

ЭЛЕКТРОНИКИ

В. НЕВОЛИН

Зондовые
нанотехнологии
в электронике



ТЕХНОСФЕРА

Неволин В.К.

Зондовые нанотехнологии в электронике

Издание 2-е, исправленное

Москва: Техносфера, 2014. – 176с. ISBN 978-5-94836-382-0

Прогресс в микроэлектронике связывают с уменьшением линейных размеров функциональных элементов. Если их размеры становятся порядка нанометров, то существенными являются квантовые эффекты, принципиально меняющие физику работы. Созданием таких элементов и интегральных квантовых схем на их основе занимается нанотехнология.

В монографии изложены физические основы зондовой нанотехнологии на базе сканирующих туннельных и атомно-силовых микроскопов, показаны основные достижения, обсуждаются проблемы, требующие решения.

Предназначена для студентов старших курсов, аспирантов и молодых ученых, желающих познакомиться с новым научным направлением и попробовать свои силы в развитии технологии XXI века.

© 2014, В.К. Неволин

© 2014, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-382-0

Содержание

Предисловие автора	5
Введение	8
Литература.....	12
Глава 1. Зондовая микроскопия и нанотехнология	15
1.1. Зондовые микроскопы для технологических приложений.....	16
1.2. Зондовая микроскопия углеродных нанотрубок.....	26
1.2.1. Атомная структура углеродных нанотрубок.....	29
1.2.2. Методы селекции углеродных нанотрубок по размерам, форме, тонкой структуре.....	37
1.3. Зондовая нанотехнология: взгляд на развитие.....	41
Литература.....	46
Глава 2. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов формирования наноразмерных структур с помощью проводящего зонда	49
2.1. Физико-химические эффекты в зондовой нанотехнологии.....	50
2.2. Концепция зондовой нанотехнологии в газовых и жидких средах.....	55
2.3. Контактное формирование нанорельефа поверхности подложек.....	64
2.4. Бесконтактное формирование нанорельефа поверхности подложек.....	68
2.5. Локальная «глубинная» модификация полупроводниковых подложек.....	69
2.6. Локальная электродинамическая модификация поверхности подложки.....	74
2.7. Межэлектродный массоперенос с нанометровым разрешением.....	78
2.8. Модификация свойств среды в зазоре между проводящим зондом и подложкой.....	83
2.9. Электрохимический массоперенос.....	90
2.10. Массоперенос с помощью газовой среды.....	92

2.11. Локальное анодное окисление.....	94
2.12. Тепловой эффект в устройствах вакуумной микро- и нанoeлектроники.....	97
Приложение.....	101
Литература.....	104
Глава 3. Зондовые нанотехнологии создания элементной базы нанoeлектроники.....	109
3.1. Квазиодномерные проводники как активные элементы нанoeлектроники.....	110
3.2. Зондовое формирование полимерных микропроводников.....	122
3.3. Методы формирования металлических квазиодномерных микроконтактов на подложках.....	130
3.4. Создание элементов металлической нанoeлектроники.....	135
3.5. Нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок. Инверторы.....	142
3.5.1. Метод приготовления проводников на основе пучка углеродных нанотрубок.....	142
3.5.2. Репозиционирование и модифицирование углеродных нанотрубок на подложках.....	147
3.5.3. Исследование характеристик макетов нанотранзистора и инвертора на основе углеродных нанотрубок.....	152
3.6. Углеродная нанoeлектроника.....	156
3.7. Локальное анодное окисление пиролитического графита.....	163
Литература.....	166
Заключение.....	172

ГЛАВА I

ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ И НАНОТЕХНОЛОГИЯ

В настоящее время имеется множество обзоров (см. Введение) и издано достаточное количество книг [1—4] по зондовой микроскопии, позволяющих подробно ознакомиться с методами зондовой микроскопии, с устройством зондовых микроскопов. Прародителем всех зондовых микроскопов можно считать профилограф, в котором с помощью острой иглы «ощупывается» поверхность образца по некоторой траектории. С помощью электромеханического устройства нормальные к поверхности перемещения острия в увеличенном масштабе записываются на бумажную ленту. В результате получается профилограмма, позволяющая судить о шероховатости поверхности. Прогресс в материаловедении, механике и электронике позволил усовершенствовать это устройство. Стало возможным проводить сканирование на некотором участке поверхности и получать трехмерное ее изображение. Зондовые микроскопы стали называться по физическому принципу действия, используемому для «ощупывания» поверхности. Далее нас будут интересовать сканирующие туннельные микроскопы (СТМ) и атомно-силовые микроскопы (АСМ).

В СТМ используется туннельный эффект. Ток, который регистрируется в каждой точке, весьма чувствителен к расстоянию между зондом и поверхностью подложки. Как правило, в таких микроскопах напряжение между электродами поддерживается постоянным. В СТМ применяются два основных метода. Метод, в котором управляющая электроника поддерживает постоянным туннельный ток, измеряя его по несколько раз в каждой точке при сканировании, называют методом «постоянного тока». Этот метод является довольно «медленным», и применяется он, как правило,

при сканировании больших участков поверхности. Метод «постоянной высоты» используется при исследовании малых и достаточно плоских поверхностей для получения атомного разрешения в плоскости сканирования. В этом случае обратная связь, поддерживающая заданную величину туннельного тока, «загрубляется» или отключается.

Для технологических приложений АСМ используются обычно два метода: контактный и полуконтактный. В контактном методе степень прижатия острия может регулироваться за счет начального изгиба кантилевера. В полуконтактном методе зонд периодически с некоторой частотой касается поверхности. Это более «щадящий» метод.

1.1. Зондовые микроскопы для технологических приложений

Рассмотрим основные требования к отдельным частям конструкции зондовых микроскопов с точки зрения применения их в качестве технологических устройств, работающих в нормальных атмосферных условиях. Эти сведения необходимы для выбора подходящего зондового микроскопа и реализации возможных технологических приемов.

Современный зондовый микроскоп как прибор для научных исследований можно условно представить в виде суммы четырех компонентов:

- 1) **механическая часть:** зондовый датчик; сканер для перемещения зонда; координатный стол для размещения и обслуживания исследуемого (обрабатываемого) образца; систему грубого подвода зонда к образцу; устройство защиты от нежелательных посторонних воздействий и создания определенных условий в области взаимодействия зонд-образец;
- 2) **электронная система:** блок управления отдельными узлами механической части; электронные платы формирования воздействующих импульсов; электронная управляющая машина;

- 3) **методики измерений и воздействий**, в функции которых входят: обоснование применяемого способа измерений; адекватная интерпретация полученных результатов; совмещения во времени процессов слежения за туннельным током и процессов локального воздействия на подложку;
- 4) **программное обеспечение**, включающее функции управления работой микроскопа; проведения технологических операций; накопления и обработки полученных результатов.

В настоящем параграфе рассмотрим только механическую часть микроскопа, изучение которой поможет глубже понять принципы работы микроскопов и их возможности при технологических исследованиях. Описание принципов построения электронных блоков и электронных схем, как правило, можно найти в Руководствах пользователя, предоставляемых поставщиками. Методики измерений и воздействий важны и заслуживают особого рассмотрения.

Программное обеспечение — наиболее мобильный компонент микроскопов и имеет подчиненное значение. Алгоритмы применяемых программ могут и должны быть сформулированы на основании методики измерений и реальных возможностей механической и электронной частей микроскопов.

Рассмотрим возможные реализации механической части микроскопа и требования, которые предъявляются к микроскопу, когда он применяется для технологических исследований. Хотя микроскоп проектируется как единое целое, выделим узлы, выполняющие отдельные функции.

Острийный зонд. Зонд определяет полезное увеличение микроскопа. Наиболее важная характеристика зонда — радиус закругления острия, который влияет на поперечные размеры области предельно достижимого разрешения. Обычно предпочтение отдается зондам с меньшими значениями радиуса острия, хотя иногда поперечные размеры исследуемых структур этого не требуют, а сложность изготовления зонда значительно повышается с уменьшением радиуса острия.

Следует учитывать, что радиус острия является основной, но далеко не единственной характеристикой зонда. Материал определяет устойчивость зонда к физико-химическим воздействиям. При использовании зонда в качестве инструмента нанотехноло-

гии к нему могут предъявляться особые требования по химической стойкости, твердости, частоте собственных изгибных механических колебаний (в особенности для кантилеверов), механической прочности, повторяемости геометрической формы и т.п. Суммируя изложенное выше, можно сказать, что в каждом конкретном случае необходимо иметь зонд с приемлемым радиусом острия и с определенным набором физико-химических и геометрических параметров.

Сканер для микроперемещений зонда. Для исследования поверхности образца на определенной площади в микроскопе используется измерение ее свойств в некотором множестве точек, равномерно расположенных в интересующей области. Перемещение зонда от точки к точке осуществляется с помощью сканера, к которому предъявляются следующие требования:

- отсутствие дрейфов, точность и повторяемость позиционирования зонда;
- долговременная стабильность параметров;
- термическая стабильность позиционирования;
- требуемый диапазон перемещений по каждой из координат;
- достаточное быстродействие.

Существует много физических эффектов, которые могут быть использованы для перемещения зонда. Однако в настоящее время для этой цели применяется главным образом обратный пьезоэффект в поляризованной пьезокерамике на основе цирконата-титаната свинца. В отечественных конструкциях широкое распространение получила пьезокерамика ЦТС-19.

Пьезокерамика представляет собой стеклообразную матрицу с вкраплениями в нее зерен пьезоэлектрического материала. В процессе спекания керамики либо после она подвергается воздействию электрического поля (поляризуется) и становится пьезоактивной. Сразу после поляризации состояние керамики далеко от равновесного. Поэтому для обеспечения достаточной стабильности во времени требуется ее состаривание. Данный процесс может протекать от нескольких часов при искусственном старении до одного года при естественном старении [5]. По окончании процесса параметры пьезокерамики приходят к своим равновесным значениям,

и в дальнейшем их стабильность зависит главным образом от режимов эксплуатации.

При работе сканера необходимо выполнение требования малости деформаций, обусловленное законом Гука. Если принять в качестве максимально допустимой относительной деформации значение 10^{-5} , то можно определить максимально допустимую напряженность управляющего электрического поля. Практически во всех известных конструкциях пьезосканеров вектор напряженности управляющего электрического поля коллинеарен вектору поляризации керамики, поэтому максимальная деформация пьезоэлемента определяется значением пьезомодуля d_{33} . Для пьезокерамики ЦТС-19 ($d_{33} = 2 \cdot 10^{-12}$ м/В) получаем значение поля $E \sim 5 \cdot 10^4$ В/м. Превышение этой величины приведет к значительному росту гистерезиса и дрейфа, связанных с остаточными пластическими деформациями пьезоэлемента.

Ограничение максимальной напряженности управляющего поля имеет большое значение также для минимизации нелинейности преобразования, определяемой явлением электрострикции, при которой деформация пропорциональна E^2 .

Большое значение для высокой долговременной стабильности имеет полярность управляющего напряжения. Незначительные изменения параметров сканера будут наблюдаться в том случае, когда его полярность будет совпадать с полярностью напряжения, при котором осуществлялась поляризация пьезокерамики. В противном случае будет наблюдаться постепенная переполаризация материала, сопровождаемая изменением параметров сканера.

Термостабильность сканера определяет точность позиционирования зонда при изменении температуры. Пьезокерамика ЦТС-19 имеет сравнительно небольшой температурный коэффициент линейного расширения, примерно $6 \cdot 10^{-6}$ К [6]. Однако изменение температуры на 1 К при длине пьезоэлемента 1 см приведет к его удлинению на 60 нм, что может оказаться неприемлемо большим для ряда применений микроскопов.

Кроме термостатирования всей конструкции микроскопа, существует два способа повышения термостабильности пьезосканера. Первый из них — введение в конструкцию сканера или его держателя элементов, компенсирующих тепловой дрейф. Второй

способ основан на свойствах симметрии конструкции сканера: если конструкция имеет плоскость симметрии, то при однородном нагреве элементов все ее точки будут смещаться параллельно этой плоскости.

Поддержание туннельного зазора или степени прижатия зонда осуществляется с помощью системы автоматического регулирования. Точность и быстродействие системы в значительной степени зависят от фазочастотных характеристик объекта регулирования. Наличие в этих характеристиках резонансов приводит с точки зрения устойчивости системы регулирования к выбору частоты среза ниже частоты резонанса. Таким образом, низшая резонансная частота объекта ограничивает быстродействие всей системы регулирования.

Для получения стабильных и повторяемых результатов необходимо, чтобы величина дрейфа за время сканирования исследуемого участка поверхности была меньше характерных размеров регистрируемых структурных особенностей исследуемой поверхности. Эта величина зависит от скорости дрейфа и от времени получения сканированного изображения. Таким образом, приемлемые значения дрейфа можно обеспечить как повышением общей стабильности сканера, так и уменьшением времени получения сканированного изображения за счет роста быстродействия сканера.

В случае технологического устройства положение несколько иное. Технологическое воздействие на выбранную точку образца потребует некоторого времени. По-видимому, это время будет немного больше того, которое необходимо в исследовательских микроскопах для регистрации положения данной точки. Именно это время, а не быстродействие сканера будет определять время обработки полного кадра. Поэтому в случае технологического устройства особое значение имеет обеспечение низкой скорости дрейфа.

Координатный стол. Наличие перемещения исследуемого образца обязательно в микроскопах, претендующих на применение в качестве инструмента нанотехнологии. Кроме того, в этом случае большое значение имеет ориентация поверхности образца в пространстве. Ее горизонтальное расположение, когда нормаль к поверхности направлена вверх, позволяет достаточно просто реализовать ряд технологических приемов, например работу в жидкой

среде. Именно такая ориентация использовалась в разработанных нами моделях СТМ [7].

Основное требование к системе перемещения образца в плоскости X-Y — обеспечение минимального шага, сравнимого с размерами области сканирования, и отсутствие механических дрейфов в состоянии покоя.

Наличие возможности перемещения образца желательно дополнить системой, позволяющей контролировать положение зонда над исследуемой поверхностью. Оптический микроскоп позволяет реализовать позиционирование зонда микроскопа с точностью порядка 1 мкм, что ограничено его разрешающей способностью. Однако при возможности точного перемещения образца этой величины может оказаться вполне достаточно для некоторых применений микроскопов.

Система грубого подвода по Z. В процессе работы микроскопа острие зонда перемещается вдоль исследуемой поверхности образца, касаясь ее или оставаясь от нее на расстоянии около 1 нм (в направлении Z) в зависимости от режима сканирования. Так как диапазон перемещений зонда в направлении нормали к поверхности образца, обеспечиваемый сканером, обычно не превышает 1—2 мкм, то становится очевидной необходимость иметь в конструкции микроскопа систему грубого подвода образца по Z. Кроме обеспечения начального приближения зонда к поверхности образца, она может быть использована для корректировки положения образца по Z в случае его нежелательного изменения, например дрейфа.

Рассмотрим основные требования к параметрам этой системы. Ее минимальный (уверенно обеспечиваемый) шаг должен быть в несколько раз меньше диапазона перемещения сканера в направлении Z. Например, если диапазон перемещения сканера $Z = 1$ мкм, то грубый подвод должен осуществляться с шагом около 0,1 мкм.

Диапазон перемещений, который должна перекрывать система грубого подвода, определяется той точностью, с которой образец фиксируется на координатном столе. Если начальное расстояние зонд-образец регистрируется с помощью простейшего оптического устройства, например лупы, то его можно установить на уровне 20—50 мкм, а в случае контроля невооруженным глазом — на уровне 200—500 мкм.

Ввиду того, что система грубого подвода включается в механическую связь зонд-образец, она не должна заметно снижать жесткость этой связи. Также недопустимо значительное увеличение механических и термических дрейфов.

Как видим, требования, предъявляемые к системе грубого подвода, аналогичны таковым для перемещения координатного стола. Поэтому и способы реализации этих систем имеют много общего.

Устройство защиты. Большое значение для нормальной работы микроскопа имеет устранение дестабилизирующих факторов, как внутренних, так и внешних. Например, в первых конструкциях СТМ особое внимание уделялось ослаблению влияния механических колебаний, способных вызвать неконтролируемые изменения величины туннельного промежутка. Так, плита, на которой был установлен СТМ, с помощью эффекта Мейснера подвешивалась над сверхпроводником. Другой способ борьбы с вибрациями — повышение жесткости механической связи зонд-образец. Подробное рассмотрение вопросов виброизоляции можно найти в многочисленной литературе [1—3].

Не меньшую опасность для работы микроскопа могут представлять акустические шумы. В случае работы микроскопа в атмосферных условиях они могут вызвать механические колебания отдельных элементов конструкции, минуя систему виброизоляции. Уменьшению акустических помех способствуют повышение жесткости всей конструкции микроскопа и применение экранов из звукопоглощающих материалов, [8].

Ввиду того, что при работе зондовых микроскопов измеряются электрические сигналы, требуется его защита от электромагнитных наводок, которые могут иметь как внешнее, так и внутреннее происхождение. Например, при увеличении скорости развертки сканера в СТМ становятся существенными паразитные емкости между электродами сканера и входными цепями предусилителя туннельного тока. Для подавления электромагнитных наводок, кроме экранов, широко применяются также схемы, устойчивые к помехам.

При использовании зондовых микроскопов в качестве инструмента нанотехнологии необходимо создавать определенные условия в зазоре между острием и подложкой. К ним может отно-

ситься, например, определенная газовая среда или освещенность. По-видимому, для этих целей наиболее целесообразно применить герметичную камеру (колпак), которая позволит также предохранить оператора от вредных воздействий.

Рассмотрим устройство СТМ ТТМ-2 [9] как пример реализации требований, сформулированных выше. На рис. 1.1 показана схема основного узла туннельного микроскопа ТТМ-2. Массивное основание имеет два плеча, разделенных упругой перемычкой. В одном плече установлен трубчатый одноэлементный пьезосканер. Пьезоэлемент закреплен в стакане, что позволяет не только обеспечить его быструю сменяемость, но и ввести в зазор между ними вязкоупругий демпфер, несколько ослабляющий резонансные свойства сканера. В другом плече основания закреплена ось вращения карусели, предназначенной для перемещения исследуемого образца. Исследуемый образец закрепляется на координатном столе, изготовленном из стали, который, в свою очередь, установлен на четырех стальных опорах. Взаимное положение этих опор может регулироваться системой пьезоэлементов, а фиксация стола осуществляется за счет сил магнитного притяжения, регулируемых системой электромагнитов. Для фиксации стола в состоянии покоя используется постоянный магнит. Подача определенной последовательности импульсов тока на электромагниты и импульсов напряжения на пьезоэлементы вызывает перемещение стола в выбранном направлении. При этом величина шага составляет 0,1 мкм и менее.

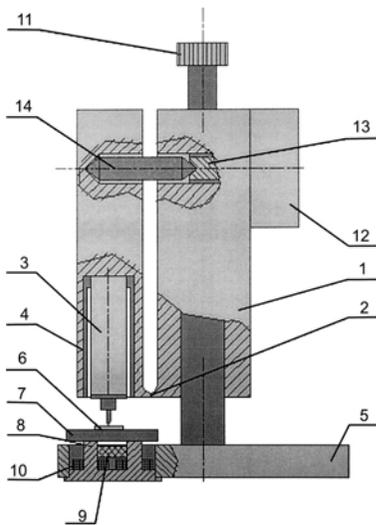


Рис. 1.1. Схема узла грубого подвода по Z: 1 — основание, 2 — упругий элемент, 3 — сканер, 4 — втулка, 5 — карусель, 6 — образец, 7 — столик образца, 8 — опора, 9 — пьезоэлемент, 10 — катушка электромагнита, 11 — винт грубого подвода по Z, 12 — шаговый двигатель, 13 — винт точного подвода по Z, 14 — толкатель-компенсатор

Установка исходного расстояния зонд-образец проводится с помощью винта, перемещающего карусель вдоль оси вращения. Полный диапазон этого перемещения составляет 8 мм, минимальный шаг — около 5 мкм. Более точная регулировка расстояния зонд-подложка осуществляется за счет изгиба упругого элемента. Шаговый двигатель, установленный на одном из плеч основания, вращает винт и через компенсатор отталкивает второе плечо. Полный диапазон второй ступени подвода по Z составляет 100 мкм. Материал компенсатора выбран таким образом, чтобы компенсировать изменение расстояния зонд-образец, происходящее за счет изменения температуры в помещении.

На рис. 1.2 представлен общий вид ТТМ-2. Карусель с исследуемым объектом имеет три фиксированных положения. В первом из них осуществляется ручная загрузка столика с установленным на его поверхности образцом. Затем карусель переводится в следующую позицию, над которой закреплен оптический микроскоп.

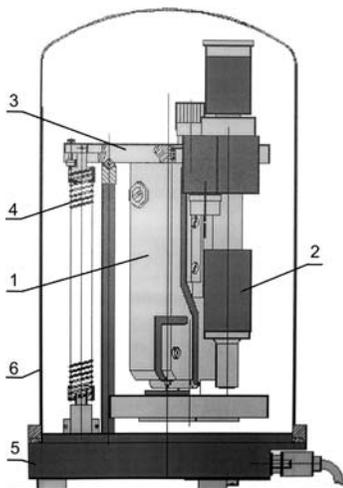


Рис. 1.2. СТМ ТТМ-2, совмещенный с оптическим микроскопом: 1 — основной узел СТМ, 2 — оптический микроскоп, 3 — рычаг системы виброизоляции, 4 — пружина, 5 — базовая плита, 6 — колпак

На этой позиции с помощью микрометрического винта, перемещающего карусель, осуществляется предварительная установка расстояния зонд-образец. Оптический микроскоп юстирован таким образом, что требуемому расстоянию (около 40 мкм) соответствует резкое изображение поверхности образца. В третьей позиции образец оказывается под пьезосканером. После перевода в эту позицию ось вращения карусели жестко фиксируется, закрывается защитный колпак, и начинается подвод зонда к образцу на туннельное расстояние. Подвод осуществляется с помощью шагового двигателя, как описано выше, и проводится в автоматическом режиме под управлением ЭВМ. Шаговый двигатель представляет собой аналог пьезоэлектрического

двигателя: толкатель прижимается к ротору силами магнитного притяжения, а затем пьезоэлемент изменяет его длину, вызывая поворот ротора. Такая конструкция двигателя при соответствующем управлении обеспечивает плавное, без толчков приближение зонда к образцу с минимальным шагом около 1 нм.

Оптический микроскоп выполняет также функцию установки зонда над интересующей областью поверхности образца. Для этого он юстируется таким образом, что точка, расположенная на перекрестии окуляра, после поворота карусели попадет под острие зонда. Точность попадания составляет около 1–2 мкм.

Система виброизоляции выполнена в виде пружинно-рычажной конструкции и введена в механическую часть СТМ. Она представляет собой рычаг, на одном из концов которого закреплен основной узел СТМ. Его вес уравновешен упругой силой пружины, закрепленной между базовой плитой и вторым концом рычага. Применение упругих резиновых элементов в точке опоры рычага и в точке крепления основного узла к рычагу демпфирует собственный резонанс системы виброизоляции. Такая конструкция является малогабаритной и в то же время обладает низкой резонансной частотой (около 1,5 Гц).

Как уже упоминалось выше, вся конструкция накрыта герметичным металлическим колпаком, обеспечивающим защиту от акустических помех, электромагнитных наводок и окружающей пыли. Кроме того, он позволяет создавать атмосферу определенного состава в туннельном зазоре. Все вводы электрических сигналов выполнены также герметично.

На рис. 1.3. представлен внешний вид микроскопа ТТМ-2.

Значительное количество технологических исследований



Рис. 1.3. Внешний вид микроскопа ТТМ-2, защитный колпак стоит рядом



Рис. 1.4. Внешний вид ACM Solver PRO без защитного колпака

было выполнено на АСМ линии Solver, изготавливаемых зеленоградской компанией «НТ-МДТ». На рис. 1.4 показан один из таких микроскопов, оснащенный системой видеонаблюдения за областью сканирования на образце, что существенно облегчает условия работы. Микроскоп оснащен методиками для проведения литографий.

Работа с нанометровыми объектами, высаженными на подложку, — одно из перспективных направлений развития ЗНТ. При этом необходимо решать прежде всего проблемы их визуализации, идентификации и размещения нанобъектов в заданных местах подложки путем перемещения. Ниже на примере углеродных нанотрубок описывается решение некоторых из этих проблем с помощью ACM Solver P-47H.

1.2. Зондовая микроскопия углеродных нанотрубок

Долгие годы все считали, что углерод может образовывать только две кристаллические структуры — алмаз и графит. Кристаллы алмаза (обработанные алмазы называют бриллиантами) хорошо известны, а вот менее известно, что структура графита слоистая: атомы углерода простираются в плоскости слоев, в то время как сами слои друг от друга находятся на существенно больших расстояниях и слабо связаны между собой. Обычный графит существует в виде



чешуек с линейными размерами около 20 нм. Однако атомы углерода могут образовывать однослойные листы значительно больших размеров. Эти листы, уложенные в стопку, образуют слоистый углеродный материал, называемый пиролитическим графитом. Этот материал можно найти в природе, как и слюду, являющуюся также слоистым материалом. Оказалось, что такие однослойные углеродные листы могут скручиваться в виде трубок в один или несколько слоев, соответственно, такие образования называют однослойными и многослойными трубками. Догадались об этом совсем недавно — открыты и описаны они были в 1991 г. японским исследователем С. Иижима [10]. Диаметр таких трубок от 0,5 нм, длина — до нескольких десятков микрон. Из-за столь малых диаметров углеродных трубок они и получили название «нанотрубки».

Недавнее открытие углеродных нанотрубок связано и с существенным развитием техники микроскопии, позволяющей обнаружить единичные экземпляры в любой саже, например саже, взятой на стеках выхлопных труб автомобилей или в саже из печных дымоходов. Однако для вполне конкретных применений требуются большие количества нанотрубок определенных размеров и свойств. Такие количества можно назвать наноматериалами.

Одним из поразительных свойств нанотрубок является то, что их свойства зависят от их геометрии. Например, трубки могут быть с открытыми концами, что позволяет заполнять их другими атомами, или с закрытыми концами, что позволяет «капсулировать» объем нанотрубки и его содержимое. Однослойный лист из атомов графита, уложенных регулярным образом в шестиугольники, имеет определенную симметрию их расположения. Эти шестиугольники, сгущаясь в трубки, образуют различный угол скручивания. От угла скручивания зависят, в частности, их электрические свойства. Углеродные нанотрубки могут в связи с этим проявлять металлическую и полупроводниковую проводимость. Если учесть, что внешнее электрическое поле (впрочем, и магнитное) может свободно проникать в однослойные углеродные нанотрубки и изменять их проводимость в определенных условиях, то можно надеяться, что свойства нанотрубок из углерода весьма многообразны и заслуживают достойного применения.

Разительные перемены можно ожидать от применения углеродных нанотрубок в электронике. Электроника, в которой элементы имеют наноразмерные величины, стала называться по-новому — наноэлектроникой, а технология формирования нанобъектов, в том числе из отдельных атомов и молекул, стала называться нанотехнологией. В литературе уже описаны макеты устройств, изготовленных на основе углеродных нанотрубок. Например, если между двумя электродами укладывается изогнутая углеродная нанотрубка, то созданное устройство проявляет свойства диода, когда проводимость устройства при одном направлении тока во много раз превышает проводимость при обратном направлении. Такие устройства назвали нанодиодами. В августе 2001 г. ученые из американской компании IBM сообщили о создании логического элемента на основе одной молекулы. Этой молекулой была углеродная нанотрубка, лежащая на системе электродов с электронной и дырочной проводимостью.

А что делается в связи с этим в России, например в Зеленоградской кремниевой долине? Углеродные нанотрубки появились в распоряжении учебно-научного центра «Зондовой микроскопии и нанотехнологии» Московского государственного института электронной техники (МИЭТ) в конце 2001 г., и обнаружены они были при исследовании углеродной смеси высокой реакционной способности. За прошедшее время удалось создать двухэлектродный элемент с углеродной нанотрубкой более высокой проводимости, чем в IBM, поскольку трубки были частично заполнены (легированы) атомами металлов платиновой группы. Созданы макеты нанотранзисторов и инверторов с углеродными нанотрубками. Удалось исследовать атомную структуру углеродных нанотрубок на воздухе в АСМ Solver P-47Н, которые выпускает зеленоградская компания «НТ-МДТ». Такие результаты получаются на зондовых микроскопах обычно в глубоком вакууме при низких температурах, что требует более значительных материальных затрат. В углеродной смеси высокой реакционной способности открыты ветвящиеся нанотрубки, имеющие вид рогов. Высказано предложение о создании нанотранзисторов на основе таких нанотрубок. Для транзисторов с ветвящимися нанотрубками не критичны размеры контактных площадок, что существенно. Однако для создания транзисторов