

Нанофізика та нанотехнології

1. Контактний та безконтактний режими роботи скануючого силового мікроскопу.

В основі роботи АСМ (атомного силового мікроскопа) лежить силова взаємодія між зондом і поверхнею, для реєстрації якої використовуються спеціальні зондові датчики, що представляють собою пружну консоль з гострим зондом на кінці (рис. 1). Сила, що діє на зонд з боку поверхні, призводить до вигину консолі. Реєструючи величину вигину, можна контролювати силу взаємодії зонда з поверхнею.



Рис. 1. Схематическое изображение зондового датчика АСМ

Методи отримання інформації про рельєф і властивості поверхні за допомогою АСМ можна розбити на три групи:

- контактний квазістатичний
- безконтактний коливальний
- «напівконтактний»

Контактний метод:

В контактних квазистатических методиках острие зонда находится в непосредственном соприкосновении с поверхностью, при этом силы притяжения и отталкивания, действующие со стороны образца, уравниваются силой упругости консоли.

В квазистатическом режиме АСМ изображение рельефа исследуемой поверхности формируется либо при постоянной силе взаимодействия зонда с поверхностью (сила притяжения или отталкивания), либо при постоянном среднем расстоянии между основанием зондового датчика и поверхностью образца. При сканировании образца в режиме $F_z = const$ система обратной связи поддерживает постоянной величину изгиба кантилевера, а следовательно, и силу взаимодействия зонда с образцом (рис. 2.)

При режиме сканирования при постоянном среднем расстоянии между основанием зондового датчика и поверхностью ($Z = const$) зондовый датчик движется на некоторой средней высоте $Z_{ср}$ над образцом (рис. 3), при этом в каждой точке регистрируется изгиб консоли ΔZ , пропорциональный силе, действующей на зонд со стороны поверхности.

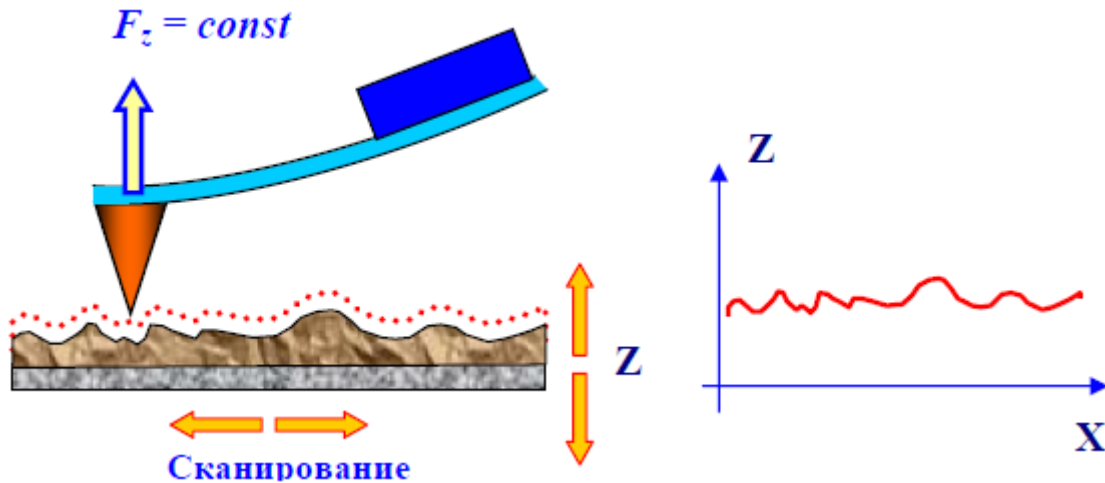


Рис. 3. Формирование АСМ изображения при постоянной силе взаимодействия зонда с образцом

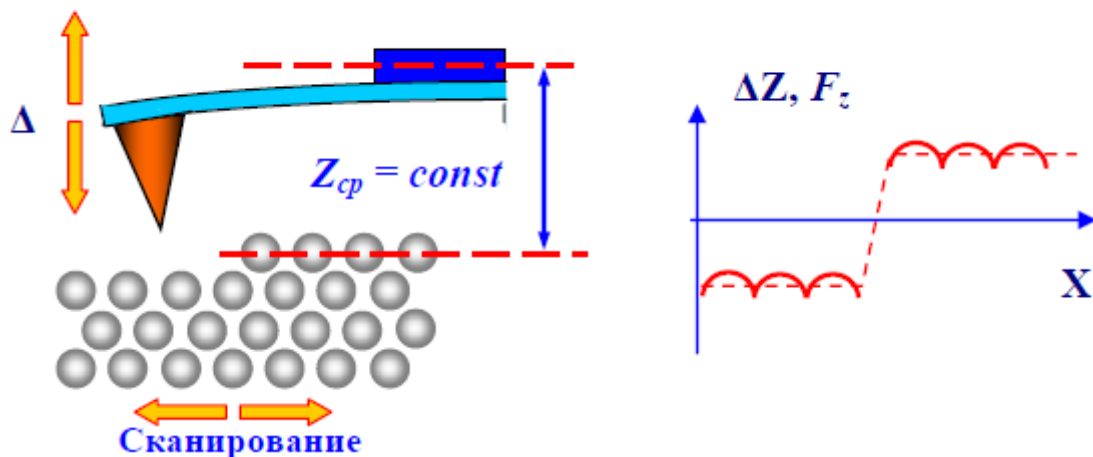


Рис. 4. Формирование АСМ изображения при постоянном расстоянии между зондовым датчиком и образцом

Недостаток контактных режимов – непосредственное механическое взаимодействие зонда с поверхностью, что может привести к поломке зонда или разрушению поверхности мягких объектов.

Бесконтактный режим

Этот режим реализуют путём измерения параметров собственных колебаний консоли кантилевера (резонансной частоты, сдвига фазы между приложенной возбуждающей силой и смещением консоли), зонд которого находится достаточно далеко от поверхности (единицы - десятки нанометров) и взаимодействует с ней посредством далеко действующих сил Ван-дер-Ваальса.

Собственная частота кантилевера:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

При піднесенні до поверхні за рахунок сили, що діє з боку поверхні, частота змінюється:

$$\omega_{rf} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{F}{k}}$$

Зсув частоти реєструється приладом. Графічно такий зсув власної частоти зображено на рис. 5.

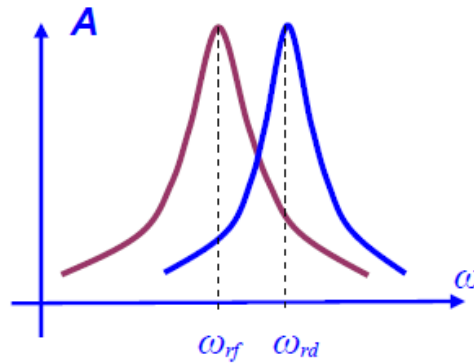


Рис. 5

«Напівконтактний» режим («tapping» mode)

Сущность полуконтактного режима заключается в том, что консоль с зондом раскачивают генератором механических колебаний (пьезокерамическим генератором, расположенном в месте крепления кантилевера, или магнитным полем), при этом основную часть периода колебаний зонд не взаимодействует с поверхностью.

Кантилевер подводится к поверхности так, чтобы в нижнем полупериоде колебаний происходило касание поверхности образца (это соответствует области отталкивания на графике зависимости силы от расстояния (рис. 6)).

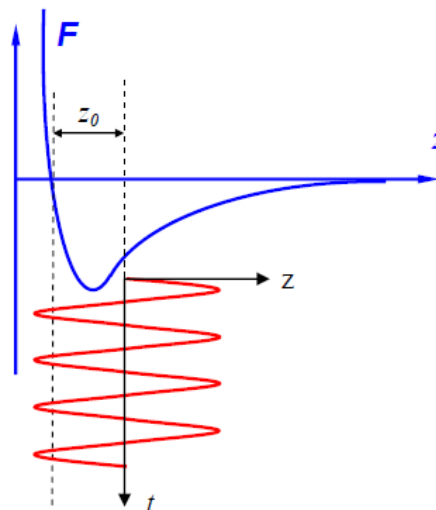


Рис. 6. Выбор рабочей точки при "полуконтактном" режиме колебаний кантилевера

Формирование изображения рельефа поверхности в режиме колебаний консоли кантилевера происходит следующим образом. Возбуждают колебания консоли на частоте ν близкой к резонансной с амплитудой A_v . При сканировании система обратной связи АСМ поддерживает постоянной амплитуду колебаний кантилевера на уровне A_0 ($A_0 < A_v$). Перемещение сканера с образцом по оси Z записывают в память компьютера в качестве изображения рельефа поверхности.

Нанофізика та нанотехнології

2. Наскільки теплові коливання кантилевера обмежують роздільну здатність силового мікроскопу?

В основі роботи АСМ (атомного силового мікроскопа) лежить силова взаємодія між зондом і поверхнею, для реєстрації якої використовуються спеціальні зондові датчики, що представляють собою пружну консоль з гострим зондом на кінці (рис. 1). Сила, що діє на зонд з боку поверхні, призводить до вигину консолі. Реєструючи величину вигину, можна контролювати силу взаємодії зонда з поверхнею.



Рис. 1. Схематичне зображення зондового датчика АСМ

За теоремою про рівномірний розподіл кінетичної енергії за степенями свободи, яка стверджує, що за умови теплової рівноваги системи будь-яка степінь свободи, що проявляється як квадратична функція, має середню енергію, що залежить тільки від температури:

$$E = \frac{1}{2} k_b T$$

Тут k_b – константа Больцмана, T – температура.

Енергія пружних коливань кантилевера дорівнює:

$$E = \frac{1}{2} k A^2$$

Тут k – жорсткість, A – відхилення.

Прирівнюючи цю енергію до теплової енергії, одержуємо:

$$A^2 = \frac{k_b}{k} T$$

Розглянемо типові умови: $k = 0,1$ Н/м, $T = 273$ К:

$$A = \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}}{0,1 \text{ Н/м}} 273 \text{ К}} = 1,94 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

На таку величину зменшиться роздільна здатність приладу. Типова амплітуда коливань кантилевера – нанометри.

3. Створення нанооб'єктів на поверхні з використанням методів скануючої зондової мікроскопії

Помимо исследовательских приложений сканирующий туннельный микроскоп получил широкое применение для направленного манипулирования атомами на поверхности твердого тела. В зависимости от специфики используемых закономерностей выделяют *параллельные* и *перпендикулярные процессы* переноса атомов. В параллельных процессах атомы или молекулы заставляют двигаться вдоль поверхности. В перпендикулярных же их переносят с поверхности на острие зонда и обратно.

Параллельные процессы

Перемещение атомов параллельно поверхности подложки может быть осуществлено в процессе *полевой диффузии* или *скольжения*.

Адсорбированный атом всегда находится в потенциальной яме. Энергия, необходимая для его перемещения, соответствует энергетическому барьеру для диффузии по поверхности.

Полевая диффузия адсорбированных на поверхности атомов инициируется сильно неоднородным электрическим полем, создаваемым между острием зонда и поверхностью. Напряженность этого поля может достигать 30–50 В/нм. Этого вполне хватает для ионизации и десорбции атомов. Для ускорения же поверхностной диффузии достаточно электрических полей и меньшей напряженности.

Потенциальная энергия атома при действии зонда добавляется к периодическому потенциалу поверхности (рис. 1,а), образуя потенциальный рельеф, благоприятный для направленного движения адсорбированного атома в область, находящуюся непосредственно под острием зонда.

При слабом взаимодействии обычно формируется широкая потенциальная яма (рис. 1,б) с рельефом, модулированным периодическим потенциалом поверхности. В случае же сильного ориентированного взаимного притяжения атома и зонда, связанного с их химической природой, потенциальная яма для атома сужается и локализуется строго под зондом (рис. 1,в). В процессе диффузии по поверхности адсорбированный атом «проваливается» в эту яму и задерживается в ней.

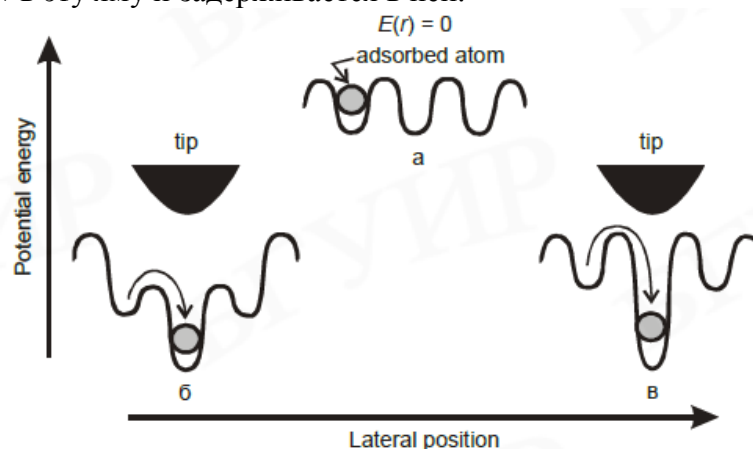


Рис. 1. Потенциальная энергия атома, адсорбированного на поверхности кристаллической подложки, в зависимости от его положения относительно зонда сканирующего туннельного микроскопа

Скольжение инициируется силами взаимодействия атомов зонда и перемещаемого атома на поверхности. Величина этих сил определяется потенциалом межатомного взаимодействия. Задавая определенное положение зонда, можно управлять величиной и направлением действия результирующей этих сил.

Манипуляция атомом посредством скольжения схематически показана на рис. 2.

Первоначально зонд устанавливается в позиции наблюдения адсорбированного атома по обычной процедуре. Затем зонд приближают к атому на расстояние, необходимое для проявления сил межатомного взаимодействия. Это достигается заданием большей величины туннельного тока. Поддерживая его постоянным, зонд перемещают вдоль поверхности в новую позицию, после чего, уменьшая контролируемый туннельный ток, отводят от поверхности на прежнее расстояние.

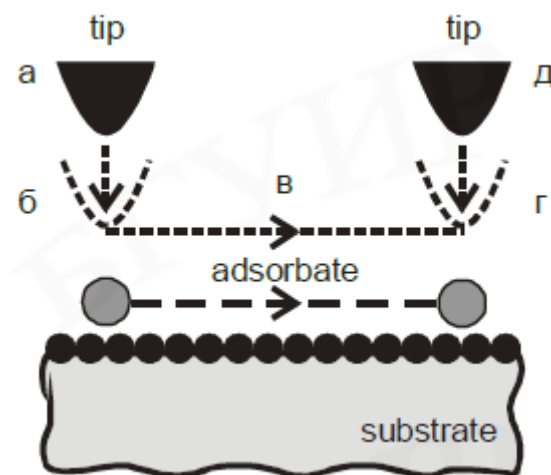


Рис. 2. Схема манипулирования атомами посредством скольжения: а и д – наблюдение; б – связывание с зондом; в – скольжение; г – отделение от зонда

Перпендикулярные процессы

В этой группе процессов отдельные атомы, молекулы или их группы переносятся с поверхности подложки на острие зонда и обратно. В

зависимости от эффективности действия электрического поля манипуляция атомами может быть осуществлена с помощью **контактного переноса, полевого испарения и электромиграции**.

Контактный перенос представляет собой простейшую реализацию перпендикулярных процессов. Он осуществляется путем сближения зонда и предназначенного для переноса атома до расстояния, при котором потенциальные ямы для адсорбции на зонде и на подложке не сольются. Атом в такой ситуации оказывается одновременно связанным и с зондом, и с подложкой. Зонд затем отводят от поверхности вместе с адсорбированным на нем атомом. Безусловно, что такое поведение перемещаемого атома может иметь место лишь в случае, когда его связь с подложкой слабее сил адсорбции на зонде.

Полевое испарение использует свойство атомов переходить с подложки на зонд при приложении между ними электрического поля. Его рассматривают как термически активируемый процесс, в котором поверхностные атомы ионизируются приложенным электрическим полем, испаряются и, дрейфуя в этом поле, легче преодолевают потенциальный барьер (барьер Шотки), отделяющий их от зонда. Такие условия

обычно создают для положительно заряженных ионов, для чего на подложку подают положительный относительно зонда импульсный потенциал.

Электромиграция в зазоре зонд – подложка предполагает те же основные закономерности, что и в твердом теле. Поток носителей заряда увлекает за собой отдельные атомы благодаря как зарядовому взаимодействию, так и в результате передачи части кинетической энергии от движущихся электронов атомам при прямых соударениях. Атомная электромиграция обратима и не имеет пороговых ограничений по величине напряженности электрического поля в зазоре.

Классический пример, иллюстрирующий возможности манипулирования атомами на поверхности твердого тела, показан на рис. 3.

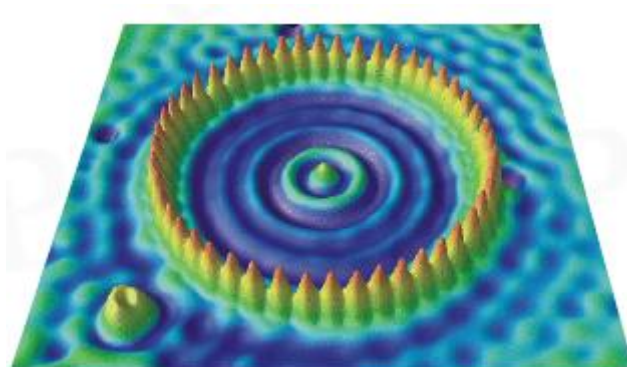


Рис. 3. Изображение в сканирующем туннельном микроскопе искусственного коралла, созданного из 48 атомов железа на $Cu(111)$ подложке. Радиус коралла 7,13 нм.

Искусственный коралл построен из атомов железа на поверхности меди. Изображение этого коралла, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа, представляет собой распределение плотности электронных состояний, соответствующих атомам железа и меди.

Нанофізика та нанотехнології

4. Специфічні властивості нанокластерів (порівняно з масивними зразками)

Нанокластеры представляют собой наноразмерные комплексы атомов или молекул. Нанокластеры по степени упорядоченности структуры подразделяются на упорядоченные, иначе называемые магическими, и неупорядоченные.

В **магических (упорядоченных)** нанокластерах атомы или молекулы расположены в определенном порядке и довольно сильно связаны между собой. Благодаря этому обеспечивается сравнительно высокая устойчивость магических нанокластеров, их невосприимчивость к внешним воздействиям.

Неупорядоченные нанокластеры характеризуются отсутствием порядка в расположении атомов или молекул и слабыми химическими связями. Этим они существенно отличаются как от магических нанокластеров, так и от нанокристаллов. Вместе с тем неупорядоченные нанокластеры играют особую роль в процессах образования нанокристаллов.

Нанокластеры – частицы вещества еще меньшего размера, не превышающего 10 нм, и содержащие не более 1000 атомов. Иногда они представляют собой большие компактные молекулы с атомным весом более 1000 а.е. Такие молекулы, в отличие от наночастиц, имеют одинаковые размеры и формы. Свойства нанокластеров часто отличаются от свойств не только массивных образцов, но и наночастиц.

Особый практический интерес представляют магнитные нанокластеры – молекулы с одинаковым спиновым моментом, которые можно использовать для производства памяти для ЭВМ. Применяются нанокластеры также в медицине и парфюмерии.

Некоторые физические законы, справедливые в макроскопической физике, для наночастиц и нанокластеров нарушаются. Например, несправедливы известные формулы для сопротивлений проводников при их параллельном и последовательном соединении. Вода в нанопорах горных пород не замерзает до $-20 \dots -30$ °C, а температура плавления наночастиц золота существенно меньше по сравнению с массивным образцом. Доля поверхностных атомов становится все больше по мере уменьшения размеров частиц. Для наночастиц и, в особенности, нанокластеров, практически все атомы «поверхностные», поэтому их химическая активность очень велика.

Особенности в сравнении с массивным образцом:

- Электроны атомов металлов, составляющих ядро кластера, не делокализованы, в отличие от обобщенных электронов атомов тех же металлов в массивном образце, а формируют дискретные энергетические уровни, отличные от молекулярных орбиталей.
- При уменьшении размера кластера и температуры одноэлектронного перехода нарушается линейная зависимость $U=f(I)$, характерная для массивного металла. На зависимости появляются ступеньки, отвечающие одно электронным переходам.
- Массивные твердые тела (Pd) характеризуются линейной температурной зависимостью электронной теплоемкости $C \sim T$. Переход от массивного твердого тела к нанокластерам сопровождается появлением квантоворазмерных эффектов, проявляющихся в отклонении зависимости $C=f(T)$ от линейной по мере уменьшения размера кластера.
- Температура плавления наночастиц золота существенно меньше по сравнению с массивным образцом.

НЕОБЯЗАТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ:

Упорядоченные нанокластеры

Особенность упорядоченных, или магических, нанокластеров состоит в том, что для них характерны не произвольные, а строго определенные, энергетически наиболее выгодные – так называемые магические числа атомов или молекул.

Повышенная стабильность, присущая магическим кластерам, обусловлена жесткостью их атомной или молекулярной конфигурации, которая удовлетворяет требованиям плотной упаковки и соответствует завершенным геометрическим формам определенных типов.

Возможно существование различных конфигураций из плотно упакованных атомов, причем, все эти конфигурации представляют собой различные сочетания группировок из трех атомов, в которых атомы расположены на равных расстояниях друг от друга и образуют равносторонний треугольник (рис. 4.1).

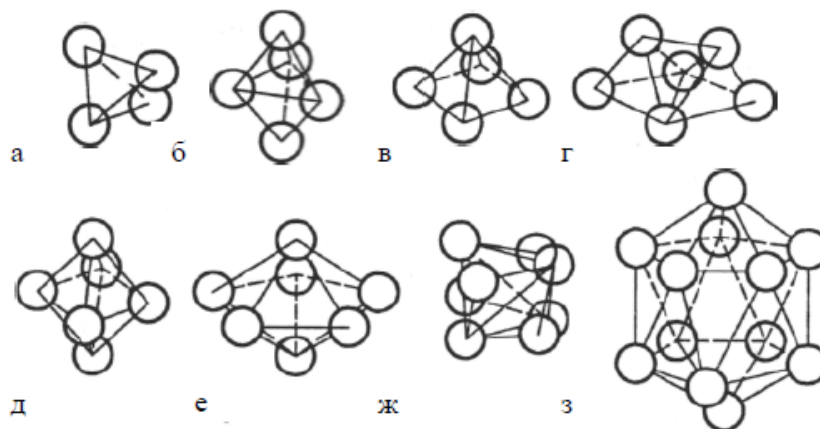


Рис. 4.1. Конфигурации нанокластеров из N плотноупакованных атомов [1]

а – тетраэдр ($N = 4$); б – тригональная бипирамида ($N = 5$) как сочетание двух тетраэдров; в – квадратная пирамида ($N = 5$); г – трипирамида ($N = 6$), образованная тремя тетраэдрами; д – октаэдр ($N = 6$); е – пентагональная бипирамида ($N = 7$); ж – звездообразный тетраэдр ($N = 8$) образован пятью тетраэдрами – к каждой из 4 граней центрального тетраэдра присоединен еще один тетраэдр; з – икосаэдр ($N = 13$) содержит центральный атом, окруженный 12 атомами, объединенными в 20 равносторонних треугольников, и имеет шесть осей симметрии 5-го порядка.

Простейшей из таких конфигураций, соответствующей наименьшему нанокластеру, состоящему из четырех атомов, является тетраэдр (рис. 4.1, а), который входит в качестве составной части в другие, более сложные конфигурации. Как видно на рис. 4.1, нанокластеры могут иметь кристаллографическую симметрию, для которой характерны оси симметрии 5-го порядка. Это принципиально отличает их от кристаллов, структура которых характеризуется наличием кристаллической решетки и может иметь только оси симметрии 1-го, 2-го, 3-го, 4-го и 6-го порядков.

Магические нанокластеры могут формироваться при различных условиях, как в объеме конденсирующейся среды, так и на поверхности подложки, которая может оказывать определенное влияние на характер формирования нанокластеров.

Неупорядоченные нанокластеры

Неупорядоченные нанокластеры представляют собой неустойчивые формирования, аналогичные по структуре так называемым ван-дер-ваальсовым молекулам – скоплениям небольшого числа молекул (атомов), возникающими за счет слабого взаимодействия, обусловленного ван-дер-ваальсовыми силами. Они ведут себя подобно жидкостям и склонны к самопроизвольному распаду.

Неупорядоченные нанокластеры играют ключевую роль в процессах образования нанокристаллов, фактически являясь прообразами нанокристаллов, иначе называемых кристаллическими наночастицами, которые характеризуются упорядоченным расположением атомов или молекул и сильными химическими связями – подобно массивным кристаллам (макрокристаллам).

Нанокристаллы могут иметь размеры до 10 нм и более и, соответственно, содержать довольно большое число атомов или молекул (от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч и выше).

Наличие дискретного спектра состояний в КТ существенным образом отличает её от объёмных материалов, где разрешенные зоны с практически непрерывным энергетическим спектром чередуются с запрещенными зонами, и позволяет сравнивать КТ с атомом. Дискретный спектр состояний в КТ может привести к независимости заселённости уровней в ней от температуры в случае, если расстояние между уровнями много больше тепловой энергии носителей. В связи с этим становится возможным реализации приборов с температурно-независимыми характеристиками. Кроме этого, теоретически было показано, что среда с нульмерной плотностью состояний обладает рядом преимуществ для генерации света, а именно, низким пороговым током, высокой характеристической температурой и большим коэффициентом усиления. Часть из этих преимуществ уже реализована в лазерных структурах на основе квантовых точек в гетеросистемах A_3B_5 .

Механизмы гетероэпитаксиального роста

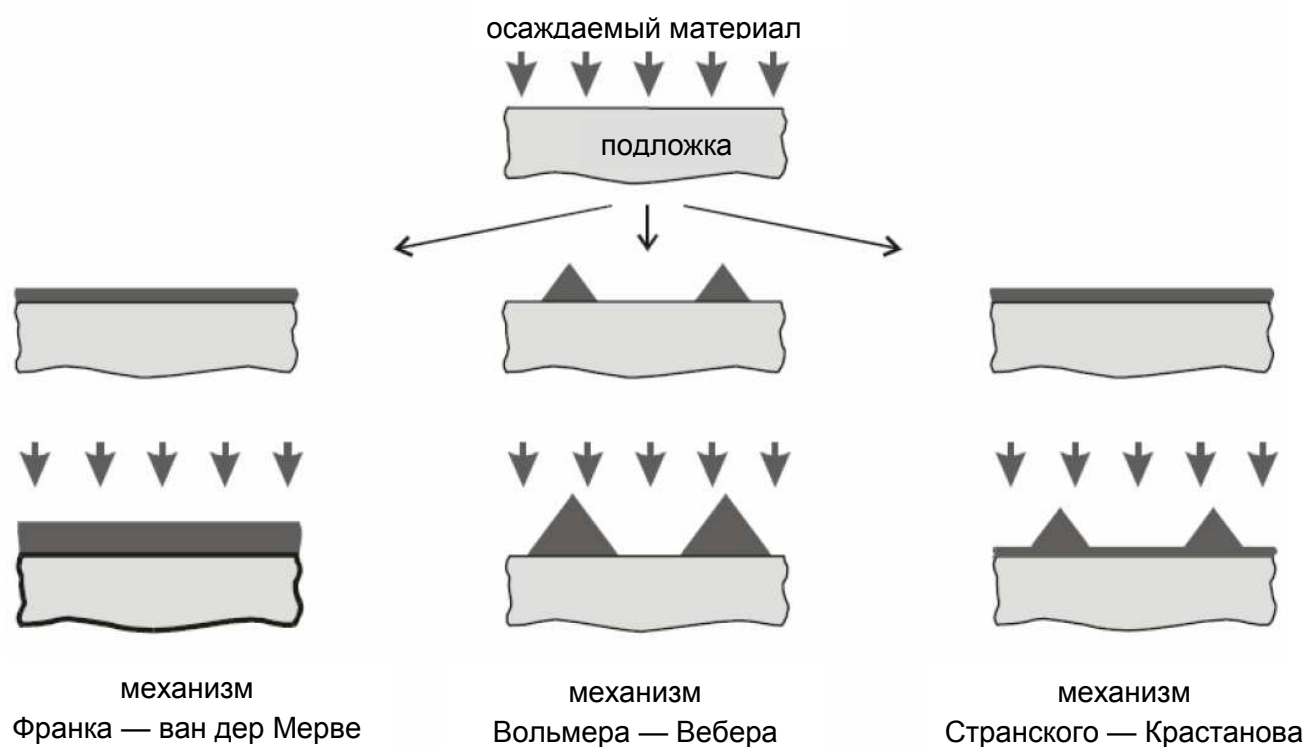


Рис. 1. Основные механизмы гетероэпитаксиального роста.

В случае гетероэпитаксиального роста, когда материалы растущей плёнки и подложки отличаются, возможны различные механизмы роста в зависимости от параметров этих материалов. Основные механизмы, реализующиеся в процессе гетероэпитаксиального роста, представлены на рисунке 1. В случае, когда параметры кристаллических решёток подложки и осаждаемого материала совпадают и в растущей плёнке не возникает механических напряжений, то механизм эпитаксиального роста зависит от поверхностных энергий подложки (γ_1), осаждаемого материала (γ_2) и энергии гетерограницы (γ_{12}).

Если выполняется соотношение:

$$\gamma_2 + \gamma_{12} < \gamma_1, \quad (2)$$

то происходит послойный рост, называемый так же ростом по механизму Франка — ван дер Мерве.

В этом случае двумерный рост пленки приводит к уменьшению суммарной энергии системы за счёт уменьшения поверхностной энергии. При этом говорят, что осаждаемый материал «смачивает» подложку. Данный механизм роста реализуется при гомоэпитаксии. Если же выполняется обратное соотношение:

$$\gamma_2 + \gamma_{12} > \gamma_1, \quad (3)$$

то происходит островковый, трехмерный рост по механизму Вольмера — Вебера. В этом случае поверхность подложки «не смачивается» осаждаемым материалом.

В гетеросистемах, растущих по так называемому «механизму Странского — Крастанова», выполняется соотношение (2) для поверхностных энергий, но постоянные кристаллических решеток осаждаемого материала и подложки различны. На начальном этапе роста по механизму Странского — Крастанова осаждаемый материал образует однородный «смачивающий» слой, что приводит к уменьшению суммарной энергии системы (рис. 3). Однако при дальнейшем увеличении количества осаждаемого материала происходит рост энергетического слагаемого, связанного с упругими напряжениями, вызванными рассогласованием кристаллических решеток пленки и подложки. Упругую энергию (E_{el}), накопленную в напряженном слое, в расчёте на единицу площади можно вычислить по известной формуле теории упругости:

$$E_{el} = 2G \frac{1+\nu}{1-\nu} \varepsilon^2 d, \quad (4)$$

где G — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона, ε — xx или yy компонента тензора деформаций, d — толщина растущего слоя. ε связана с параметрами решёток слоя и подложки следующим выражением:

$$\varepsilon = \frac{a_n - a_c}{a_n}, \quad (5)$$

где a_n и a_c — параметры решётки подложки и растущего слоя соответственно.

С определенной толщины рост двумерной бездефектной пленки становится энергетически невыгоден, так как необходимо уменьшение этого слагаемого за счет релаксации упругих напряжений.

Существует два основных механизма релаксации упругих напряжений в пленке. Согласно первому из них, так называемому «классическому» механизму роста Странского — Крастанова, рост бездефектной, однородной пленки происходит до толщины, при которой накопленной упругой энергии достаточно для преодоления энергетического барьера формирования дислокации несоответствия (~ 5 эВ для системы GeSi/Si(001)). Образование дислокаций несоответствия приводит к уменьшению упругих напряжений и, как следствие, уменьшению суммарной энергии системы. В месте образования дислокации происходит

локальное уменьшение химического потенциала, что приводит к диффузии осаждаемого материала в эту область и к образованию трехмерного кластера (островка) над дислокацией (рис. 1). Формирование островков, образованных в результате появления дислокаций несоответствия, в 80-ые года прошлого столетия рассматривалось как нежелательный процесс, делающий невозможным получение однородных по толщине пленок в напряженных гетеросистемах. Второй механизм релаксации упругих напряжений («когерентный» рост по механизму Странского — Крастанова) связан с тем, что при некоторой толщине пленки, меньшей, чем толщина, необходимая для образования дислокаций несоответствия, частичное снятие упругих напряжений может происходить за счет развития шероховатости поверхности растущей пленки. При этом механизме роста частичная релаксация упругих напряжений материала на вершинах шероховатостей приводит к уменьшению части энергии системы, связанной с упругими напряжениями (E_{el}). Однако с появлением шероховатостей связано увеличение поверхностной энергии пленки (E_{sur}). В том случае если релаксация упругих напряжений (ΔE_{el}) в результате формирования неровностей поверхности компенсирует увеличение поверхностной энергии пленки (ΔE_{sur}), образование шероховатостей выгодно с энергетической точки зрения и приводит к уменьшению суммарной энергии системы (E_s):

$$\Delta E_s = \Delta E_{el} + \Delta E_{sur} < 0. \quad (6)$$

За счет частичной релаксации упругих напряжений на шероховатостях суммарная энергия пленки с увеличением ее толщины в случае когерентного механизма роста Странского — Крастанова растет медленнее, чем в случае роста по классическому механизму. Необходимо отметить, что существует область толщин пленки, в которой образование шероховатостей не приводит к появлению дефектов кристаллической решетки. По какому из двух механизмов роста Странского — Крастанова будет происходить релаксация упругих напряжений в пленке зависит от величины рассогласования кристаллических решеток пленки и подложки и от условий роста [5].

В начале 90-х годов было экспериментально обнаружено, что одной из стадий релаксации упругих напряжений в полупроводниковых гетероструктурах, растущих по когерентному механизму Странского — Крастанова, является формирование на их поверхности трехмерных бездефектных нанообъектов. В зависимости от размеров такие нанообразования принято называть самоорганизующимися наноструктурами или квантовыми точками (КТ). Уменьшение упругих напряжений в таких нанообъектах происходит как за счет их релаксации на свободной, не связанной напрямую с подложкой, поверхности островков, так и за счет локального изгиба подложки (рис. 2). При определенных параметрах наноструктур это уменьшение упругих напряжений компенсирует дополнительную поверхностную энергию островков (рис. 2), что приводит к уменьшению суммарной энергии системы при формировании островков.

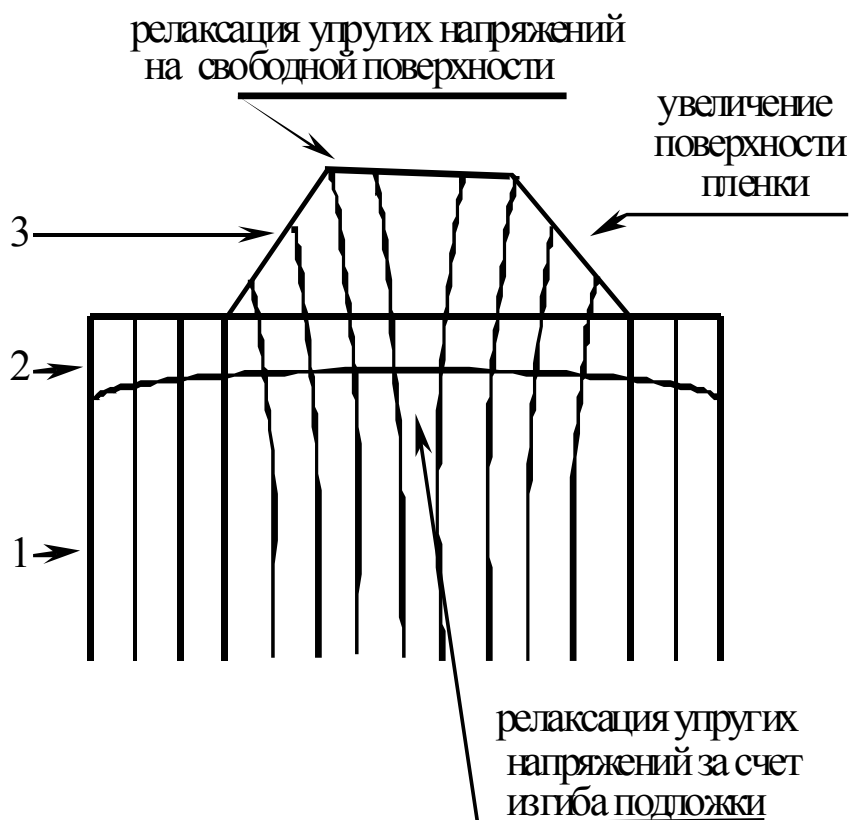


Рис. 2. Схематичное представление механизма релаксации упругих напряжений в когерентных островках. Цифрами на рисунке отмечены подложка (1), смачивающий слой (2) и островок (3).

Практический интерес к структурам с GeSi нанодоостровками во многом связан с потенциальной возможностью использования этих структур для создания оптоэлектронных приборов, интегрированных с современной кремневой технологией. Уже первые исследования физических свойств структур с GeSi островками показали, что образование островков приводит к появлению в спектрах фото и электролюминесценции от этих структур сигнала в области длин волн 1,3—1,55 мкм. Также в структурах с GeSi островками в этой области длин волн наблюдается сигнал фотопроводимости. Данная область длин волн является важной для телекоммуникации и передачи информации по оптоволоконным линиям связи, так как является областью минимальных оптических потерь и минимальной дисперсии в кварцевом оптоволокне.

Рост SiGe/Si(001) гетероструктур

Изучение роста SiGe гетероструктур начнем с рассмотрения атомарно-чистой поверхности подложки кремния, плоскость которой перпендикулярна кристаллографическому направлению [001] (подложка Si(001)). Известно, что на поверхности монокристаллической подложки имеются атомы со свободными атомными связями. Для того чтобы уменьшить число свободных связей, а, следовательно, и понизить суммарную энергию системы, атомы на поверхности образуют кристаллическую структуру, которая отличается от кристаллической структуры в объеме подложки. Такую кристаллическую перестройку на поверхности подложки принято называть «реконструкцией поверхности». В случае атомарно-чистой вицинальной (вырезанной под небольшим углом к атомной плоскости) поверхности подложки Si(001) наблюдается реконструкция поверхностных атомов (2×1) (рис. 3). Данное обозначение указывает на то, что в одном из кристаллографических направлений параметр (период) реконструкции в 2 раза больше, чем в объеме, а в другом — равен объемному параметру решетки.

Реконструкция (2×1) вызвана появлением на поверхности так называемых димеров (двух близко расположенных атомов Si), образование которых приводит к уменьшению числа и, таким образом, энергии свободных связей поверхностных атомов Si (рис. 3 и рис. 4). Димеры в пределах одной атомной плоскости выстраиваются в цепочки. Из-за того, что кремний имеет кристаллографическую структуру типа алмаза, направление димеров в каждом последующем атомном слое меняется на 90° .

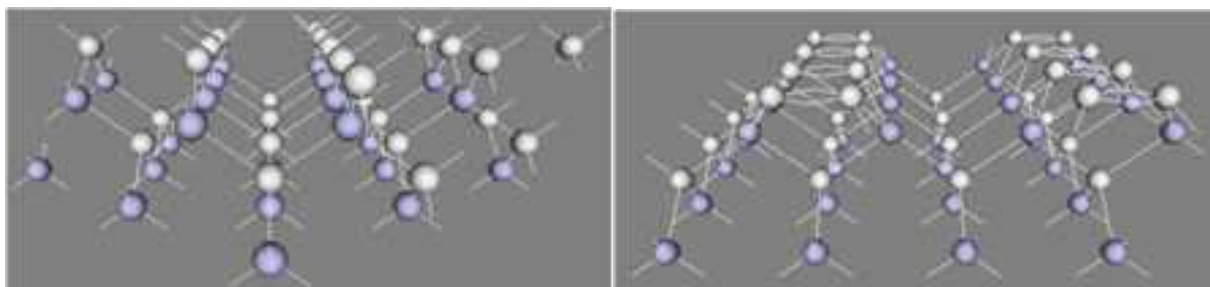


Рис. 3. Поверхность Si(001) без реконструкции (слева) и с реконструкцией (2×1) (справа). Круги обозначают атомы Si, линии – атомные связи (см. <http://www.ipm.sci-nnov.ru/~Demidov>).

Как было отмечено выше, рост Ge на Si идет по механизму Странского — Крастанова. Это означает, что из-за меньшей поверхностной энергии пленки Ge, на начальных этапах роста энергетически выгодным является двумерный рост Ge в виде сплошной пленки. Однако параметры объемной кристаллической решетки германия больше, чем у кремния (0.565 нм для Ge по сравнению с 0.543 нм для Si). В результате рассогласования параметров кристаллических решеток Ge и Si, пленка Ge при осаждении на поверхность Si(001) испытывает упругие напряжения сжатия. Релаксация упругих напряжений в растущей пленке Ge начинается уже при ее субмонослойных толщинах за счет изменения реконструкции поверхности.

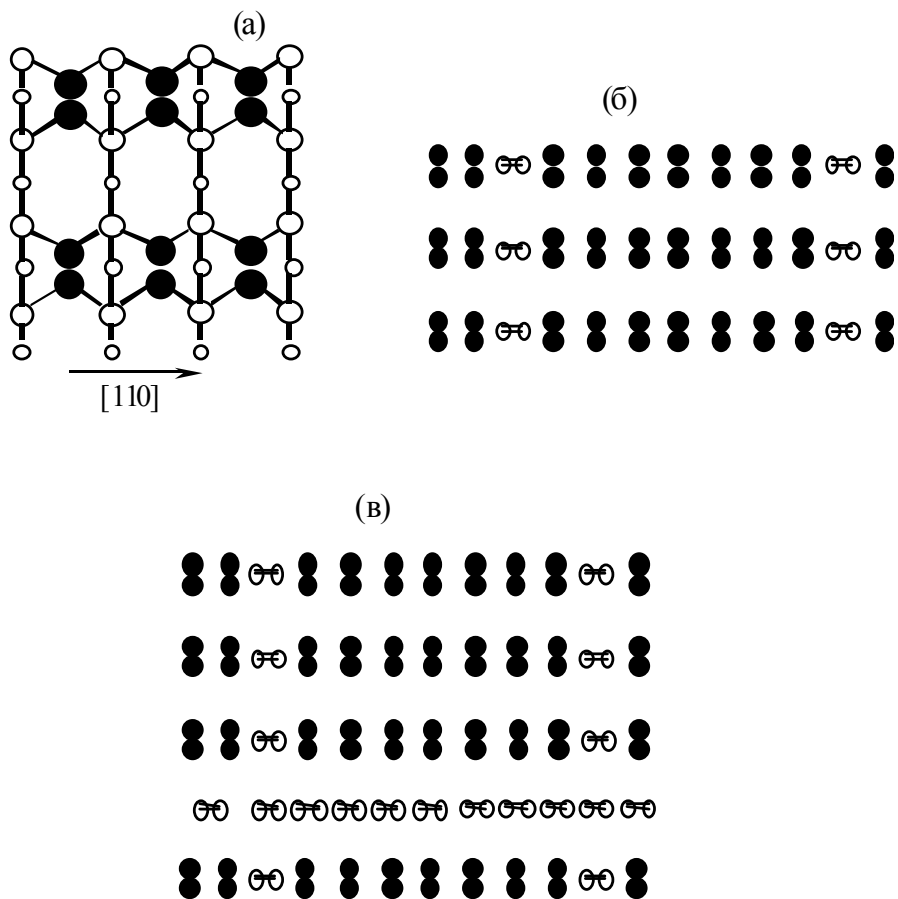


Рис. 4. Схематичное представление реконструкций поверхности пленки Ge/Si(001). (а) — реконструкция (2×1) на поверхности Si(001). Черные кружки соответствуют атомам в верхнем слое, не закрашенные средние и маленькие кружки — атомам во втором и третьем слое, соответственно. Стрелкой показано кристаллографическое направление [110]. (б) — реконструкция поверхности пленки Ge/Si(001) (2×n) ($n = 8$). (в) — реконструкция поверхности пленки Ge/Si(001) (m×n).

Упругие напряжения в осажденной пленке Ge приводят к тому, что в цепочках димеров образуются дивакансии (отсутствие в цепочке одного димера), за счет образования которых происходит частичная релаксация упругих напряжений сжатия граничащих с ней Ge атомов (рис. 4б). Упругое взаимодействие дивакансий между собой приводит к их упорядочению в ряды дивакансий. При этом реконструкция поверхности (2×1) меняется на реконструкцию (2×n), где n — целое число, означающее, что в цепочках димеров отсутствует каждый n -ый димер. Значение $n \geq 12$ для толщин Ge (d_{Ge}) меньше одного монослоя (МС) ($1 \text{ МС} \approx 0,14 \text{ нм} = 6,27 \times 10^{14} \text{ атомов/см}^{-2}$) уменьшается до 6—10 в зависимости от степени перемешивания Ge с Si для $d_{Ge} \geq 2 \text{ МС}$. Уменьшение n связано с ростом упругой энергии в системе с увеличением толщины пленки Ge, поскольку означает увеличение числа дивакансий, что способствует большей релаксации упругих напряжений.

Нанофізика та нанотехнології

6. Скануючий тунельний мікроскоп працює в режимі сталого тунельного струму. Яким чином отримують інформацію стосовно топографії поверхні?

В основі роботи скануючого тунельного мікроскопу (СТМ) лежить процес тунелювання електронів крізь потенціальний бар'єр, утворений між двома електродами. Одним із електродів є досліджуваний зразок, іншим – металеве вістря СТМ. Внаслідок переходу зарядів з вістря на зразок або навпаки між електродами протікає електричний струм, амплітуда якого несе інформацію про різноманітні властивості поверхні зразка.

У СТМ тунельний струм вимірюється в електричному колі, що складається з вістря, зразка, тунельного проміжку між ними, джерела тунельної напруги та вимірювальної системи (див. рис. 2.2.1). Остання передає виміряну величину струму у систему зворотного зв'язку, де відбувається порівняння виміряної величини струму з певним, наперед заданим, значенням тунельного струму.

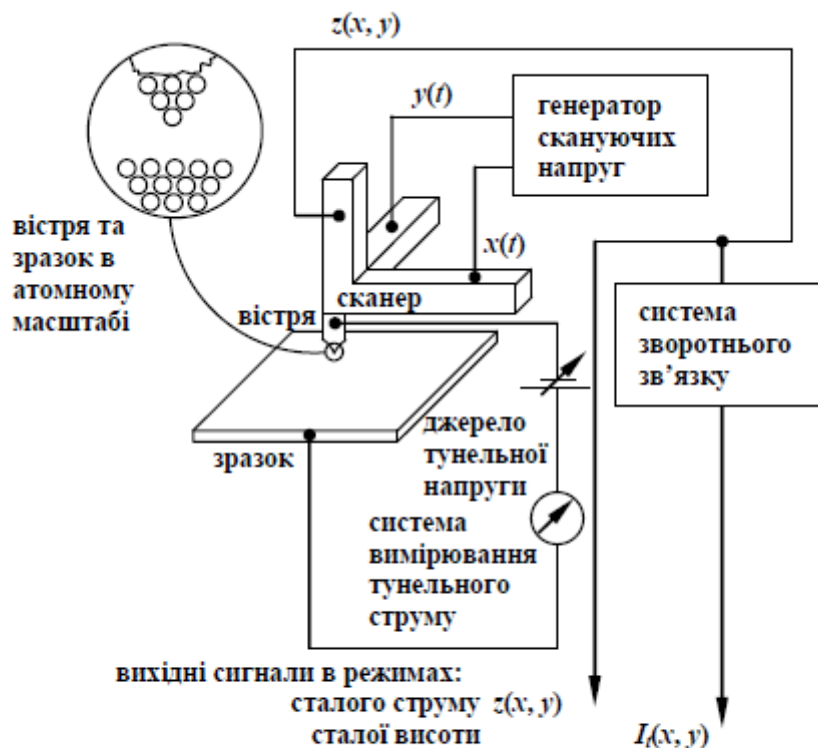


Рис. 2.2.1. Схематичне зображення основних складових частин СТМ.

Найчастіше сканер виготовляється у вигляді п'єзокристалічної збірки або монокристалу і забезпечує переміщення вістря у трьох взаємно ортогональних напрямках: x , y , z . Це відбувається за рахунок п'єзоефекту при прикладанні електричних напруг до відповідних провідних обкладинок, нанесених на п'єзокристал. Нехай x та y є координатами у площині зразка (латеральними координатами), а z є координатою перпендикулярною до цієї площини. Зміна координати $z = z_0$ вістря фактично означає зміну товщини тунельного бар'єра l .

Напруга (напруги у випадку всіх трьох координат) на п'єзоелементі, що відповідає за переміщення вздовж осі z , визначається системою зворотного зв'язку за наступним принципом. Якщо фактичний виміряний тунельний струм виявляється меншим за I_0 , п'єзоелемент наближає вістря СТМ до зразка, якщо більшим – навпаки, віддаляє. Завдяки надзвичайно сильній залежності тунельного струму від ширини бар'єра $l = L$, такий негативний зворотній зв'язок призводить до того, що відстань L між поверхнею зразка та вершиною вістря СТМ підтримується сталою. Такий режим роботи СТМ називається *режимом сталого струму* і найчастіше використовується на практиці.

Інше пояснення (не обов'язково писати!)

Координата z_0 вістря СТМ – координата, яка характеризує висоту вістря над поверхнею зразка – визначається системою зворотного зв'язку. Одним з основних елементів цієї системи є двигуни на основі п'єзоелементів – так звані п'єзодвигуни. У наближенні лінійного п'єзоефекту координати вістря (x_0, y_0, z_0) є пропорційними відповідним миттєвим значенням напруг, прикладених до п'єзоелементів. Отже, вимірюючи значення напруг, прикладених до п'єзоелементів, можна визначити значення відповідних координат.

Одночасно вимірюючи значення напруг, які відповідають координатам (x_0, y_0, z_0) , можна визначити траєкторію руху вістря $z_0(x_0, y_0)$, тобто визначити топографію поверхні досліджуваного зразка.

Нанофізика та нанотехнології

7. На поверхні Cu(111) присутні молекули C_2H_2 та C_2D_2 . Як їх розрізнити, використовуючи методи тунельної спектроскопії?

Тут використовується непружна тунельна спектроскопія.

При збільшенні абсолютної величини тунельної напруги від нуля до певного порогового значення $\frac{\hbar\omega}{e}$, відкривається додатковий канал тунелювання електронів між зразком та зондом. Він зумовлений коливаннями молекул на поверхні з частотою ω . Результатом «активізації» непружної компоненти буде наявність ледь помітного зламів на ВАХ тунельного переходу (рис. 3.2.3). Таким чином точка $\frac{\hbar\omega}{e}$ на горизонтальній осі графіку $I(V)$, ділить ВАХ на дві частини: з більш повільним та більш швидким зростанням струму. Отже, на графіку $\frac{dI(V)}{dV}$ у цій точці буде спостерігатися невелика сходинка, яку досить складно ідентифікувати візуально. Для кращого представлення даних непружної тунельної спектроскопії вдаються до обчислення другої похідної від тунельного струму за напругою $\frac{d^2I(V)}{dV^2}$. На її графіку буде присутній пік, положення якого на осі напруг буде відповідати енергії фонону $\hbar\omega$, що збуджується тунелюючим електроном.

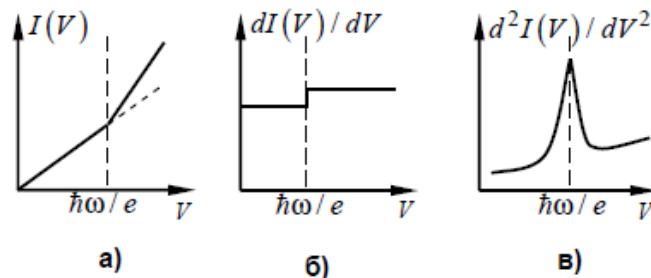


Рис. 3.2.3. Схематичне зображення непружних тунельних спектрів: а) $I(V)$; б) $dI(V)/dV$; в) $d^2I(V)/dV^2$.

При інших рівних умовах, характерна частота коливань молекули $\omega \sim \sqrt{k/\mu}$ зменшується при збільшенні зведеної маси молекули m . Оскільки зведена маса молекули C_2D_2 приблизно вдвічі більша за зведену масу молекули C_2H_2 , характерні частоти для цієї молекули суттєво менші характерних частот молекули C_2H_2 . Отже резонансний пік при $eV \sim \hbar\omega$ для молекули C_2H_2 повинен спостерігатись при помітно більших напругах ніж для молекули C_2D_2 . Таким чином, верхня крива на спектрі, зображеному на рис. 4.40.1, відповідає молекулі C_2H_2 , а нижня – молекулі C_2D_2 .

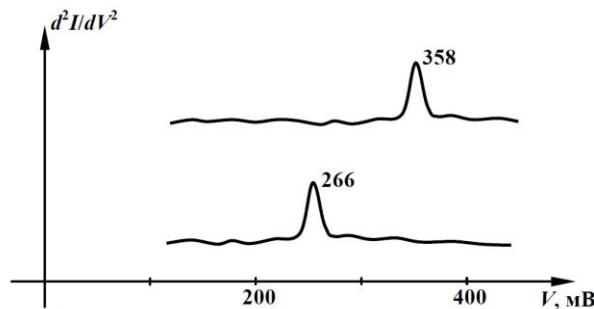


Рис. 4.40.1. Схематичне зображення спектрів молекул C_2H_2 (верхня крива) та C_2D_2 (нижня крива).

На цьому прикладі видно, що однією з переваг тунельної спектроскопії є розрізнення молекул за хімічним складом.

§1. Методы получения углеродных нанотрубок

Первые нанотрубки производились в дуговом разряде. На сегодняшний день широко используются так называемые CVD-методы (Chemical Vapor Deposition), в частности, каталитический пиролиз углеродсодержащих материалов и другие способы. Большой проблемой в процессе получения нанотрубок является управление процессом их роста. Обычно при синтезе образуются одно- и многослойные нанотрубки и аморфный углерод. Причем нанотрубки, как правило, собраны в пучки.

1.1. Электродуговой метод

В настоящее время наиболее распространённым является метод термического распыления графитовых электродов высокой чистоты в плазме дугового разряда. Процесс образования нанотрубок осуществляется в камере, заполненной гелием под давлением около 500 торр (рис. 1). При горении плазмы гелия происходит интенсивное термическое испарение анода, при этом на торцевой поверхности катода образуется осадок, в котором присутствуют нанотрубки углерода.

1.2. Каталитический метод (CVD - chemical vapor deposition)

Каталитический метод основан на использовании процесса разложения углеводородов (ацетилена, метана и др.) в присутствии катализаторов. Катализатор, представляющий собой мелкодисперсный металлический порошок (Ni, Co, Cu, Fe), заполняет керамический тигель, заключенный в кварцевую трубку длиной 60 см, внутренним диаметром 4 мм (рис. 2). Кварцевая трубка помещается в печь, в которой поддерживается температура 700-1000 °C.

Смесь ацетилена C_2H_2 и азота N_2 в соотношении 1:10 прокачивается через трубку в течение нескольких часов. В результате каталитического распада ацетилена получается несколько типов углеродных структур: аморфный слой углерода на поверхности катализатора; нити аморфного углерода; металлические частицы, заключенные в оболочку из графитовых слоев и нанотрубки. Выход нанотрубок зависит от типа катализатора.

1.3. Другие методы получения углеродных нанотрубок

Конденсационный метод

Метод основан на термическом распылении графита в вакууме 10^{-8} торр. Высокая температура распыления (до 3000 °C) достигается в результате резистивного нагрева при пропускании тока через графитовую ленту. Сажа с нанотрубками конденсируется на охлаждаемую водой подложку из высокоупорядоченного пиролитического графита.

Метод лазерного испарения

Метод основан на распылении графита под воздействием импульсного лазерного излучения в потоке инертного (He или Ar) газа. Сажа с нанотрубками осаждается на охлаждаемой водой медную подложку.

Пиролитический метод

Основан на пиролизе (разложении) бензола в потоке водорода. Пиролиз бензола происходит при 1000°C. Сажа с нанотрубками осаждается на графитовом стержне.

3.1. Структурные типы однослойных углеродных нанотрубок

Однослойная углеродная нанотрубка – нанотрубка со стенкой в один атомарный слой. Диаметр однослойной трубки составляет 0.6-1.8 нм (1.4 нм типичный).

Структурные параметры углеродной нанотрубки определяются структурой базисных плоскостей графита, симметрией кристаллического графенового слоя относительно оси трубки. Сворачивать графеновый слой можно в разных направлениях: вдоль грани шестиугольника – трубки "armchair" (кресельные), перпендикулярно грани – трубки «zigzag» (зигзажные) и во всех промежуточных – "chiral" (хиральные) (рис 7).

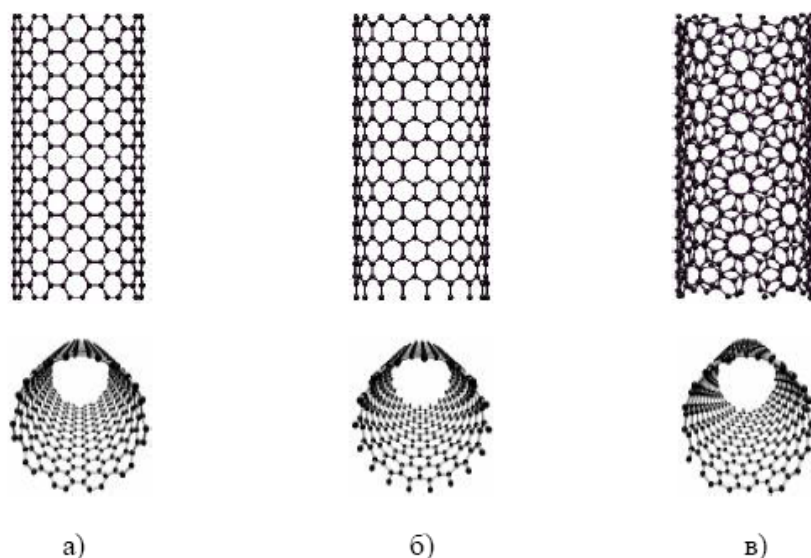


Рис. 7. Структура однослойных нанотрубок:
а) кресельная; б) зигзажная; в) хиральная.

Кресельные и зигзажные нанотрубки имеют высокосимметричную структуру, так кресельные нанотрубки переходят в себя при зеркальном отражении, а зигзажные нанотрубки переходят в себя с точностью до поворота. Хиральные нанотрубки составляют большую часть нанотрубок и не обладают столь высокосимметричной формой. В хиральных нанотрубках гексагоны закручиваются по спирали вокруг оси трубки. При зеркальном отражении хиральная нанотрубка (n,m) переходит в нанотрубку (m,n) . Взаимная ориентация гексагональной сетки графита и продольной оси нанотрубки определяет очень важную структурную характеристику нанотрубки – хиральность.

3.2. Структурные параметры углеродных нанотрубок



М.Эшер. «Рисующие руки».

Хиральность (от греч. *hiros* – рука) – тип зеркальной симметрии, при котором левый и правый варианты фигуры не могут быть совмещены друг с другом (подобно симметрии кистей рук).

Рассмотрим подробно как из графитового листа получают нанотрубки (рис.8). Вектора \mathbf{a}_1 и \mathbf{a}_2 являются базисными векторами элементарной ячейки графитового листа. Вектор \mathbf{C} является линейной комбинацией векторов \mathbf{a}_1 и \mathbf{a}_2 и соединяет две эквивалентные точки на первичном графитовом листе:

$$\mathbf{C} = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2,$$

где n, m - целые числа ($n \geq m$), называемые индексами хиральности.

От хиральности зависят свойства нанотрубок.

Металлическими свойствами обладает 1/3 зигзажных нанотрубок. В этом случае n должно быть кратно 3. Остальные 2/3 зигзажных нанотрубок являются полупроводниковыми.

1/3 хиральных нанотрубок является металлическими, если выполняется условие $n-m=3q$, где q - целое число. Остальные 2/3 хиральных нанотрубок, так же как и зигзажные, обладают полупроводниковыми свойствами.

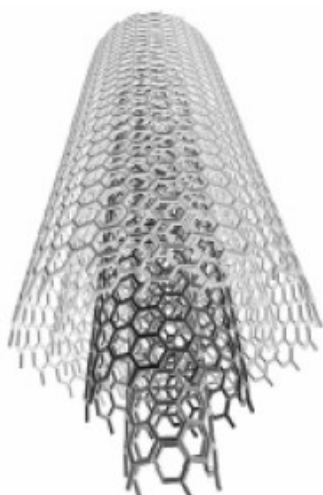


Рис. 12. Модель
многослойной углеродной
нанотрубки.

3.3. Особенности многослойных углеродных нанотрубок

Многослойная углеродная нанотрубка представляет собой вложенные друг в друга нанотрубки, образованные атомарными графитовыми слоями, расстояние между которыми составляет ~ 0.34 нм

(рис. 12). Диаметр многослойной трубки составляет 20-50 нм.

В многослойной нанотрубке между трубками действует слабая связь Ван-дер-Ваальса, поэтому трубки могут двигаться друг относительно друга.

Многослойные углеродные нанотрубки отличаются от однослойных значительно более широким разнообразием форм и конфигураций. Разнообразие структур проявляется как в продольном, так и поперечном направлении. Наиболее распространенными разновидностями поперечной структуры являются матрешка (коаксиально вложенные друг в друга однослойные нанотрубки) и свиток (рис. 13).

Реализация той или иной структуры многослойной нанотрубки зависит от условий синтеза.

§5. Физические свойства углеродных нанотрубок

Благодаря своим уникальным свойствам углеродные нанотрубки являются привлекательным объектом фундаментальной науки с одной стороны, а с другой – широкими перспективами прикладного использования.

5.1. Механические свойства нанотрубок

Нанотрубки обладают аномально высокой прочностью на растяжение, изгиб и кручение.

Углеродные нанотрубки очень упруги при изгибе. Они не ломаются и могут распрямиться без повреждений, т.к. имеют мало структурных дефектов (дислокаций, границ зерен). Кроме того, углеродные кольца стенок в виде правильных шестиугольников при изгибе меняют свою структуру. Это является следствием того факта, что углерод-углеродные связи sp^2 -гибридизованы и могут перегибридизоваться при изгибе.

Предел прочности характеризует необходимое для разрыва напряжение. Предел прочности однослойной углеродной нанотрубки составляет 45 ГПа, в то время как для стали он составляет 2 ГПа. Многослойные нанотрубки тоже имеют лучшие, чем у стали, механические свойства, но они меньше, чем у однослойных нанотрубок. Например, многослойная нанотрубка диаметром 200 нм имеет предел прочности 7 ГПа и модуль Юнга 0.6 ТПа.

5.2. Проводимость углеродных нанотрубок

Проводимость нанотрубки чрезвычайно чувствительна к степени ее изгиба. Например, проводимость прямолинейного участка однослойной нанотрубки, не испытывающей внешней нагрузки, при комнатной температуре составляет ~ 100 мкСм, что соответствует сопротивлению 10 кОм. По порядку величины это значение сравнимо с величиной единичного кванта проводимости $4e^2/h = 154$ мкСм, который соответствует баллистическому механизму переноса заряда (электроны преодолевают длину нанотрубки без рассеяния). В результате изгиба нанотрубки на угол 105° ее проводимость уменьшается в 100 раз, достигая значения ~ 1 мкСм. Изучение температурной зависимости проводимости изогнутого участка нанотрубки позволило установить, что через место изгиба электрон туннелирует (рис. 18). Поэтому, изгибая трубку, можно создать в ней туннельный переход и приборы на его основе.

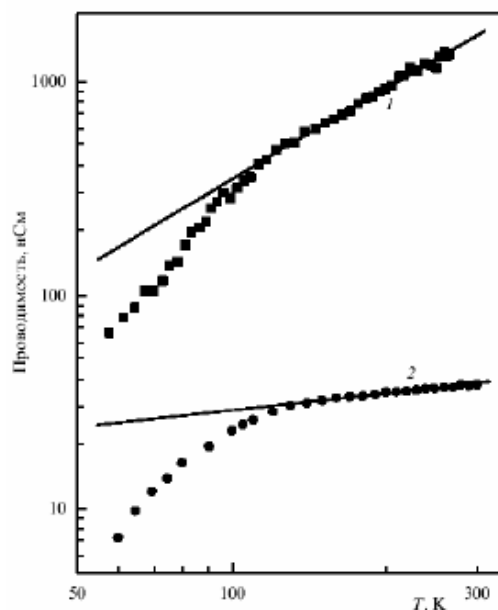


Рис. 18. Температурная зависимость проводимости однослойной металлической нанотрубки, измеренная четырехзондовым (1) и двухзондовым (2) методами.

Если нанотрубка обладает полупроводниковыми свойствами, то ее сопротивление составляет десятки МОм, и оно не распределено равномерно по длине, как у нормального проводника, а сосредоточено в «барьерах», расположенных примерно через каждые 100 нм вдоль длины нанотрубки.

Согласно полученным экспериментальным данным сопротивление многослойной нанотрубки с хорошей точностью описывается соотношением;

$$R = \frac{\rho L}{\pi D},$$

где $\rho \approx 700 \text{ Ом/см}$ – удельное сопротивление нанотрубки; L – длина нанотрубки; D – диаметр нанотрубки.

5.3. Автоэлектронная эмиссия

Явление автоэлектронной эмиссии возникает при воздействии на проводник внешнего электрического поля. В результате такого воздействия электроны проводимости, первоначально находящиеся в прямоугольной потенциальной яме, получают возможность выхода за пределы проводника вследствие квантового туннелирования.

Традиционно считается, что источником автоэлектронной эмиссии служит вершина нанотрубки, в окрестности которой напряженность поля максимальна. Однако последние исследования показали, что и боковая поверхность нанотрубок служит хорошим источником автоэлектронной эмиссии. При определенных ориентациях нанотрубки относительно направления электрического поля вклад эмиссии с боковой поверхности в полный ток автоэлектронной эмиссии может оказаться определяющим, т.к. площадь боковой поверхности заметно превышает площадь поверхности вершины. Работа выхода электронов для однослойных нанотрубок составляет $\sim 4\text{-}5 \text{ эВ}$, для многослойных $\sim 0.2\text{-}7 \text{ эВ}$.

На рис. 20 приведены вольт-амперные характеристики эмиттеров, полученные при различных ориентациях нанотрубок относительно подложки.

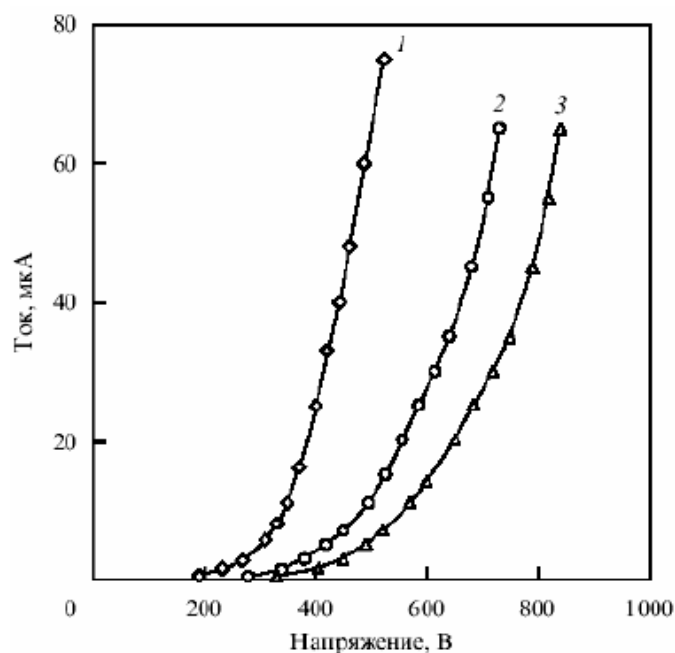


Рис. 20. Вольт-амперные автоэмиссионные характеристики многослойных нанотрубок: 1- ориентация параллельно плоскости подложки; 2- ориентация под углом 45° к плоскости подложки; 3- ориентация перпендикулярно плоскости подложки.

Пороговое значение напряженности электрического поля, определяемое по минимальному эмиссионному току 0.5 мкА , составляет 2 В/мкм (ориентация параллельно плоскости подложки), 3.5 В/мкм (ориентация под углом 45°) и 4 В/мкм (ориентация перпендикулярно плоскости подложки). Значение плотности эмиссионного тока в 1 мА/см^2 , необходимое для работы плоских дисплеев, достигается при напряженностях электрического поля 4.2 , 6 и 6.8 В/см для трех ориентаций соответственно.

5.4. Капиллярные явления в углеродных нанотрубках

Нанотрубка является поверхностной структурой, и вся ее масса заключена в поверхности слоев. Поэтому нанотрубки имеют аномально высокую удельную поверхность, что определяет особенности их сорбционных и электрохимических характеристик. Расстояния между слоями в многослойной углеродной нанотрубке (3.4 нм) достаточно, чтобы внутри трубки разместилось некоторое количество вещества. Таким образом, нанотрубку можно рассматривать как емкость для хранения газообразных, жидких или твердых веществ.

Вещество проникает внутрь нанотрубки под действием внешнего давления, либо в результате капиллярного эффекта и удерживается внутри нее благодаря сорбционным силам. Графитовая оболочка обеспечивает хорошую защиту находящегося в ней материала от внешнего воздействия.

§6. Углеродные нанотрубки в нанотехнологии

6.1. Наномеханизмы и наномашинны

После срезания нескольких слоев с одного из концов многослойной CNT, внутренние нанотрубки могут скользить назад и вперед с очень малым трением. Именно это требуется для механических частей наноразмерных механизмов.

Зубчатая передача представляет собой углеродную нанотрубку диаметром от 1 до 10 нанометров . Молекулы бензола (как зубья) присоединяются к углеродной нанотрубке, формируя зубчатую передачу, работающую на гигагерцовых частотах (рис. 22).

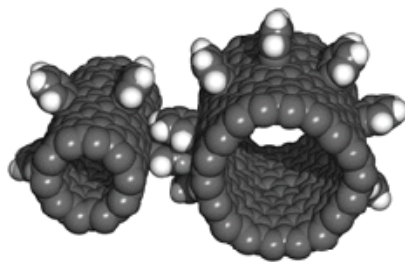


Рис. 22. Углеродные шестерни на нанотрубках с бензольными зубцами.

Теоретические исследования структуры и условий функционирования наномашин показывают, что зубчатые передачи на основе углеродных нанотрубок очень прочные и могут функционировать даже при проскальзывании, т.е. в условиях, когда обычная зубчатая передача не работает. На основании результатов компьютерного моделирования ученые пришли к выводу, что нанопередача или другие наномашин в будущем могут быть использованы для контроля мощности лазерного излучения или контроля внешних электрических полей.

6.2. Углеродные нанотрубки в электронике

Межсоединения. Сегодня электрические соединения внутри чипов обеспечиваются тончайшими медными контактами. Производство микросхем подошло к пределу дальнейшего уменьшения электрических проводников, соединяющих различные компоненты одного кремниевого чипа. В настоящее время электронно-лучевая литография позволяет создавать линии шириной 50 нм и несколько нм толщиной. Из-за уменьшения размеров транзисторов и увеличения их числа возникают проблемы с высокой плотностью электрического тока, который должен проходить через все более тонкие проводники. Поэтому однослойные нанотрубки диаметром 0.6 - 1.8 нм (1.4 нм типичный), выращиваемые на кремниевой подложке, могут послужить в качестве соединительных проводников в микросхемах (рис. 23).

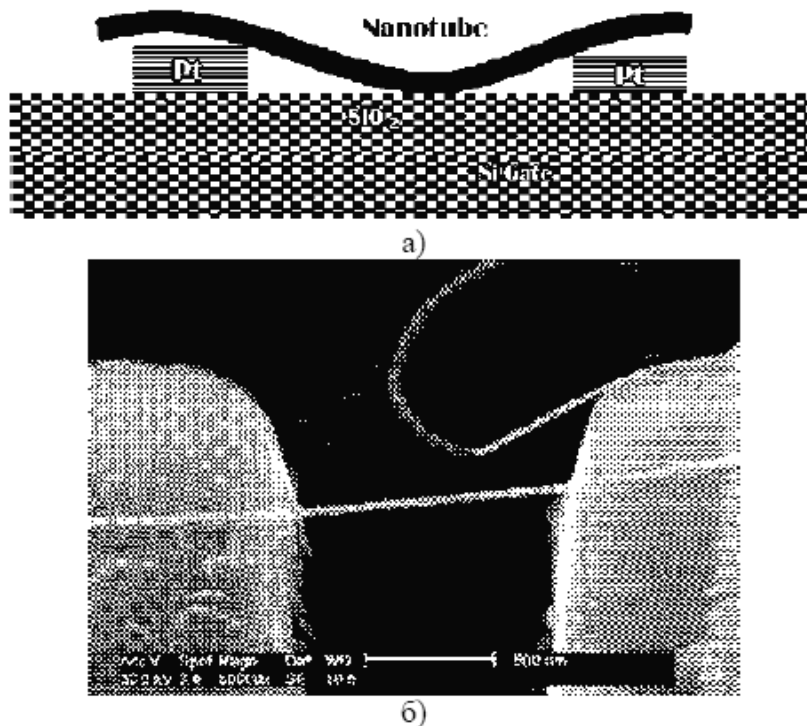


Рис. 23. Углеродная нанотрубка между двумя металлическими проводниками: а) модельное представление; б) ТЕМ-изображение.

Кроме миниатюрных размеров углеродные нанотрубки более термостойчивы – до 2800 °С в вакууме и до 750 °С на воздухе, чем металлические провода в микросхемах, которые плавятся при

600 - 1000 °С. Теплопроводность нанотрубок составляет до 6000 Вт/м·К, что превышает теплопроводность алмаза (3320 Вт/м·К).

Электронные устройства на нанотрубках. Рекорд подвижности электронов в углеродных нанотрубках при комнатной температуре составляет 100000 см²/В·с. Это значение подвижности на 23% превышает значение подвижности в InSb (77000 см²/В·с); в 70 раз выше, чем в кремнии (1500 см²/В·с). Углеродные нанотрубки с такой высокой подвижностью можно использовать для изготовления более быстродействующих транзисторов (рис. 24) и более чувствительных химических сенсоров.

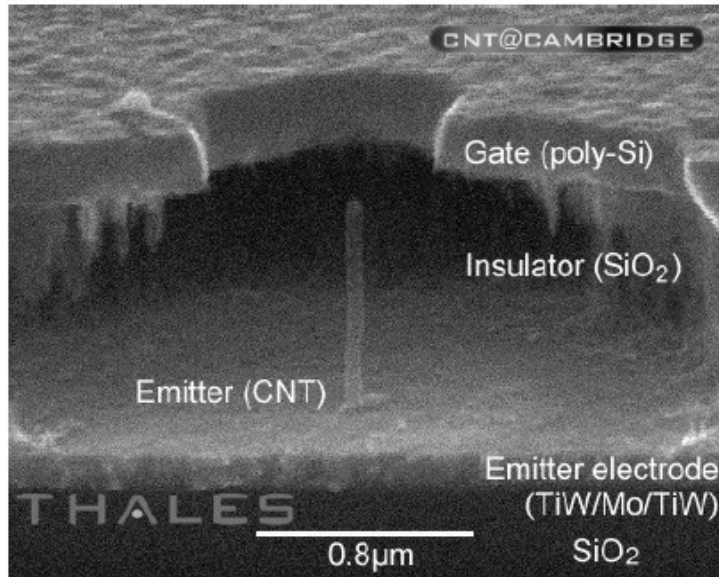


Рис. 24. Полевой транзистор на основе углеродных нанотрубок.

В настоящее время созданы опытные образцы полевых транзисторов на основе одной нанотрубки: при приложении запирающего напряжения в несколько вольт проводимость однослойных нанотрубок изменяется на 5 порядков.

Ширина запрещенной зоны полупроводниковых нанотрубок зависит от диаметра нанотрубки и варьируется в пределе 0.7-1.1 эВ.

При создании светодиода на основе нанотрубок реализована трехконтактная конфигурация полевого транзистора с использованием SiO₂ подложки в качестве базы (рис. 25).

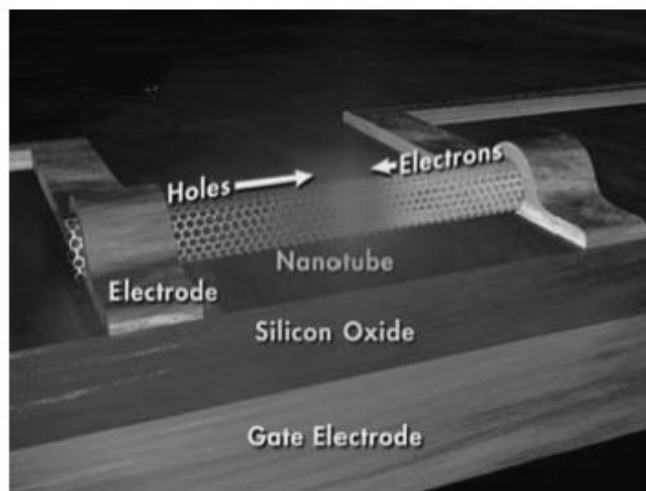


Рис. 25. ИК-светодиод из нанотрубки.

Испускание фотона происходит при рекомбинации носителей тока с разноименными зарядами: электронов и дырок. Электроны и дырки инжектируются в нанотрубку в области контакта с металлическим проводником эмиттера и коллектора за счет создания барьера Шоттки и, следовательно, контактной разности потенциалов соответствующего знака.

CNT-литография. Углеродные нанотрубки могут быть использованы как зонды для атомно-силовой микроскопии (АСМ) (рис. 26). Такие зонды для АСМ могут применяться для создания нанощаблонов для нанолитографии или для травления поверхности в производстве полупроводниковых чипов. Т.о., CNT-зонд используется как нанопинцет для удаления атомов с поверхности.

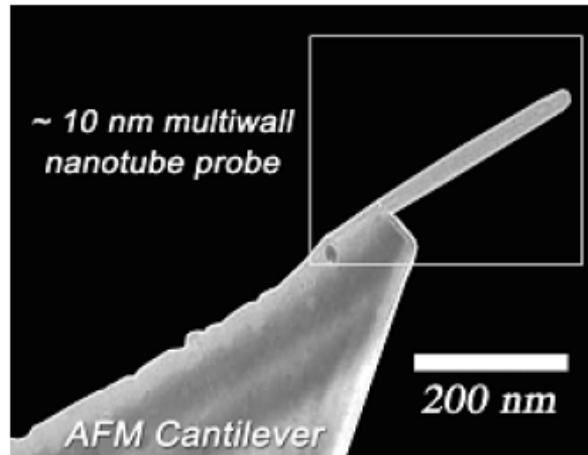


Рис. 26. Кантилевер для АСМ-микроскопии с наконечником из многослойной углеродной нанотрубки.

В режиме травления нанозонд слегка касается поверхности и селективно удаляет атомы с поверхности. В режиме идентификации CNT-зонд надавливает на поверхность, чтобы сделать нанодырку.

6.3. Холодные катоды на углеродных нанотрубках

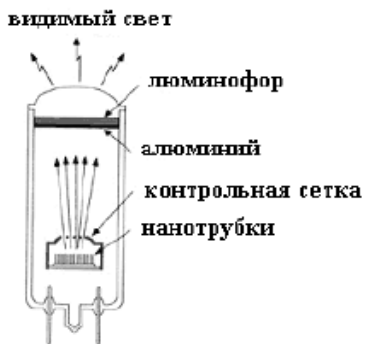


Рис. 28.

Катодолуминесцентная лампа на нанотрубках.

Автоэлектронные катоды на нанотрубках имеют очевидные достоинства – ничтожный разброс по высоте (10 нм), равномерность токосъема по поверхности, высокая плотность тока эмиссии (до 1 А/см²), возможность варьировать геометрию катода, рекордно низкую работу выхода (1 эВ). Потребляемая мощность с рабочими характеристиками, сравнимыми с аналогичными характеристиками лампы накаливания мощностью 100 Вт, составит всего лишь 25 Вт. Металлические нанотрубки активируют люминофор при 1-3 В/мкм, в то время как молибденовые нити при 50-100 В/мкм.

6.4. Топливные элементы на основе углеродных нанотрубок

Углеродные нанотрубки могут быть использованы в изготовлении элементов питания. Литий, являющийся носителем заряда в некоторых элементах питания, можно помещать внутрь нанотрубок. По оценкам, можно разместить один атом лития на каждые шесть атомов углерода. Другим возможным применением нанотрубок является хранение в них водорода, что может быть использовано при конструировании топливных элементов как источников электрической энергии.

6.5. Биосенсоры из углеродных нанотрубок

Биосенсоры позволяют быстро и с высокой селективностью проводить автоматизированный анализ сложных по составу объектов, определяя глюкозу, холестерин, мочевины, аминокислоты и другие вещества, содержание которых может изменяться от 0.05 мкг/л до 1 мг/л.