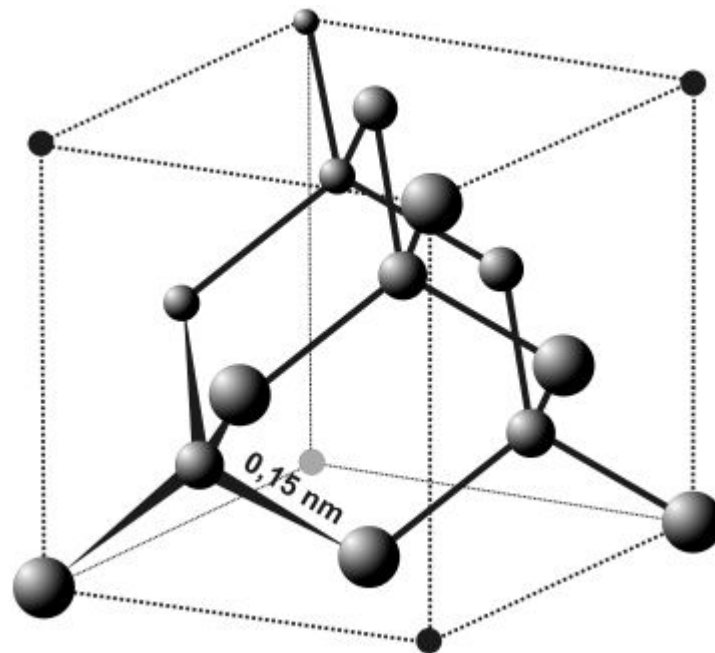


Углеродные наноструктуры

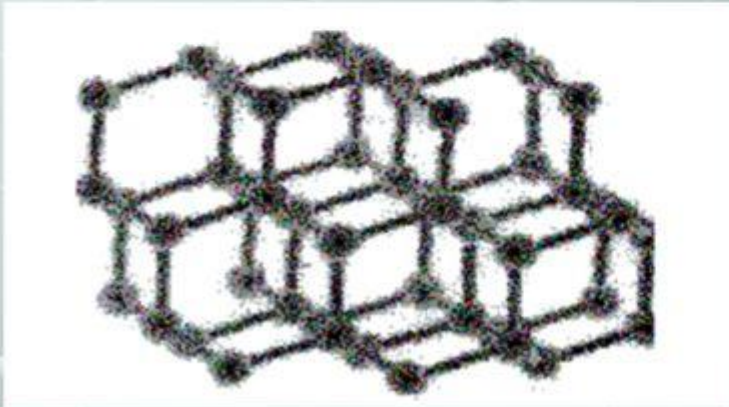
Аллотропные формы углерода

- 1. Алмаз
- 2. Графит
- 3. Графен
- 4. Нанотрубки
- 5. Фуллерен

Алмаз



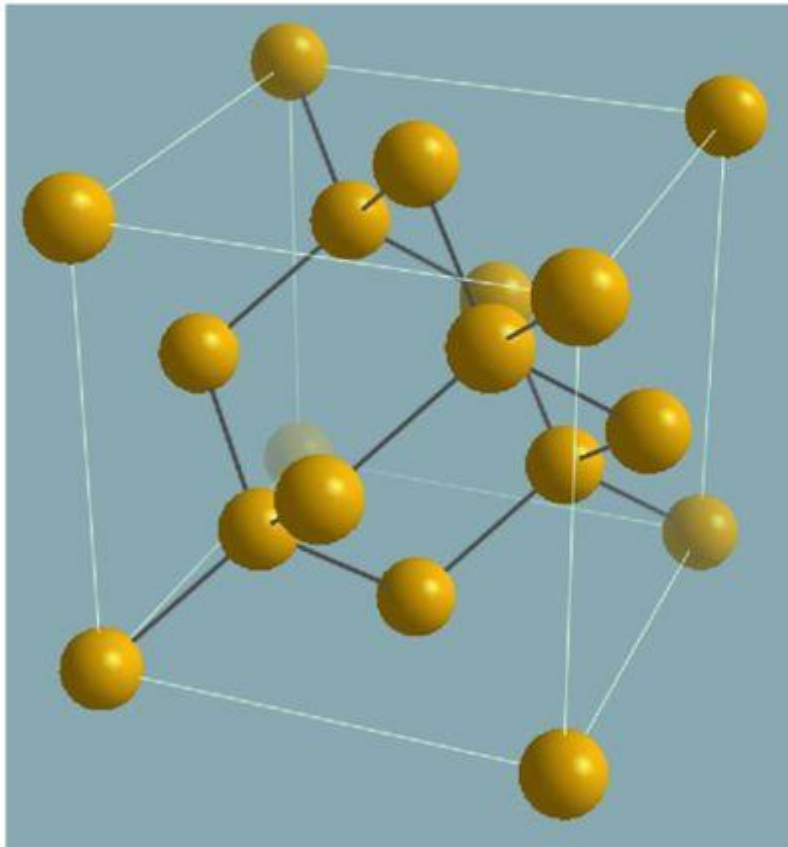
Алмаз



Структура алмаза

- Алмаз – бесцветное, прозрачное, сильно преломляющее свет вещество. Алмаз тверже всех найденных в природе веществ, но при этом довольно хрупок. Он настолько тверд, что оставляет царапины на большинстве материалов.

Решётка типа алмаза



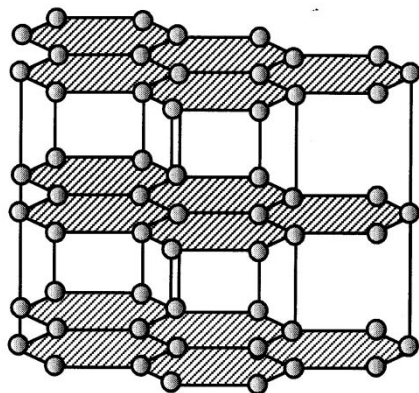
ГЦК с базисом
 $(0;0;0)$ и
 $(1/4;1/4;1/4)$ –

кремний,
германий, алмаз.

Не примитивная,
содержит 8
атомов!!!

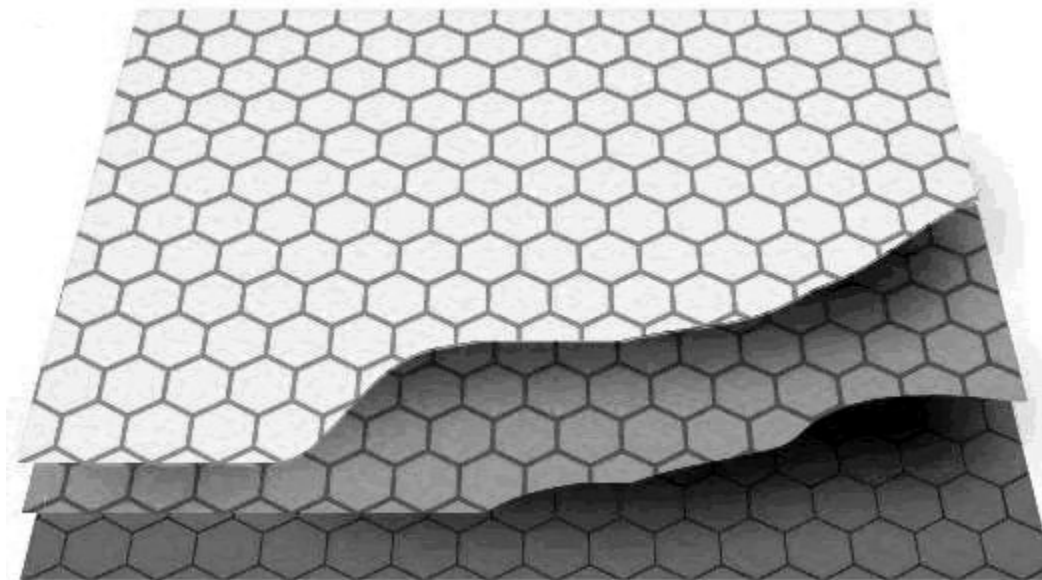
4 + 6 половинок + 8

осьмушек  MyShared



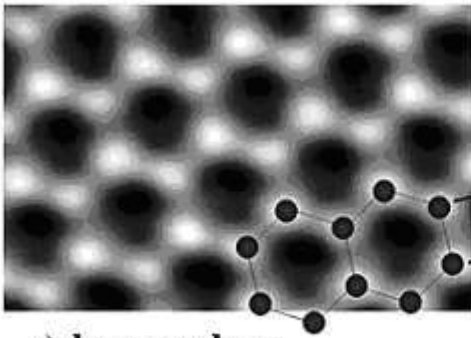
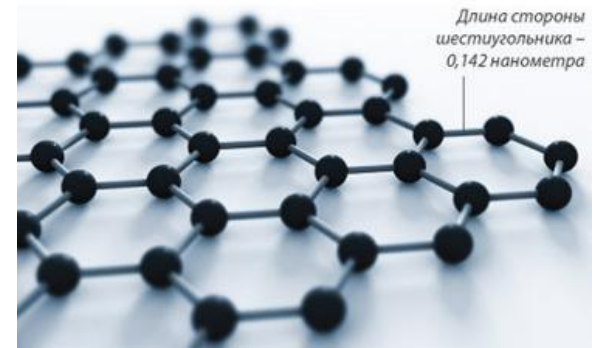
Графит

Графит, из чего сделаны грифели обычных карандашей, представляет собой стопку листов графена (рис. 22). Графены в графите очень плохо связаны между собой и могут скользить друг относительно друга. Поэтому, если провести графитом по бумаге, то соприкасающийся с ней лист графена отделяется от графита и остаётся на бумаге. Это и объясняет, почему графитом можно писать.

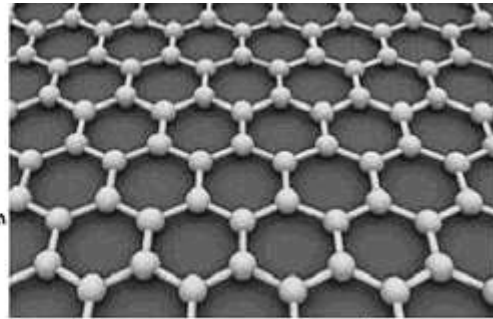


Схематическое изображение трёх листов графена, находящихся друг над другом в графите.

Графен

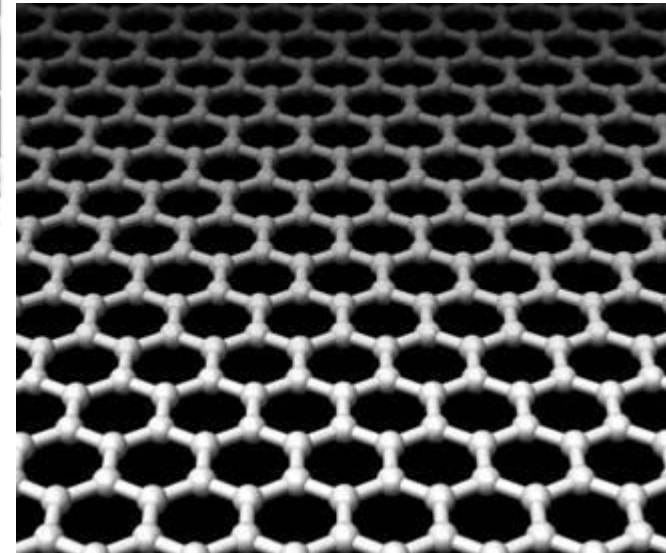


а) фото графена

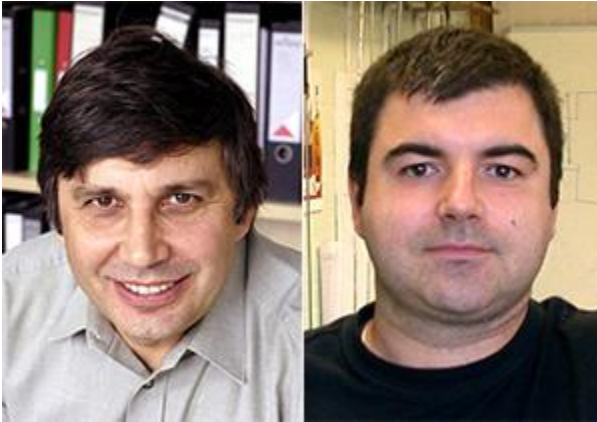


б) визуализированный графен

- Графен – это одиночный плоский лист, состоящий из атомов углерода, связанных между собой и образующих решётку, каждая ячейка которой напоминает пчелиную соту (рис. 21). Расстояние между ближайшими атомами углерода в графене составляет около 0,14 нм.



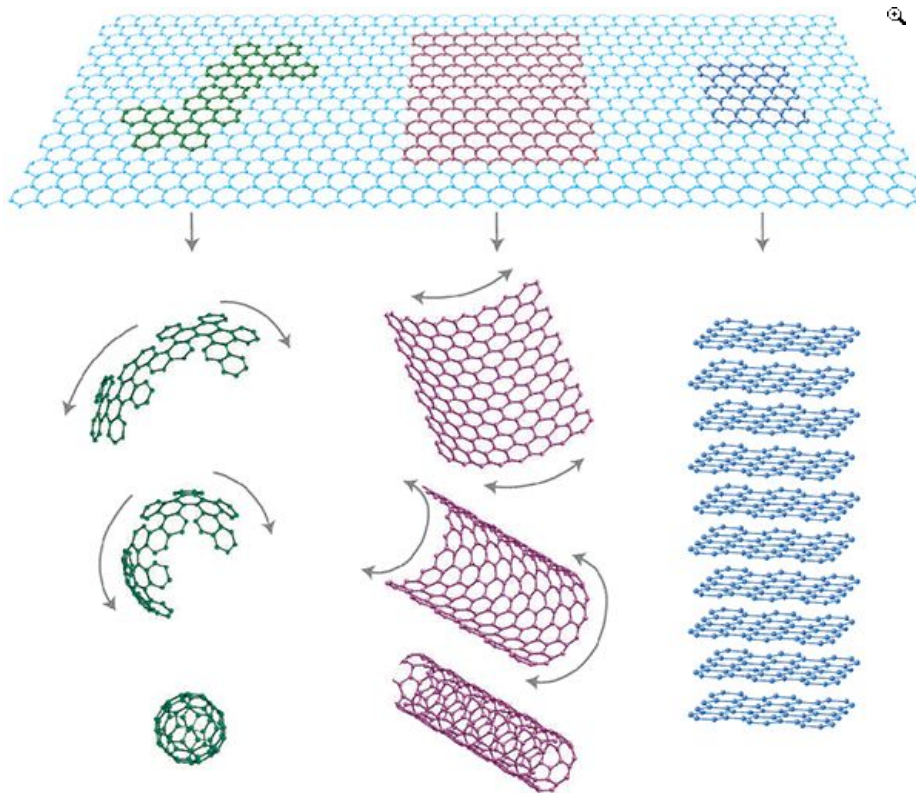
Схематическое изображение графена. Светлые шарики – атомы углерода, а стержни между ними – связи, удерживающие атомы в листе графена.



Лауреаты Нобелевской премии по физике
за 2010 год Андрей Гейм (слева) и
Константин Новосёлов.

Нобелевская премия по физике за 2010 год была присуждена Андрею Гейму ([Andre Geim](#)) и Константину Новосёлову ([Kostya Novoselov](#)) из Манчестерского университета за новаторские эксперименты с графеном — двумерной формой углерода. Возглавляемая ими группа ученых была первой, кому удалось получить графен и идентифицировать его. Помимо этого, работы Гейма и Новосёлова внесли важный вклад в исследования необычных свойств и характеристик нового материала.

Графен



Графен (верхний рисунок) — это 2D- (двумерный) строительный материал для других углеродных аллотропных модификаций. Он может быть свёрнут в 0D-фуллерен (слева), скручен в 1D-углеродную нанотрубку (в центре) или уложен в 3D-штабеля, образуя графит (справа). Рисунок из статьи А. К. Geim и К. S. Novoselov [The rise of graphene](#) в *Nature Materials*

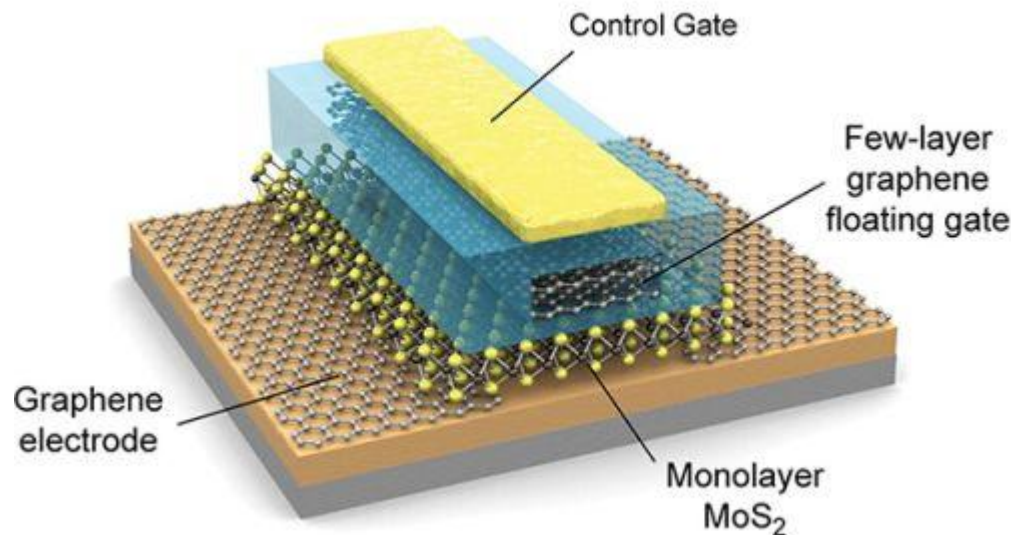
Графит — сильно анизотропное вещество; он состоит из слабо взаимодействующих плоских слоев атомов углерода. То, что связь между атомными плоскостями слабая, можно наблюдать в процессе рисования карандашом на бумаге, когда слои графита легко смещаются и отсоединяются, оставляя на бумаге след. Предположим, что нам каким-то образом удалось «отщепить» от кристалла графита одну атомарную плоскость. Полученный единичный слой атомов углерода и есть графен (из-за плоской формы графен называют еще двумерной аллотропной формой углерода). Так что можно считать, что графит — это такой штабель графеновых плоскостей.

Свойства графена

- 1. Электронные свойства новой формы углерода коренным образом отличаются от свойств трехмерных веществ. В частности, эксперименты подтвердили предсказания теоретиков о линейном законе дисперсии электронов. Но физикам было известно, что подобную зависимость энергии от импульса имеют и фотоны — безмассовые частицы, распространяющиеся в пространстве со скоростью света. Это означает, что электроны в графене, как и фотоны, не имеют массы, но движутся в 300 раз медленнее фотонов и имеют ненулевой заряд. (нулевая масса электронов наблюдается только в пределах графена. Если такой электрон удалось бы «вытянуть» из графена, то он приобрел бы свои обычные свойства.)
- 2. Линейный закон дисперсии электронов, а также то, что они являются фермионами (имеют полуцелый спин), вынуждает использовать для описания графена не [уравнение Шредингера](#), как в физике твердого тела, а [уравнение Дирака](#). Поэтому электроны в графене называют дираковскими фермионами, а определенные участки кристаллической структуры графена, для которых закон дисперсии линеен, — дираковскими точками.
- 3. Поскольку эти особенности поведения электронов в двумерном углероде присущи релятивистским частицам (со скоростью движения близкой к скорости света), появляется возможность экспериментальным образом смоделировать в графене некоторые эффекты из физики высоких энергий (например, [парадокс Клейна](#)), которые в обычных условиях исследуются в ускорителях заряженных частиц. Поэтому графен в шутку называют «настольным ЦЕРНом» (ЦЕРН — Европейский центр ядерных исследований, под его эгидой работает [Большой адронный коллайдер](#)).
- 4. В макроскопическом масштабе линейный закон дисперсии приводит к тому, что графен является полуметаллом, то есть полупроводником с нулевой шириной запрещенной зоны, а его проводимость в нормальных условиях не уступает проводимости меди. Более того, его электроны чрезвычайно чувствительны к воздействию внешнего электрического поля, поэтому [подвижность носителей заряда](#) в графене при комнатной температуре теоретически может достигать рекордных значений — в 100 раз больше, чем у кремния, и в 20 раз больше, чем у арсенида галлия. Эти два полупроводника, наряду с германием, наиболее часто используются при создании различных высокотехнологичных устройств (интегральных схем, диодов, детекторов и т. п.), а поскольку быстрота и эффективность их работы определяется как раз подвижностью электронов, то чем больше эта величина, тем быстрее и производительнее работают устройства.
- 5. Графен установил рекорд и по теплопроводности. Измеренный коэффициент теплопроводности двумерного углерода в 10 раз больше коэффициента теплопроводности меди, которая считается отличным проводником теплоты. Интересно, что до открытия графена звание лучшего проводника тепла принадлежало другой аллотропной форме углерода — углеродной нанотрубке. Графен улучшил этот показатель почти в 1,5 раза.

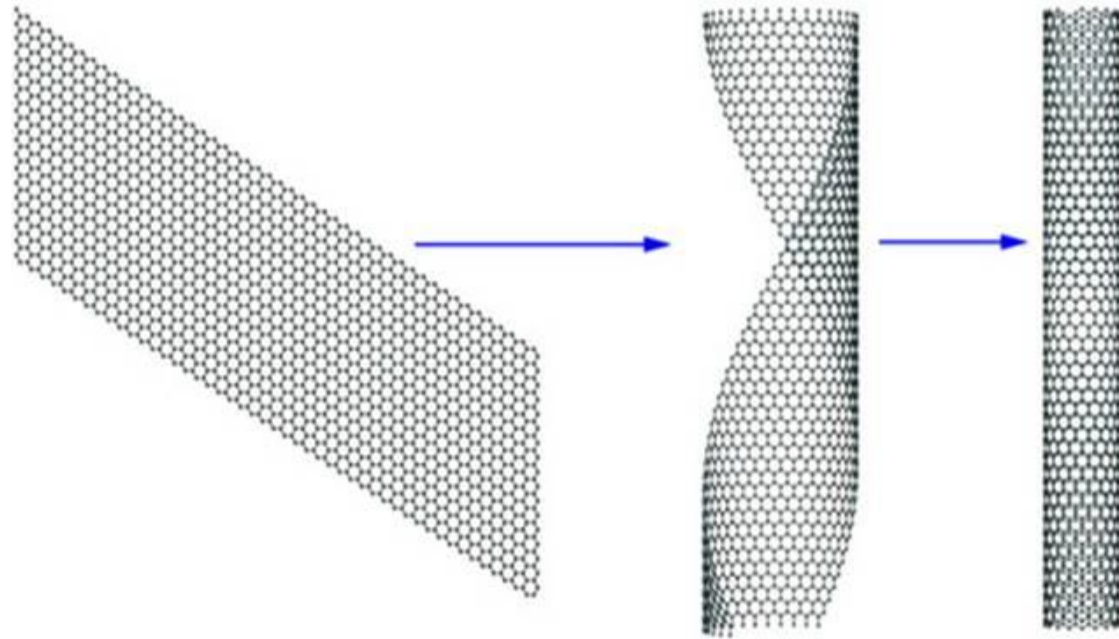
Графен в приборах

- Ученые из Швейцарского федерального политехнического университета Лозанны (Swiss Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, EPFL), объединив два материала с уникальными электрическими характеристиками, графен и молибденит, создали опытные образцы ячеек флэш-памяти, которые демонстрируют многообещающие характеристики с точки зрения эффективности работы, размера, гибкости и потребления энергии. На основе молибденита ученые уже создали чипы простейших логических микросхем, а создание на основе этого материала флэш-памяти является большим шагом на пути продвижения этого материала в область практической электроники.



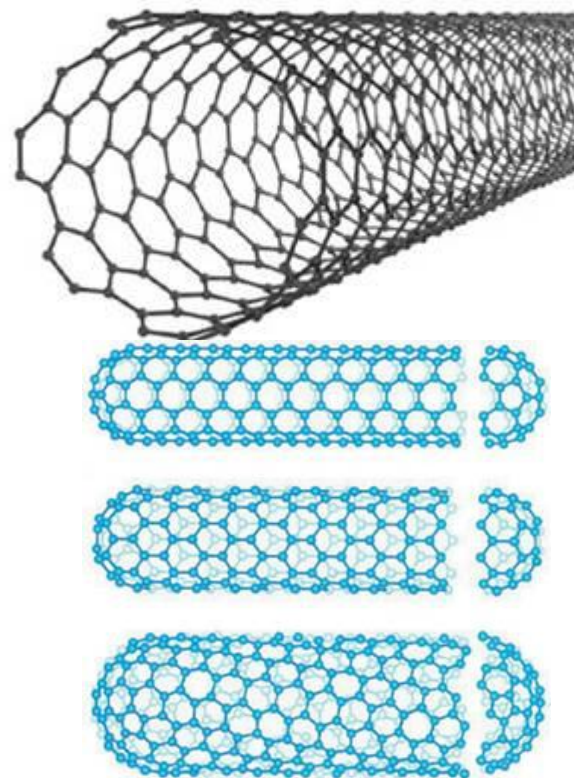
Углеродные нанотрубки

- Многие перспективные направления в нанотехнологиях связывают с углеродными нанотрубками. Углеродные нанотрубки – это каркасные структуры или гигантские молекулы, состоящие только из атомов углерода. Углеродную нанотрубку легко себе представить, если вообразить, что вы сворачиваете в трубку один из молекулярных слоёв графита – графен



Один из способов воображаемого изготовления нанотрубки (справа) из молекулярного слоя графита (слева).

- Нанотрубки образуются, например, на поверхности угольных электродов при дуговом разряде между ними. При разряде атомы углерода испаряются с поверхности и, соединяясь между собой, образуют нанотрубки самого различного вида – однослойные, многослойные и с разными углами закручивания
- Диаметр однослойных нанотрубок, как правило, около 1 нм, а их длина в тысячи раз больше, составляя около 40 мкм. Они нарастают на катоде перпендикулярно плоской поверхности его торца. Происходит так называемая самосборка углеродных нанотрубок из атомов углерода. В зависимости от угла закручивания нанотрубки могут обладать высокой, как у металлов, проводимостью, а могут иметь свойства полупроводников.
- Углеродные нанотрубки прочнее графита, хотя сделаны из таких же атомов углерода, потому, что в графите атомы углерода находятся в листах. А каждому известно, что свёрнутый в трубочку лист бумаги гораздо труднее согнуть и разорвать, чем обычный лист. Поэтому-то углеродные нанотрубки такие прочные. Нанотрубки можно применять в качестве очень прочных микроскопических стержней и нитей, ведь модуль Юнга однослойной нанотрубки достигает величин порядка 1-5 ТПа, что на порядок больше, чем у стали! Поэтому нить, сделанная из нанотрубок, толщиной с человеческий волос способна удерживать груз в сотни килограмм.



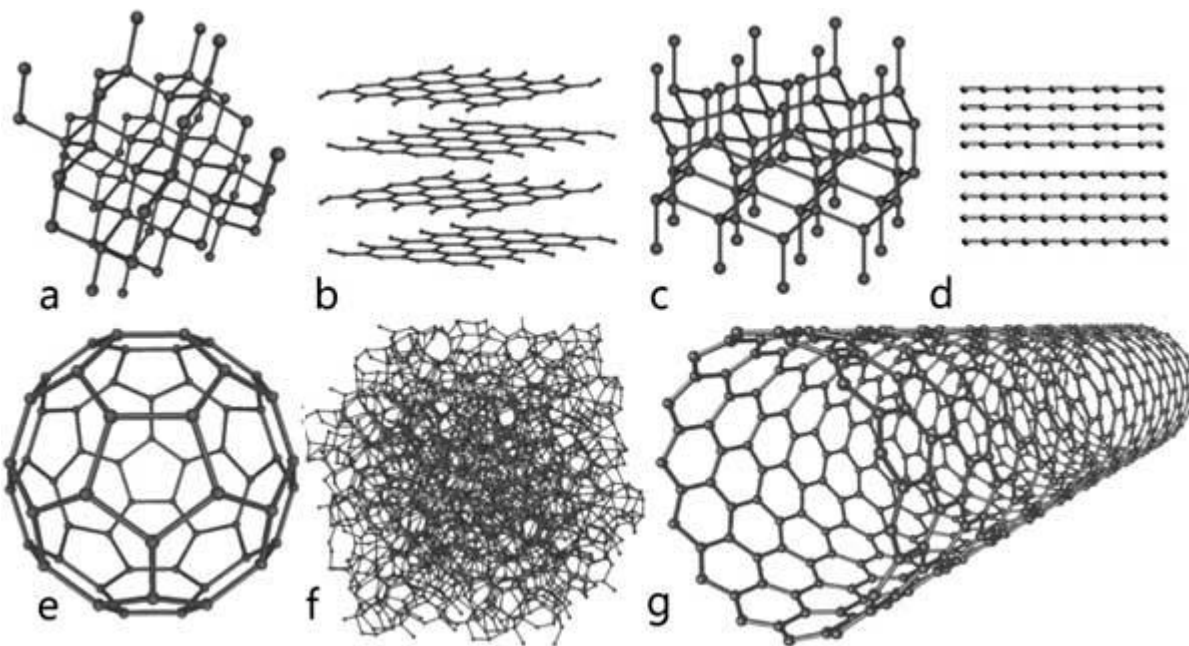
Сверху – схематическое изображение однослойной углеродной нанотрубки; ниже (сверху вниз) – двухслойная, прямая и

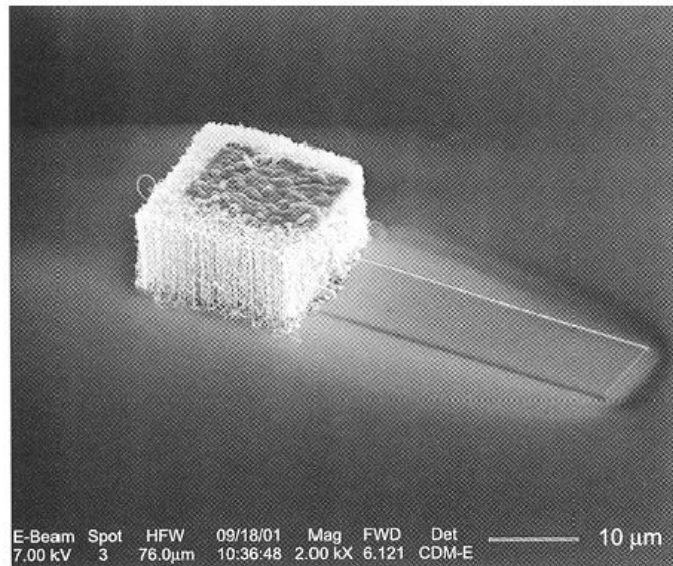
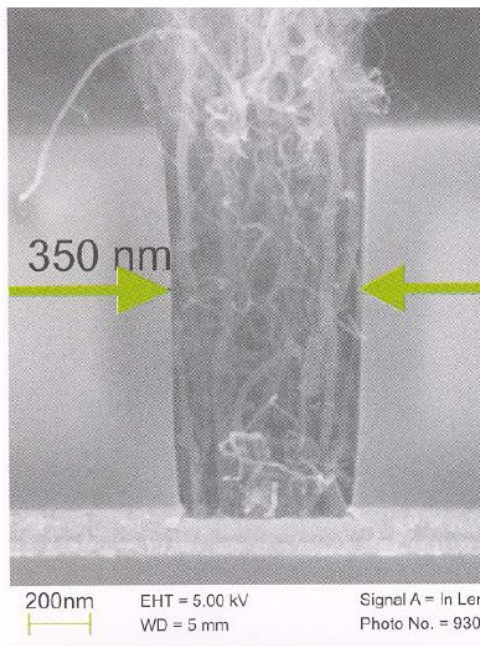
Фуллерен

- Молекулы самого симметричного и наиболее изученного фуллерена, состоящего из 60 атомов углерода (C_{60}), образуют [многогранник](#), состоящий из 20 шестиугольников и 12 пятиугольников и напоминающий футбольный мяч (рис. 26). Диаметр фуллерена C_{60} составляет около 1 нм.



Схематическое изображение фуллерена C_{60} .
За открытие фуллеренов американскому физiku Р. Смоли, а также английским физикам Х. Крото и Р. Керлу в [1996](#) году была присуждена [Нобелевская премия](#).





Максимальная плотность тока 10^{10} A/cm^2

Для сравнения: для меди максимальный допустимый ток:
 10^7 A/cm^2

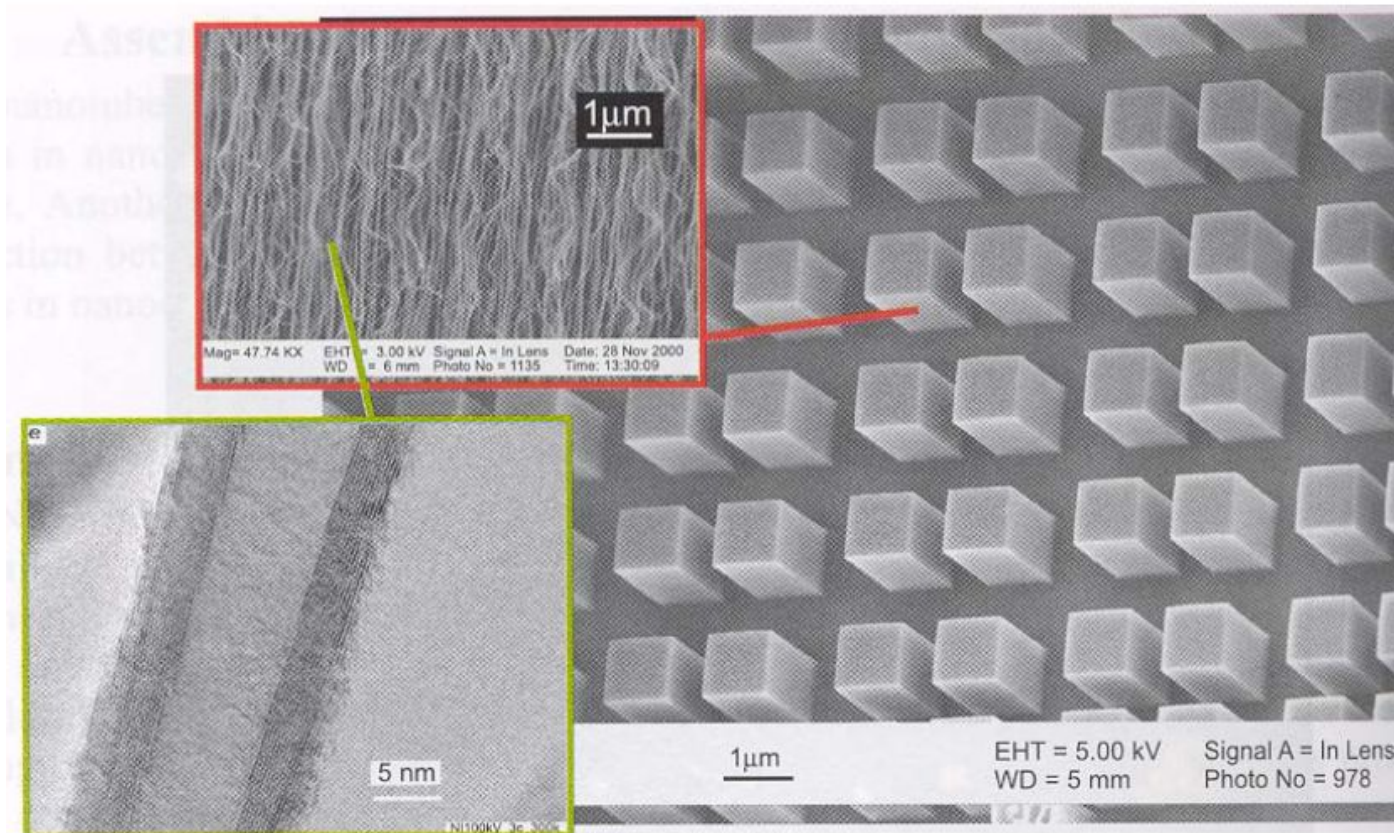
Надежность: экспериментально: более 300 часов (на
воздухе)

оценки: 12000 часов

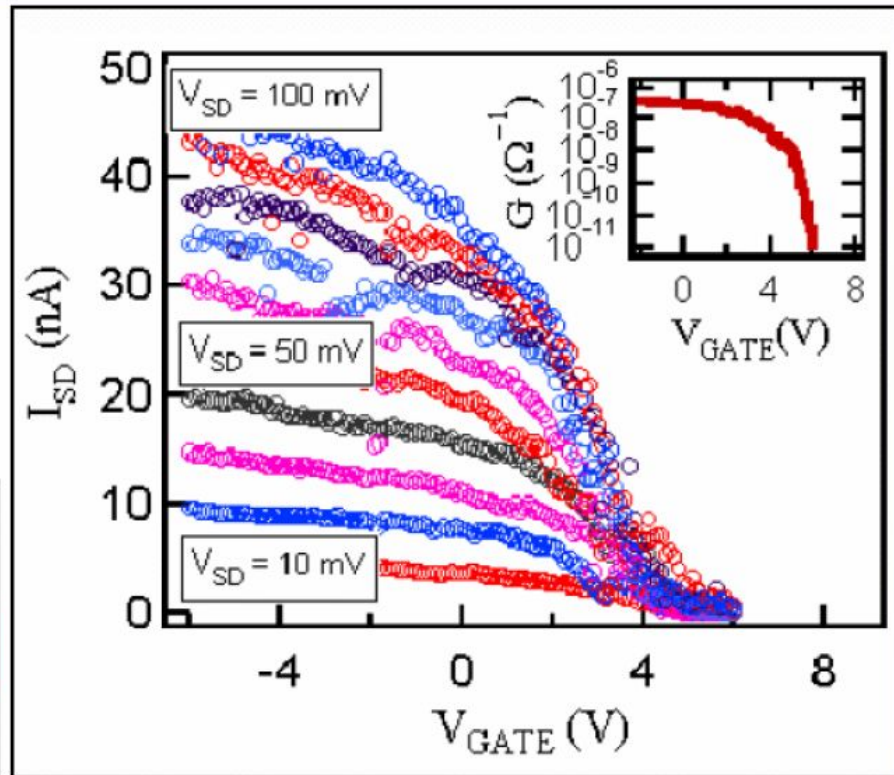
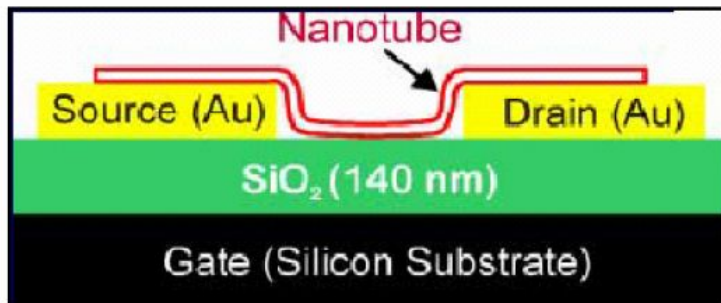
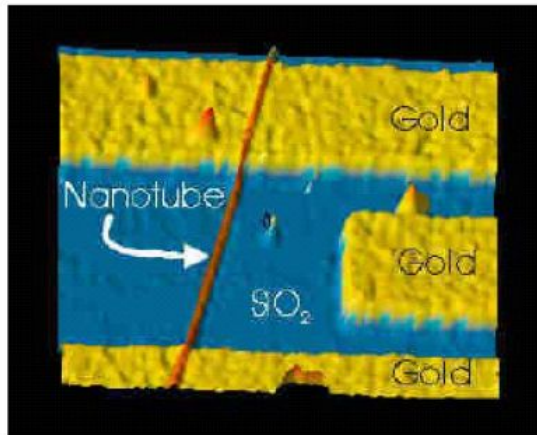
Проблемы:

- Металлические УНТ: Обратное рассеяние электронов на контакте
- Полупроводниковые УНТ: барьер Шоттки

Электрические соединения с помощью УНТ



Транзистор на УНТ



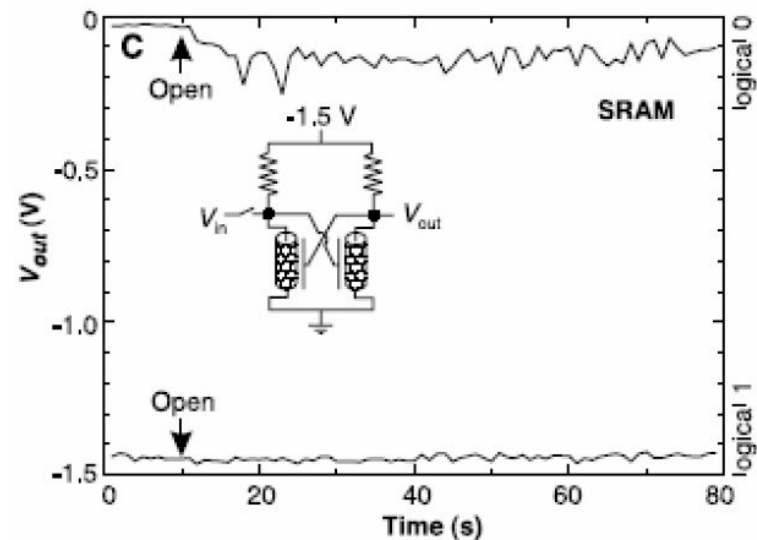
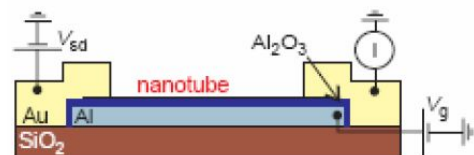
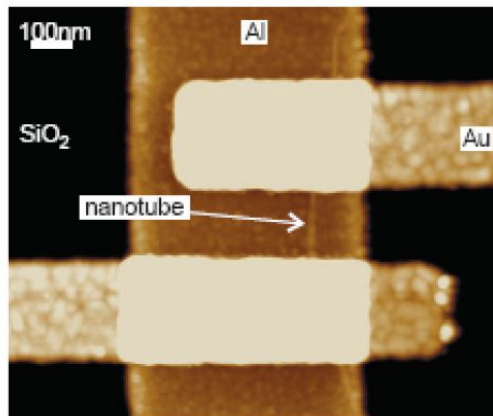
- Транзистор на индивидуальной нанотрубке, который действует при комнатной температуре. Это трех электродное устройство, содержащее индивидуальную нанотрубку, расположенную на двух металлических нанoeлектродах и подложке-затворе. Диаметр нанотрубки около 5 нм.

По данным: **Nanotube Field Effect Transistor**
IBM Research

Преимущества нанотрубок

- ✦ Высокая плотность ($1\ 16\ \text{Gb}/\text{cm}^2$)
- ✦ Высокая скорость переключения (100GHz)
- ✦ Низкие энергозатраты
- ✦ Четко выраженные бистабильные (on & off) состояния
- ✦ Энергонезависимость: нет необходимости перезаписывания
- ✦ Быстрее SRAM, плотнее DRAM, дешевле (?) flash memory.
- ✦ Радиационно и магнитно стойкая

Элемент памяти на УНТ



РТЛ СРАМ с УНТ полевым транзистором . Логические состояния память 0 и 1 показаны после того как переключение открылось?