. Изучите свойства и методы получения самоорганизованных полупроводниковых наноструктур.
2. Изучите механизмы самоорганизованного формирования поверхностных квантовых точек.
3. Получите АСМ изображение самоорганизованных КТ (GeSi/Si, Si на сапфире, InAs/GaAs или др.).
4. Определите из полученного АСМ изображения величины геометрических параметров квантовых точек, а так же их поверхностную плотность. Постройте гистограмму распределения высот и латеральных размеров КТ, определите средние значения указанных величин и вероятностные параметры распределения.
5. Сделайте количественную оценку влияния формы зонда на полученные результаты.

### Контрольные вопросы

1. Что такое эффект размерного квантования и какие типы квантоворазмерных структур вы знаете?
2. Назовите основные методы получения полупроводниковых наноструктур.
3. Расскажите о механизмах самоорганизованного формирования поверхностных квантовых точек.
4. Опишите основы метода атомно-силовой микроскопии и его основные типы.

5. Опишите методику определения геометрических параметров самоорганизованных КТ из результатов АСМ измерений.
6. Расскажите о влиянии радиуса закругления зонда на результаты АСМ измерений.

### **Литература**

1. В.Я. Демиховский. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? – Соросовский образовательный журнал, 1997, № 5, с.80-86.
2. И.А. Карпович. Квантовая инженерия: самоорганизованные квантовые точки. – Соросовский образовательный журнал, 2001, № 11, с. 102-108.
3. В.И. Белявский. Физические основы полупроводниковой нанотехнологии. – Соросовский образовательный журнал, 1998, № 10, с. 92-98.
4. Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин и др. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. – ФТП, 1998, т. 32, № 4, с. 385-403.
5. О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский и др. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства. – ФТП, 2000, т. 34, № 11, с. 1281-1299.
6. В.Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. ИФМ РАН – г. Н. Новгород, 2004 г. - 110 с.

Александр Валерьевич Круглов

# **АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ САМООРГАНИЗОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР**

*Описания лабораторной работы*

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального  
образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И.  
Лобачевского».

603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать .2010. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл.печ.л. 1,2 . Уч.-изд.л. .

Заказ № . Тираж 100 экз.

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

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

Лицензия ПД № 18-0099 от 14.05.01