



## Тема 1. Введение в нанотехнологию

Содержание темы:

Наночастицы в природе

Эмпирический закон Гордона Мура о закономерности миниатюризации транзисторов

Плюсы и минусы миниатюризации транзисторов

Принцип Ландауэра о выделении теплоты

Краткая справка по истории нанотехнологий

СТМ и АСМ микроскопии

Направления нанотехнологии

Понятия нанотехнология, наноэлектроника и наногетероструктурная электроника.

Слова наночастица и нанотехнология являются относительно новыми, однако сами наночастицы появились вокруг нас и изучались намного раньше, чем сформировались эти слова. Например, многие прекрасные **цвета витражного стекла** являются результатом присутствия в нём мелких кластеров оксидов металлов с размерами, сопоставимыми с длиной волны видимого света. Частицы разных размеров рассеивают свет различных длин волн, придавая разные цвета стеклу. Маленькие коллоидные частицы серебра появляются в процессе **обработки фотоснимка**. Вода при комнатной температуре состоит из нанокластеров. Микроскопические кристаллики льда, парящие в атмосфере, приводят к ряду **оптических явлений**: гало, парагелий, солнечный столб, зенитная дуга, глория и т.д.

**Наночастицами** обычно считаются образования из связанных атомов или молекул с размерами  $< 100$  нанометров (нм). Нанометр равен  $10^{-9}$  метра или  $10 \text{ \AA}$ , так что частицы с радиусом  $< 1000 \text{ \AA}$  могут считаться наночастицами.

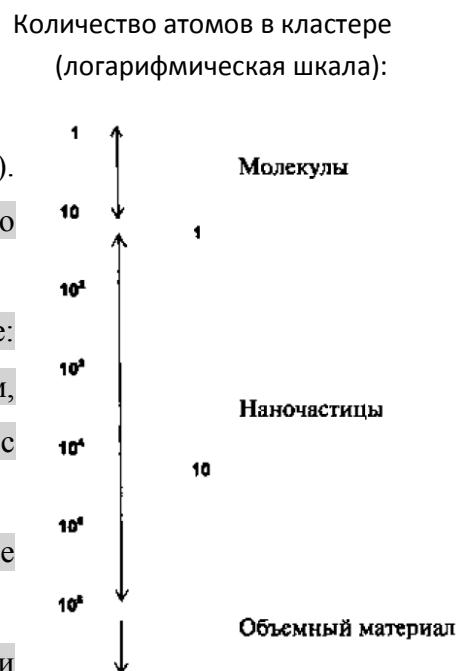
Кластер радиусом один нанометр содержит примерно 25 атомов, однако множество молекул состоит из более, чем 25 атомов (особенно биологические молекулы). Так что между наночастицами и молекулами невозможно провести чёткой грани.

Можно принять за рабочее следующее определение:  
**наночастица** - это агрегат атомов с размерами от 1 до 100 нм, рассматриваемый как часть объёмного материала, но с размерами меньше характерных длин некоторых явлений.

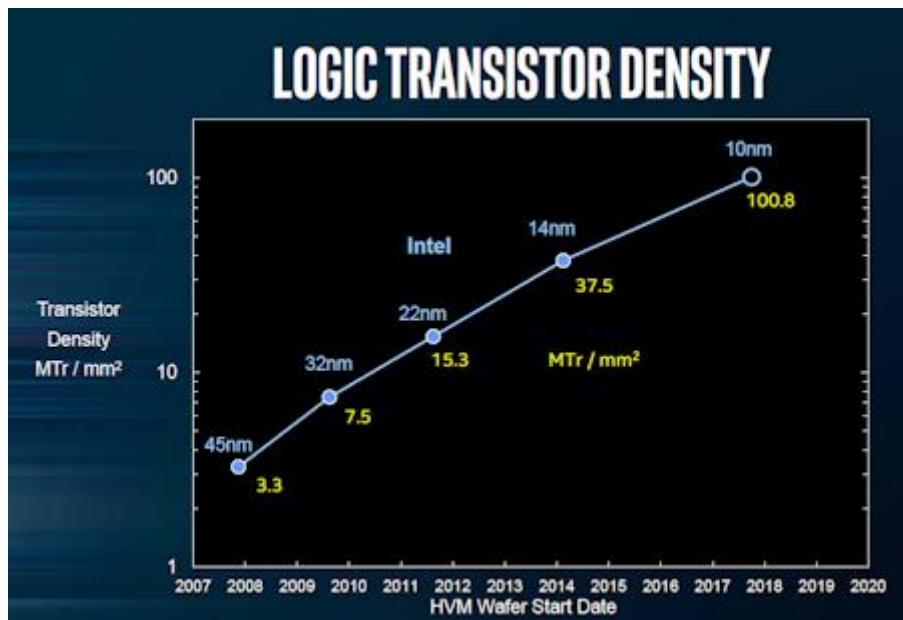
С уменьшением размеров в силу вступают квантовые законы, которые существенно меняют свойства материала.

Всерьёз с этим эффектом столкнулись технологии при уменьшении размеров электронных компонент.

Уменьшение компонент - основной тренд развития человеческой электроники.

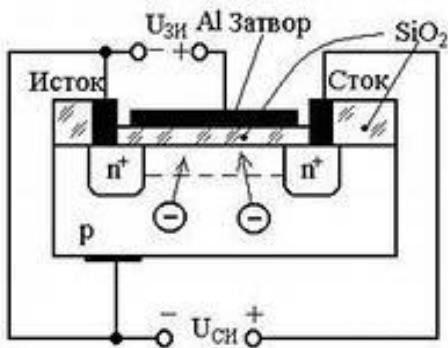


**Эмпирический закон Гордона Мура:** число транзисторов на кристалле интегральной схемы удваивается каждые 2 года.



В 1965 году (через шесть лет после изобретения интегральной схемы) один из основателей Intel Гордон Мур в процессе подготовки выступления обнаружил закономерность: появление новых моделей микросхем наблюдалось спустя примерно год после предшественников, при этом количество транзисторов в них возрастало каждый раз приблизительно вдвое. Мур пришёл к выводу, что при сохранении этой тенденции мощность вычислительных устройств за относительно короткий промежуток времени может вырасти **экспоненциально**. В 1975 году Гордон Мур внёс в свой закон корректизы, согласно которым удвоение числа транзисторов будет происходить каждые два года. В 2007 г. Мур заявил, что закон нарушается из-за "неделимости" атома и предела  $v < c$ . Однако процесс миниатюризации продолжается и по сей день!





### Плюсы миниатюризации транзисторов

С уменьшением размеров МОП транзисторов:

- снижается площадь **СБИС**  
(сверхбольшая интегральная схема, > 10 тыс. элементов)
- улучшается быстродействие
- уменьшаются паразитные ёмкости
- снижается энергопотребление.

### Минусы миниатюризации транзисторов

#### Основные проблемы микроминиатюризации МОП:

- туннелирование электронов через затвор
- электрический прокол между истоком и стоком
- уменьшение подвижности носителей в канале
- увеличение сопротивления между истоком и стоком
- уменьшение запаса между пороговым напряжением и напряжением питания
- квантово-механическая природа слоя электронов у поверхности раздела Si/SiO<sub>2</sub>  
(т.н. инверсионного слоя), которая не позволяет другим электронам приближаться к поверхности Si, что увеличивает эффективную толщину окисла.

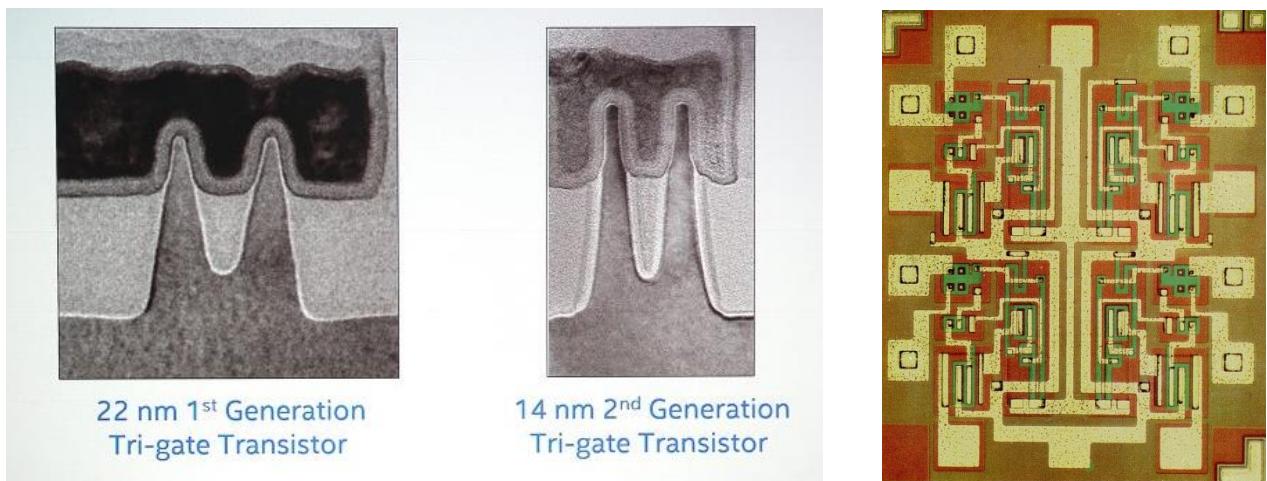
«Тик-так» (tick-tock) — экстенсивная стратегия разработки микропроцессоров, анонсированная Intel в сентябре 2006. Цикл разработки делится на две стадии:

«Тик» означает уменьшение технологического процесса на основе существующей микроархитектуры,

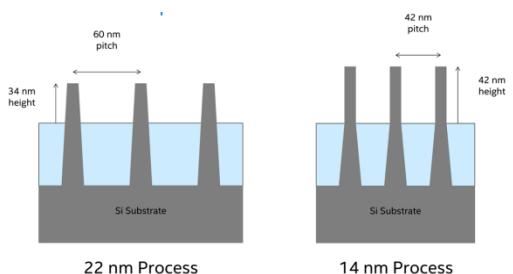
«Так» означает выпуск микропроцессоров с новой микроархитектурой на основе существующего технологического процесса.

Уменьшение горизонтальных размеров элементов позволило создать в 2017 году 18-ядерный 14-нанометровый процессор Intel Core i9-7980XE :

тактовая частота 2.6 ГГц (в турбо режиме до 4,4 ГГц), L3-кеш 24,75 Мб, 4 канала памяти, требование к системе охлаждения TDP 165 Вт, цена 2000 \$.



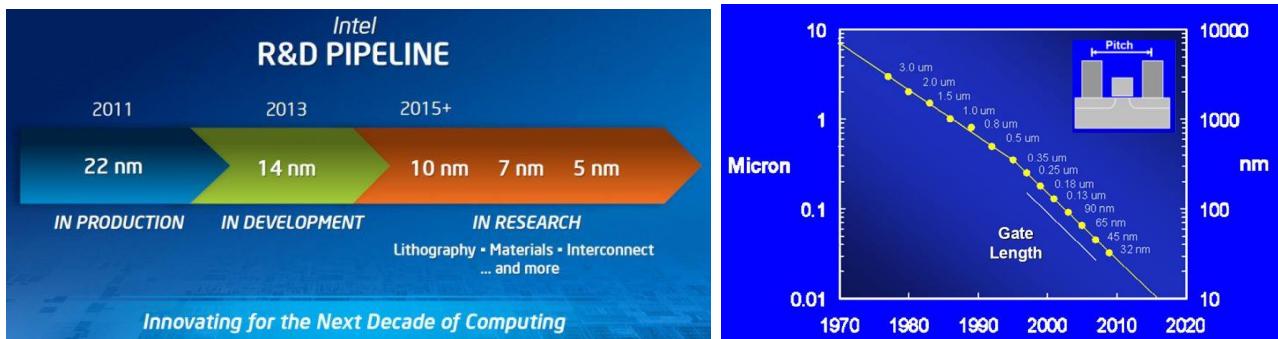
	22 nm Node	14 nm Node	Scale
Transistor Fin Pitch	60	42	.70x
Transistor Gate Pitch	90	70	.78x
Interconnect Pitch	80 nm	52 nm	.65x



(transistor fin pitch - шаг транзистора, transistor gate pitch - расстояние между затворами, Interconnect pitch - минимальное расстояние между слоями внутрисхемных соединений).

<https://habr.com/post/403917/>

Переход с 32 нм на 22 нм позволил вдвое увеличить плотность транзисторов. Как следствие, на том же кристалле, что раньше, стало возможным размещение не 4, а уже 8 ядер процессора. Переход на 14 нм - уже 18 ядер!



Техпроцесс напрямую оказывается на количестве активных элементов полупроводниковой микросхемы. Чем тоньше техпроцесс – тем больше транзисторов поместится на определенной площади кристалла. В первую очередь это значит увеличение количества продукции из одной заготовки. Во вторую – снижение потребления энергии: чем тоньше транзистор – тем меньше он расходует энергии. Как итог, при равном количестве и структуре размещения транзисторов (а значит, и увеличения производительности) процессор будет меньше расходовать энергию.

Минусом перехода на тонкий техпроцесс является удорожание оборудования. Новые промышленные агрегаты позволяют делать процессоры лучше и дешевле, но сами набирают в цене. Как следствие, лишь крупные корпорации могут вкладывать миллиарды долларов в новое оборудование. Даже такие известные компании, как AMD, Nvidia, MediaTek, Qualcomm или Apple самостоятельно процессоров не делают, доверяя это гигантам вроде TSMC.

Строительство завода Intel под названием Fab 42 в американском штате Аризона началось в середине 2011 года, а в эксплуатацию планировалось сдать в 2013 году. По заявлению Intel, он стал бы самым современным заводом по массовому выпуску компьютерных процессоров, используя 14-нанометровую технологию на основе 300-миллиметровых кремниевых пластин. В январе 2014 года Intel объявила о задержке открытия завода Fab 42 из-за сокращения рынка ПК. В начале 2017 года Intel выделило 7 млрд долл. на установку и наладку оборудования для построенной фабрики, чему способствовала политика местного производства. На завершение работ отводится ещё 3-4 года. Планируется освоение также 7 нм техпроцесса.

## Принцип Ландауэра

Принцип Ландауэра — принцип, сформулированный в 1961 году Рольфом Ландауэром (IBM) и гласящий, что в любой вычислительной системе, независимо от её физической реализации, при изменении 1 бита информации выделяется теплота в количестве по крайней мере  $W$  джоулей:

$$W = k_B T \ln 2 \quad (\text{где } k_B \text{ — константа Больцмана, } T \text{ — температура})$$

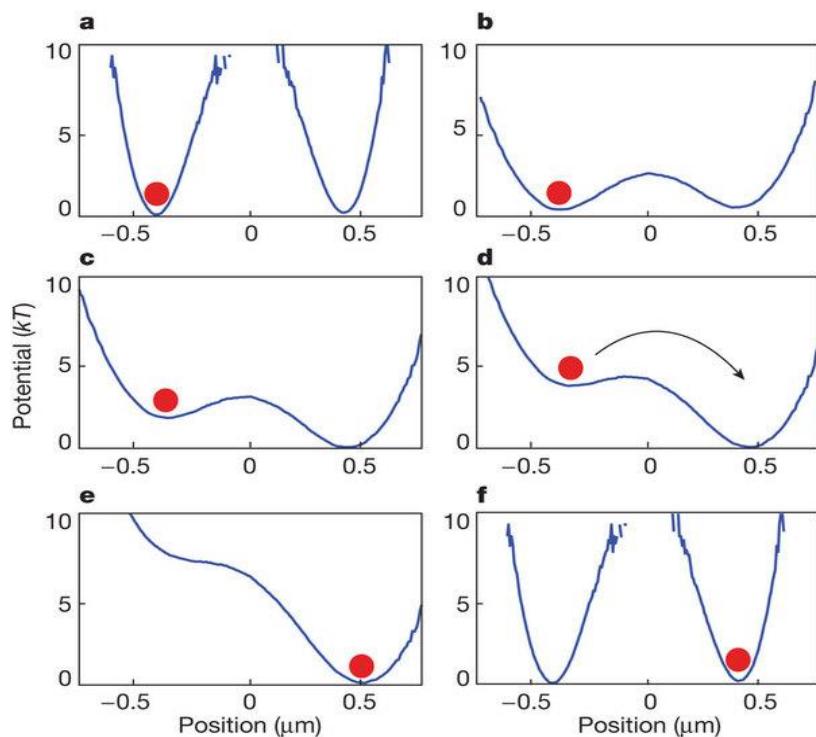
(при  $T_{комн} = 300$  К,  $k_B T = 0,026$  эВ, тогда теплота  $W = 0,017$  эВ)

Выражение Шеннона - Фон-Неймана - Ландауэра задаёт минимальную энергию  $E_{bit}$ , необходимую для обработки 1 бита (либо — минимальную высоту барьера, необходимую для разделения двух состояний электрона  $E_{SNL}$ ):

$$E_{bit} > E_{SNL} = W$$

Исследователи из трёх университетов Франции и Германии провели эксперимент: они построили ячейку памяти на основе микроскопической коллоидной частицы (кварцевая бусинка диаметром два микрометра).

На бусинку был направлен лазерный луч **оптического пинцета**. При этом свет был отрегулирован так, что были созданы две потенциальные ямы, в которые мог свалиться этот шарик. Условно они были названы «левая» и «правая». Им присвоили логические значения 0 и 1. Управляя глубиной каждой из ям по отдельности, а также высотой барьера между ними, учёные могли влиять на вероятность нахождения бусинки в правом или левом положении, а значит — записывать в ячейку информацию и стирать её.



Переход частицы из состояния А (логический 1) в состояние В (логический 0).

Если барьер был невелик, **хаотичное тепловое движение** могло перебрасывать бусину из одного положения в другое с равной вероятностью. Далее, если яма «1» делалась глубже, чем яма «0», то бусина с большей вероятностью попадала в правое положение. После чего можно было тут же увеличить высоту энергетического барьера и зафиксировать это новое состояние ячейки памяти. За перемещениями шарика следила **высокоскоростная камера**, показания которой помогли вычислить тепловую энергию, передаваемую от движущегося шарика воде (за счёт сил трения) в момент перескока из одной потенциальной ямы в другую. Таким образом была впервые измерена энергия, безвозвратно рассеиваемая в окружающую среду при уничтожении информации в ней. Это количество тепла оказалось близким к значению, предсказанному 51 год назад Ландауэром!

В начале XXI века компьютеры при обработке одного бита рассеивали примерно в **миллион раз больше тепла, чем предсказано принципом**. Однако, на начало 2010-х разница снизилась до нескольких тысяч, и предсказывается дальнейшее приближение к пределу Ландауэра в течение ближайших десятилетий.

Возможные попытки обойти лимит Ландауэра:

1. существует возможность организовать обратимые вычисления, в которых энтропия всей системы возрастать не будет;
2. не так давно теоретики показали, что в квантовых компьютерах стирание битов может приводить к отрицательным значениям энтропии ячейки и охлаждению системы, вместо рассеивания тепла;
3. как атаку на второе начало термодинамики можно воспринимать реализованный японцами полтора года назад **двигатель Сциларда** (он же – вариация демона Максвелла), который превращает информацию в энергию.

**Двигатель Сциларда:**



Японцы создали два связанных шарика полистирола диаметром 0,3 микрометра на поверхности стекла в жидкости. Один мог вращаться вокруг первого. Молекулы жидкости хаотично подталкивали шарики, естественно, с равной вероятностью как по часовой, так и против часовой стрелки. Яп. добавили слабое электрическое поле, которое создавало крутящий момент. Затем добавили «демона» — высокоскоростную камеру, наблюдающую за шариком, и компьютер, управляющий полем. Каждый раз, когда ротор в броуновском движении делал шаг против поля, компьютер сдвигал последнее так, что шарик мог повернуться, но когда ротор пытался вращаться обратно, поле блокировало его. Так был создан аналог открываемой и закрываемой демоном Максвелла дверцы: ротор увеличивал свою энергию за счёт теплового движения молекул.

## **Второе начало термодинамики**

Второй закон термодинамики устанавливает существование энтропии как **функции состояния** термодинамической системы и вводит понятие абсолютной температуры. Он гласит, что в изолированной системе энтропия остаётся либо неизменной, либо возрастает, достигая максимума при установлении термодинамического равновесия.

В статистической физике энтропия  $S$  термодинамической системы рассматривается как функция вероятности  $W$  её состояния - т.н. «принцип Больцмана».

$$S = k * \ln W$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $W$  — термодинамическая **вероятность** состояния, которая **определяется количеством микросостояний**, реализующих данное макросостояние.

Следствие второго начала термостатики: невозможно одновременное осуществление полных превращений тепла в работу и работы в тепло.

## Краткая справка по истории нанотехнологий

Мария Рыбалкина «Нанотехнологии для всех»

Дедушкой нанотехнологий можно считать греческого философа Демокрита. 2400 лет назад он впервые использовал слово “атом” для описания самой малой частицы вещества.

1905

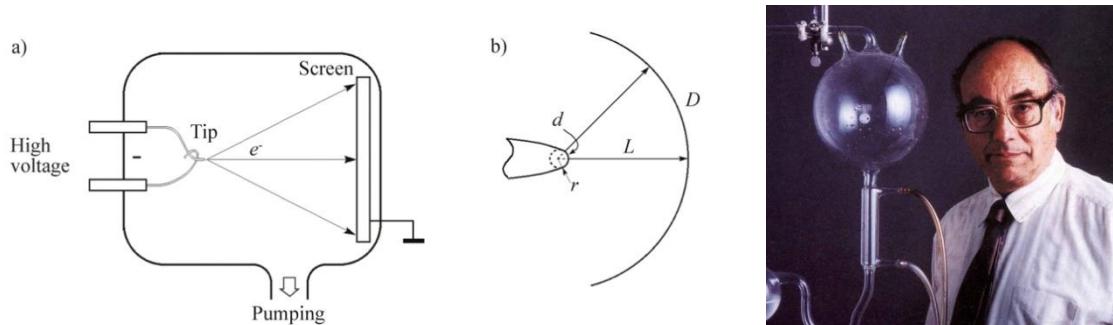
Швейцарский физик Альберт Эйнштейн опубликовал работу, в которой доказал, что размер молекулы сахара составляет примерно 1 нанометр.

1931

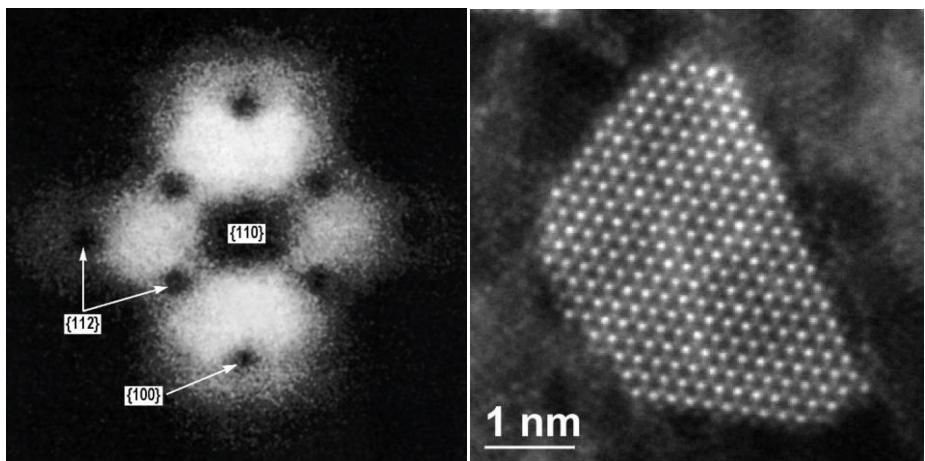
Немецкие физики Макс Кнолл и Эрнст Руска создали [электронный микроскоп](#), который впервые позволил исследовать нанообъекты.

1936

Эрвин Мюллер изобрёл [автоэлектронный микроскоп](#) и в 1950 г. получил первое детальное изображение молекулы!



Электронный проектор - безлинзовый электронно-оптический прибор для получения увеличенного в миллионы раз изображения поверхности твердого тела. Содержит катод в виде проволочки с точечным эмиттером на конце, радиус кривизны которого  $r \sim 10^{-7}$  м. Анод изготавляется в виде полой сферы, внутренняя поверхность которой покрыта слоем люминофора и металлизацией. Из колбы откачивается воздух. Когда на анод подается положительное напряжение в несколько тысяч вольт, напряженность электрического поля вблизи острия катода достигает  $10^8$  В/см. Это обеспечивает вылет электронов из острия в вакуум. Эти электроны, ускоряясь полем, бомбардируют экран анода и вызывают свечение люминофора, что создаёт на экране увеличенное изображение поверхности катода.



1951

Мюллер изобрел [автоионный микроскоп](#) (к аноду летят атомы инертного газа, сорванные полем с выступов поверхности катода). Получил изображение поверхности проводника атомарного разрешения. Добился прямого наблюдения на атомном уровне кристаллической решетки и её дефектов (1958 г.). Впервые наблюдал (1967 г.) доменные структуры при фазовых превращениях порядок-беспорядок, а также биологические молекулы.

1959

Американский физик Ричард Фейнман впервые опубликовал работу, где оценивались перспективы миниатюризации. Основные положения нанотехнологий были намечены в его легендарной лекции “Там внизу – много места” (“There’s Plenty of Room at the Bottom”), произнесённой им в Калифорнийском Технологическом Институте. Фейнман научно доказал, что с точки зрения фундаментальных законов физики нет никаких препятствий к тому, чтобы создавать вещи прямо из атомов. Тогда его слова казались фантастикой только лишь по одной причине: ещё не существовало технологии, позволяющей оперировать отдельными атомами (то есть опознать атом, взять его и поставить на другое место). Чтобы стимулировать интерес к этой области, Фейнман назначил приз в \$1000, тому, кто впервые запишет страницу из книги на булавочной головке, что, кстати, осуществилось уже в 1964 году.

1968

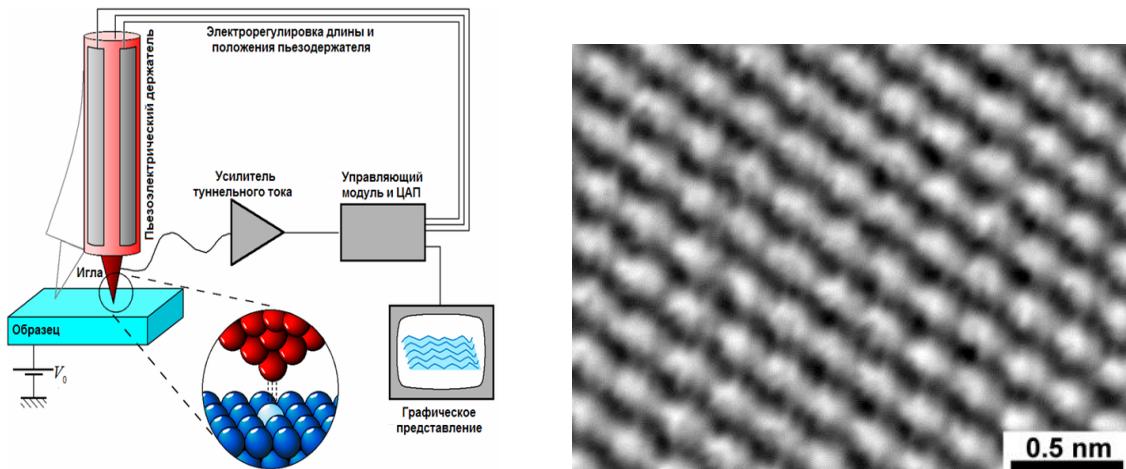
Альфред Чо и Джон Артур, сотрудники научного подразделения американской компании Bell, разработали теоретические основы нанообработки поверхностей.

1974

Японский физик Норио Танигучи ввёл в научный оборот слово “нанотехника”, предложив называть так механизмы размером менее 1 микрона.

1981 Германские физики Герд Бинниг и Генрих Рорер создали сканирующий тунNELНЫЙ микроскоп - прибор, позволяющий осуществлять воздействие на вещество на атомарном уровне. Через четыре года они получили Нобелевскую премию.

СТМ бесконтактный, но требует проводящей поверхности!



СТМ изображение поверхности графита

Рабочим органом СТМ – зондом – служит токопроводящая металлическая игла. Зонд подводится к изучаемой поверхности на очень близкое расстояние ( $\sim 0,5 \text{ нм}$ ) и при подаче на зонд постоянного напряжения между ними возникает туннельный ток, который экспоненциально зависит от расстояния между зондом и образцом. Это значит, что при увеличении расстояния лишь на  $0,1 \text{ нм}$  туннельный ток уменьшается почти в 10 раз!

Именно это и обеспечивает высокую разрешающую способность микроскопа, поскольку незначительные изменения по высоте рельефа поверхности вызывают существенное изменение туннельного тока.

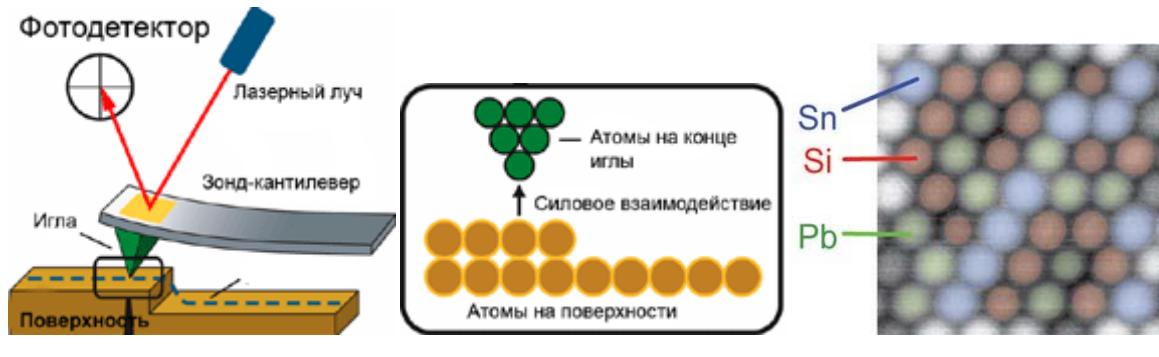
Поддерживая ток и расстояние постоянным при помощи следящей системы, зонд сканирует поверхность, перемещаясь над нею по осям X и Y, то опускаясь, то поднимаясь в зависимости от её рельефа. Информация об этом перемещении отслеживается компьютером и программно визуализируется, чтобы исследователь мог увидеть на экране объект с нужным разрешением.

1985

Американский физики Роберт Керл, Хэрольд Крото и Ричард Смолли создали технологию, позволяющую точно измерять предметы диаметром в один нанометр.

1986

Создан атомносилоевой микроскоп, позволяющий, в отличие от туннельного микроскопа, осуществлять взаимодействие с любыми материалами, а не только с проводящими.



АСМ изображение поверхности SiSnPb

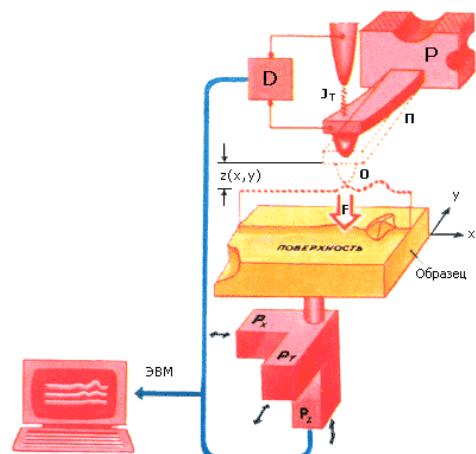
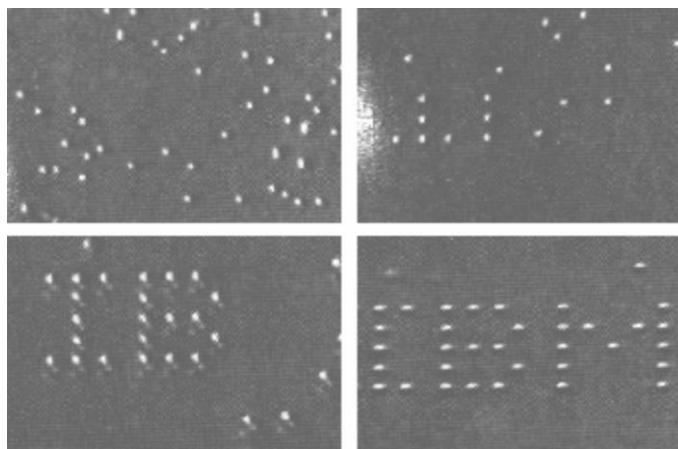
В качестве зонда в АСМ обычно используется алмазная игла. При изменении силы  $F$ , действующей между поверхностью и остриём, пружинка, на которой оно закреплено, отклоняется. Величина отклонения упругого элемента (пружинки) несёт информацию о рельефе поверхности. Для регистрации этого отклонения обычно используют регистрацию отклонения лазерного луча, который отражается от кончика зонда.

1986

Нанотехнология стала известна широкой публике. Американский футуролог Эрик Дrexler опубликовал книгу, в которой предсказал, что нанотехнология в скором времени начнёт активно развиваться.

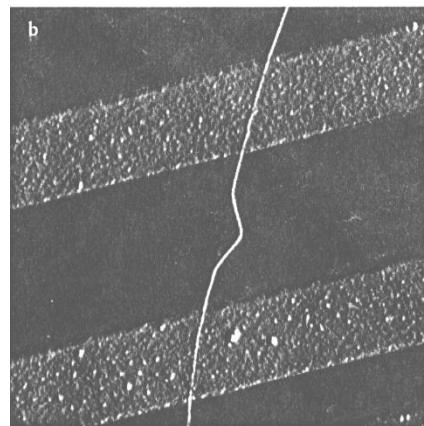
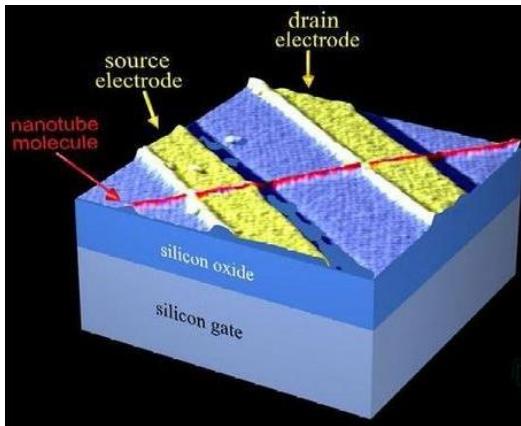
1989

Дональд Эйглер, сотрудник компании IBM, выложил название своей фирмы атомами ксенона при помощи атомно-силового микроскопа.



1998

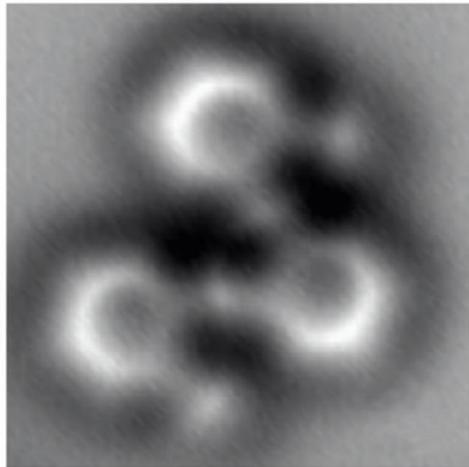
Голландский физик Сеез Деккер создал нанотранзистор.



2000

Администрация США объявила “Национальную нанотехнологическую инициативу” (National Nanotechnology Initiative). Тогда из федерального бюджета США было выделено \$500 млн. В 2002 сумма ассигнований была увеличена до \$604 млн. На 2003 год “Инициатива” запросила \$710 млн., а в 2004 году правительство США приняло решение увеличить финансирование научных исследований в этой области до \$3,7 млрд. в течение четырёх лет. В целом, мировые инвестиции в нано в 2004 году составили около \$12 млрд.

2004 Администрация США поддержала “Национальную наномедицинскую инициативу” как часть National Nanotechnology Initiative.



## **Направления нанотехнологии:**

- I. Молекулярный дизайн. Препарирование молекул и синтез новых молекул в сильно неоднородных электромагнитных полях;
- II. Наноматериаловедение. Создание «бездефектных» высокопрочных материалов, материалов с высокой проводимостью;
- III. Наноприборостроение. Создание сканирующих тунNELьных микроскопов, атомно-силовых микроскопов, магнитных силовых микроскопов, многоострийных систем для молекулярного дизайна, миниатюрных сверхчувствительных датчиков, нанороботов;
- IV. Наноэлектроника. Конструирование нанометровой элементной базы для ЭВМ следующего поколения, нанопроводов, полевых транзисторов, выпрямителей, дисплеев, акустических систем;
- V. Нанооптика. Создание нанолазеров, синтез многоострийных систем с нанолазерами;
- VI. Нанокатализ. Разработка катализаторов сnanoструктурами для классов реакций селективного катализа;
- VII. Наномедицина. Проектирование наноинструментария для уничтожения вирусов, локального ремонта органов, высокоточной доставки доз лекарств в определённые места живого организма;
- VIII. Нанотрибология. Определение связи nanoструктуры материалов и сил трения и использование этих знаний для изготовления перспективных пар трения;
- IX. Управляемые ядерные реакции. Наноускорители частиц, нестатистические ядерные реакции.

**Нанотехнология** – научная область, в которой исследователи работают с объектами по размеру меньше 100 нм ( $10^{-9}$  м), такими как атомы и молекулы. Процессы нанотехнологии подчиняются законам квантовой механики. **Задачей** нанотехнологии является разработка методов, инструментов (приборов) и материалов для работы сnanoобъектами. Нанотехнология включает атомную сборку молекул, новые методы записи и считывания информации, локальную стимуляцию химических реакций на молекулярном уровне и т.д.

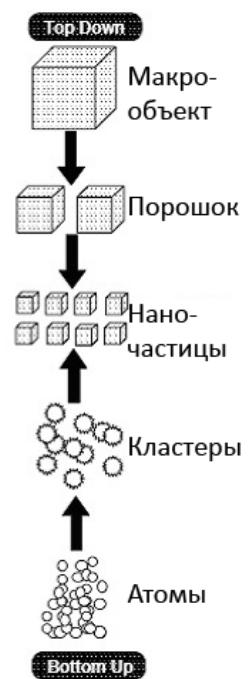
*Большой Энциклопедический словарь*

**Наноэлектроника** – область электроники, которая занимается разработкой физических и технологических основ для создания интегральных электронных схем с характерными размерами элементов менее 100 нм.

Существует **две концепции создания наноструктур:**

**путь «сверху - вниз»**, при котором процесс начинается с обработки макромасштабного объекта или структуры и состоит в постепенном уменьшении их размеров

**и путь «снизу - вверх»**, который состоит в том, чтобы набрать, соединить и выстроить отдельные атомы и молекулы в упорядоченную структуру (с помощью АСМ например).



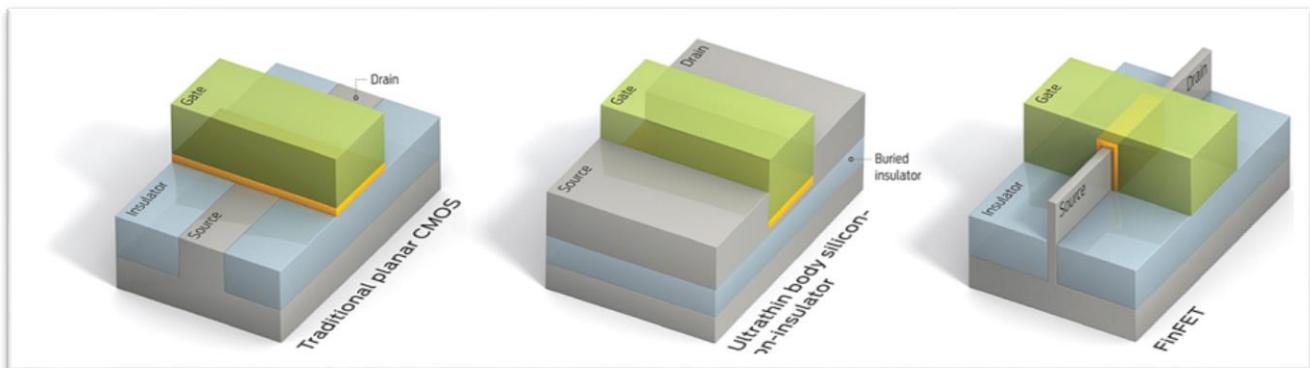
А путь "изобретение велосипеда" заключается в создании нового вида микроскопических структур, которые будут более компактными, чем уже известные устройства. Например, открытие Fin-Fet технологии (см. далее).

“Уловки”, продлевающие жизнь закону Мура:

1985 г.: переход  
от nMOP к CMOS

~2000 г.: разработка  
“Кремний на изоляторе”

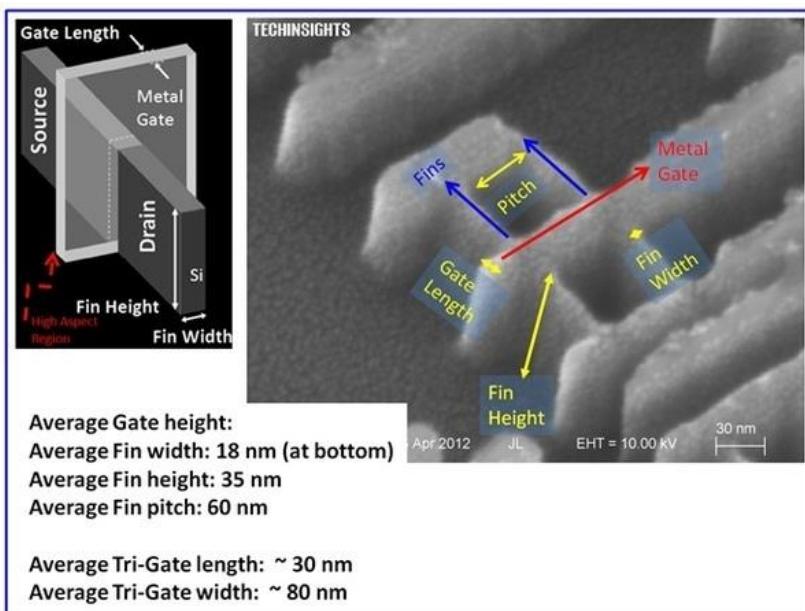
~2011 г. (22 нм):  
FinFET транзисторы



FinFET транзисторы – это новое направление в проектировании микросхем, в котором за счет использования трехмерного затвора транзистора в форме плавника повышается эффективная ширина затвора при сходной площади логической ячейки.

Структура состоит из “плавника” (fin) - т.е. из области диффузии для стока и истока, которая окружена затвором. Физические размеры транзистора описываются высотой плавника, толщиной плавника (или кремния) и длиной канала.

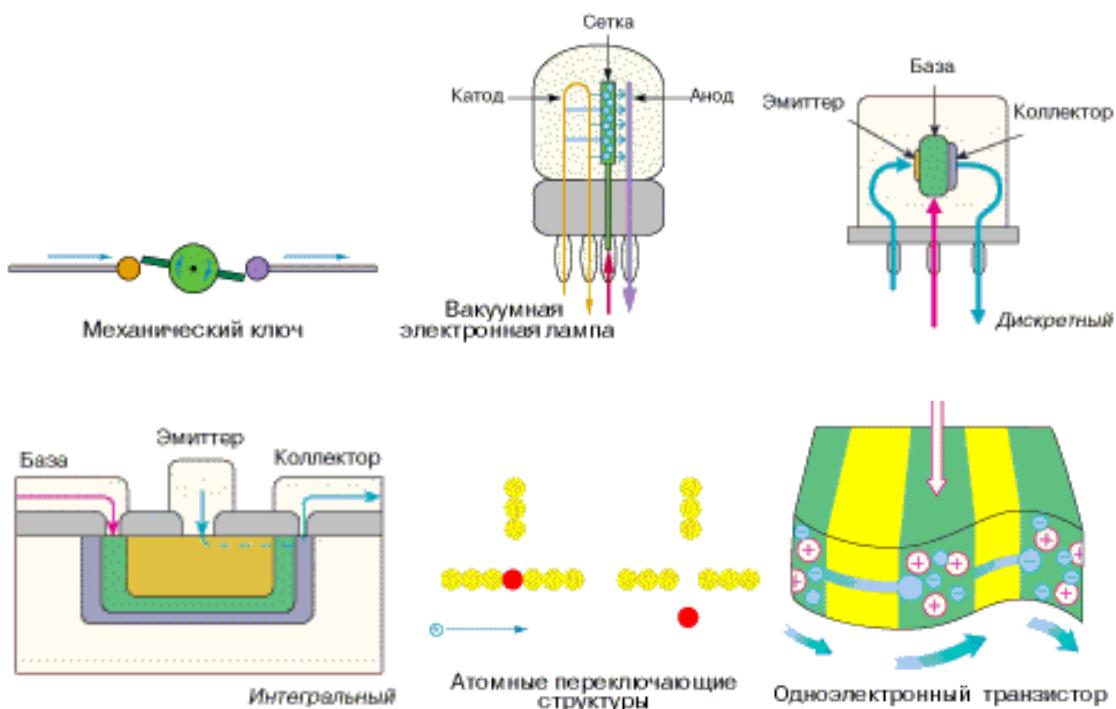
SG (Shorted-Gate) или TG (Tri-gate) FinFET - затворы транзистора соединены между собой. IG (Independent-Gate) или DG (Double-Gate) FinFET, затворы транзистора независимы (на каждый затвор подается свой сигнал).



При переходе от микро- к наноэлектронике квантовые эффекты во многом являются паразитными. Однако оказалось возможным использование квантовых эффектов в качестве базовых для создания новой элементной базы, а это уже новая т.н. **наногетероструктурная электроника**.

Одной из основных задач наноэлектроники является конструирование **нанометровой элементной базы** для ЭВМ следующего поколения: нанопроводов, полевых транзисторов, выпрямителей, дисплеев и т.д.

Историческое развитие элементной базы электроники:



## **Басня про Людей:**

Три человека ворочали камни.

Одного из них спросили – Что ты делаешь?

Он вытер пот со лба и ответил – Горбачусь.

Подошли ко второму и спросили – А ты что делаешь?

Он закатал рукава и деловито сказал – Деньги зарабатываю.

Спросили у третьего – А что делаешь ты?

Он посмотрел вверх и сказал – Храм строю.

Мораль истории: жизнь наполнена смыслом у того, кто преследует великую цель.