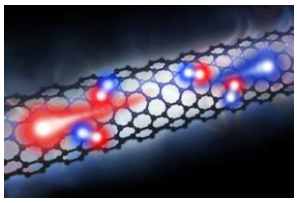


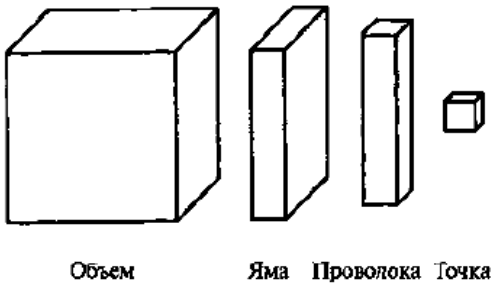
Тема 9. Основы наноэлектроники

Содержание темы: **Квантовое ограничение электронов**; Квантовые ямы, нити, точки;
Размерные эффекты: изменение плотности состояний, влияние на проводимость, проблемы легирования, влияние на оптические свойства, экситоны, кулоновский взрыв;
Приборы на наноструктурах: Лазеры с квантовыми структурами, Фотоприёмники на квантовых ямах, Туннельно-резонансный диод, Двухслойный туннельный транзистор, MIIM диод, Одноэлектронное туннелирование на эффекте кулоновской блокады, Квантово-точечные клеточные автоматы, Квантовый интерференционный транзистор;
Молекулярная наноэлектроника: атомные переключающие структуры, графеновый транзистор, диоды из углеродных нанотрубок, полевые транзисторы из углеродных нанотрубок, нанотрубки как источники электронов, нанопровода из углеродных нанотрубок, суперконденсатор; топливный элемент, датчики веществ, ДНК-анализатор, алмазная память для компьютеров;
Спинтроника.

Квантовое ограничение электронов

Мы привыкли изучать трёхмерные электронные системы макроскопических размеров. В этом случае электроны проводимости делокализованы и свободно движутся по всей проводящей среде, такой как медная проволока. ЯСНО, что все размеры проволоки много больше расстояний между атомами. При уменьшении одного или нескольких размеров медного образца до величин, всего лишь в несколько раз превышающих расстояния между атомами, положение дел кардинально меняется: делокализация становится невозможной, и электроны остаются локализованными.

Рассмотрим, например, плоский лист меди длиной 10 см, шириной 10 см и толщиной 3,6 нм, которая соответствует 10 элементарным ячейкам. 20% атомов в таком листе н:подятся в элементарных ячейках, расположенных на поверхности. Электроны проводимости будут делокализованы в плоскости листа, но будут локализованы по меньшему измерению. Такой объект называется **квантовой ямой**.



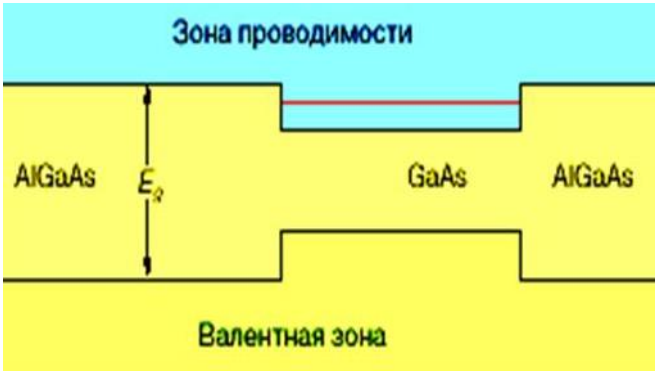
Квантовая проволока - это структура типа медного провода - длинная в одном направлении, но с диаметром, составляющим нанометры. Электроны делокализованы и свободно движутся вдоль проволоки, но оказываются локализованными в поперечных направлениях.

И, наконец, в **квантовой точке**, которая может выглядеть как крошечный куб, короткий цилиндр или шар с размерами в несколько нанометров, электроны локализованы по всем трём пространственным направлениям, так что делокализации вообще не происходит.

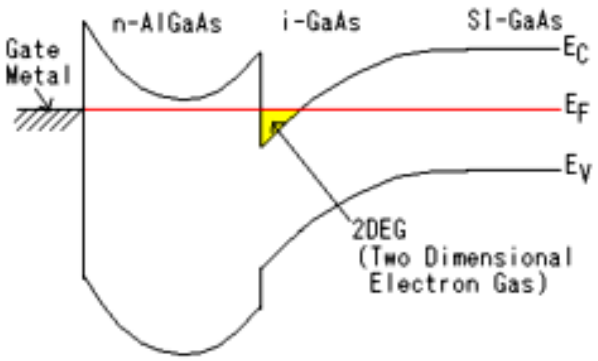
Рассмотрим подробнее квантовые наноструктуры, которые позволяют создать методы современной литографии.

1. Квантовая яма – это потенциальная яма, которая ограничивает подвижность частиц с трёх до двух измерений, заставляя их двигаться в плоском слое и образуя в нём **двумерный газ** (если заполненных подзон оказывается несколько, то газ называется **квазидвумерный**).

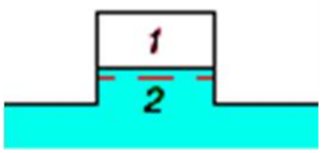
Квантовая яма на базе структуры AlGaAs / GaAs / AlGaAs



Квантовая яма на базе структуры n-AlGaAs / i-GaAs / SI-GaAs

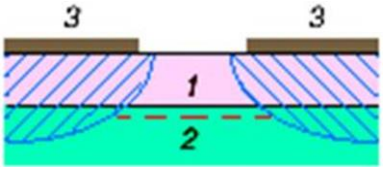


2. Квантовые нити получаются с помощью субмикронной литографии: вытравливанием либо узкой полоски из самой структуры. В таких нитях живёт одномерный электронный газ.



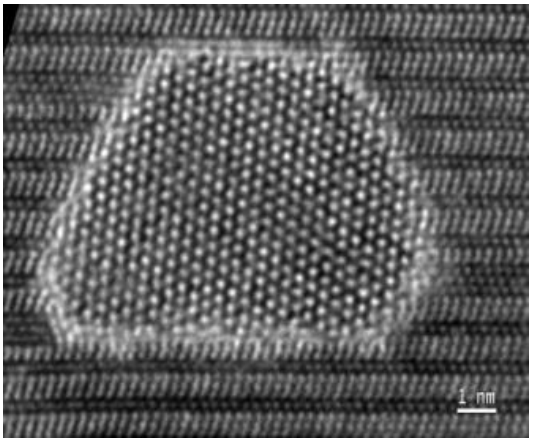
1 – AlGaAs с широкой Eg
2 – GaAs с узкой Eg

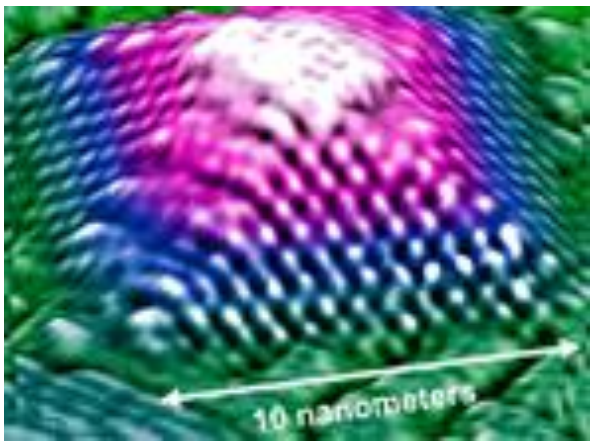
либо щели в затворе Шоттки:



1 – AlGaAs с широкой Eg
2 – GaAs с узкой Eg
3 – металлический затвор

3. Квантовая точка (т.н. "искусственный атом") состоит из атомов (до 100 000 штук). Движение электронов в ней ограничено в трёх направлениях, так что спектр разрешённых состояний полностью дискретен. Если содержит один свободный электрон - типа атом водорода, два - атом гелия, и т.д.





Размерные эффекты

С уменьшением размеров материала (при переходе от кристаллов к кластерам) в силу вступают квантовые законы, которые существенно меняют его свойства. Наблюдается это явление в условиях, когда геометрические размеры объекта сравнимы с той или иной из длин, определяющих протекание физических процессов (например, длиной свободного пробега носителя заряда, длиной волны де Бройля и т.д.). А так как различные физические процессы обусловлены различными длинами волн, то и разные физические свойства объёмных материалов начинают меняться при разных размерах кластера.

Длина свободного пробега молекулы или другой частицы в веществе — это среднее расстояние, которое частица пролетает за время свободного пробега от одного столкновения до следующего.

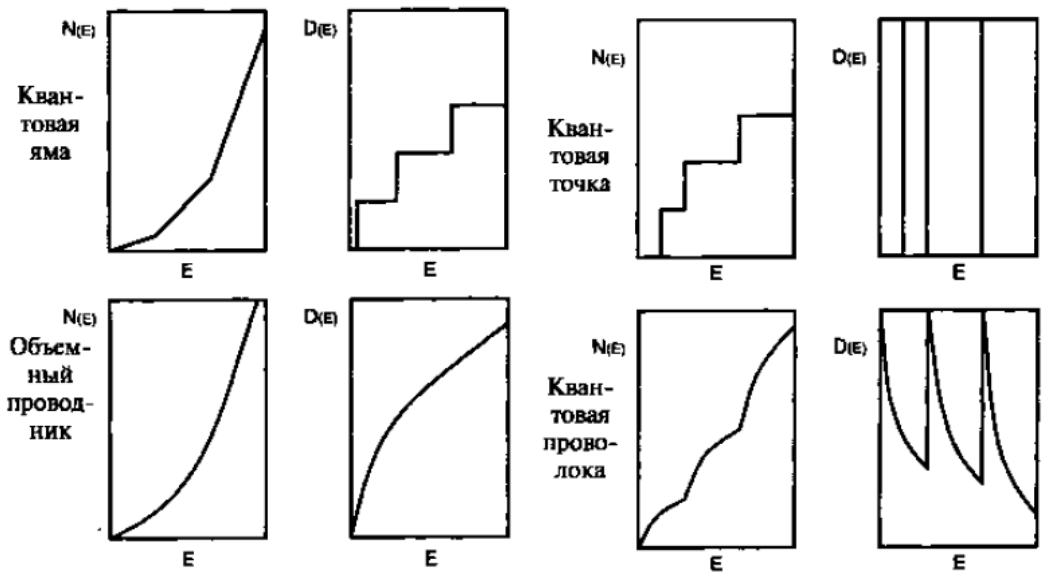
Волны де Бройля — волны вероятности, определяющие вероятность обнаружения объекта в заданной точке пространства. Волны де Бройля связаны с любыми частицами и отражают их волновую природу. Скажем, при взаимодействии квантовой частицы с узкой щелью в результате наблюдается картина аналогичная картине взаимодействия с этой щелью некоторой волны.

Квантовый размерный эффект — изменение свойств кристалла, когда хотя бы один из его геометрических размеров становится соизмеримым с длиной волны электронов.

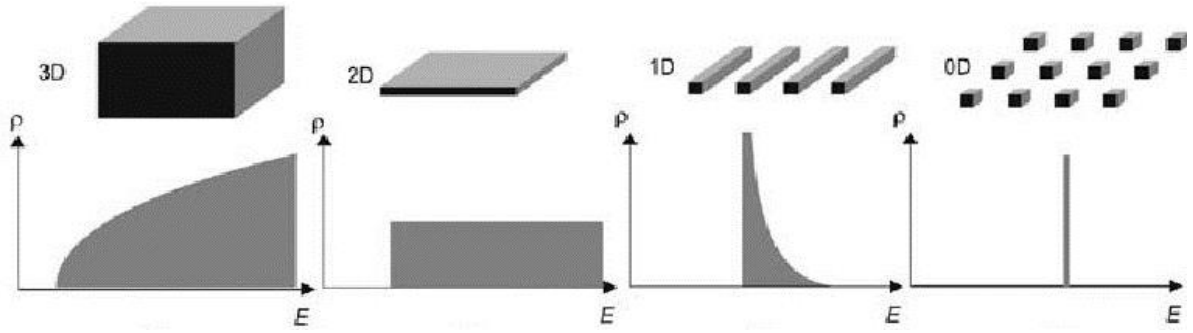
1. Изменение плотности состояний

Ограничение движения электронов в низкоразмерных структурах (когда размер структуры становится сравнимым с Дебаевской длиной волны) делает разрешённые состояния электронов дискретными. Причём в соответствии с принципом неопределённости запирание электрона, т.е. уменьшение вариации его координаты Δx, приводит к "вариации" его импульса на $\Delta p = \hbar/L$, и соответственно полной энергии на $\Delta E = \hbar^2 k^2/2m^*$. Так что средняя энергия электронов в структуре будет определяться не столько химической природой атомов, сколько размером частицы. А это даёт дополнительное квантование уровней и приводит к тому, что свойства наноразмерных структур отличаются от известных объёмных свойств материала, из которого они сделаны.

Ниже представлены зависимости количества электронов проводимости $N(E)$ и плотности состояний $D(E) = dN(E)/dE$ от энергии E в случаях делокализации по одному (квантовые проволоки), двум (квантовые ямы) и трём измерениям (объёмный материал).



Плотность состояний наноструктур $D(E) = dN(E)/dE$ от энергии E при ограничении движения электронов:



Квантовый размерный эффект появляется в полупроводниках при бо'льших размерах, чем в металлах, так как длина волны электронов и дырок в полупроводниках больше. В полупроводниках длина волны может достигать 1 мкм, в то время как в металлах она составляет ~ 0,5 нм.

Плотность состояний D(E) является определяющим фактором влияния на различные электронные свойства материала. Так, например, интенсивность излучения вещества пропорциональна плотности состояний электронов проводимости в нём, потому что вероятность захвата дыркой электрона с заданной энергией пропорциональна *D(E)*. Таким образом, спектр испускаемого веществом излучения отражает энергетическую зависимость плотности состояний в нём.

2. Проводимость

Движение носителей заряда в проводниках и полупроводниках под действием приложенного электрического поля прерывается рассеянием на фононах (тепловые колебания решётки) или примесях (инородные атомы). В обычных металлах средняя длина свободного пробега электронов лежит в диапазоне 1 - 10 нм.

Сопротивление поликристаллического проводника или полупроводника, состоящего из микрокристаллов с размерами, намного большими длины свободного пробега, похоже на сопротивление сети соединённых между собой резисторов. Но когда размеры микрокристаллов приближаются или становятся меньше длины свободного пробега, сопротивление преимущественно определяется рассеянием на границах зёрен.

Различные типы дефектов решётки также прерывают поступательное движение электронов проводимости и ограничивают их длину свободного пробега. Однако некоторые наноструктуры слишком малы для того, чтобы у них присутствовали внутренние дефекты, что существенно повышает их проводимость.

3. Проблемы легирования

Для обычных для полупроводников с концентраций доноров (~10^{15} см$^{-3}$) в квантовой точке размером 100 нм в среднем будет от 0,1 до 1000 электронов проводимости. Нижний предел (0,1 электрон на точку) означает, что лишь в одной квантовой точке из десяти будут находиться электроны проводимости. Таким образом, квантовые структуры характеризуются очень малыми концентрациями электронов, которые могли бы участвовать в переносе тока. Это позволяет управлять движениями электронов в таких структурах поштучно.

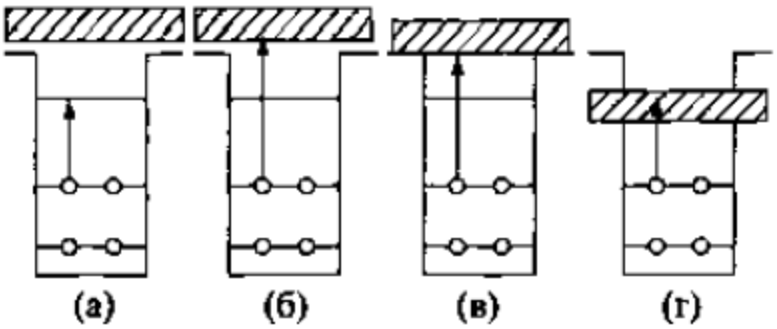
4. Оптические свойства

Когда частица уменьшается в размерах до нескольких сотен атомов, плотность состояний (количество энергетических уровней в заданном интервале энергий) в зоне проводимости – в верхней зоне, содержащем электроны радикально меняется. Непрерывная плотность состояний в зоне заменяется набором дискретных уровней. Маленький кластер аналогичен молекуле с её дискретным набором энергетических уровней, связывающими и антисвязывающими орбиталями.

При этом энергия оптических переходов между уровнями увеличивается, поэтому цвета окраски и излучения наночастиц сильно зависят от их размера: при уменьшении размеров частиц **оптические спектры поглощения существенно сдвигаются в голубую сторону** (т.е. в сторону уменьшения длин волн).

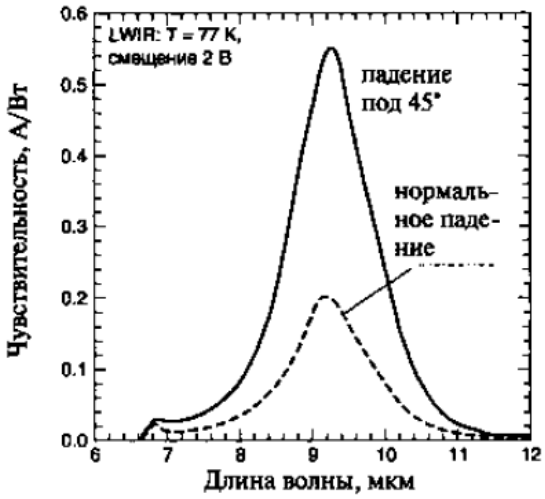
Из-за этого же эффекта наночастицы полупроводящих материалов (германия или кремния) не являются полупроводниками, потому что в них просто нет необходимого для образования полупроводниковых энергетических зон количества атомов!

Переходы между энергетическими уровнями квантовых точек, лежащие в инфракрасной области спектра используются в инфракрасных фотодетекторах. Схемы четырёх типов таких детекторов изображены на рис.



Схематическое изображение зоны проводимости (заштрихована) в ИК фотодетекторе на квантовой яме и структуры электронных переходов (вертикальные стрелки) следующих типов: а) - между двумя локализованными состояниями; б) - из локализованного состояния в зону (континиум); в) - из связанного в квазисвязанное; г) - из связанного в минизону.

Чувствительность детектора выражается в силе тока (в амперах) на один ват (Вт) падающего излучения. Для GaAs/ AlGaAs фотодетектора на переходах «связанное состояние - непрерывная зона» чувствительность достигает максимума на длине волны 9,4 мкм, а рабочий диапазон длин волн находится между 8,5 и 10 мкм.



5. Экситоны

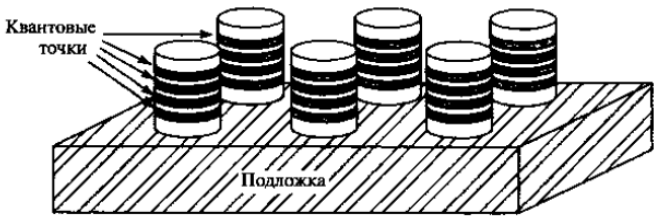
Под действием фотонов в веществе могут образовываться экситоны (связанные электрон-дырочные пары). Из-за кулоновского притяжения между положительной дыркой и отрицательным электроном эта парочка может довольно долго не разбегаться и перемещаться по кристаллу единым облачком (размер его может быть несколько порядков межатомных расстояний). Экситон можно рассматривать как водородоподобный атом, структура уровней энергии которого аналогична атому водорода, но с меньшим масштабом по энергиям, так что он тоже может поглощать и испускать фотоны.

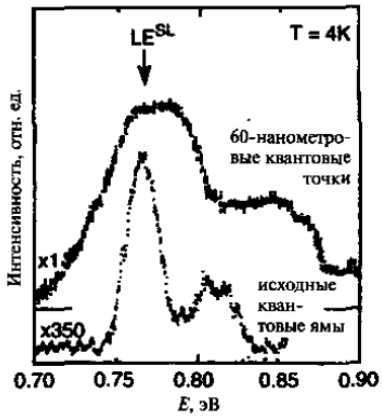
Для арсенида галлия энергия и размер экситона: **E = 5,2 мэВ;** a_{eff} **= 10,4 нм**

Радиус экситона можно рассматривать как меру локализации электрона в наночастице. Сравнивая размер наночастицы d с радиусом экситона *a* можно выделить два режима локализации, а именно: **слабую локализацию**, когда d > *a* и **сильную**, при которой d < *a*. При d >> *a* локализации не происходит.

Присутствие экситонов оказывает сильное влияние на электронные свойства полупроводников и их оптическое поглощение. При уменьшении размера наночастицы экситон может перестать в ней существовать, и появятся отдельные уровни электронов и дырок (сильная локализация).

Массив квантовых точек, полученный с помощью литографии, демонстрирует появление нового экситонного пика в спектре фотолюминесценции (LE - локализованные экситоны - 0,7654 эВ):





6. Кулоновский взрыв

Многократная ионизация кластера (вырывание электронов лучом света например) вызывает быстрое перераспределение зарядов на его атомах, делающее каждый атом более положительно заряженным, так что энергия электростатического отталкивания между атомами становится больше энергии связи. Это вызывает нестабильность кластера и приводит к его взрыву. Скорость разлёта фрагментов в этом процессе очень высока. Такое явление называется **кулоновским взрывом**.

Минимальное количество атомов N, необходимое для стабильности кластера с зарядом Q, зависит от типа атомов и природы связи между атомами кластера.

Бо'льшие кластеры легче стабилизируются при сильных ионизациях.

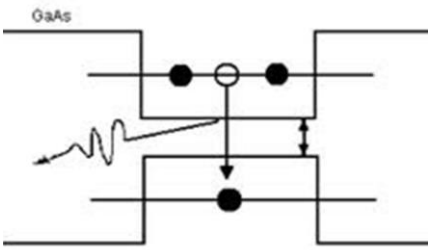
Таблица 4.2. Некоторые примеры наименьших многократно ионизированных кластеров разных типов (меньшие кластеры разрываются)

	Заряд		
Атом	+2	+3	+4
Kr	Kr_{73}		
Xe	Xe_{52}	Xe_{114}	Xe_2O_6
CO_2	$(CO_2)_{44}$	$(CO_2)_{106}$	$(CO_2)_{216}$
Si	Si_3		
Au	Au_3		
Pb	Pb_7		

Приборы на наноструктурах

1. Лазеры с квантовыми структурами

Самый распространённый тип лазеров: двойная гетероструктура, где свет излучается тонким слоем узкозонного полупроводника, зажатым между широкозонными. Уменьшение размеров слоя превращает его в квантовую яму, нить или точку. Переход электронов между двумя обособленными уровнями в квантовой яме обеспечивает когерентный поток фотонов (с частотой, определённой расстоянием между этими уровнями).



Зонная структура лазера на GaAs

Инжекция: при пропускании электрического тока в прямом направлении через p-n-переход в прилежащих к переходу областях создаются высокие концентрации неравновесных («инжектированных») носителей заряда, которые после диффундирования на небольшое расстояние рекомбинируют с дырками, создавая лазерное излучение.

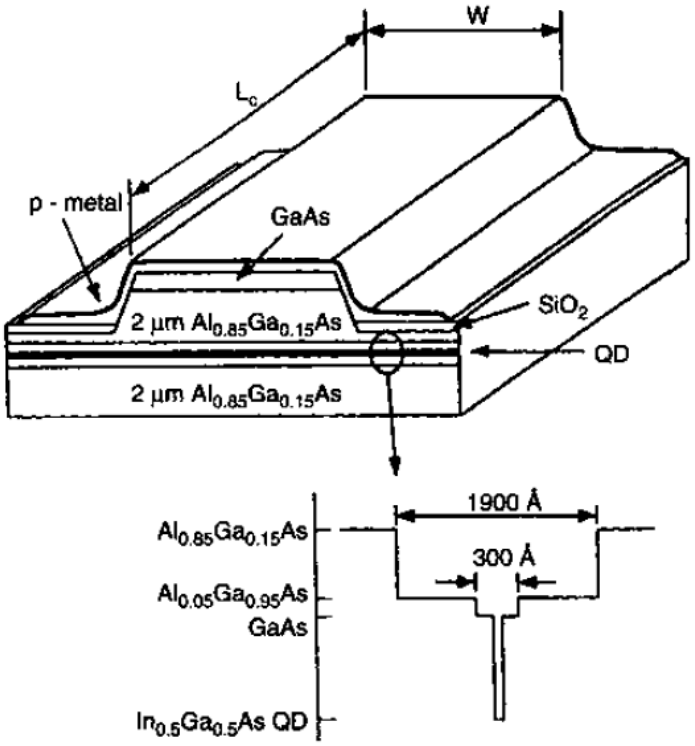
Увеличение плотности состояний ρ в области края зоны за счёт присутствия уровней квантовых точек снижает пороговый инжекционный ток, необходимый для начала генерации света. Чем более "сфокусированны" на энергетической шкале уровни квантовой ямы, тем больше энергии участвует в усилении излучения. Поэтому линейчатый спектр плотности состояний квантовых точек более выгоден, чем спектр кантовых ям и нитей.

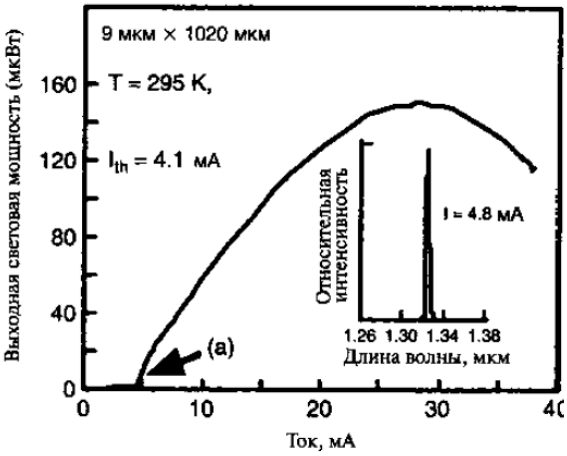
Пороговый ток инжекции:

А чем ниже ток электронов в сторону квантовой ямы, тем меньше тепловыделение в области контактов, так что существенно увеличивается термостабильность лазера и он работает даже при температурах выше комнатных!

Изменение ширины квантовой ямы (нагревом или пьезоэффектом) меняет взаимное положение уровней, между которыми происходит рекомбинация носителей и испускание света, что в итоге **позволяет перестраивать частоту генерирации**.

Схема конструкции лазера на квантовых точках на основе диода, выращенного на подложке из GaAs n-типа (на рисунке не показана):



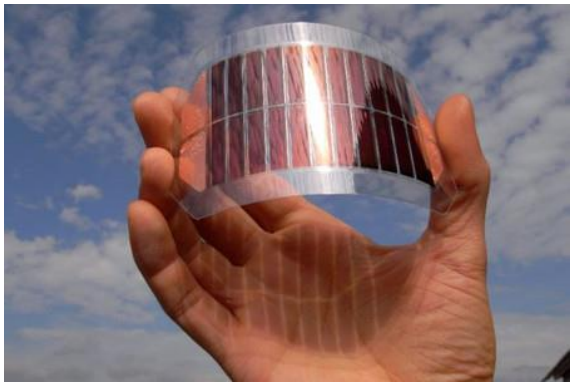


Верхний металлический слой контактирует с лежащим под ним слоем арсенида галлия. Между этим верхним контактом и не показанной снизу подложкой находится пара обкладок толщиной 2 мкм из $Al_{10,85}Ga_{0,15}As$, а между ними расположен волновой канал толщиной 190 нм из $Al_{0,05}Ga_{0,95}As$. Этот волновод играет роль проводника излучаемого света к выходным окнам на границах структуры. Посредине волновода (тёмная горизонтальная полоса на рисунке, помеченная QD) находится слой GaAs толщиной 30 нм, в котором лежат 12 монослоев квантовых точек из $In_{0,5}Ga_{0,5}As$ с концентрацией $1,5\cdot 10^{10}$ см$^{-2}$.

На нижней врезке к рисунку более подробно показана структура волновода. Длина Lc и ширина W может меняться от образца к образцу в диапазоне от 1 до 5 мм, а W - от 5 до 60 мкм. Торцы лазера покрыты высокоотражающим (> 95 %) слоем из $ZnSe/MgF_2$, возвращающим большую часть излучения для усиления вынужденной генерации. Свет покидает лазер через боковые стороны структуры.

2. Фотоприёмники на квантовых ямах

Принцип приёмника излучения: свет забрасывает электроны в зону проводимости, чем увеличивает проводимость полупроводника. Время жизни этих неравновесных носителей заряда (время до обратного спуска в валентную зону - до рекомбинации с дыркой) должно быть достаточным чтобы они успели продиффундировать до границы раздела полупроводников, где поле пространственного заряда их разделяет, создавая фото-ЭДС.



Фотопроводимость определяется произведением трёх факторов: скорости оптической генерации g (пропорциональна коэффициенту поглощения α), времени жизни в делокализованном состоянии τ_q и эффективной подвижности носителей заряда $\mu_{эф}$.

$$\sigma_{фото} \sim g \cdot \tau_p \cdot \mu_{эф}$$

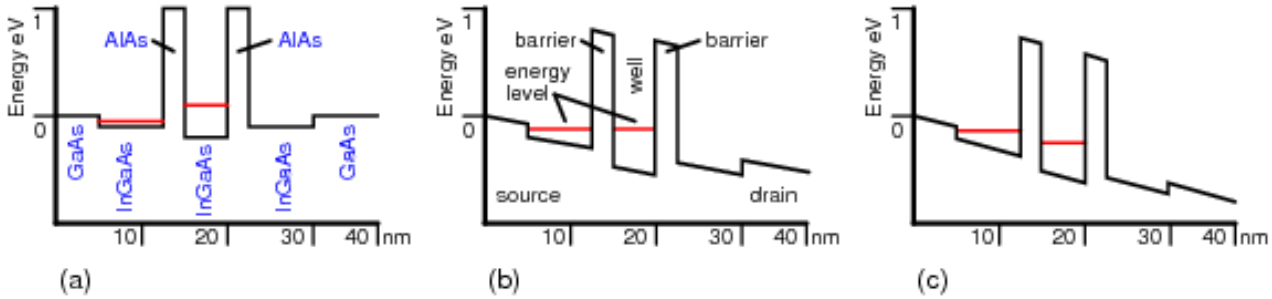
В квантовом фотоприёмнике время жизни неравновесных носителей – это время захвата в квантовую яму τ_q . Это время на несколько порядков меньше времени захвата на обычные рекомбинационные центры в кристалле.

Отметим, что время жизни τ_q осциллирующим образом зависит от параметров квантовой ямы. Это связано со свойствами волновой функции электронов в делокализованных состояниях "над" квантовой ямой. Так что для **резонансных квантовых ям** (в которых состояния над ямой и в яме "синхронизированны", что делает переход в яму более вероятным) τ_q резко падает.

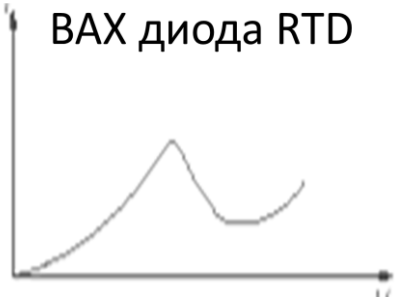
Несмотря на то, что для резонансных квантовых ям τ_q минимально, другие два параметры g и $\mu_{эф}$ максимальны, так что их произведение оказывается очень большим, поэтому фотоприёмники на квантовых ямах оказываются эффективнее обычных полупроводниковых фотоприёмников.

Внедряя в полупроводник квантовые точки (микрокристаллы), удалось достигнуть значительного увеличения энергоэффективности фотоэлементов: КПД = 114% !

3. Туннельно-резонансный диод

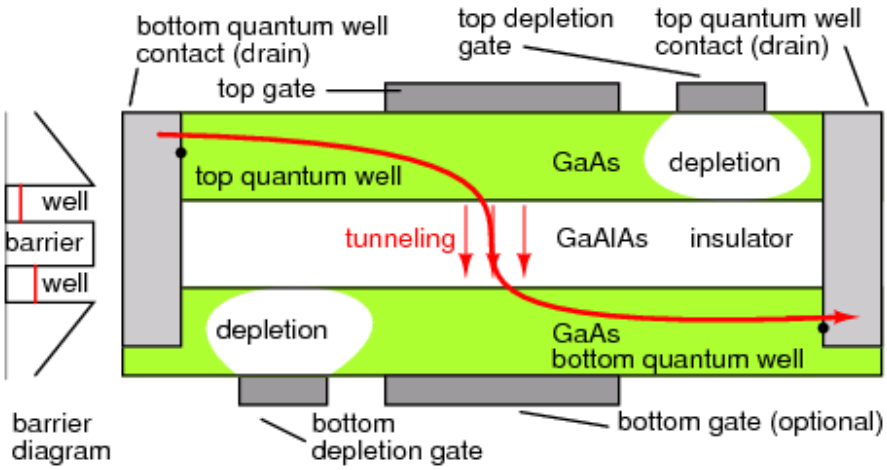


Принцип действия туннельно-резонансного диода (RTD): через структуру из очень тонких, периодических потенциальных ям могут туннелировать лишь электроны с определённой энергией. Если уровни в потенциальных ямах не совпадают, вероятность туннелирования падает и тоннельный ток прекращается. При подаче внешнего напряжения зонная структура вещества искривляется (наклоняется) и уровни в ямах начинают менять своё положение, приближаясь друг к другу и увеличивая тоннельный ток. Таким образом, управляя уровнем потенциальных барьеров, можно включать и выключать ток через структуру.



4. Двухслойный туннельный транзистор

Двухслойный туннельный транзистор (Deltt) - это диод на двух квантовых ямах, у которого потенциал ям и условия резонанса контролирует третий электрод.



Deltt работает при T < 77 K.

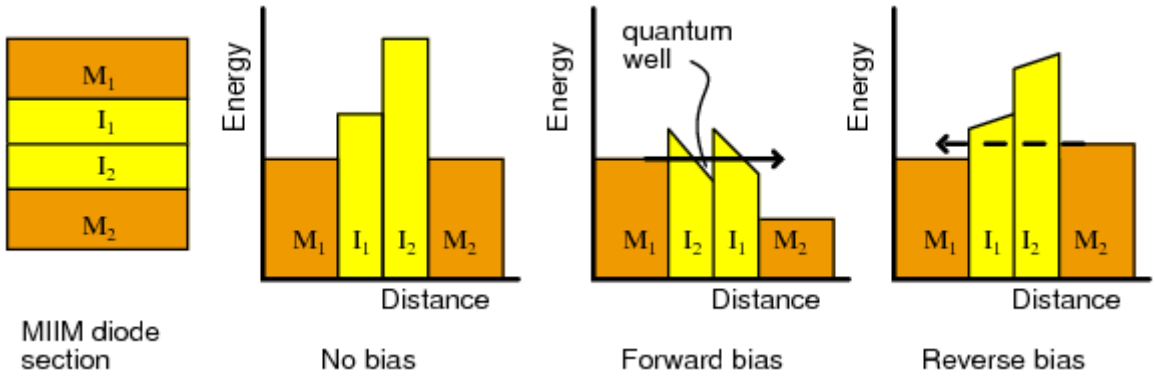
Напряжение питания ~ 100 мВ.

Частоты переключения ~ 10^{12} Гц,

это в 100 раз выше, чем у интегральных транзисторов!

5. MIIM диод

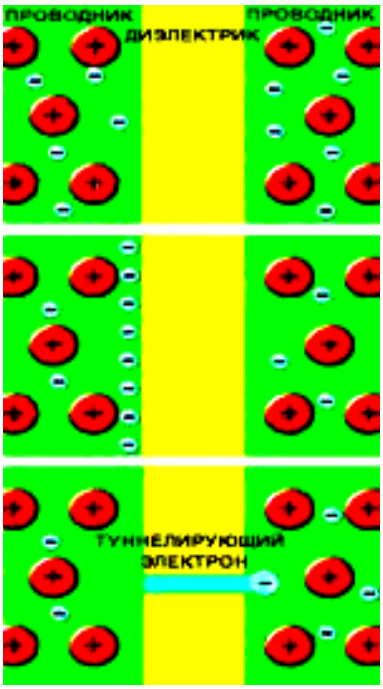
Структура металл-диэлектрик-диэлектрик-металл (MIIM) обладает диодными свойствами из-за разности уровней потенциальных барьеров диэлектрических слоёв и их малой толщины (меньше $\lambda_{\text{де-Бройля}}$), достаточной для туннелирования зарядов. Причём энергия уровней туннелирования не зависит от напряжения смещения (в отличие от RTD).



Диод MIIM имеет более крутой вид ВАХ, чем стандартные диоды Шоттки, и работает на более высоких частотах (3,7 ТГц), чем СВЧ транзисторы.

Добавление третьего электрода к MIIM диоду превращает его в транзистор.

6. Одноэлектронное туннелирование на эффекте кулоновской блокады

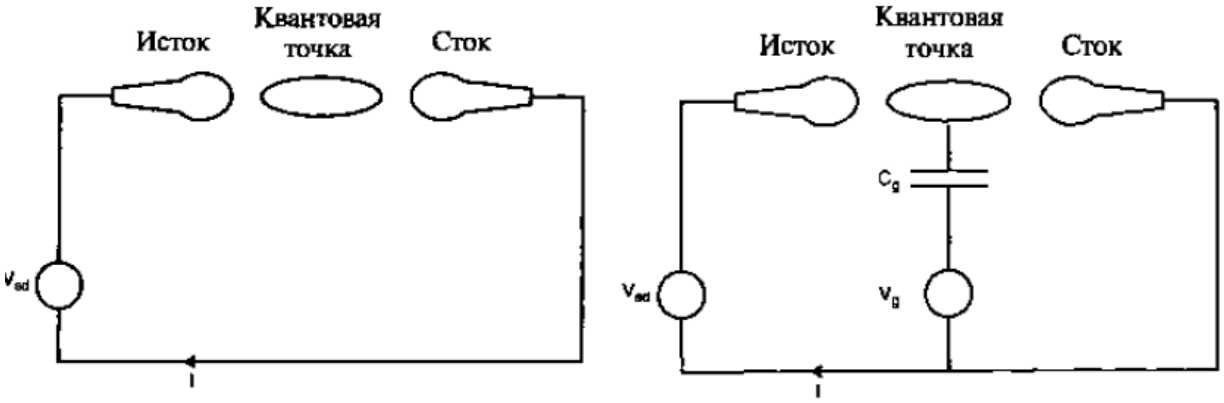


Структура для одноэлектронного туннелирования состоит из двух проводников, разделённых тонким диэлектрическим слоем. При приложении к структуре напряжения на границах металл/диэлектрик накапливается заряд, пока его величина не будет достаточной для туннелирования через диэлектрик 1 электрона, затем система снова начинает копить энергию (аналогия - капля, отрывающаяся от края водостока). Остальные электроны не могут туннелировать, пока протуннелировавший до них электрон не отбежит на достаточное расстояние от границы раздела веществ (это и есть **кулоновская блокада**). С повышением уровня напряжения электроны могут туннелировать по двое (потенциал кулоновского сдерживания требует не одного, а двух "перебежчиков").

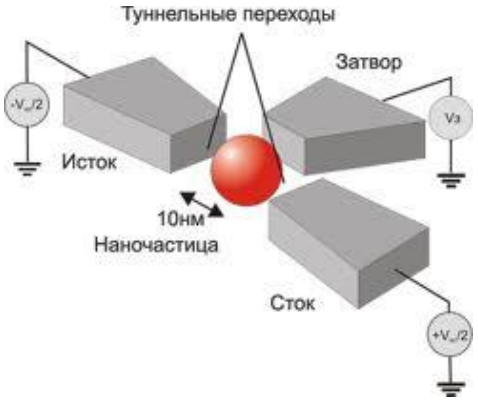
Одноэлектронный транзистор на эффекте кулоновской блокады состоит из двух последовательных туннельных переходов.

Приложение напряжения V_{sd} вызывает ток I. Основной вклад в сопротивление вносит процесс электронного туннелирования с истока на квантовую точку и с точки на сток.

В качестве активной области берётся наноструктура ~ 10 нм, поэтому количество свободных электронов в ней не больше 10.



Если модифицировать цепь ёмкостной связью, подведённой к квантовой точке, то приложение напряжения V_g к затвору позволяет регулировать сопротивление R активной области квантовой точки, а, следовательно, и влиять на ток I, текущий между истоком и стоком. Такое устройство работает как управляемый напряжением полевой транзистор.



При макроскопических размерах прибора ток через него непрерывен, а **дискретность потока электронов проявляется во флуктуациях тока** (дробовом шуме). При микроскопических размерах появляется возможность прохождения электронов по наноструктуре поштучно.

Для квантовых точек в форме диска или сферы радиусом r ёмкость выражается следующим образом:

$$C = 8\varepsilon_0 \varepsilon r \qquad \text{(диск)}$$

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r \qquad \text{(шар)},$$

где ε - диэлектрическая проницаемость окружающей среды, а ε_0 = 8,8542 . 10-12 Ф/м - диэлектрическая постоянная вакуума. Для типичного материала подобных наноструктур - GaAs - ε составляет 13,2, что даёт очень малое значение C = 1,47· lO-18г Фарад для сферической формы, где r - радиус в нанометрах. Электростатическая энергия сферической ёмкости с зарядом Q при добавлении или отборе электрона изменяется на ΔE ~ eQ/C, что соответствует изменению потенциала на ΔV= ΔE/Q, если r выражено в нанометрах:

$$\Delta V = e/C \cong 0{,}109/r \text{ Вольт},$$

Для наноструктуры радиусом 10 нм это приводит к изменению потенциала на 11 мВ, что легко поддаётся измерению. Это же изменение потенциала достаточно велико и для того, чтобы воспрепятствовать туннелированию следующего электрона.

Для наблюдения дискретной природы одноэлектронного переноса заряда на квантовую точку должны быть выполнены два условия.

1) электростатическая энергия квантовой точки в присутствии одного электрона e2/2C должна превосходить тепловую энергию k_BT случайных колебаний атомов:

$$\frac{e^2}{2C} \gg k_BT$$

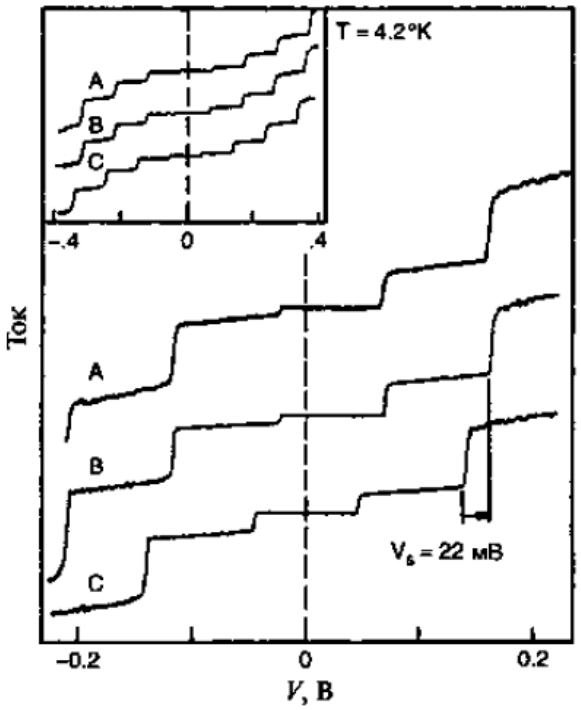
2) система должна удовлетворять принципу неопределённости Гейзенберга: произведение энергии конденсатора $e^2/2C$ и характерного времени его зарядки $t = R_TC$ должно превосходить постоянную Планка (где R_T - туннельное сопротивление потенциального барьера):

$$\Delta E\,\Delta t = \left(\frac{e^2}{2C}\right)(R_TC) > h$$

или

$$R_T \gg \frac{h}{e^2}$$

h/e^2 = 25,813 кОм - характерная величина квантового сопротивления.

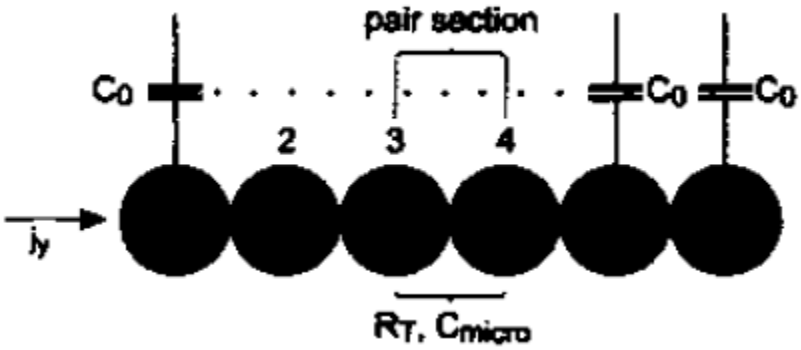


При выполнении этих условий медленное изменение напряжения вызывает ступенчатый рост тока каждый раз, когда напряжение изменяется на величину ΔV= 0.109/r.

На графике представлена ВАХ иридиевой капли размером 10 нм. Экспериментальная кривая А получена на сканирующем туннельном микроскопе. Кривые В и С отражают теоретические расчёты.

Этот эффект называется кулоновской блокадой так как после туннелирования фиксированного (для данного напряжения) количества электронов на островок дальнейшее туннелирование электронов блокируется.

В цифровых интегральных схемах на одноэлектронных транзисторах один бит информации будет представлен как присутствие или отсутствие индивидуального электрона. Тогда однокристальная память 10^{12} бит будет размером 6,5 см^2!

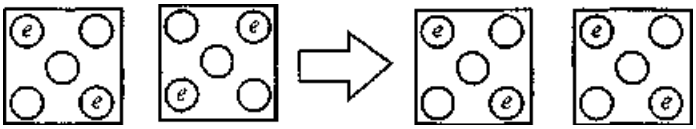


Линейная цепочка лиганд-стабилизированных кластеров Au_{55} с межкластерным сопротивлением R_T межкластерной ёмкостью Cmicro и собственной ёмкостью Co. Одноэлектронный туннельный ток плотностью j перетекает по цепочке слева направо, туннелируя с частицы на частицу.

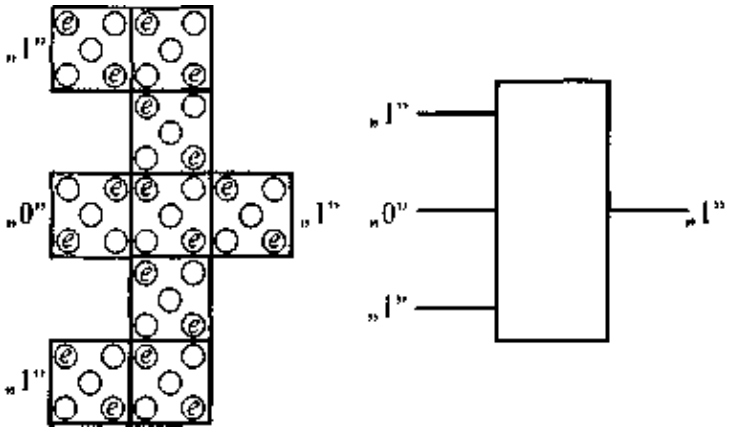
7. Квантово-точечные клеточные автоматы

Нано-компьютеры требуют очень высокую плотность логических элементов и максимально низкое потребление энергии на одно переключение элемента. Это могут обеспечить **квантово-точечные клеточные автоматы - QCA** (Quantum Cellular Automata). Это приборы, состоящие из массивов связанных квантовых точек, которые способны проводить вычисление логических функций.

Одна ячейка, состоит из 4 или 5 квантовых точек. В неё через электрод вводят два избыточных электрона. Отталкиваясь друг от друга, они расположатся в углах квадрата. Два таких состояния – это логические «1» и «0». Туннелирование электронов возможно только через центральную точку.



С помощью дополнительных электродов, связанных с ячейкой ёмкостной связью, можно навязать ей необходимое состояние и перевести в состояние «1» или «О». Если же рядом с первой ячейкой расположить вторую (тоже с электронами), то электростатическое поле первой ячейки заставит электроны располагаться так, чтобы обеспечить минимум электростатической энергии всей системы. Составляя комбинации из квантовых ячеек, можно реализовать разнообразные логические функции.



В представленной комбинации ячеек состояние на выходе определяется большинством состояний на входе (логическая функция «Majority»). Взаимное расположение ячеек обеспечивает передачу логического сигнала без перемещения зарядов – **в бестоковом режиме**, только за счёт передачи вдоль цепочки состояния поляризации.

Полный сумматор с размером точки 20 нм можно расположить на площади ~ 1 мкм^2, эту площадь занимает всего лишь один полевой транзистор! Построение сумматора на транзисторах требует ~ 40 транзисторов + области коммутации их между собой.

Пробный прибор QCA на основе клеточных автоматов был изготовлен при помощи стандартной электронно-лучевой литографии из алюминиевых островков на поверхности окисленной кремниевой пластины. Его площадь ~ 50 X 50 нм^2.

Недостатки QCA:

1. Поскольку сложные вычислительные устройства должны содержать большое число ячеек, то состояние с минимальной энергией в QCA можно получить разными способами. Это может приводить к ошибкам в вычислениях.

2. Системы QCA чувствительны к внешним воздействиям: при повышении температуры вычислительный процесс может быть разрушен, потому что для ячеек, у которых размер одной квантовой точки 20 нм, изменение энергии при перезарядке составляет величину ~ 1 мэВ (почти 1/20 kT при $T_{комнатной}$).

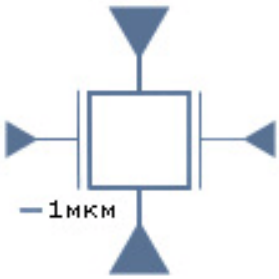
3. Электростатическое поле ячейки влияет на соседние ячейки как в направлении выхода устройства, так и в направлении входа, поэтому из-за случайных воздействий возможно распространение сигнала не только от входа к выходу, но и наоборот. Для устранения этого недостатка предложены устройства QCA, у которых направление передачи сигнала определяется внешним полем.

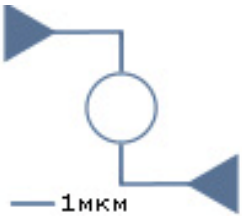
Практическое изготовление устройств на основе клеточных автоматов находится в начальной стадии и требует разрешения целого ряда технологических проблем.

8. Квантовый интерференционный транзистор

Электронные волны в наноразмерных структурах, также как и световые, интерферируют друг с другом (или с неоднородностями в структуре). Благодаря наличию у них заряда, их распространением можно управлять. Если разделить пучок электронов и провести его с двух сторон от магнитного потока так, чтобы потом он интерферировал сам с собой, то магнитным полем можно управлять "проводимостью" структуры: при определённых условиях в результате интерференции электроны гасят друг друга на выходе и ток дальше не идёт.

Квантовый интерференционный транзистор использует эффект фазовой интерференции электронов в вакууме. Прибор состоит из: полевого эмиттера, коллектора и конденсаторов между ними. Рабочие частоты: $10^{11} \div 10^{12}$ Гц.

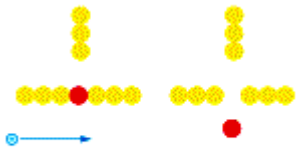




Молекулярная наноэлектроника

1. Атомные переключающие структуры

Японские учёные разработали новое семейство цифровых переключающих приборов на атомных и молекулярных шнурах. Базовая ячейка (**атомное реле**) состоит из атомного шнура, переключающего атома и переключающего электрода. Общий размер составляет менее 10 нм, а рабочие частоты ~ 10^{12} Гц.



Атомные переключающие структуры

Приложенное к переключающему электроду электрическое поле смещает переключающий атом из атомного шнура, и реле переходит в состояние выкл.

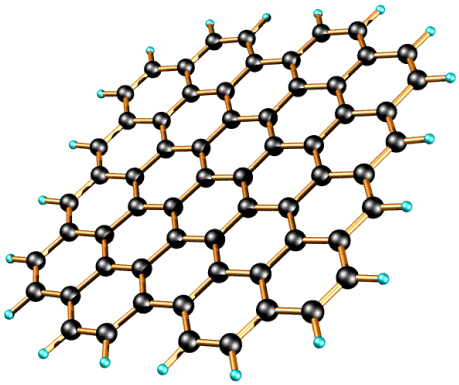
Теоретически показано, что зазор в атомном шнуре величиной 0,4 нм является достаточным, чтобы прервать движение по нему электронов.

На этой основе были разработаны логические элементы НЕ-И и НЕ-ИЛИ, а также ячейка динамической памяти. Предполагается, что они позволят создать суперкомпьютер с оперативной памятью 10^9 байт на площади 200 мкм^2.

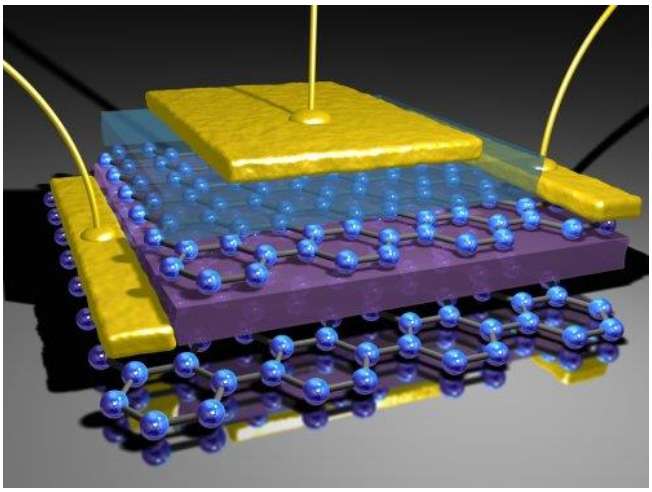
Для создания атомных реле требуется уникальный сканирующий туннельный микроскоп, обеспечивающий прецизионную манипуляцию атомами.

2. Графеновый транзистор

Графе́н – двумерная аллотропная модификация углерода, слой атомов углерода толщиной в один атом с гексагональной кристаллической решёткой (одна плоскость графита). Обладает большой механической жёсткостью (~ 1 ТПа) и рекордно большой теплопроводностью (~ $5 \cdot 10^3$ Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$). Максимальная подвижность электронов среди всех известных материалов делает графен одной из основ для наноэлектроники и возможной заменой кремния в интегральных микросхемах.



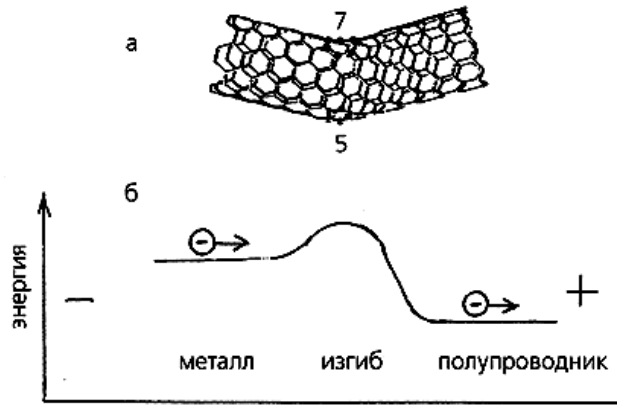
Графеновый транзистор: управляемый туннельный диод, в котором электроны от слоя к слою графена туннелируют сквозь слой диэлектрика.

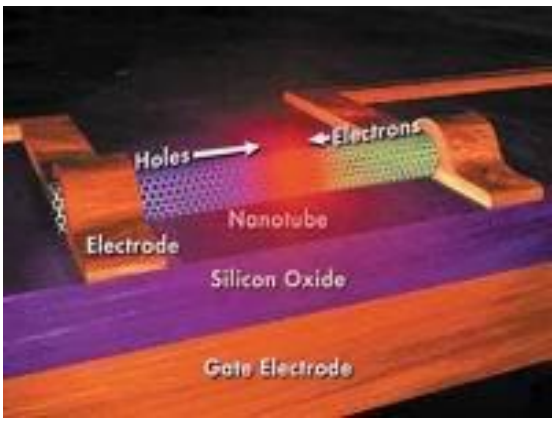


Прибор может быть изготовлен в виде небольших устройств (60 атомов в ширину), рассеивает мало энергии, имеет высокие скорости переключения, работает при комнатных температурах.

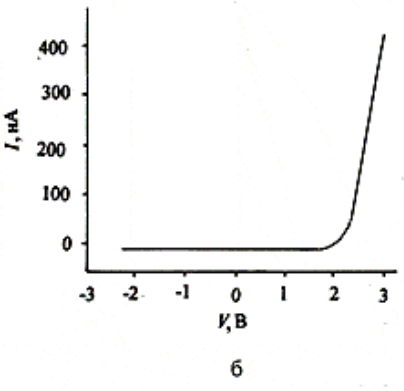
3. Диоды из углеродных нанотрубок

Если один углеродный шестиугольник в углеродной нанотрубке (УНТ) заменить, например, на пятиугольник, трубка изогнётся. С изменением ориентации шестиугольников по отношению к оси УНТ меняется и её электронный спектр, положение E_F, E_g и т.п. Так что слева от изгиба УНТ должна быть металлической, а справа - полупроводниковой, причём с разными уровнями Ферми! Значит, изогнутая УНТ – это **молекулярный гетеропереход** металл-полупроводник. Эту задачу решила фирма General Electric.





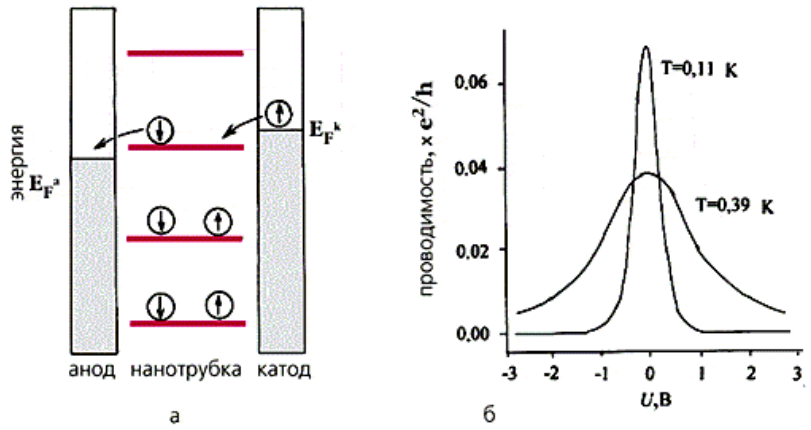
В единой системе выигрыш в энергии приводит к перетеканию заряда и образованию потенциального барьера, так что электроны перемещаются только из области УНТ с большей E_F в область с меньшей. Это “одностороннее” прохождение тока через УНТ с изгибом используется для создания выпрямляющего диода.



Отметим, что большой ток не нагревает трубку настолько, насколько он разогревает медный провод. Это вызвано отсутствием дефектов на пути электронов в кристаллической структуре. К тому же теплопроводность нанотрубок почти вдвое превышает теплопроводность алмаза.

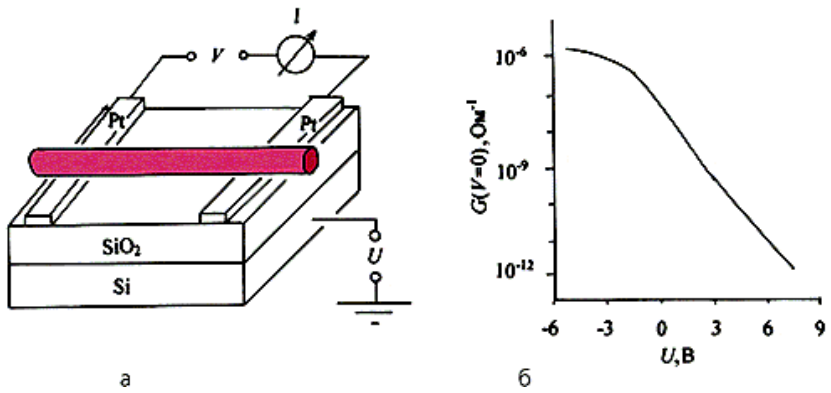
4. Полевые транзисторы из углеродных нанотрубок

Если положить **металлическую УНТ** на два электрода, у которых энергии Ферми E_F близки к одному из её уровней проводимости (энергии молекулярных орбиталей с расстоянием между ними ~ 1 мэВ, **при температуре ниже 1 К** электроны не могут прыгать с уровня на уровень), и подать напряжение, то по УНТ потечёт туннельный ток.



Если же внешним электрическим полем сместить уровни энергии УНТ относительно E_F электродов, то ток перестанет течь. На ВАХ проводимость будет иметь пик именно при том напряжении, при котором уровни совпадают и наблюдается туннелирование.

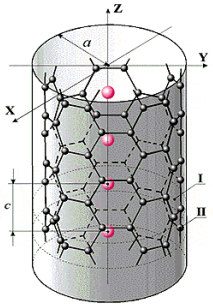
В **полупроводниковой УНТ** валентная зона (связанные состояния) отделена от зоны проводимости (антисвязанные состояния) энергетической щелью (E_g). При подаче на затвор потенциала *U* в УНТ возникает электрическое поле, меняющее изгиб зон, при этом концентрация дырок в УНТ растёт, а вместе с ней растёт и электропроводность. Это позволяет подачей напряжения превращать нанотрубку из полупроводниковой в металлическую: при напряжениях ~ 6 В она становится металлической. И всё это работает **при комнатной температуре**!



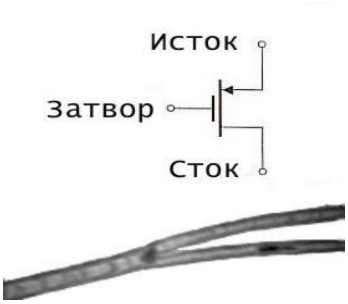
Возможности использования УНТ в молекулярной электронике возрастают при переходе от чисто углеродных к **химически модифицированным нанотрубкам**:

1. Возможно добавление **аддендов** на внешнюю поверхность УНТ (например, атомов фтора), которые существенно меняют её проводимость;

2. Внутрь УНТ удаётся внедрить различные элементы, включая тяжёлые металлы. Если одну половину полупроводниковой УНТ заполнить металлом, а вторую оставить нетронутой, получим молекулярный гетеропереход металл-полупроводник!



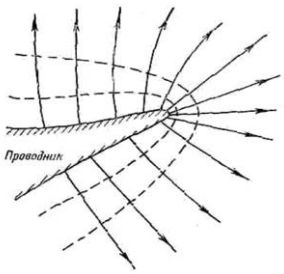
3. Ветвление нанотрубок тоже даёт широкие возможности, например, создание транзистора внутри одной нанотрубки!

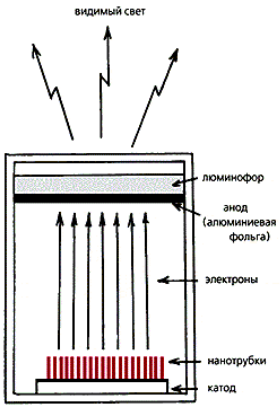


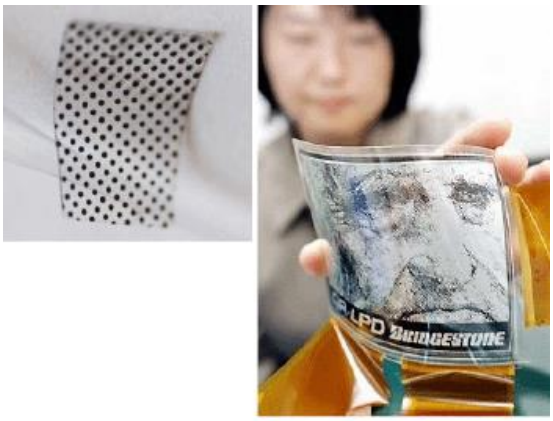
5. Нанотрубки как источники электронов

Обладая повышенным коэффициентом усиления поля, нанотрубки могут служить полевыми эмиттерами электронов. Источники электронов необходимы для разработки различного вида электронных приборов: источников света, дисплеев, рентгеновских аппаратов, космических двигателей, наконец.

Дисплей из углеродных нанотрубок. Если закрепить УНТ на катоде (например, в виде композита с полимером) и подать напряжение, то на остриях УНТ появится заряд, который "притянет" к себе силовые линии электрического поля, так что поле на конце будет огромным и появится автоэмиссия. Под действием поля летящие электроны формируются в пучок. Чтобы с помощью такой автоэлектронной эмиссии получить изображение, на аноде закрепляют люминофор. Электронный удар возбуждает молекулы люминофора, которые затем возвращаются в основное состояние, излучая фотоны. Получается светодиод.







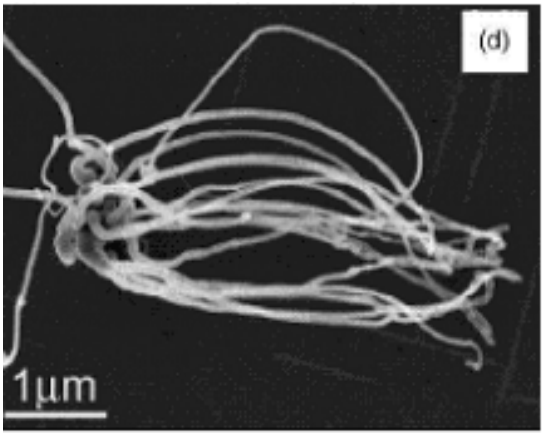
На рис. справа: матрица гибкого дисплея на основе нанотрубок, пронизывающих тонкую полимерную плёнку, и гибкий дисплей с изображением Леонардо де Винчи.

С углеродными нанотрубками, по заявлению разработчиков FED, многие проблемы исчезают. Поскольку нанотрубки очень тонкие, то высокое напряжение для эмиссии электронов не требуется. А благодаря большой силе излучения их можно разместить не так близко к поверхности экрана и освободить тем самым больше пространства для управляющей электроники.

Дисплеи из углеродных нанотрубок уже в состоянии уйти из лабораторий и отправиться непосредственно на заводы, - отмечают исследователи фирмы Motorola. Потенциал УНТ дает возможность создавать HD-TV изображения с такой цветопередачей, контрастностью и временем отклика, которые можно сравнить с изображениями для ЭЛТ-дисплеев (CRT).

6. Нанопровода из углеродных нанотрубок

Длинные УНТ могут быть использованы в наноэлектронных устройствах в качестве молекулярных проводов.



Исследования свойств УНТ обнаружили квантовую природу переноса заряда:

1. В УНТ электронная проводимость не зависит ни от её длины, ни от толщины и равна **кванту проводимости**:

$(2e^2/h) = 12{,}9$ кОм$^{-1}$

Это предельное значение проводимости для свободного переноса по всей длине проводника делокализованных электронов. Плотность такого тока при комнатной температуре $J \sim 10^7$ А·см$^{-2}$, что на два порядка превосходит J в сверхпроводниках!

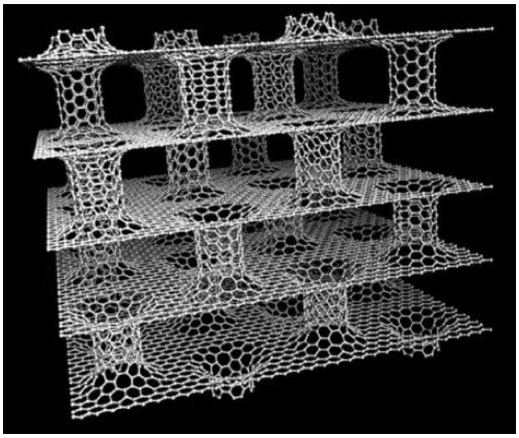
2. В контакте с двумя сверхпроводящими электродами при Т ~ 1 К **УНТ сама становится сверхпроводником**. Эффект связан с тем, что Куперовские электронные пары (образующиеся в сверхпроводящих электродах и являющиеся причиной сверхпроводимости) не распадаются при прохождении через нанотрубку.

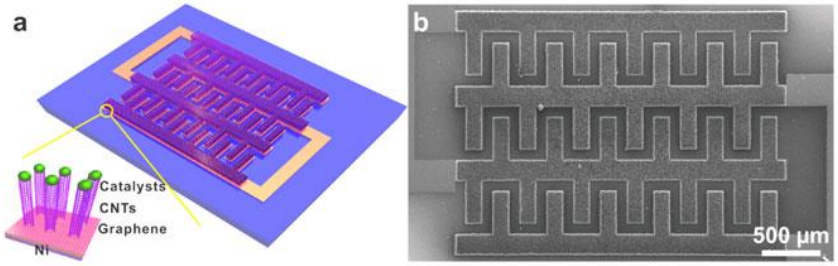
3. При низких температурах с ростом напряжения на металлических УНТ наблюдается ступенчатое возрастание тока (**квантование проводимости**): каждый скачок отвечает появлению очередного делокализованного уровня в промежутке между уровнями Ферми катода и анода. Это связано с возникновением **сингулярностей ван Хоффа**: если длина волны электрона не укладывается целое число раз на длине окружности трубок, она интерферирует сама с собой с погашением, так что разрешены только такие длины волн электронов, которые укладываются целое число раз на периметре трубки. Это сильно ограничивает количество состояний, пригодных для проводимости вокруг цилиндра, и делает УНТ одномерной квантовой проволокой.

4. УНТ обладают ярко выраженным **магнитосопротивлением**: электропроводность сильно зависит от индукции магнитного поля.

7. Суперконденсатор

Прибор состоит из двух нанокомпозитных плёнок (композит графен + УНТ), разделённых полимером или жидким электролитом. При этом плёнки служат одновременно электродами и коллекторами тока.





СТМ-скан напечатанного материала

Такие устройства позволяют запасти в два раза больше энергии на единицу объема, чем традиционные алюминиевые конденсаторы.

В представленных суперконденсаторах работают свойства, которыми обладает простое тонкое покрытие из неупорядоченных одностенных нанотрубок: хорошая проводимость (что позволяет обойтись без металлического коллектора), высокая электрохимическая стойкость и механическая прочность (что делает конденсаторы необычно гибкими).

Эффективность фильтрации напряжения обычно характеризуется таким параметром, как фазовый угол электрического сопротивления на частоте 120 Гц. И фазовый угол суперконденсаторов, создававшихся до сих пор в коммерческих масштабах, на частоте 120 Гц близок к 0 градусов. Однако суперконденсаторы, сформированные из листов графена и углеродных нанотрубок, демонстрируют фазовый угол более -81,5 градусов, что соизмеримо с параметрами используемых сейчас алюминиевых электролитических конденсаторов. Столь

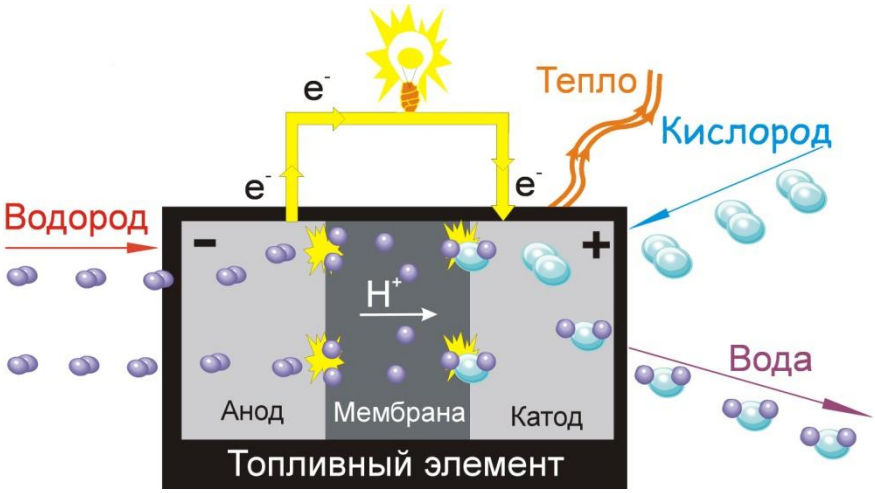
высокий фазовый угол возможен благодаря фактически бесшовному соединению графена и нанотрубок.

Как показывают расчеты, новое устройство имеет емкость до 2,16 мкФ/см^2 в водном электролите и до 3,93 мкФ/см^2 в ионных, таким образом, его параметры сравнимы с характеристиками современных коммерческих суперконденсаторов. При этом скорость разряда новых конденсаторов составляет 400 В/с, что в сотни раз превышает скорость разряда, наблюдаемую в большинстве суперконденсаторов.

Такие гибридные устройства могут стать в будущем идеальными дискретными источниками энергии для применения в портативной электронике.

8. Топливный элемент

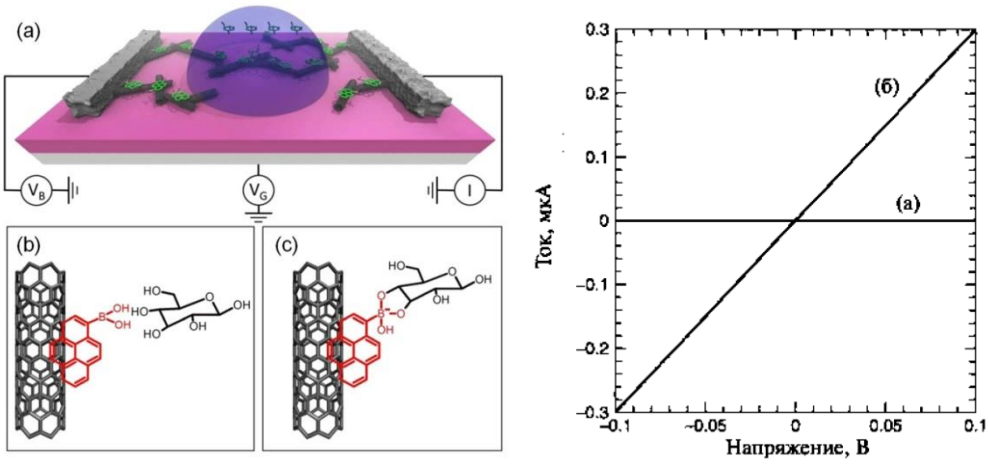
Топливный элемент состоит из двух электродов и специального электролита (мембраны), пропускающего ионы водорода между ними, но не пропускающего электроны. Нейтральный водород ионизируется на поверхности анода. Свободные электроны движутся к катоду по внешней цепи, а ионы водорода диффундируют к катоду через электролит, где из этих ионов, электронов и кислорода образуются молекулы воды.



Источником водорода могут быть батарейки-хранилища на основе УНТ. Литий, являющийся носителем заряда в некоторых батарейках, можно помещать внутрь нанотрубок. По оценкам, в УНТ можно разместить **один атом Li на каждые шесть атомов C**.

9. Датчики веществ

Одностенные нанотрубки являются миниатюрными датчиками для обнаружения молекул в газовой среде или в растворах. При адсорбции на поверхности нанотрубки молекул её электросопротивление, а также характеристики нанотранзистора могут изменяться. Полевой транзистор, сделанный на полупроводящей хиральной нанотрубке, является детектором с ультравысокой чувствительностью.



Справа зависимость тока от напряжения для полевого транзистора на отдельной нанотрубке: до (а) и после (б) воздействия газообразного NO_2.

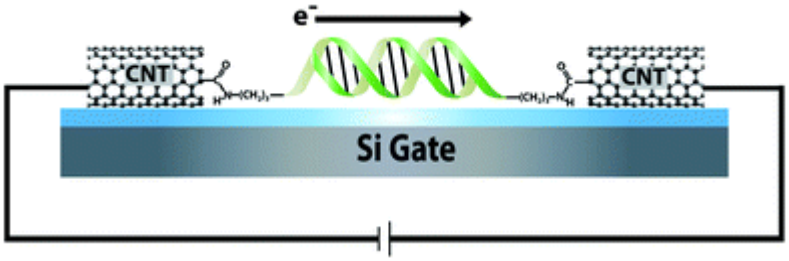
На основе транзисторов из углеродных нанотрубок группа ученых из США создала очень чувствительный электронный датчик, способный обнаружить предельно низкие концентрации глюкозы. Когда созданная структура помещается в раствор, содержащий глюкозу, молекулы глюкозы образуют на поверхности нанотрубок пару ковалентных связей *с пиреном борной кислоты*. За счет явления, известного, как рассеяние носителей (электронов и дырок проводимости), созданное соединение препятствует прохождению свободных носителей заряда через углеродную нанотрубку. В результате сопротивление цепи увеличивается, а значит, уменьшается полный ток, проходящий через устройство. Поскольку датчик состоит из тысяч одинаковых цепей, падение тока зависит от концентрации молекул глюкозы в растворе. Чем она выше, тем больше цепей прекращают проводить электрический ток. Таким образом, по падению тока можно сделать однозначные выводы о концентрации молекул глюкозы в растворе.

Поскольку устройство вполне может обнаружить глюкозу в человеческой слюне, по мнению исследователей, такие датчики могут стать реальной альтернативой обычным глюкометрам, работающим на основе образца крови.

10. ДНК-анализатор

Химическая модификация молекул ДНК, в особенности – метилирование цитозиннуклеотидов в составе ДНК, представляет собой один из главных механизмов, с помощью которых клетки активируют и дезактивируют работу определенных генов.

Исследователи из США решили исследовать особенности метилирования ДНК. Разработанная методика заключается в том, что первоначально в одностенной углеродной нанотрубке протравливается зазор, после чего в этот зазор помещается однонитевая ДНК, которая прикрепляется к двум концам разорванной нанотрубки; на завершающем этапе полученная система подключается к источнику электрического тока.



Измеряя силу тока, протекающего по системе нанотрубка-ДНК, исследователи обнаружили, что они могут определять моменты метилирования нити ДНК в режиме реального времени.

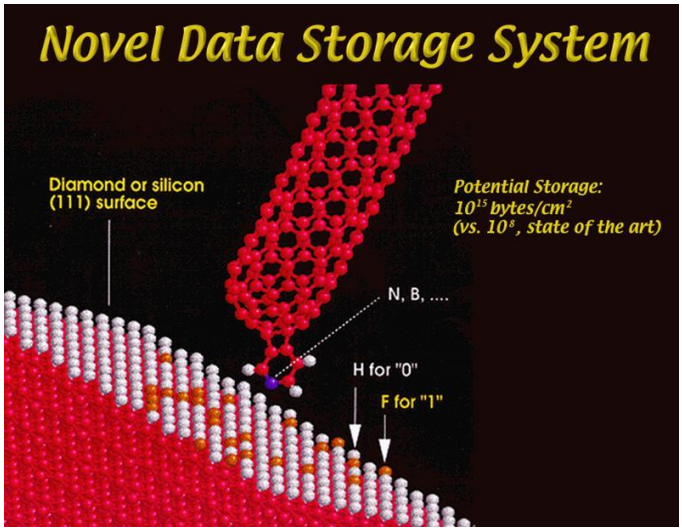
11. Алмазная память для компьютеров

Модель высокоплотной памяти разработана в NASA. Схема устройства проста и состоит из зонда и алмазной поверхности.

Зонд представляет собой углеродную нанотрубку, заканчивающуюся полусферой C_{60}, к которой крепится молекула C_5H_5N.

Алмазная поверхность покрывается монослоем атомов водорода.

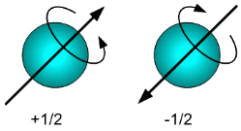
Некоторые атомы водорода замещаются атомами фтора.



При сканировании зонда вдоль алмазной поверхности, покрытой монослоем адсорбата, молекула C_5H_5N, согласно квантовым моделям, способна отличить адсорбированный атом фтора от адсорбированного атома водорода.

Поскольку на одном квадратном сантиметре поверхности помещается $\approx 10^{15}$ атомов, то плотность записи достигает $\approx 10^5$ GB/cm^2.

Спинтроника



Спиновая электроника – раздел квантовой электроники, использующий не электрические заряды носителей, а их спиновые магнитные моменты. Сегодня ведутся разработки спинтронной элементной базы.

1. Магнитные головки

В большинстве считывающих головок жёсткого дика современных компьютеров уже используется **спин-диод** на **эффекте гигантского магнитного сопротивления** (GMR: сопротивление слоистой ферромагнитной структуры зависит от совпадения ориентации намагниченности её слоёв, что позволяет считывать магнитную ориентацию слоёв под магнитной головкой).

2. Передача спина через диэлектрик

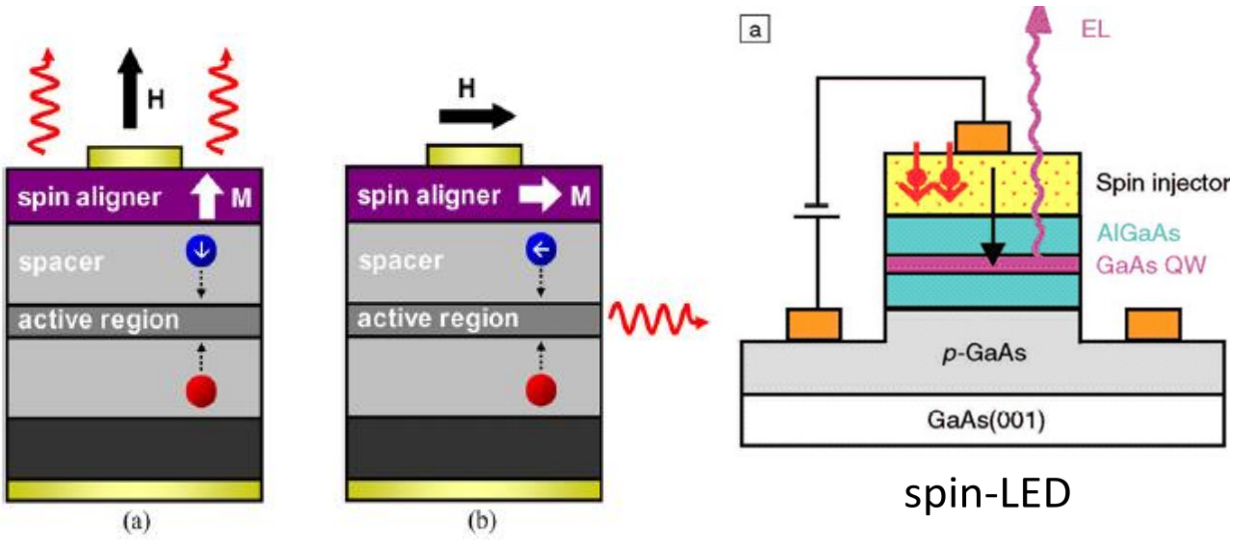
Одно из взаимодействий электронов - передача друг другу спинового момента. Квантовая механика предсказала передачу спина электронами друг другу через тонкий диэлектрический слой. Причём оказалось, что в реальности расстояние передачи спина намного больше, чем было предсказано! Потому как в передаче спина участвуют ещё и фононы! (эффект Эйнштейна-де-Гааза - проявление механической природы спинового момента). До сих пор было принято считать, что фононы в спинтронике могут играть только негативную роль - ускоряя спиновую релаксацию электронов и ядер. Однако оказалось, что фононы могут играть и конструктивную роль в спиновых явлениях.

3. Спин-световой диод (spin-OLED)

В том случае, когда в светоизлучающий слой гетероструктуры (квантовую яму) инжектируются **неполяризованные** по спину носители, интенсивности излучения циркулярного левополяризованного и правополяризованного одинаковы, т.е. получается неполяризованное излучение.

Ситуация меняется, если инжектируются **поляризованные** по спину электроны. В результате рекомбинации носителей преобладает либо право-, либо лево- поляризованное излучение.

Схематическое представление спинового сведодиода при использовании (a) геометрии Фарадея, (b) геометрии Фойхта. Справа - структура спин-диода на основе GaAs. Спин-поляризованные электроны инжектируются из контакта в квантовую яму AlGaAs / GaAs(001) и рекомбинируют там, испуская свет.



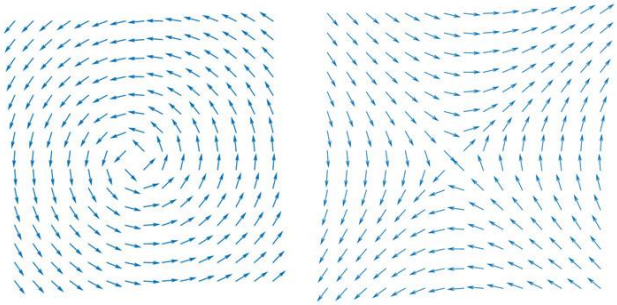
Светодиод включает в себя:

1. инжектор поляризованных по спину носителей,
2. излучающую область (обычно это квантовая яма или слой квантовых точек),
3. спейсер, пространственно разделяющий эти области, в котором происходит дрейф спин-ориентированных электронов от инжектора к излучающему слою,
4. проводящая подложка,
5. базовый омический контакт.

Кроме создания поляризованого излучения, спин-диод позволяет различать и анализировать поляризацию спина пришедших в диод носителей заряда. Так что одно из его потенциальных применений - передача информации с помощью спин-кодов.

В завершение стоит упомянуть Нобелевскую премию по физике 2016 года, теоретические аспекты которой основаны на спиновых взаимодействиях атомов в веществе.

http://elementy.ru/novosti_nauki/432847/Nobelevskaya_premiya_po_fizike_2016



Два топологически нетривиальных возбуждения спиновой решетки:
вихрь (слева) и антивихрь (справа).

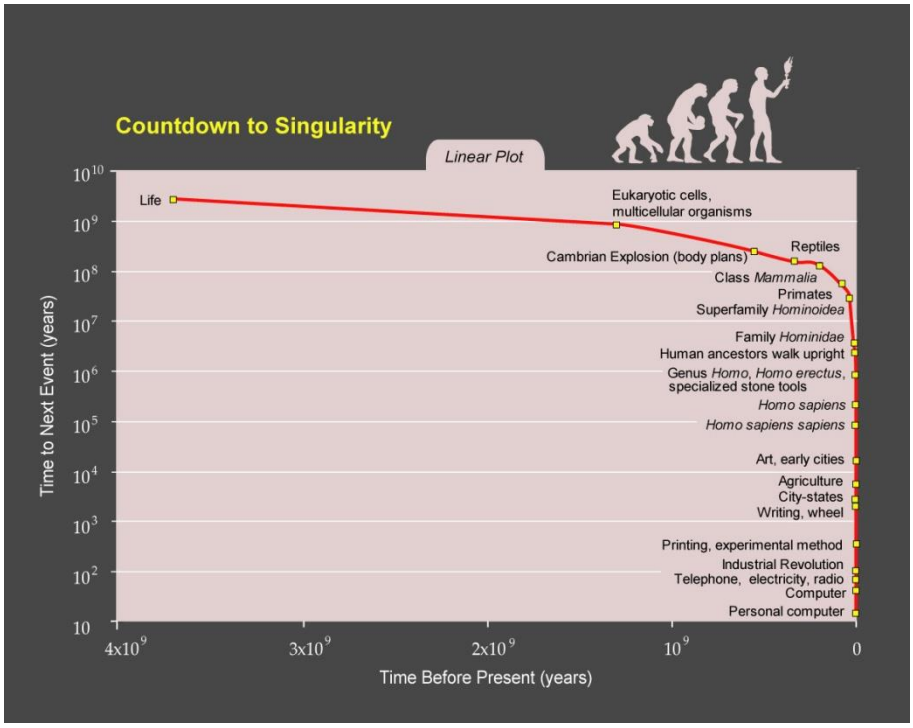
Заключение

Уже сегодня техника вплотную приблизилась к теоретической возможности запоминать и передавать 1 бит информации (0 и 1) с помощью одного электрона, локализация которого в пространстве может быть задана одним атомом! Ожидает практического разрешения и идея аналогичных однофотонных элементов.

Широкое применение этих элементов для создания информационных систем пока сдерживается недостаточной их изученностью, а также необходимостью обладать нанотехнологией их производства, которая существует пока только в исследовательских лабораториях. Однако темпы развития электроники позволяют уверенно прогнозировать промышленное освоение наноэлектроники в XXI веке.

Технологи́ческая сингуля́рность - гипотетический момент, по прошествии которого, технический прогресс станет настолько быстрым и сложным, что окажется недоступным человеческому пониманию. Предположительно, этот момент наступит после создания людьми искусственного интеллекта, появления самовоспроизводящихся машин, интеграции человека с вычислительными машинами или значительного увеличения возможностей человеческого мозга за счёт биотехнологий.

На Саммите Сингулярности в 2012 году (Nob Hill Masonic Center in San Francisco) Стюарт Армстронг собрал оценки экспертов, медианное значение даты наступления сингулярности составило 2040 год. Если проэкстраполировать закон Мура, окажется, что примерно в то же время вычислительная мощность компьютеров сравнится с головным мозгом человека.



Басня про Людей:

Чемпиона мира по шахматам Гарри Каспарова как-то спросили:

“На сколько ходов вперед вы думаете?”

Многие думали, что он приведет какую-то огромную цифру, и мы поймем, что делает его великим. Ответ показал людям, почему они играют в шахматы хуже Каспарова:

“Главное в шахматах это не то, на сколько ходов вперед ты думаешь, а как ты анализируешь текущую ситуацию”.

Суть метода в том, что, не зная объективно своей ситуации, мы начинаем просчитывать ходы, которые оказываются ошибочными в принципе. И поскольку просчитать всего невозможно, очередь до правильных ходов так никогда и не доходит. В результате, мы выбираем лучший вариант из худших. Лучший из тех, которые мы рассматривали.

Применяя ту же самую стратегию к жизни, давайте подумаем, как часто мы вместо того, чтобы объективно оценить происходящее, пытаемся просчитать ходы вперед, и как часто позднее эти ходы оказываются не вперед, а в сторону.

Увидеть ясно настоящую ситуацию, значит сделать так, чтобы ходы открыли себя сами. Тот, кто говорит, что не знает, что ему делать дальше, всего-навсего не знает, что происходит с ним сейчас.