

# Технология получения многослойного и малослойного графена

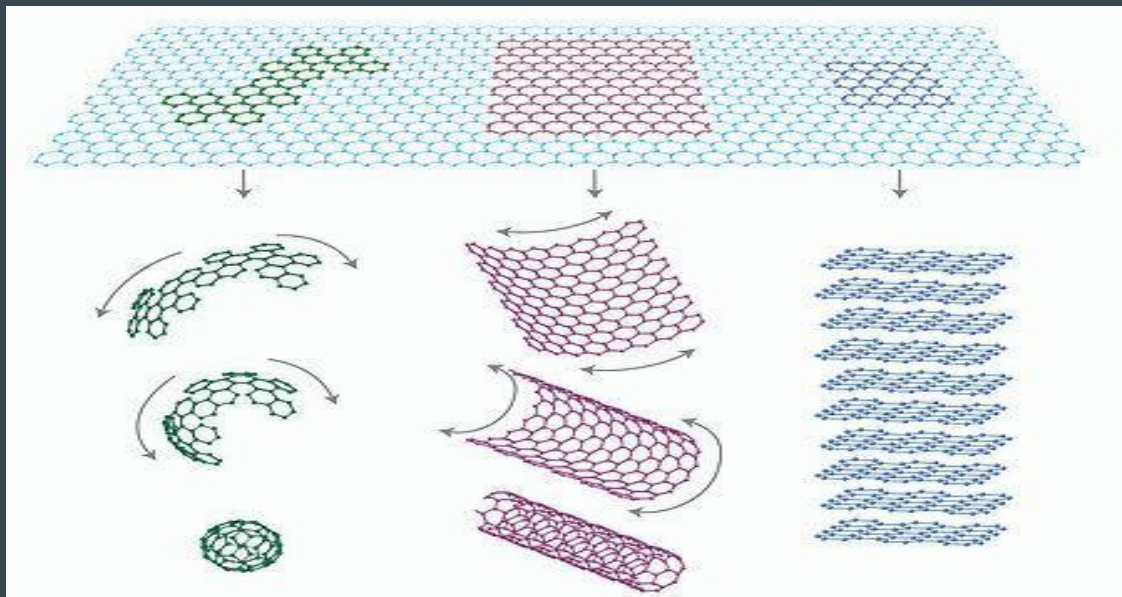
...

# Введение

Углерод обладает наибольшим разнообразием аллотропных модификаций: алмаз, графит, фуллерен, углеродные нанотрубки, графен и др. Графен – один слой графита, состоящий из шестичленных колец, в узлах которых находятся атомы углерода, соединенные  $sp^2$  гибридованными связями в гексагональную двумерную (2D) решетку [1]. Интерес в изучении и применении представляет не только однослойный графен, но и двуслойный, а также многослойный (до 10 слоев).

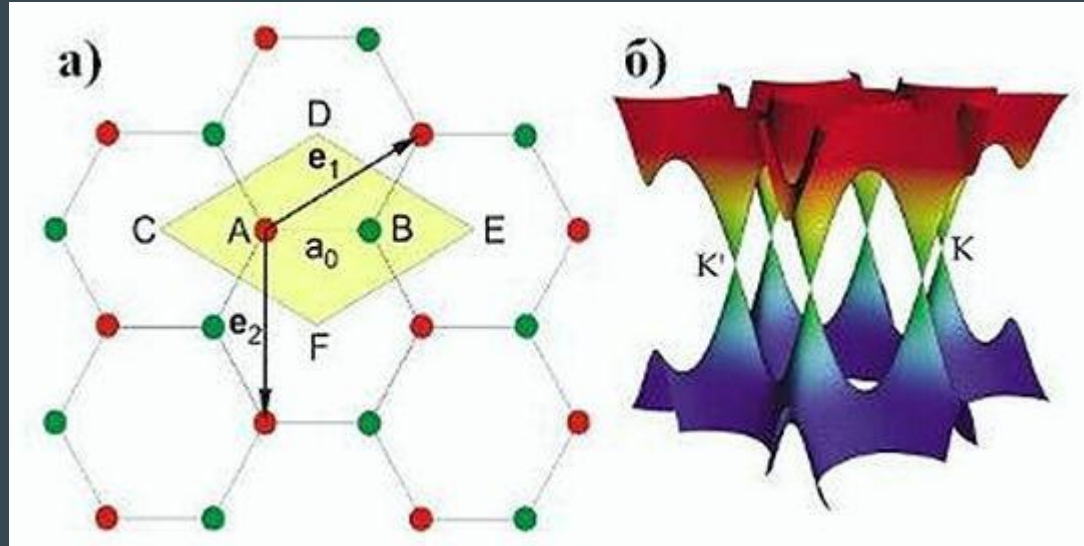
## Строение графена

Углерод — один из самых интересных элементов периодической таблицы Менделеева. Он имеет множество аллотропов. Некоторые из них, например, алмаз и графит, известны давно, в то время как другие открыты относительно недавно (10-15 лет назад) — фуллерены [1] и нанотрубки [2].



## Атомная решётка и электронная структура графена

Кристаллическая решётка графена (рис. 2а) представляет собой плоскость, состоящую из шестиугольных ячеек, то есть является двумерной гексагональной кристаллической решёткой [8, 9]. В элементарной ячейке кристалла находятся два атома, обозначенные как А и В. Тот факт, что носители заряда в графене описаны дираковским спектром, а не обычным уравнением Шредингера для нерелятивистских квантовых частиц, может быть интерпретирован как следствие кристаллической структуры графена.



## Методы получения графена

Теоретические исследования графена начались задолго до получения реальных образцов. В 30-40-х гг. прошлого века проведенные расчёты показали, что свободная двумерная плёнка должна быть термодинамически нестабильной. По этой причине монослойные структуры получали лишь на поверхности объёмных материалов.

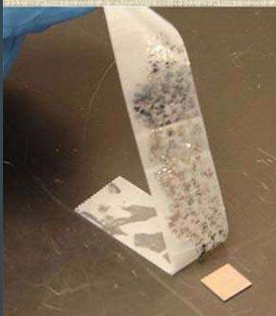
**Таким образом графен делят на несколько категорий по способу его получения:**

1. отщеплённый графен [7, 17, 18];
2. химический графен [19-21];
3. эпитаксиальный графен на металлах [22-35] или эпитаксиальный графен на SiC [36-39];
4. CVD графен (на никеле [40-45] или на меди [46-49]).

## Первый метод.

*полученит образцов графена методом микромеханического отщепления.*

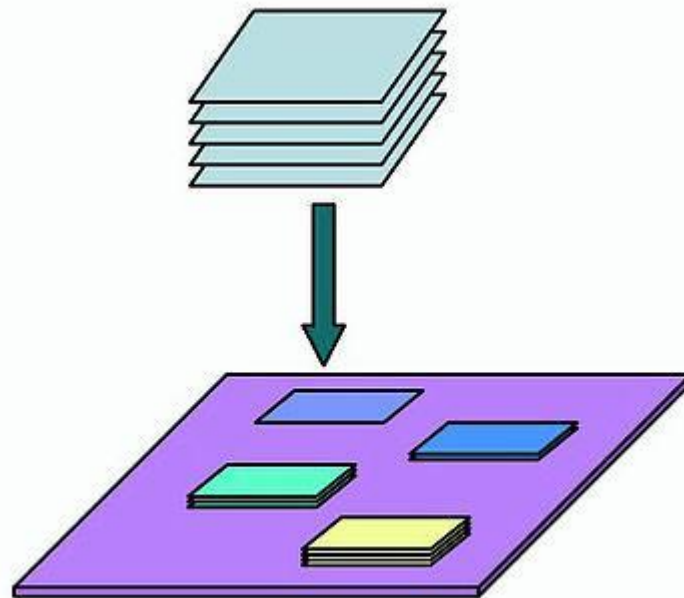
### Получение графена расщеплением



Изображение в  
оптическом микроскопе

Скотч отрывает графитные слои, оставляя абсолютно гладкую поверхность. Ленту выбрасывают вместе с тем, что к ней прилипло. «За то, что мы ее подобрали и исследовали, нас обозвали garbage scientists — мусорными учеными».

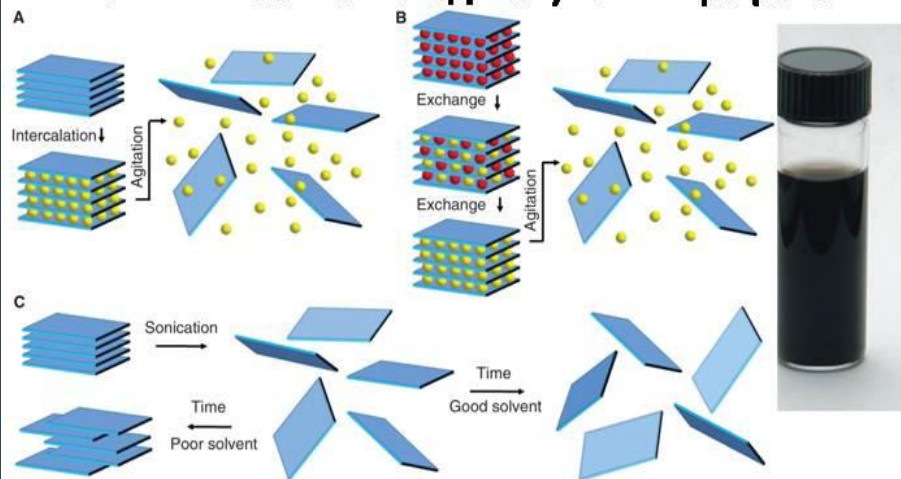
Кусочки графена получают при механическом воздействии на графит. Сначала плоские куски графита помещают между липкими лентами (скотч) и отщепляют раз за разом создавая достаточно тонкие слои (среди многих плёнок могут попадаться однослойные и двухслойные, которые и представляют интерес). После отшелушивания скотч с тонкими плёнками графита прижимают к подложке окисленного кремния. При этом трудно получить плёнку определённого размера и формы в фиксированных частях подложки (горизонтальные размеры плёнок составляют обычно около 10 мкм).



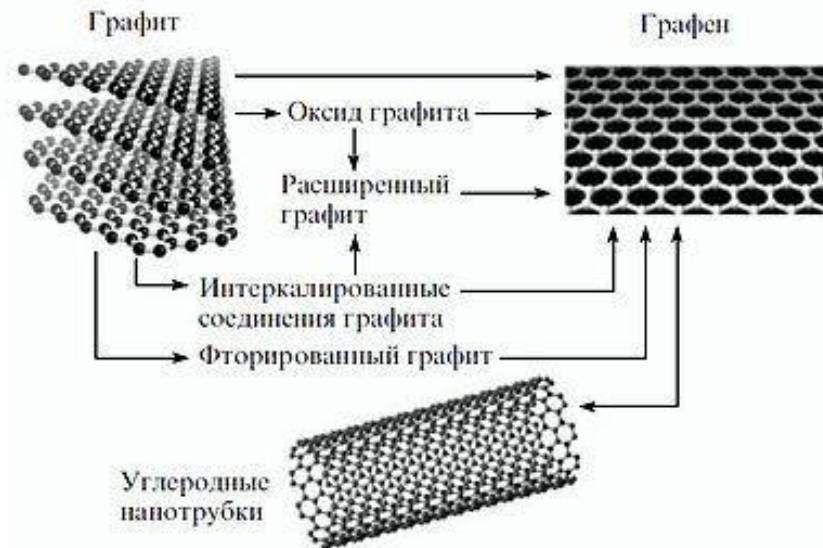


## Второй метод - химический

### 2. Химические метод получения графена



Разделение графита (порошок) на тонкие слои (цель - 1 – 3 монослоя) химическими методами. Интеркаляция и/или обработка ультразвуком для разделения на монослои - один из необходимых этапов. Результат - суспензия (или дисперсия) графена. Проблема – высокая концентрация более толстых элементов

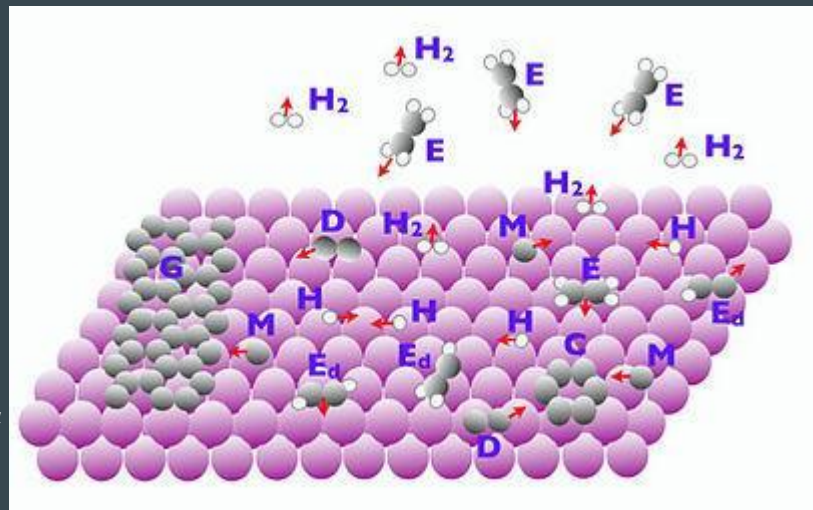




## Третий метод - эпитаксиальный.

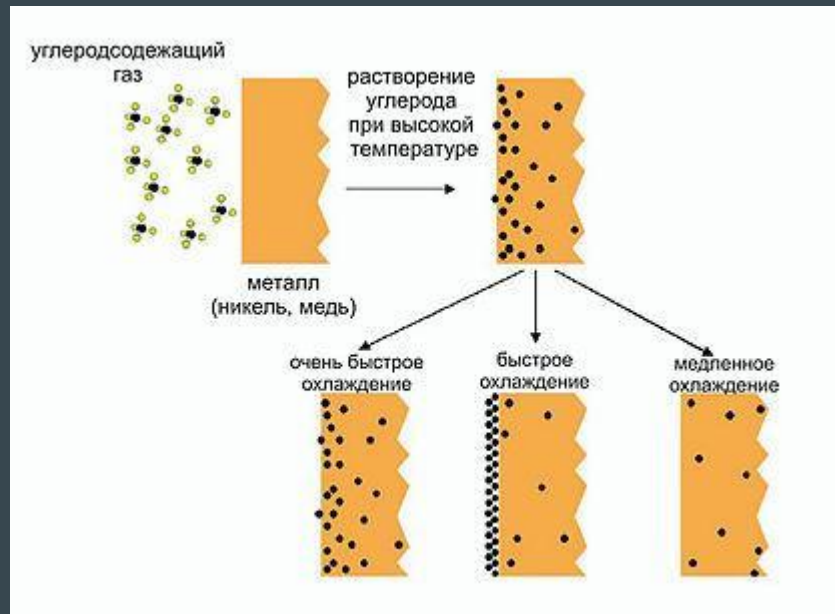
Схематическое изображение основных процессов, происходящих при эпитаксиальном росте графена из углеводородных молекул E.

Они оседают на поверхности, подвергаются разложению через ряд реакций дегидрирования, приводящих к различным видам  $C_xH_y$ , показанными как E<sub>d</sub> и H-атомов. Новые виды диффундируют через поверхность. Меньшие формы углерода M и D не диффундируют, а слипаются в более крупные кластеры атомов C. Атомы H исходной молекулы мигрируют с поверхности и формируют молекулу водорода, которая испаряется с поверхности. И, наконец, некоторые из таких кформ, как M и D, или даже их больших кластеров C, может присоединятьк острову G на ее краю

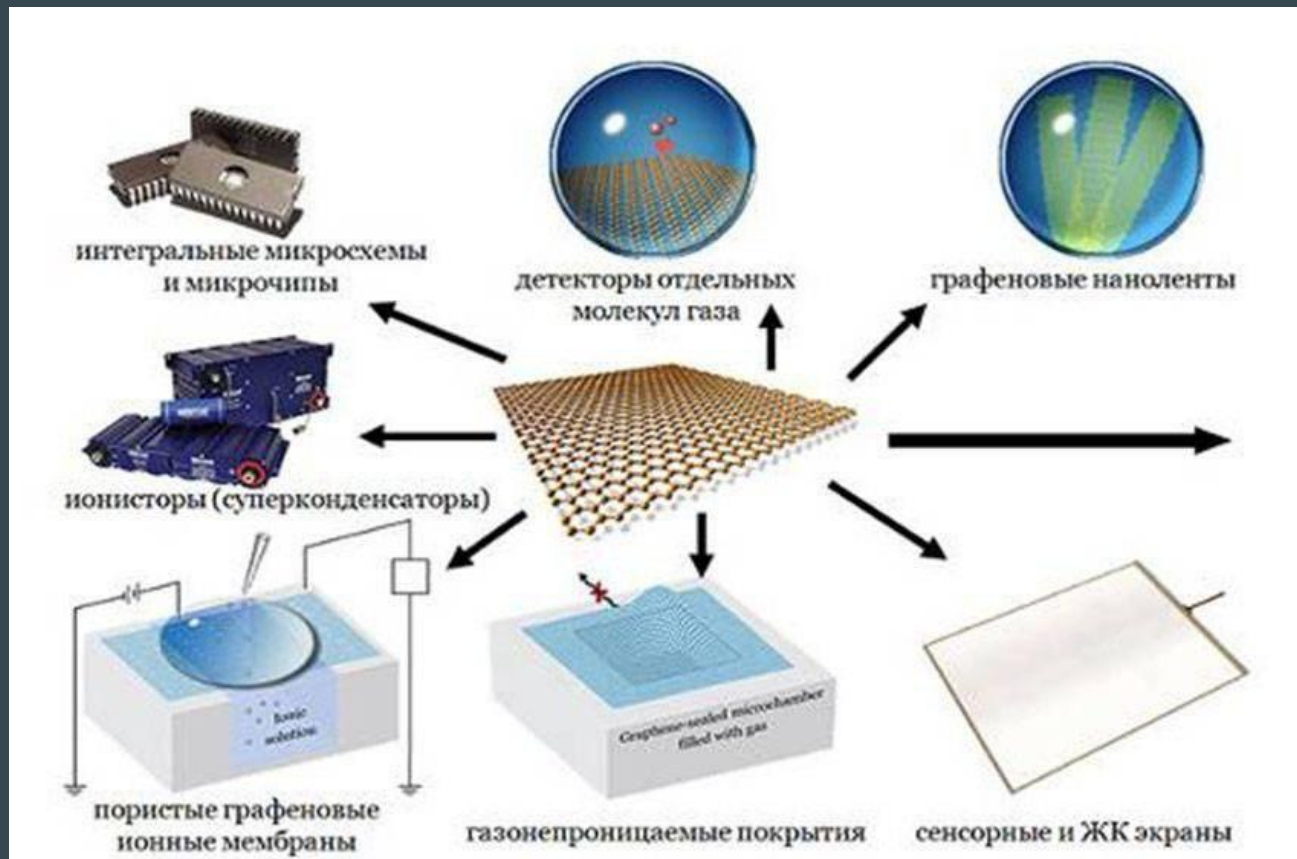


## Четвёртый метод - химическое газофазное осаждение

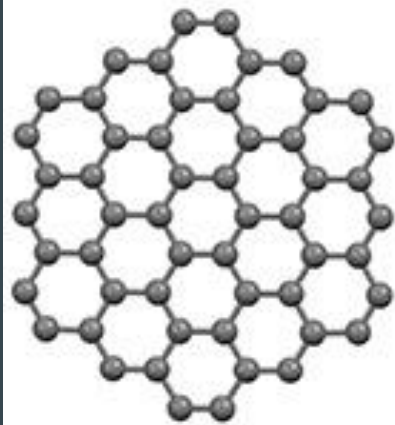
*Схема формирования графеновой плёнки на поверхности никеля или меди с помощью метода химического газофазного осаждения*



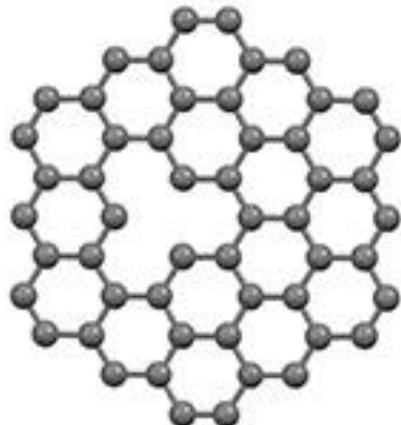
# Возможности применения графеновых структур



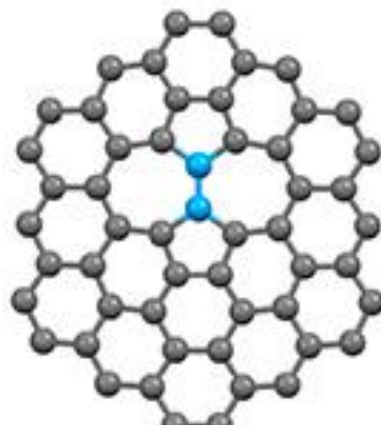
## Дефекты



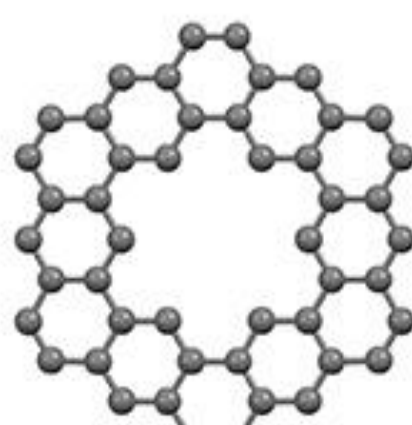
исходная «идеальная»  
структура



точечный дефект  
«вакансия»

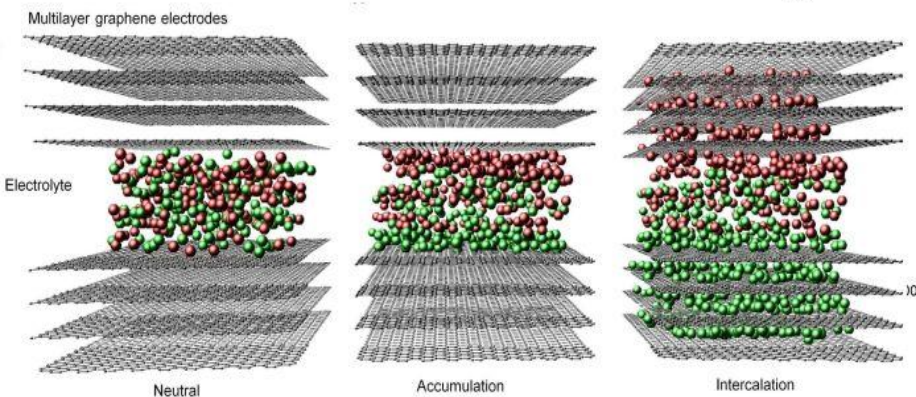
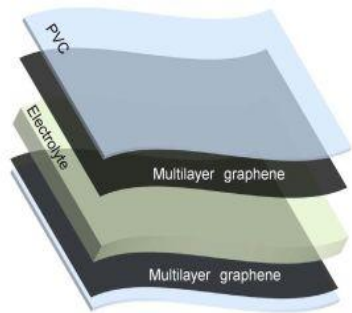


топологический дефект  
Стоуна-Уэльса

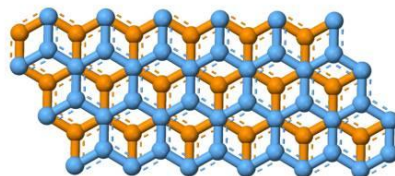


«нанопора»

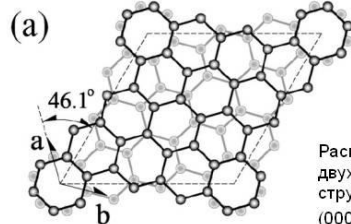
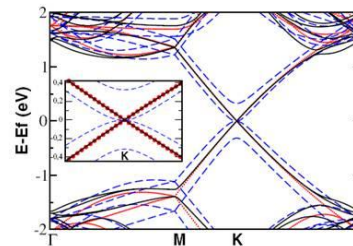
# Многослойный графен



## Многослойный графен



Расположение атомов в двухслойном графене



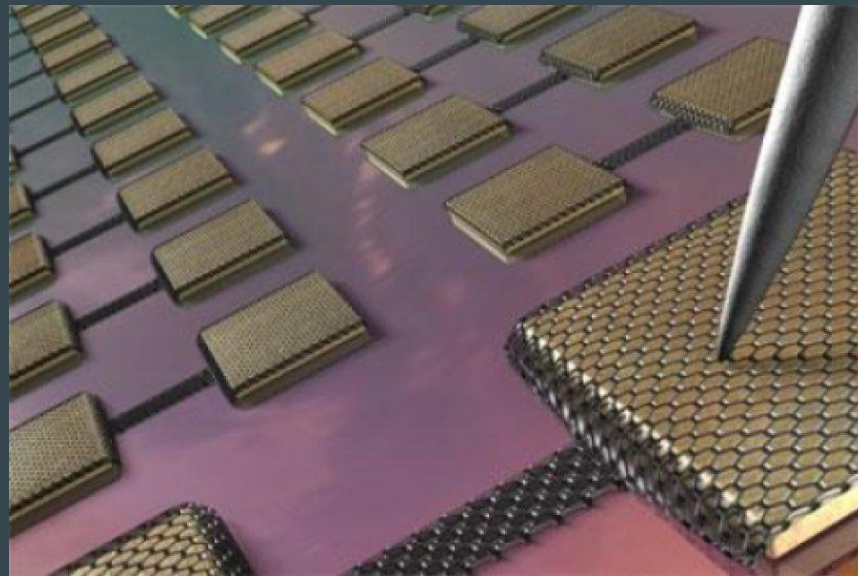
Расположение атомов в двух слоях многослойной структуры, выращенной на (000-1)SiC (C-грань)

Расчет энергии в однослойном (точки), двухслойном (пунктир) и «сложенном» графене (линия) из PRL, 100, 125504(2008)



# Области применения многослойного графена

**Графен в электронике:  
сегодня и завтра**



# Примеры применения

Высокочастотные транзисторы.

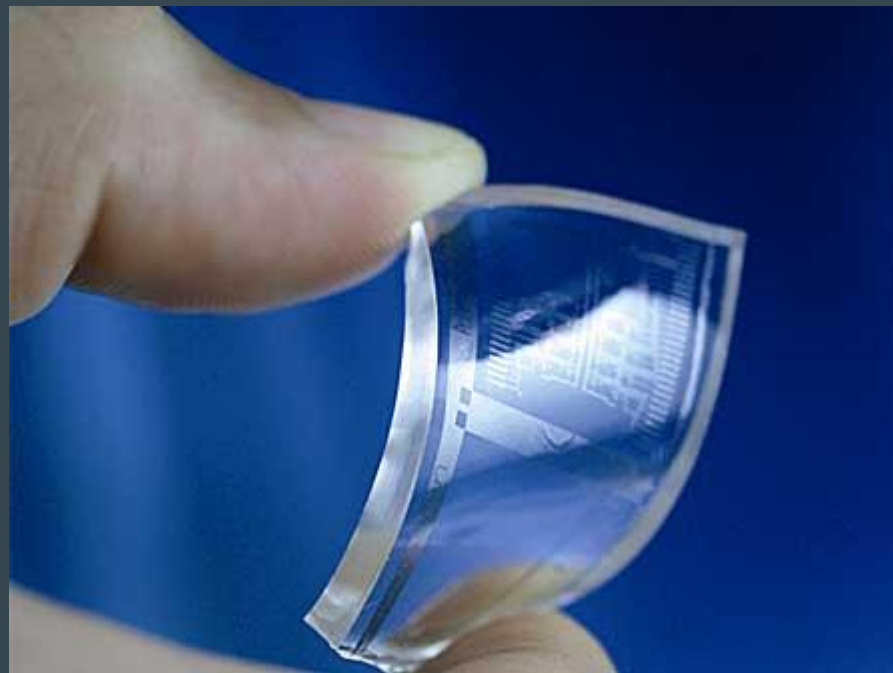
Электроды для суперконденсаторов.

Недорогие дисплеи для портативных устройств.

Аккумуляторы для автомобилей на водородном топливе.

Охлаждение электронных схем.

Элементы с малым удельным весом и высокой прочностью.



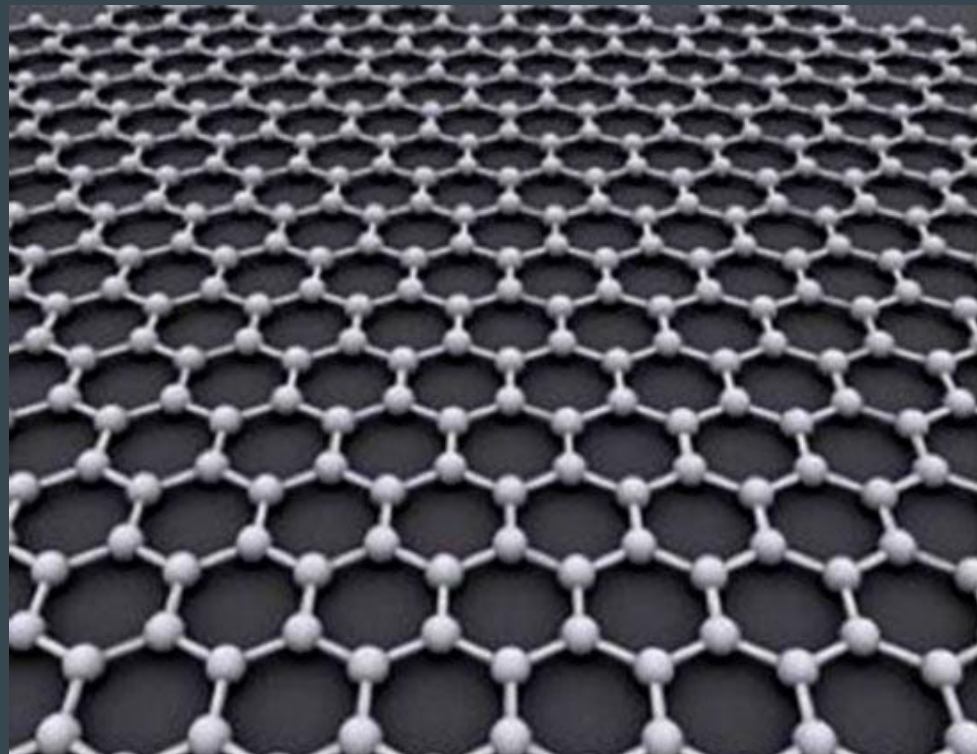


## Вместо заключения

Нет сомнений, что когда эти и другие разработки будут доведены до конца, наше представление об электронике коренным образом изменится. Как? Например, так, как показано в следующем видеоролике:

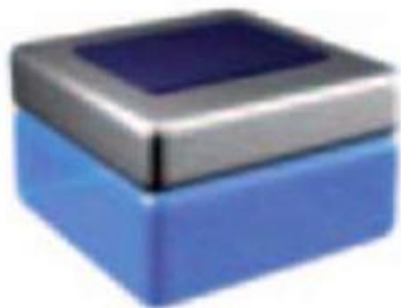
[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=60&v=-YbS-YyvCl4](https://www.youtube.com/watch?time_continue=60&v=-YbS-YyvCl4)

# Малослойные графены

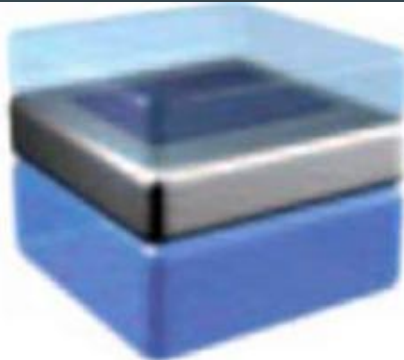


# Получение и применение

а



б



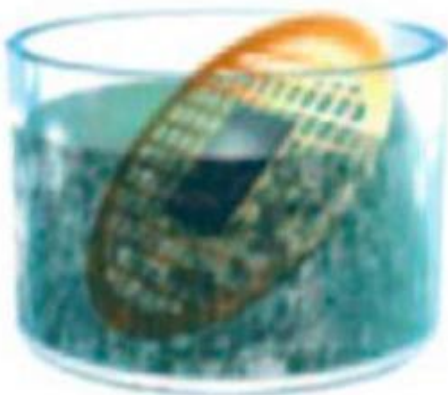
в



г



д



е

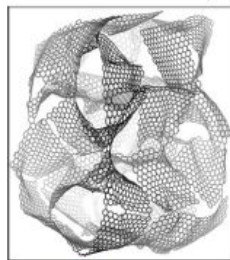


# Обработка графена

**a**

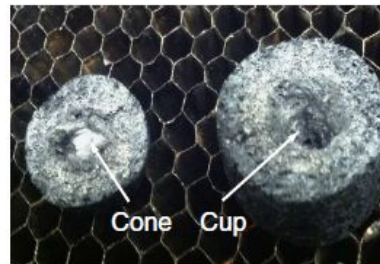


Solvothermal  
reaction

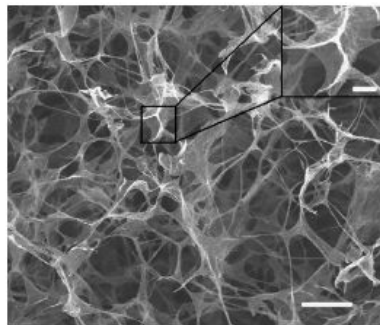


Graphene sponge

**c**



**d**



**b**



# Графен (Таунит ГМ)

