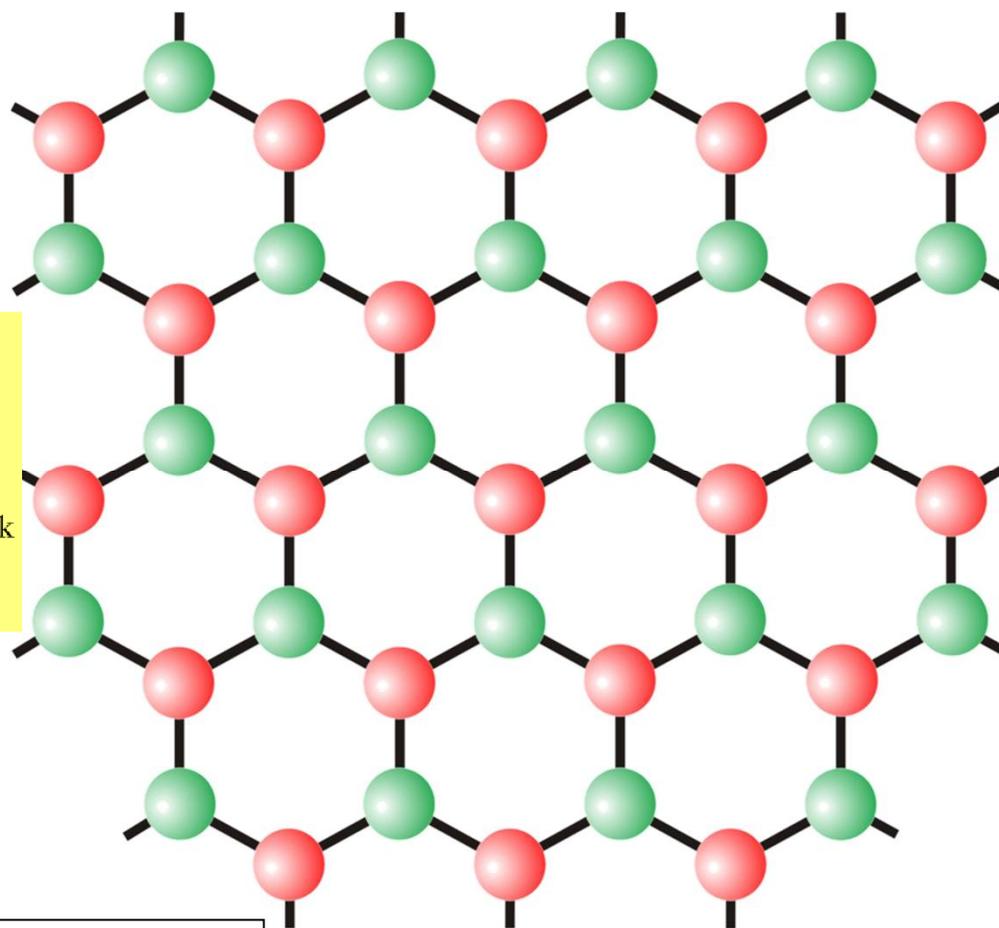
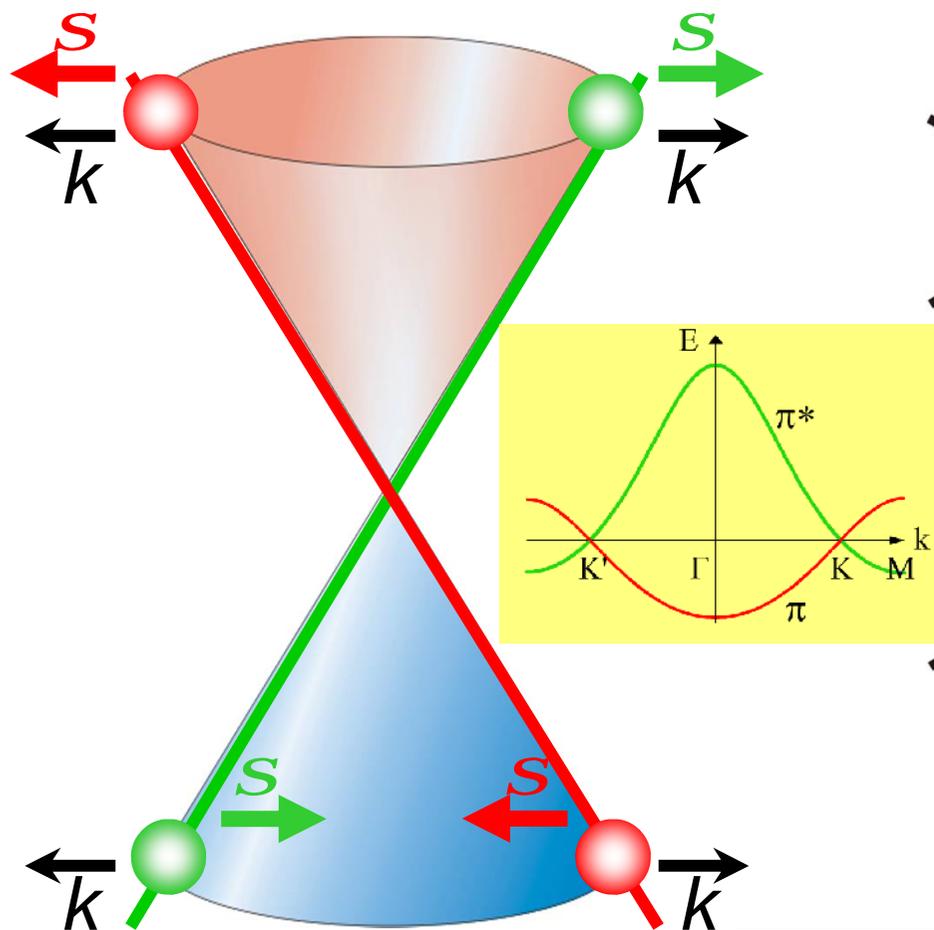


Графен и другие двумерные кристаллы

*С.В. Морозов,
ИПТМ РАН (Черноголовка)*

Киральные Дираковские фермионы

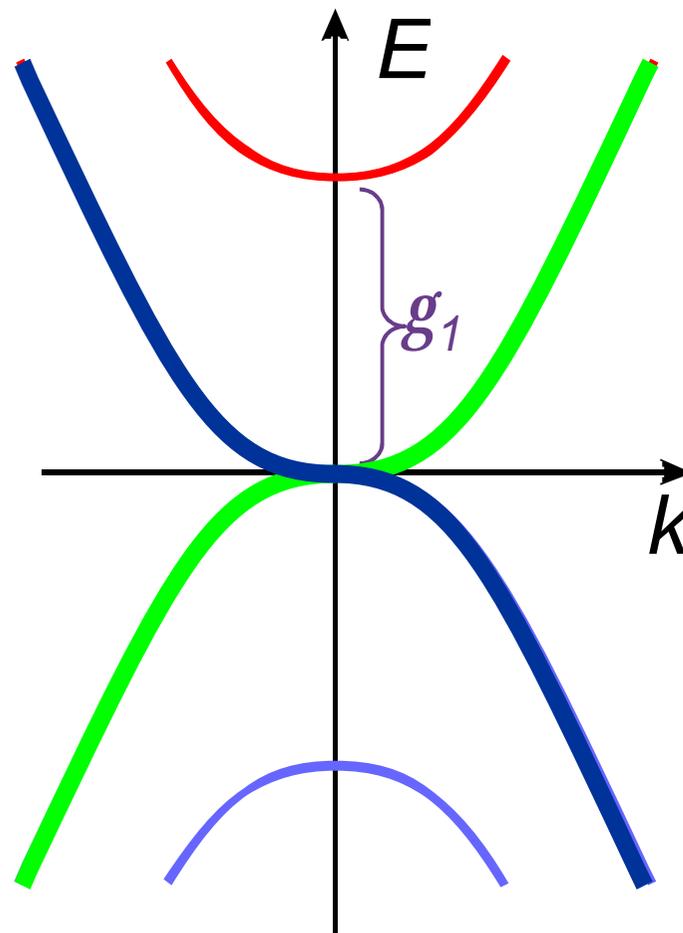
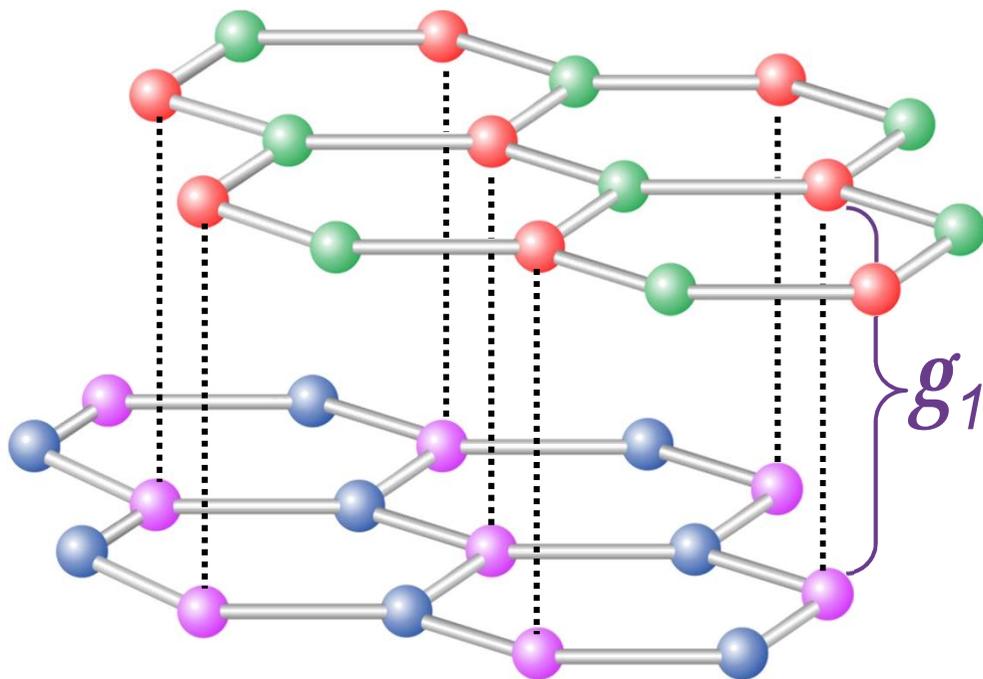
2 эквивалентные подрешетки \Rightarrow Киральная симметрия



$$E_F = m_c c_*^2$$

$$c_* = 10^6 \text{ m/s}$$

Киральные массивные фермионы в двухслойном графене



Графен

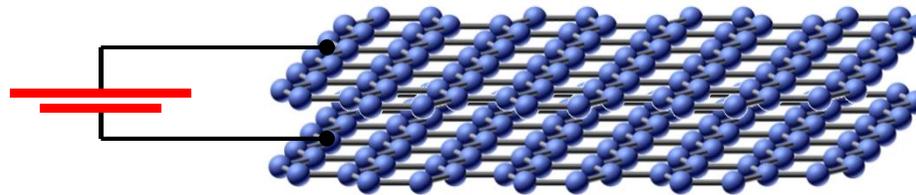
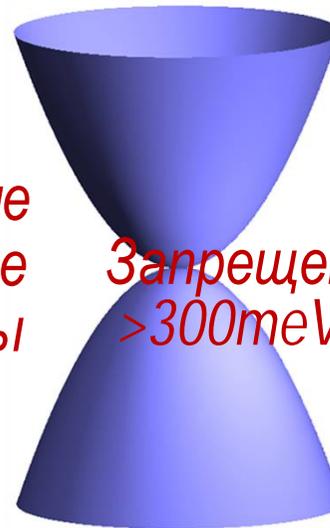
Безмассовые
Дираковские
Фермионы



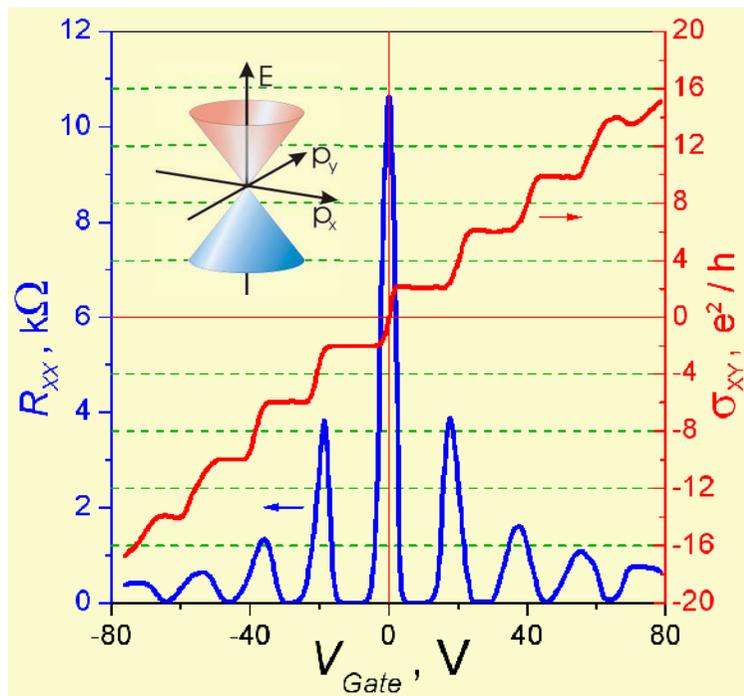
Двухслойный графен:

Массивные
Киральные
Фермионы

Запрещенная зона
>300meV



Графен: 2 новых типа квантового эффекта Холла

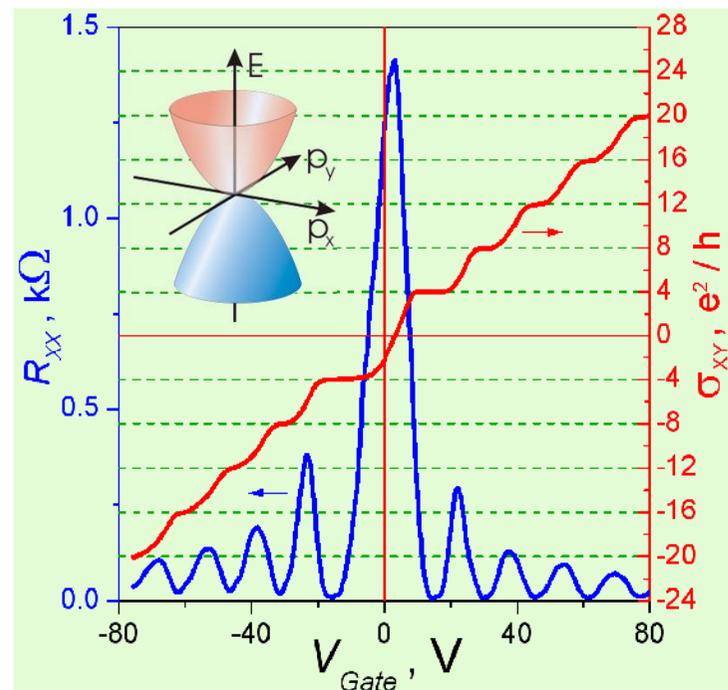


Один монослой графита (графен):

- безмассовые дираковские фермионы (линейный закон дисперсии)
- "полуцелый" целочисленный квантовый эффект Холла

$$(\sigma_{xy} \sim N + \frac{1}{2})$$

Nature 2005



Двухмонослойный графен:

- массивные хиральные фермионы (параболический закон дисперсии)
- целочисленный квантовый эффект Холла, но без нулевого плато

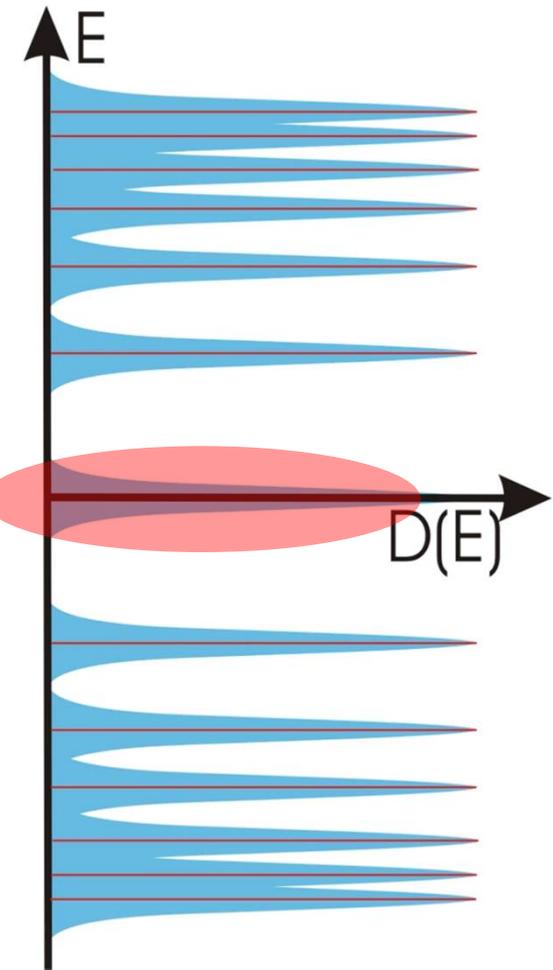
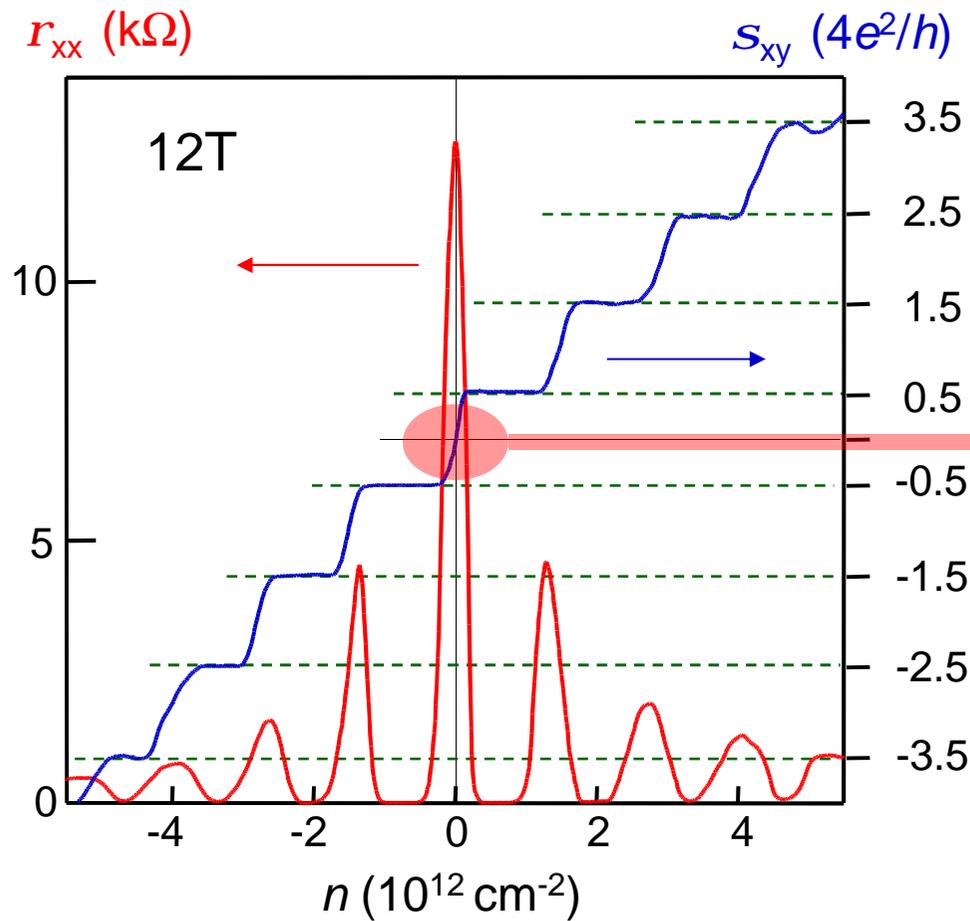
$$(\sigma_{xy} \sim N)$$

Nature Physics 2006

Полуцелый Квантовый эффект Холла

Квантование при $\nu = N + 1/2$

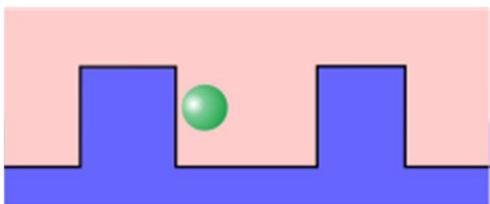
Фаза Берри = π



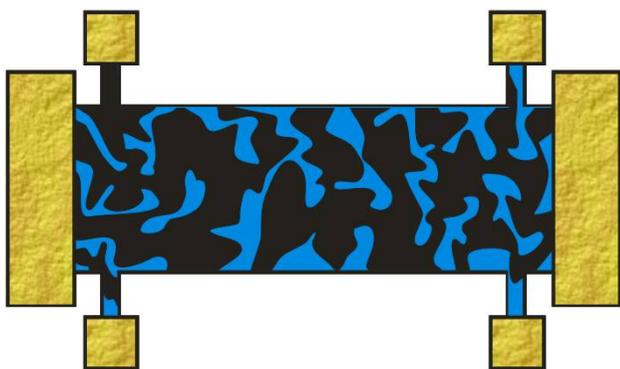
Nature 2005

Отсутствие Локализации (Klein парадокс)

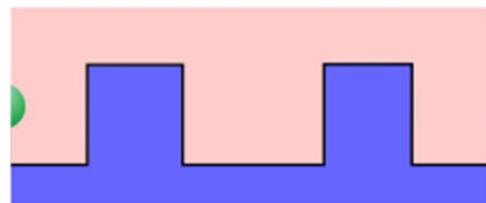
Массивные частицы в 2D:



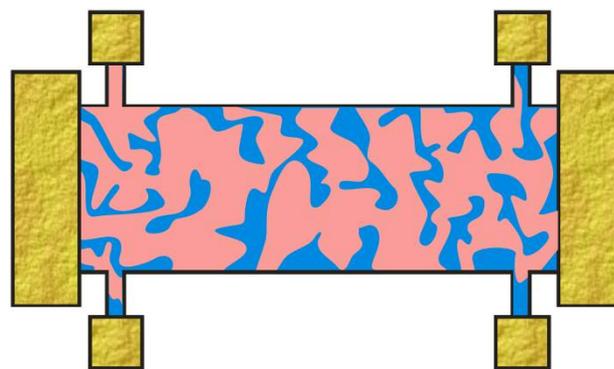
всегда локализованы



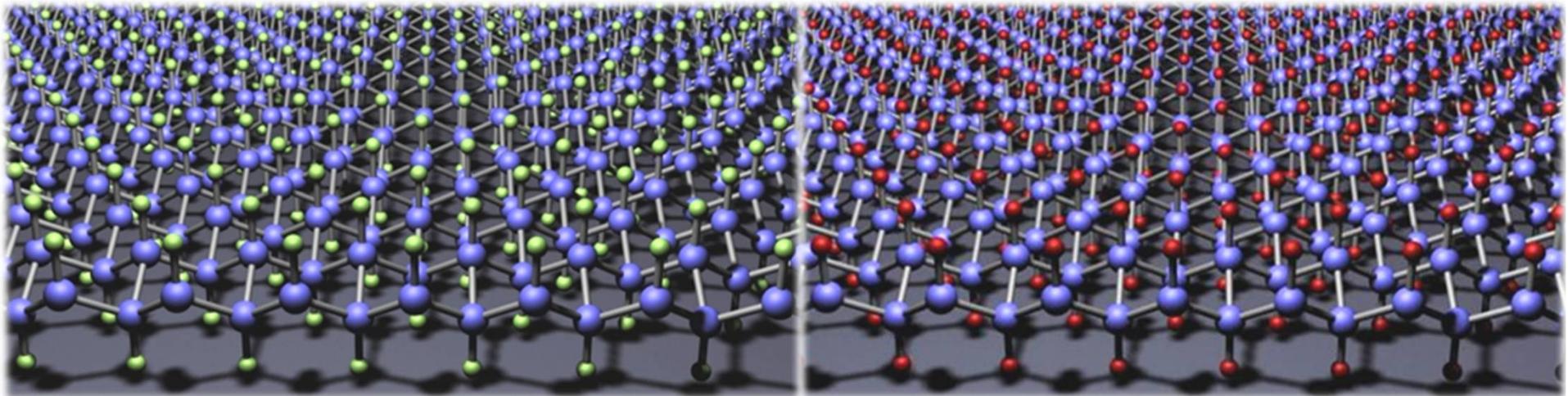
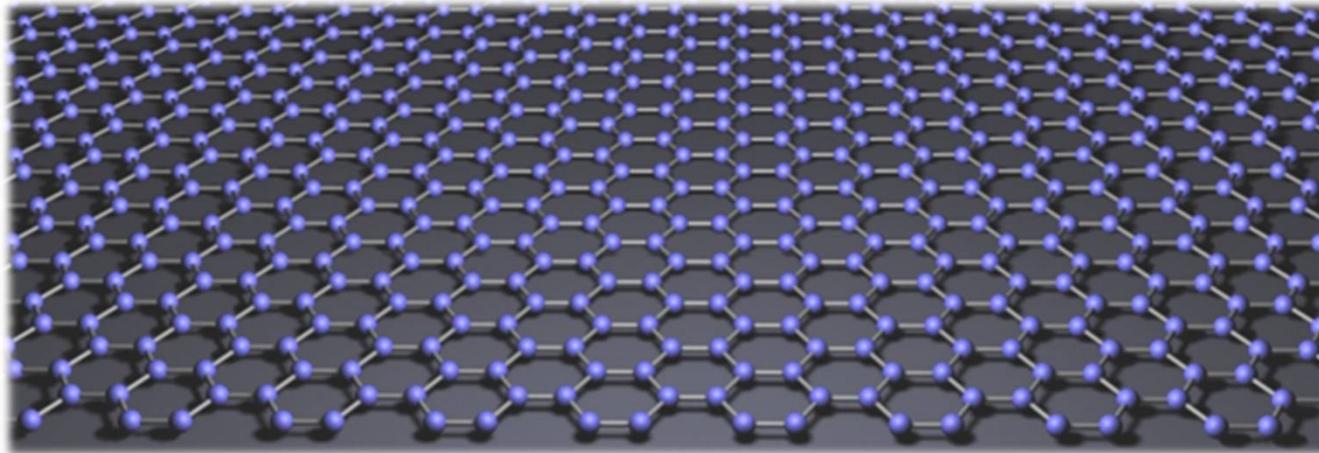
безмассовые частицы в 2D:



НИКОГДА НЕ ЛОКАЛИЗОВАНЫ



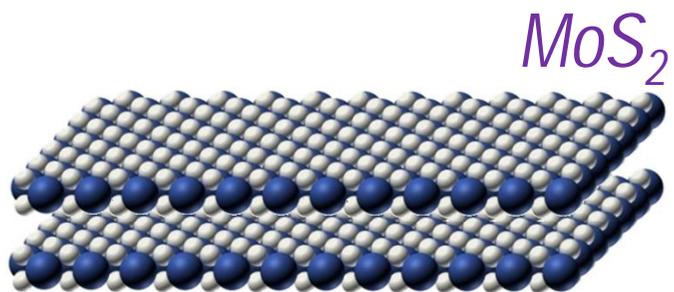
Химическая модификация графена



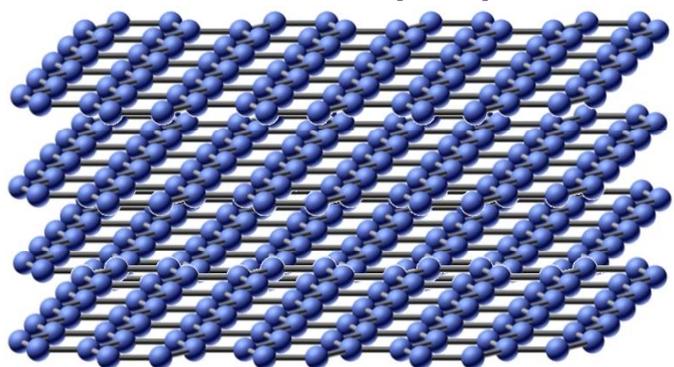
Флюорографен (graFane)
Small 2010

Графан (graphane)
Science 2009

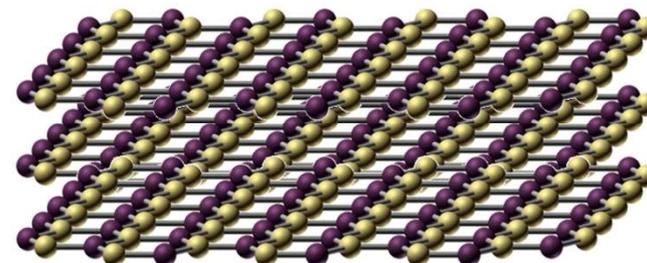
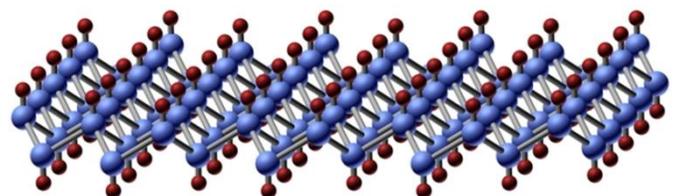
2D кристаллы => Гетероструктуры



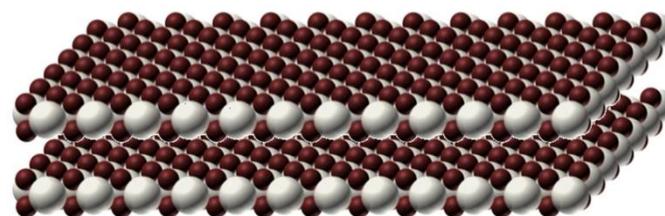
Графен



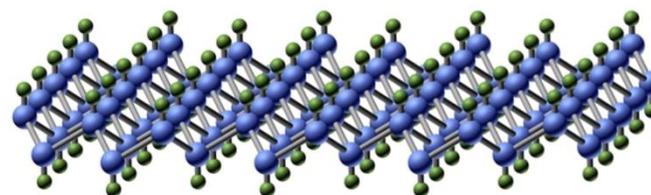
Графан



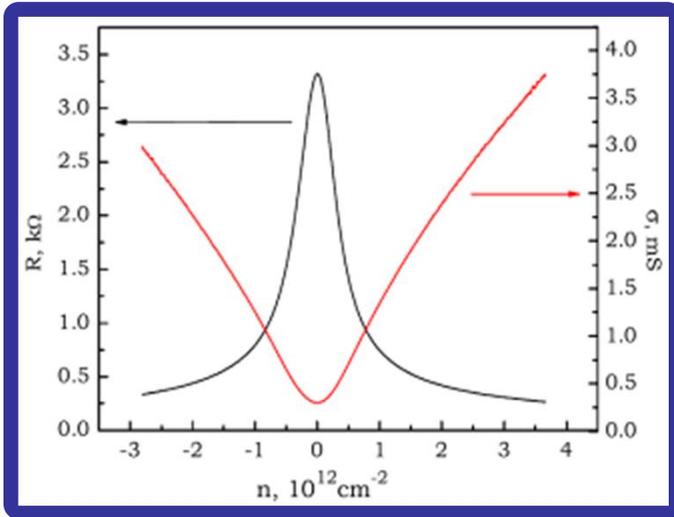
Нитрид бора



NbSe_2

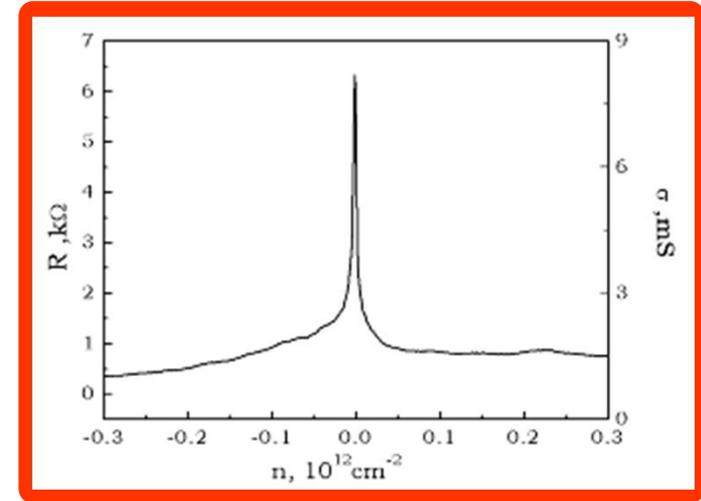


Флюорографен

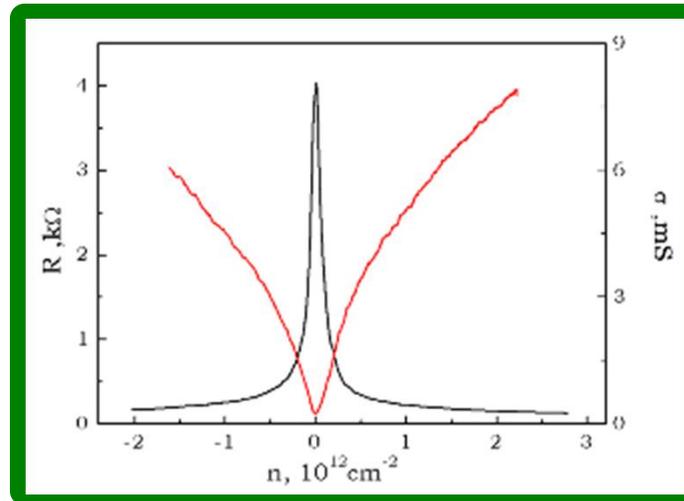


**Графен на
SiO₂**
5 000 -
20 000 cm²/Vs

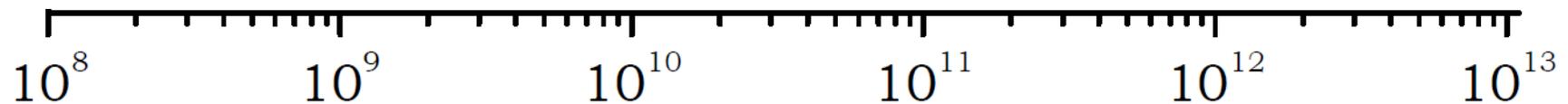
50 000 -
150 000 cm²/Vs
(500 000)
**Графен на
BN**



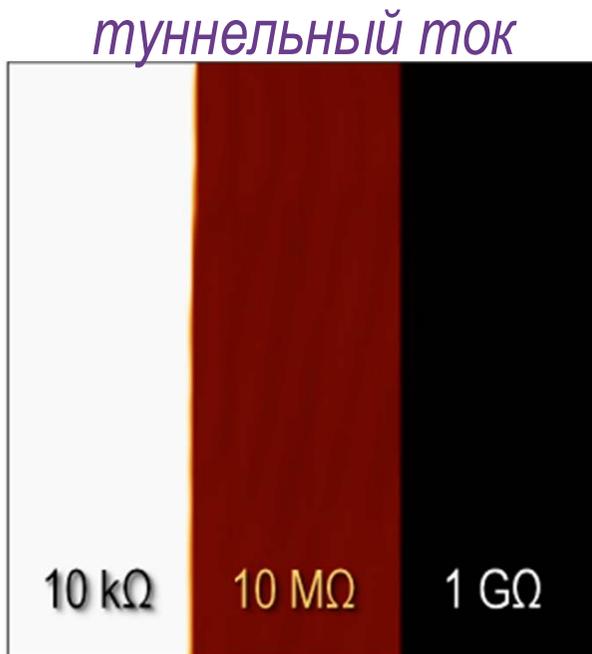
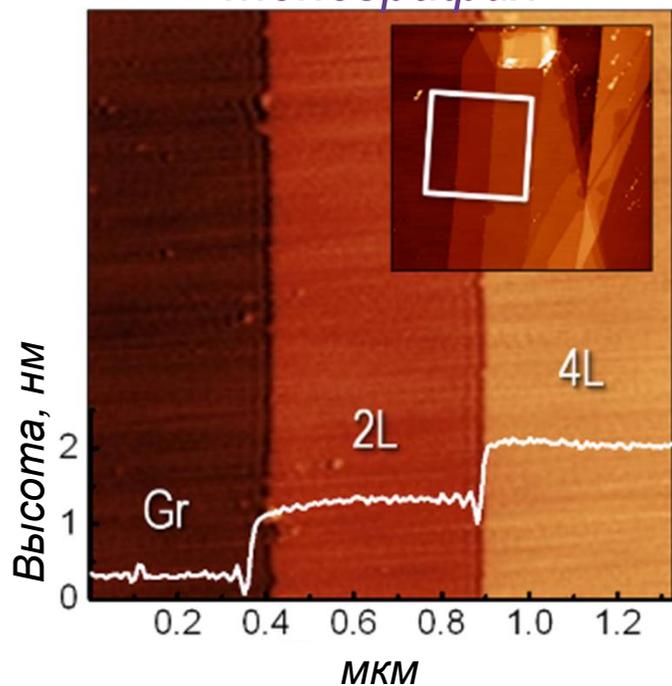
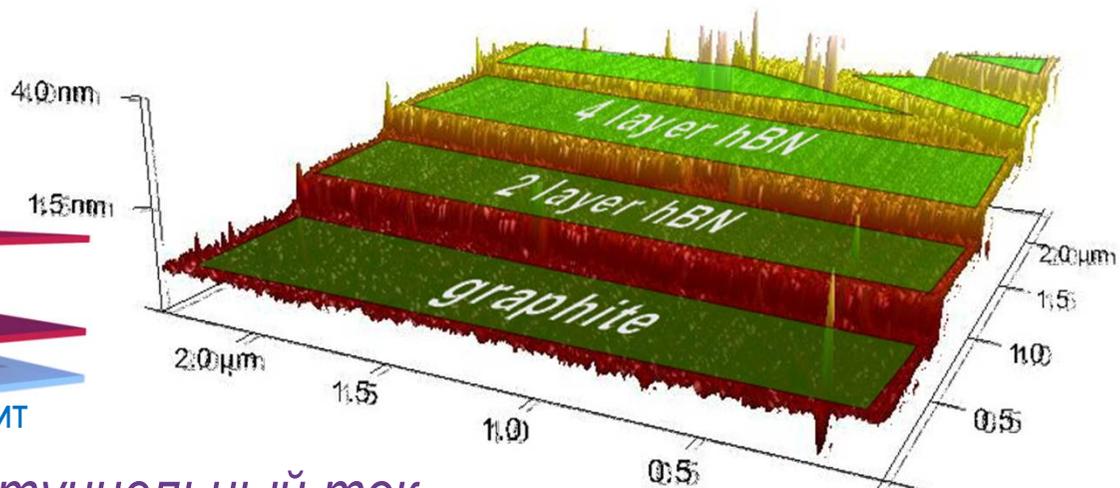
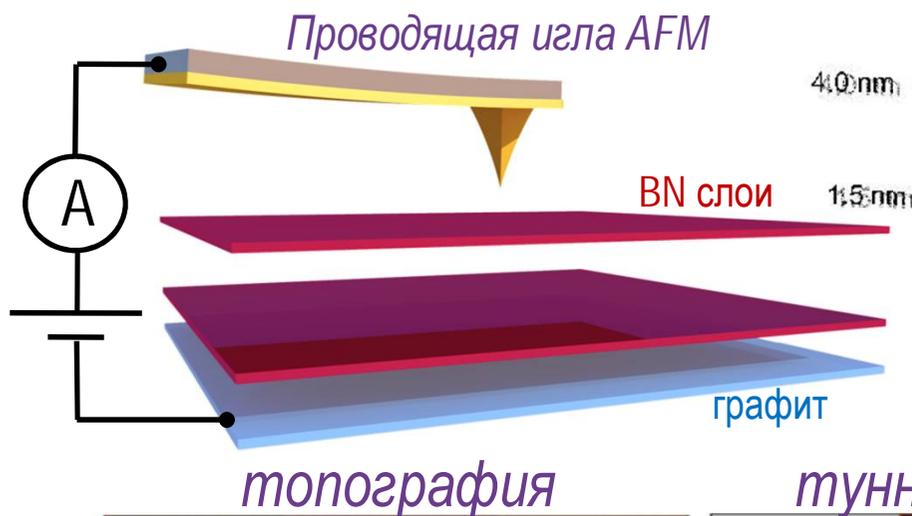
**Подвешенный
графен**
100 000 -
1 000 000 cm²/Vs



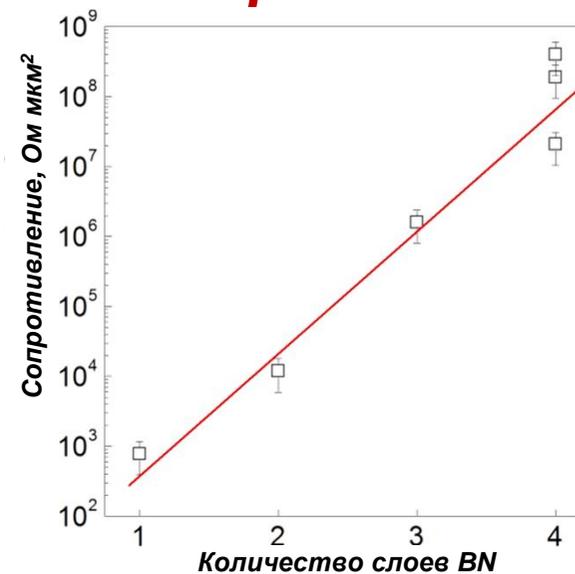
Интервал достижимых концентраций носителей, (см⁻²)



Атомарно-тонкий BN - превосходный диэлектрик



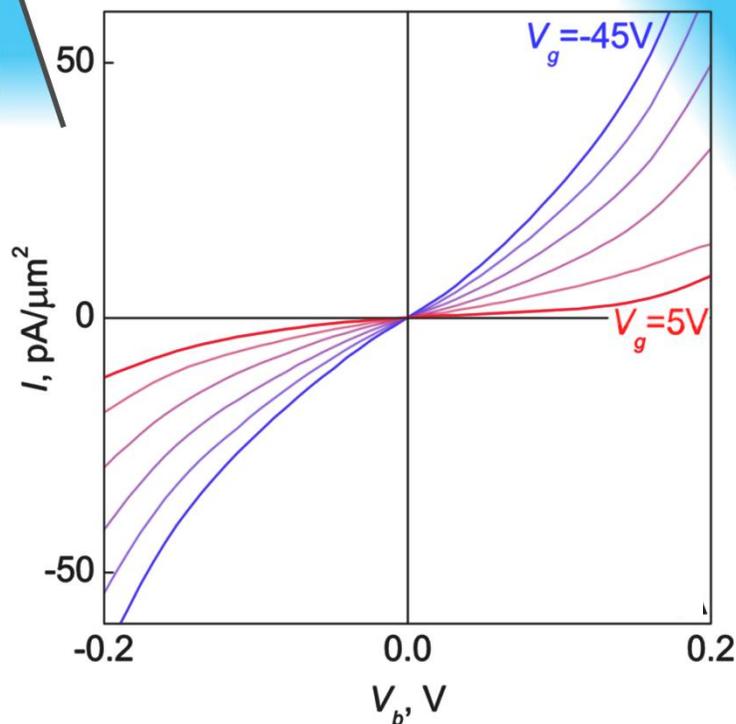
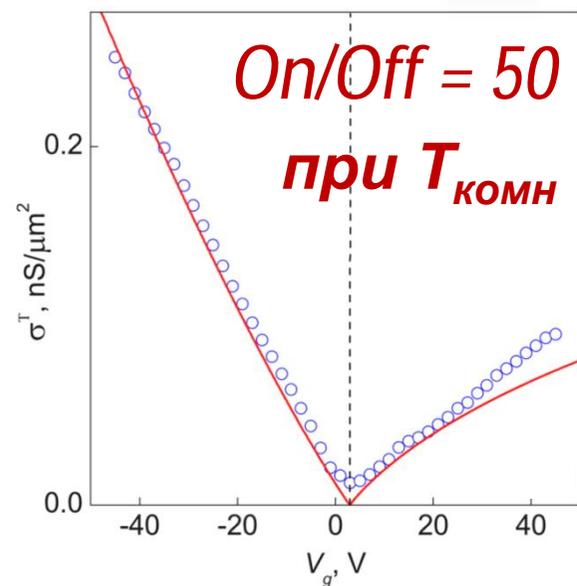
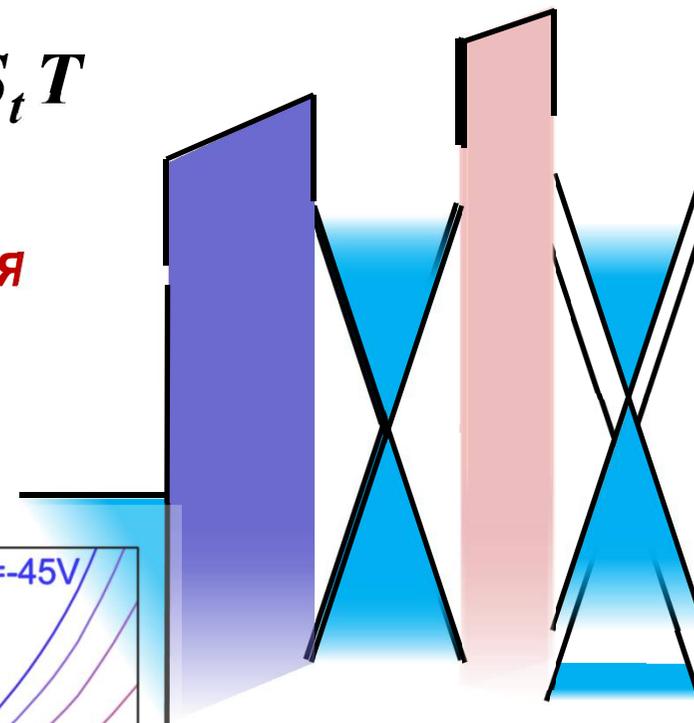
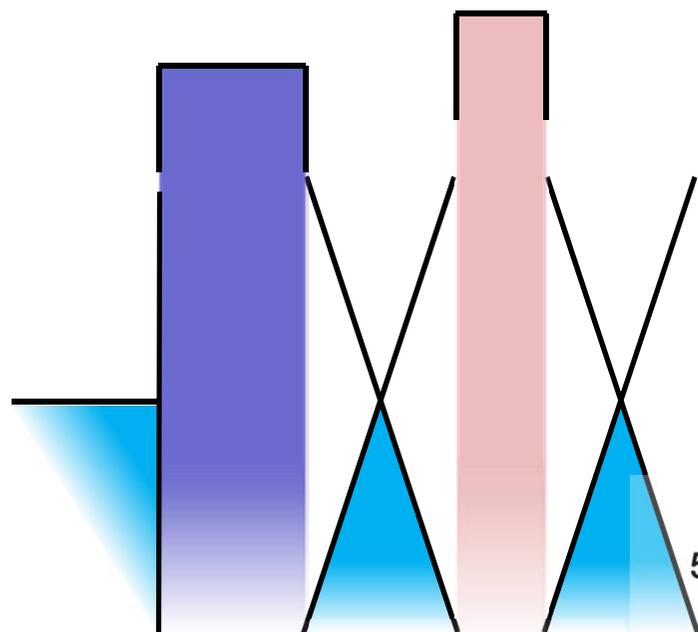
Без проколов и дефектов



Туннельный транзистор

$$I \propto \mu \text{DoS}_b \text{DoS}_t T$$

для BN - барьера:
ток определяется
плотностью
состояний



Графеновый
вертикальный
туннельный
транзистор

Увеличение On/Off

$$I \propto D_o S_b D_o S_t T$$

для BN - барьера:

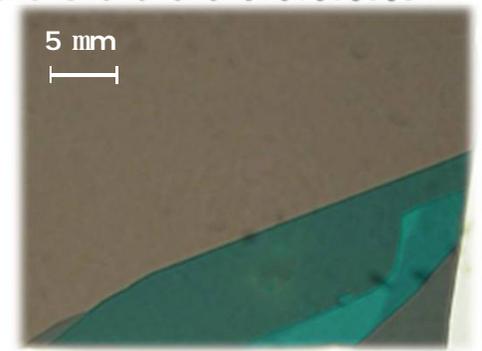
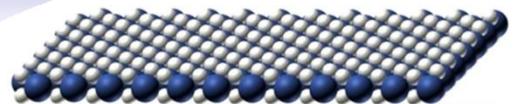
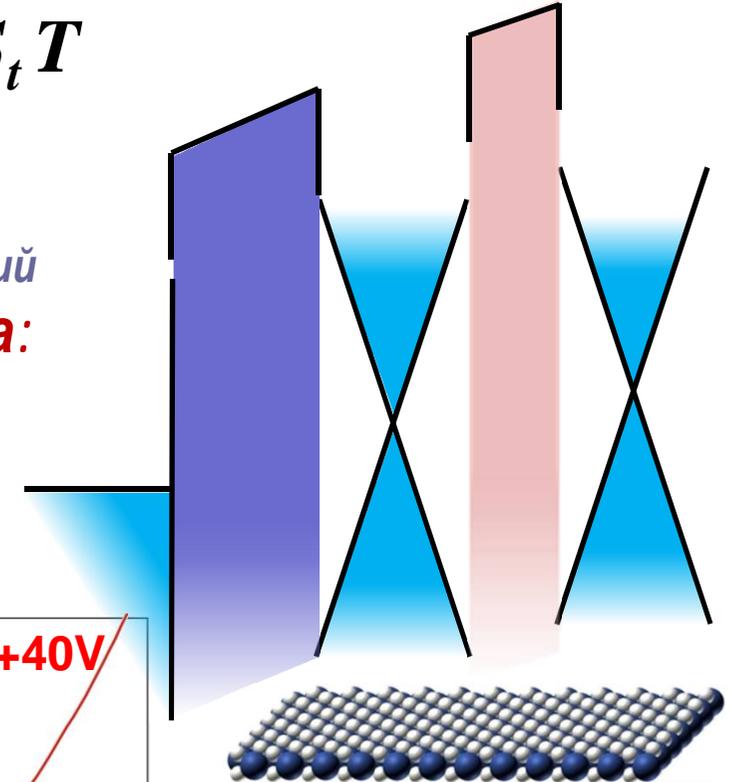
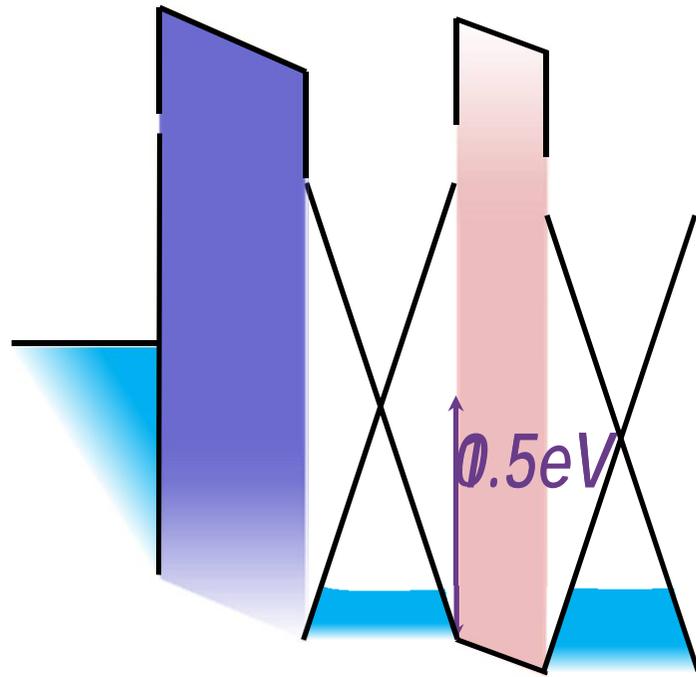
ток определяется

плотностью состояний

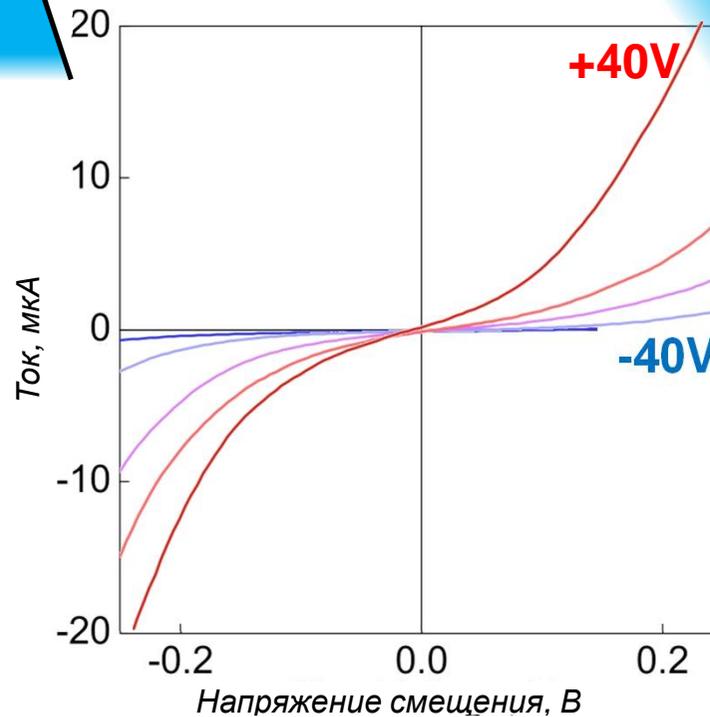
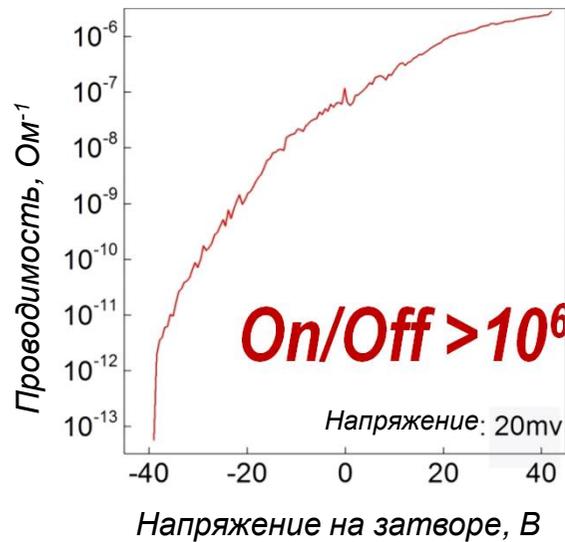
Для MoS₂-барьера:

определяется

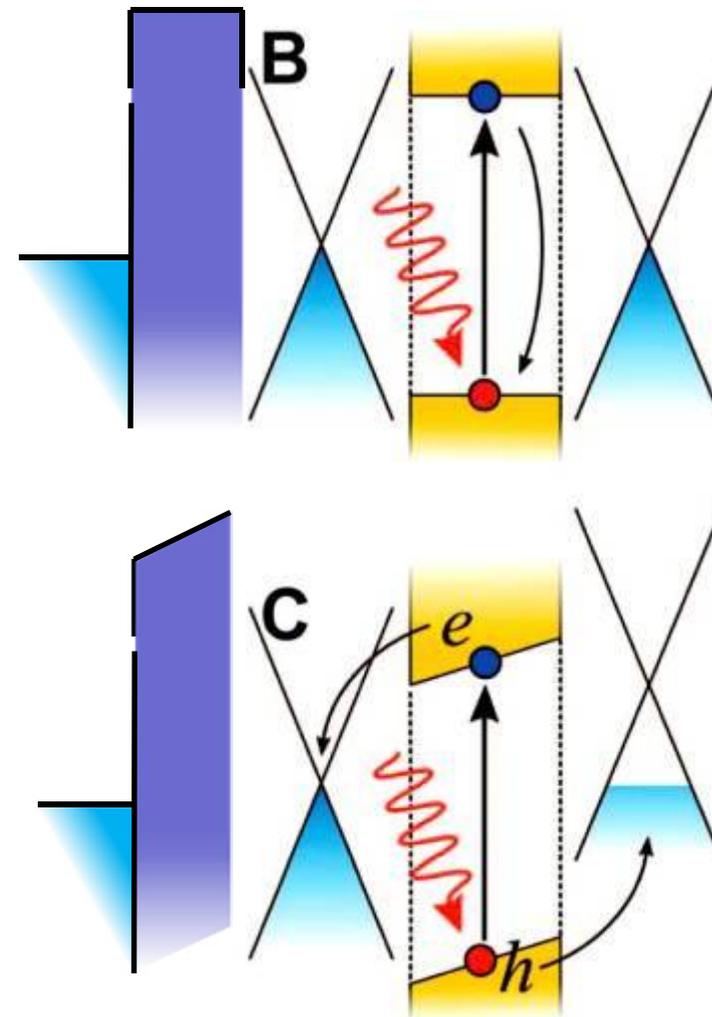
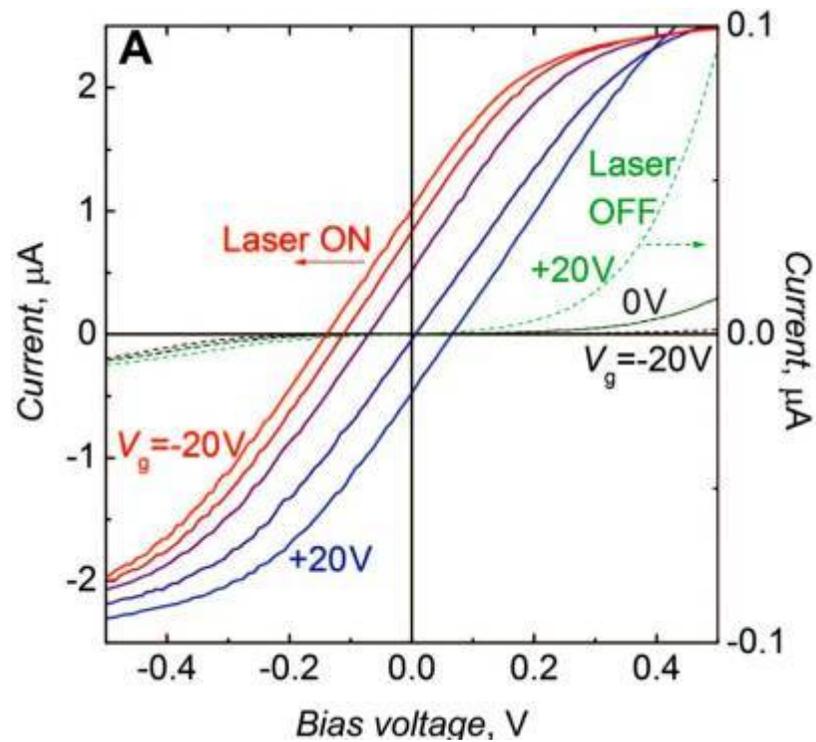
$$T \propto \exp(-d \times D^{1/2})$$



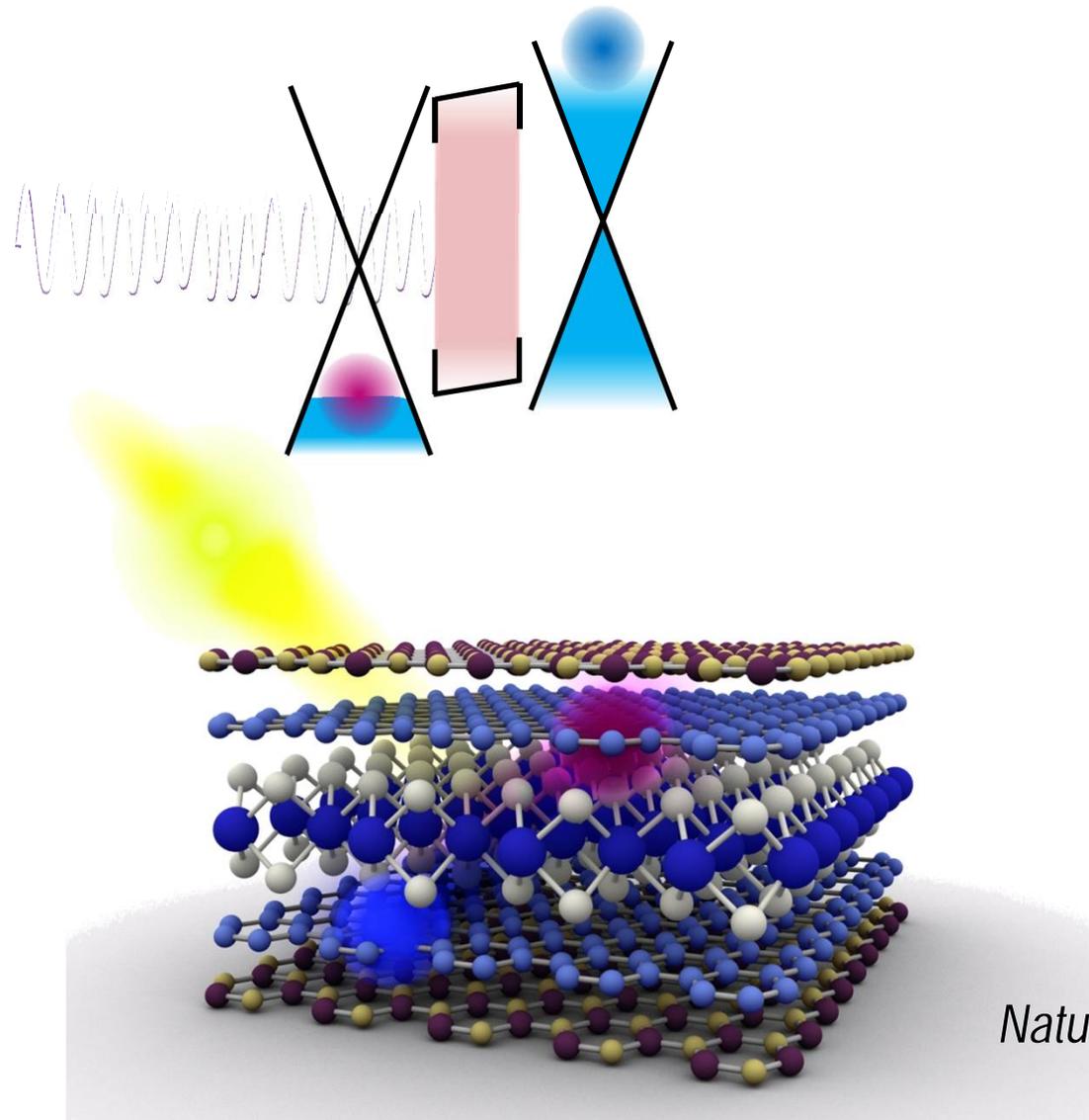
2D MoS₂



Фотоэлектронные детекторы на основе графена и дихалькогенидов металлов (WS_2 или MoS_2)



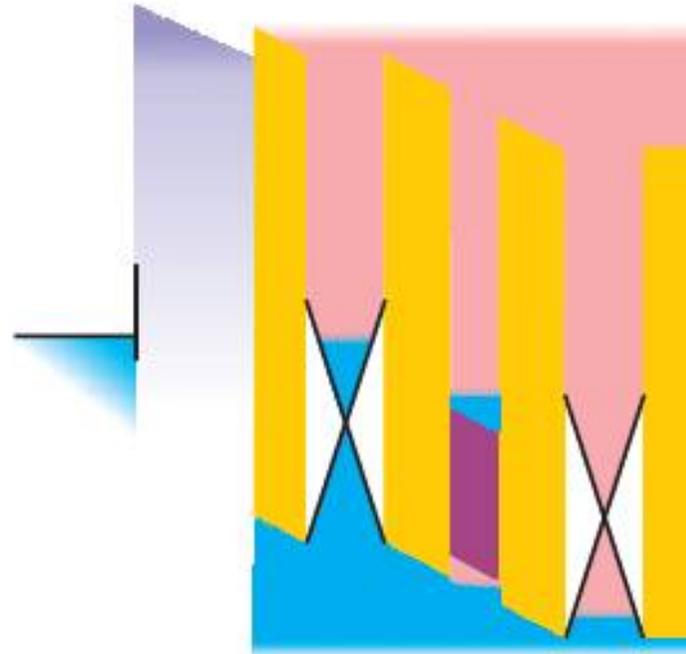
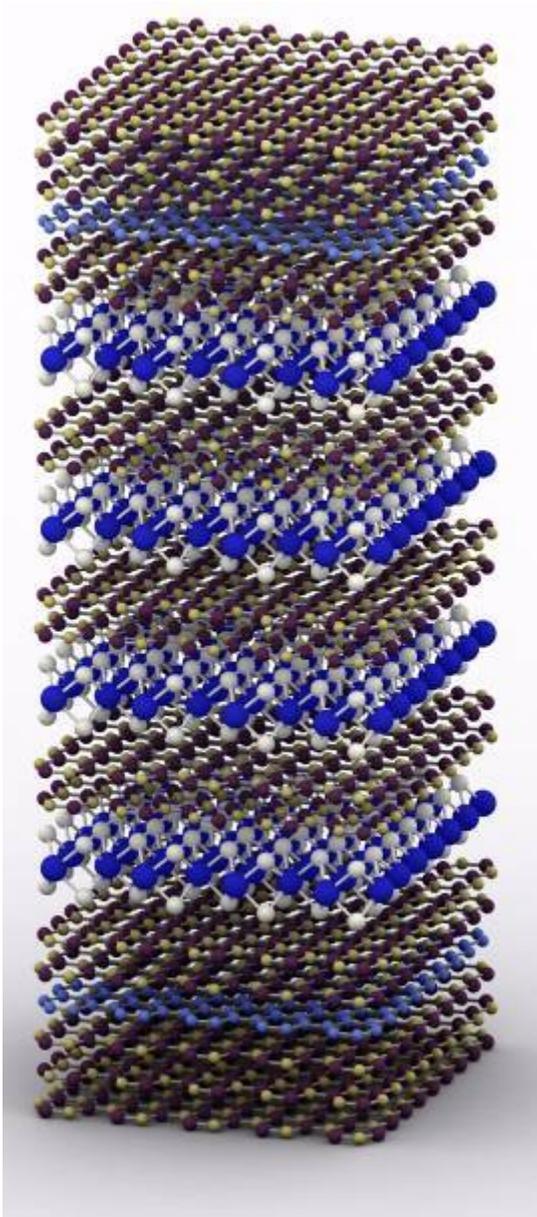
Излучательная рекомбинация в гетероструктуре



Nature Materials '15

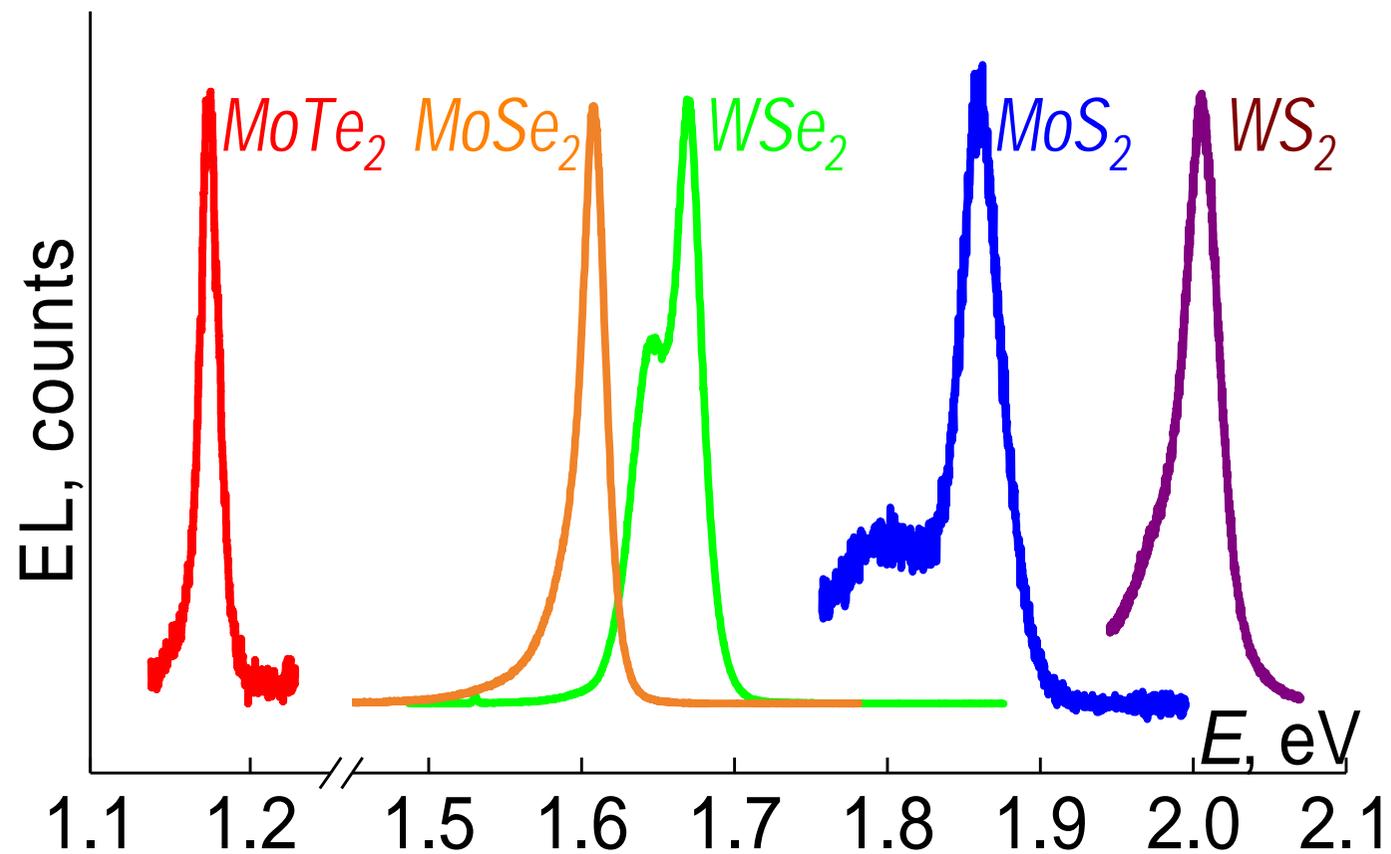
Светодиоды на основе двумерных кристаллов

(MoS_2 , WS_2 , WSe_2)

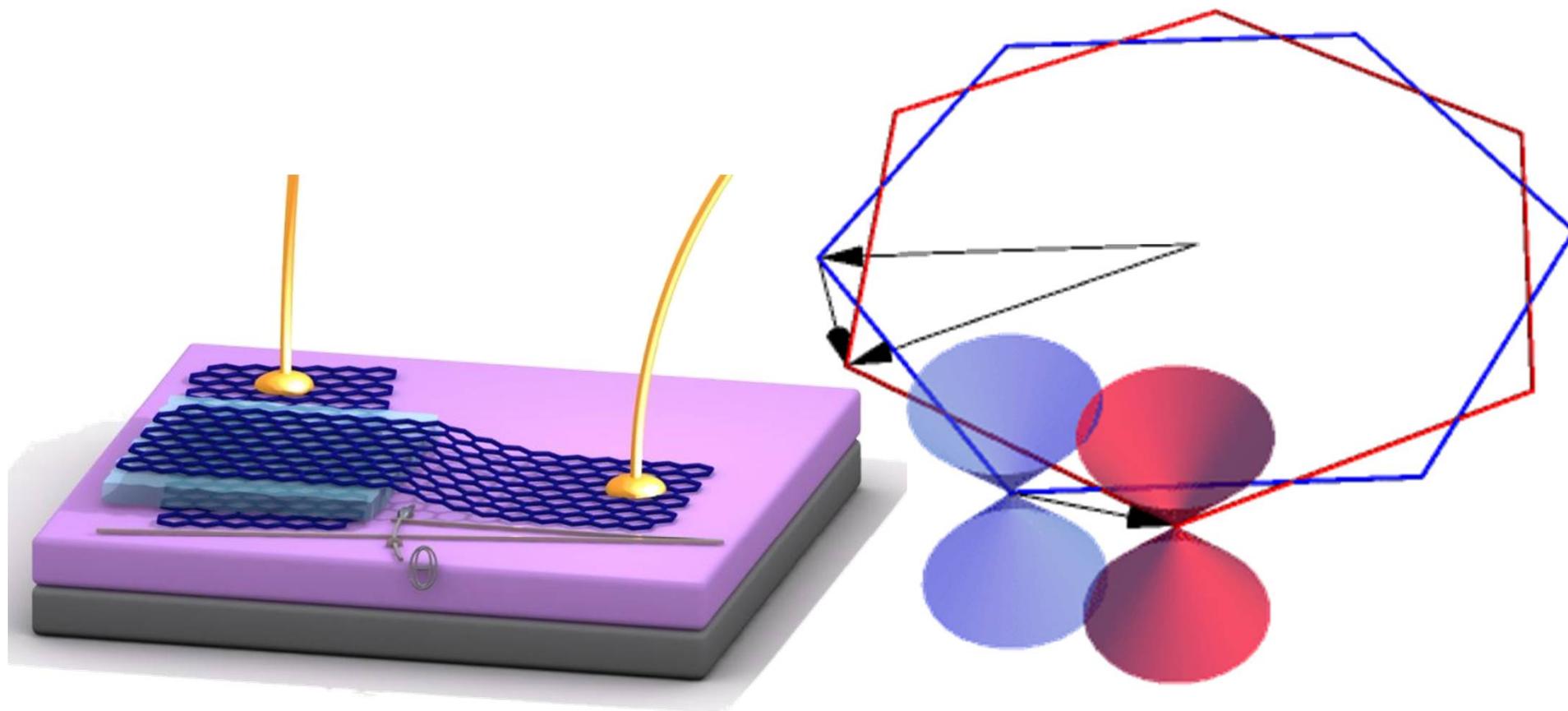


Nature Materials '15

Излучение светодиодов из различных материалов



Туннелирование между графеновыми пленками



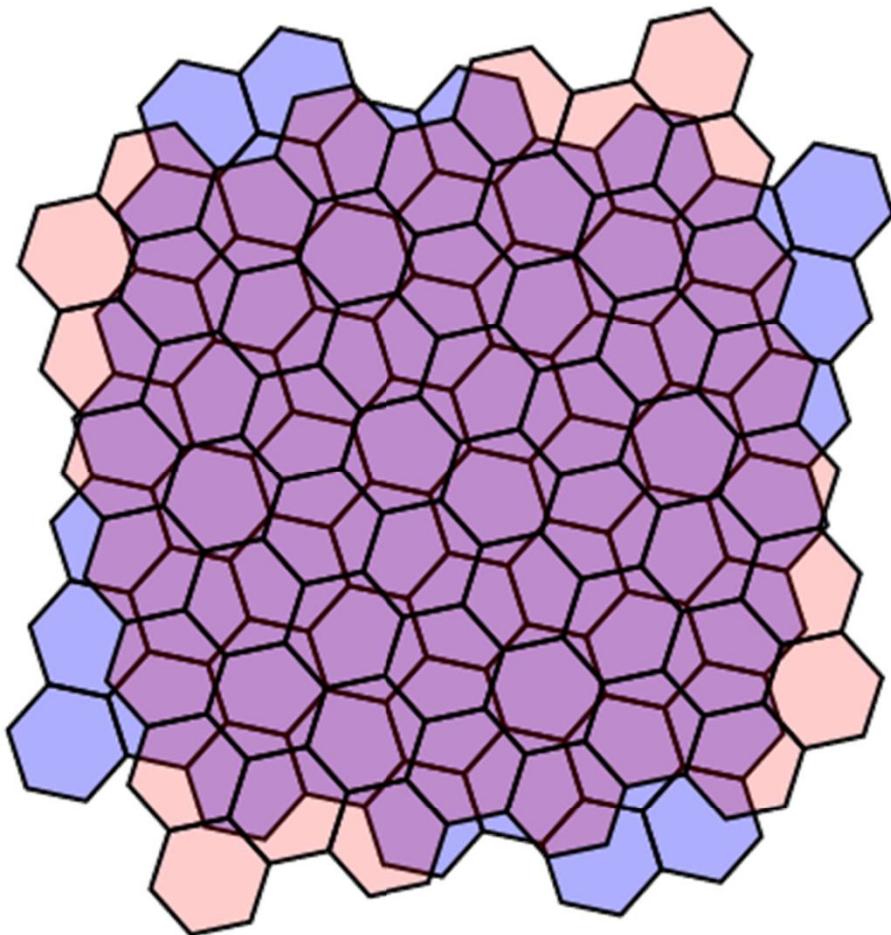
В реальном пространстве

В обратном пространстве

Выравнивание графеновых кристаллов

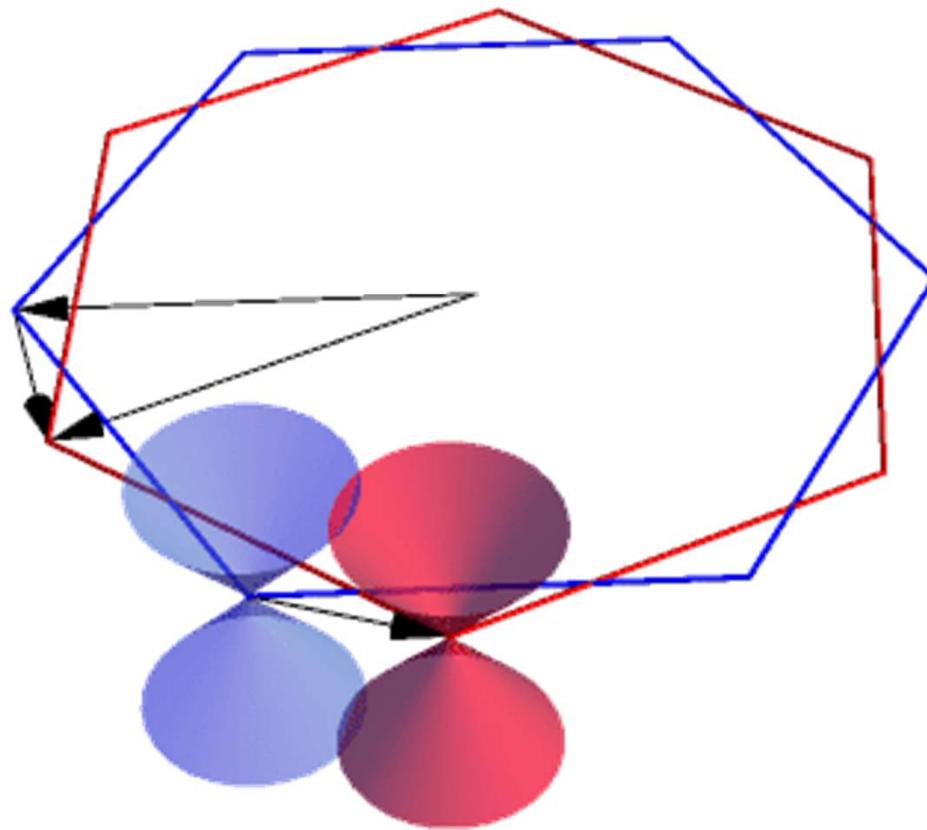
Nature Nanotech. 2014

Туннелирование между графеновыми пленками



В реальном пространстве

Выравнивание графеновых кристаллов

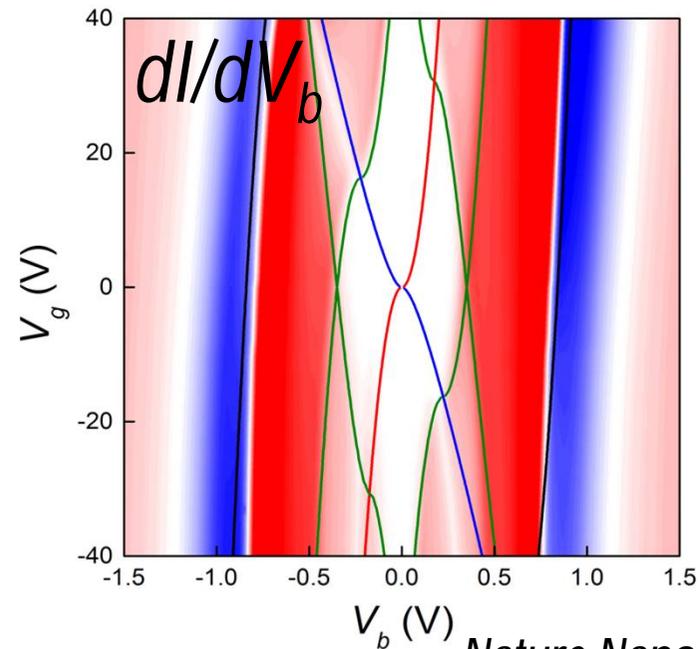
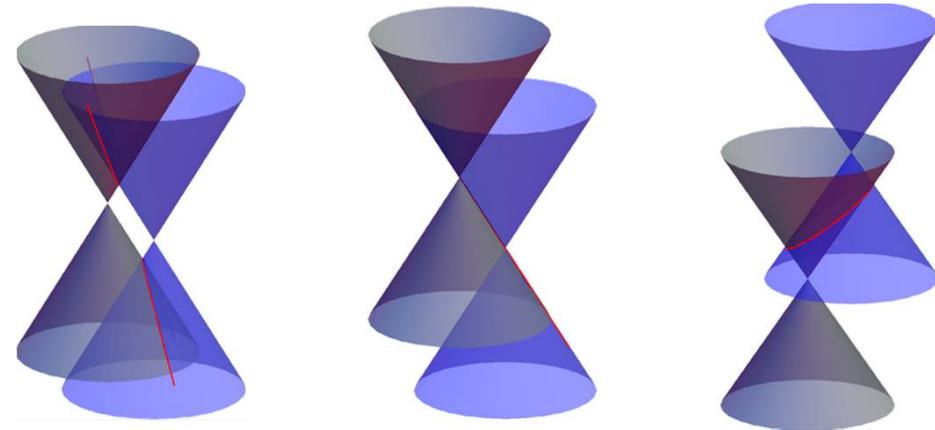
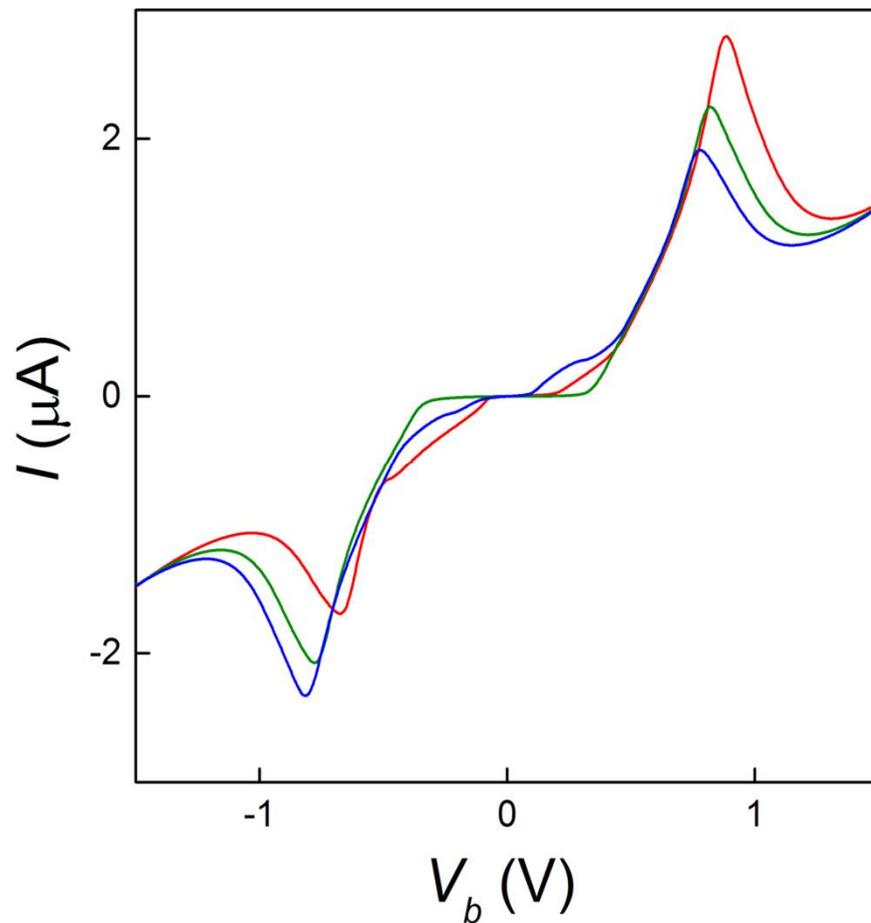


В обратном пространстве

Туннельные характеристики

Отрицательное дифференциальное сопротивление:

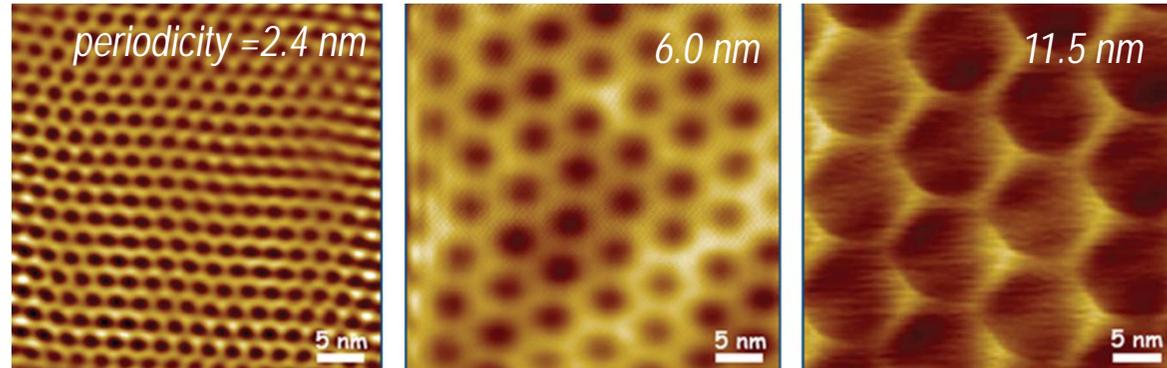
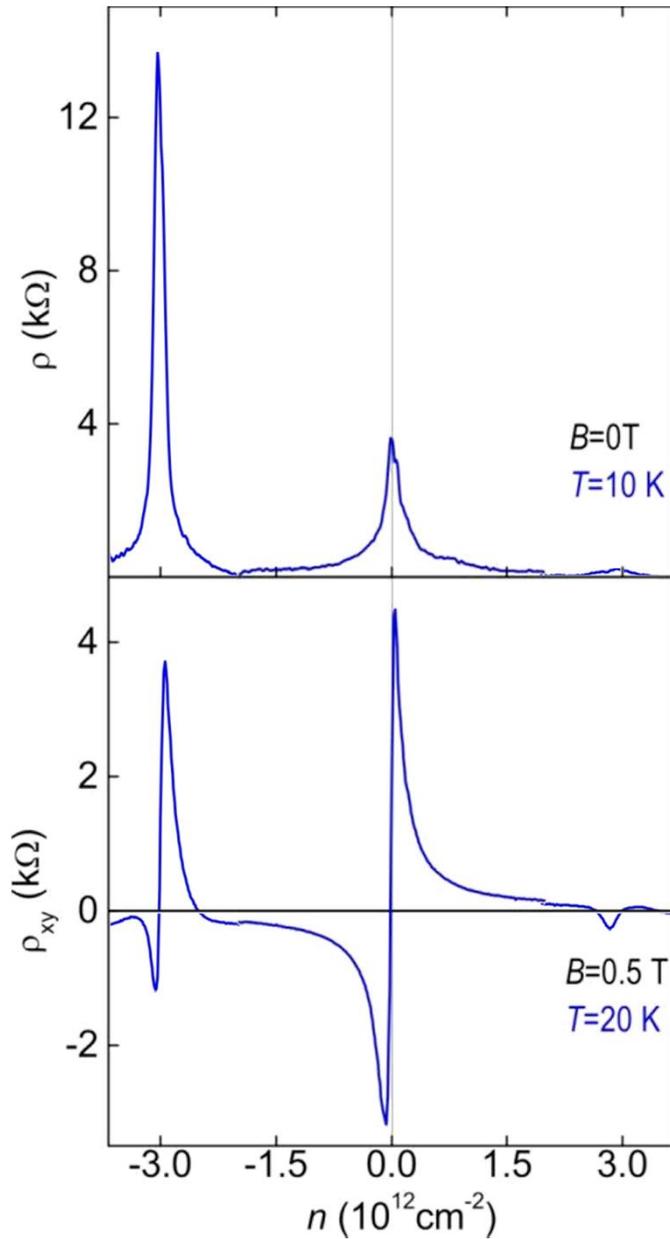
- Большое отношение токов
- Управляется затвором



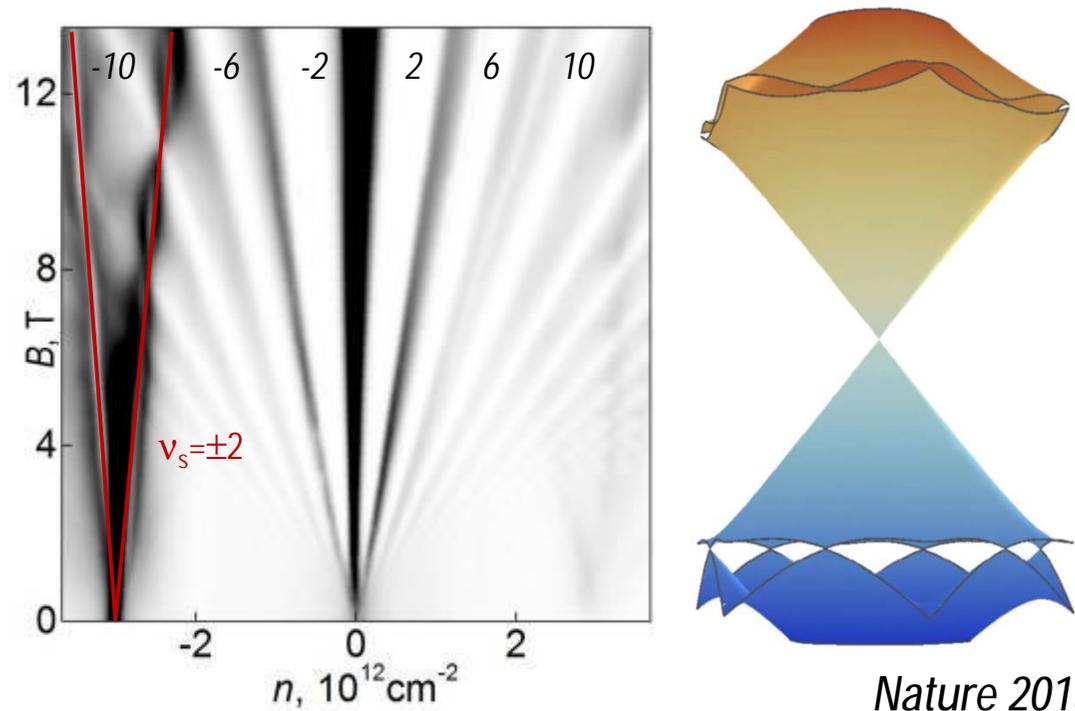
Nature Nanotech. 2014

Графен на ВН: выровненные решетки

Муар: графен на нитриде бора

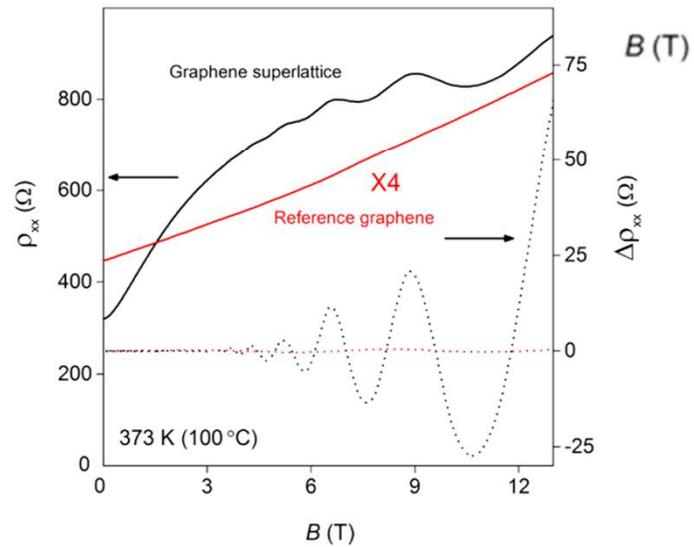
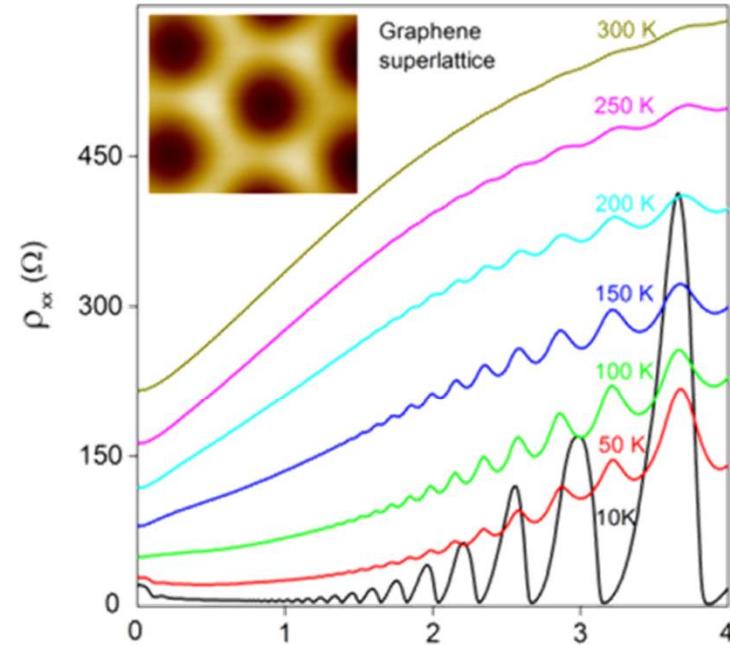
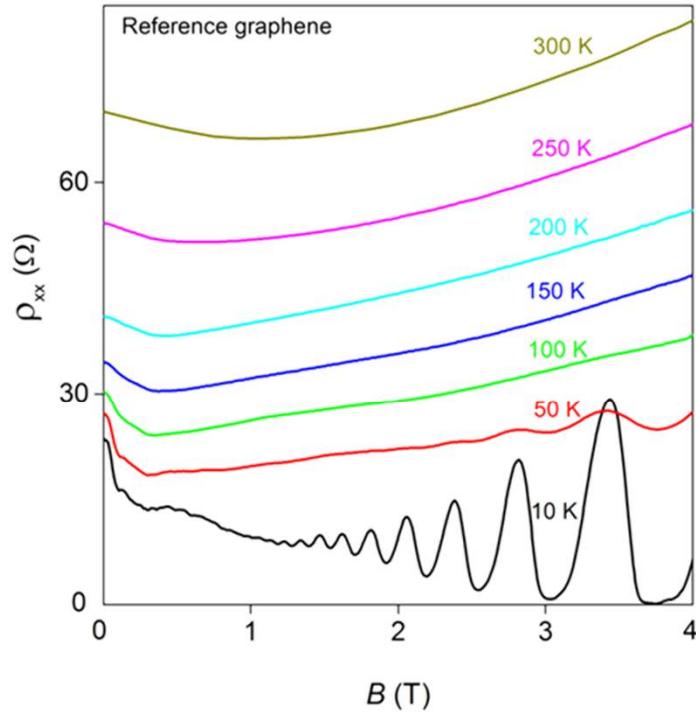


Xue et al, Nature Mat 2011; Decker et al, Nanolett 2011;
Yankowitz et al Nature Physics 2012



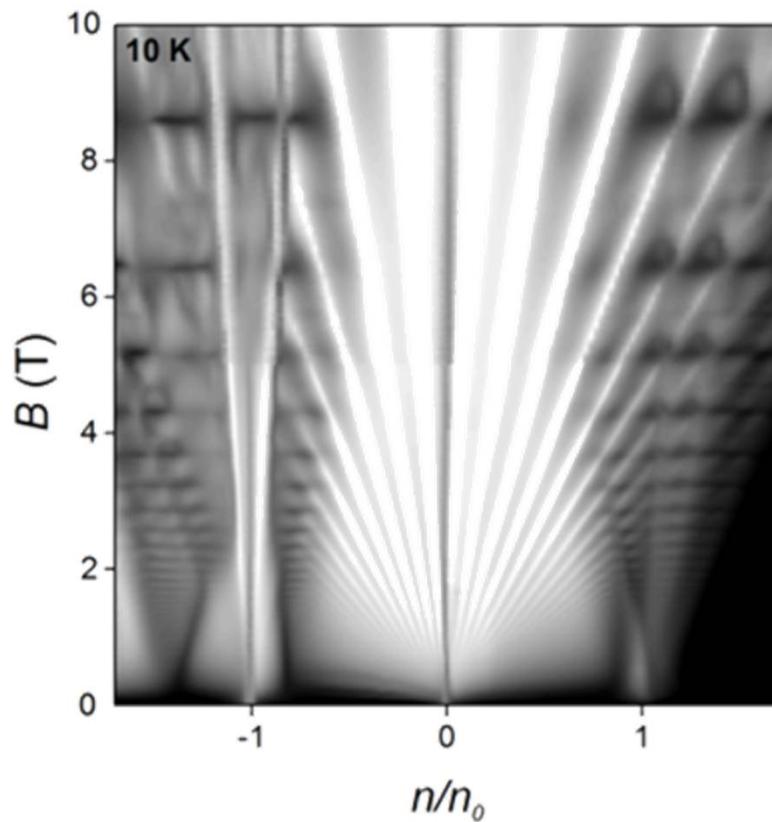
Nature 2013

Высокотемпературные осцилляции магнитосопротивления в сверхрешетках

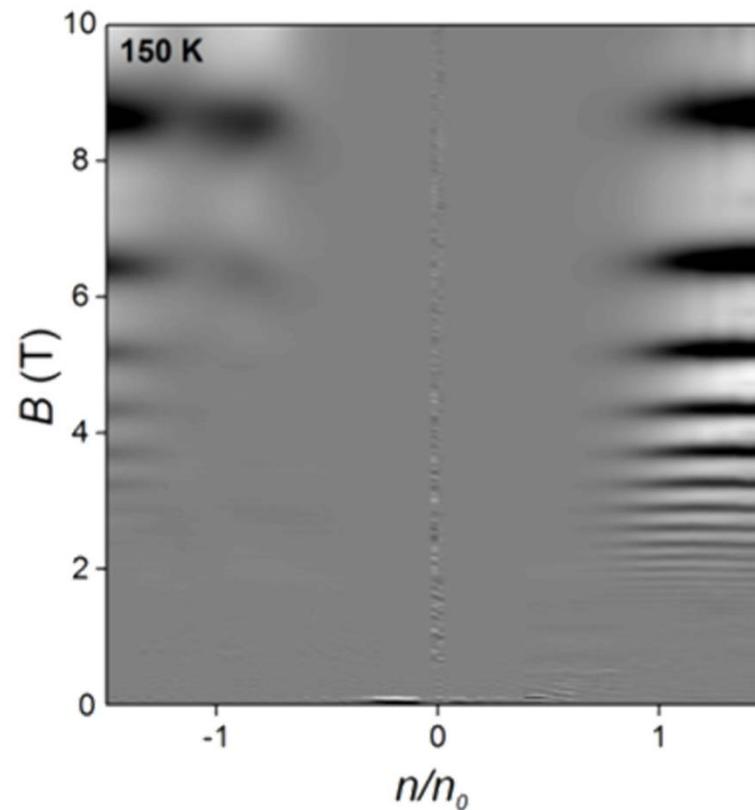


Высокотемпературные осцилляции магнитосопротивления в сверхрешетках

T = 10K



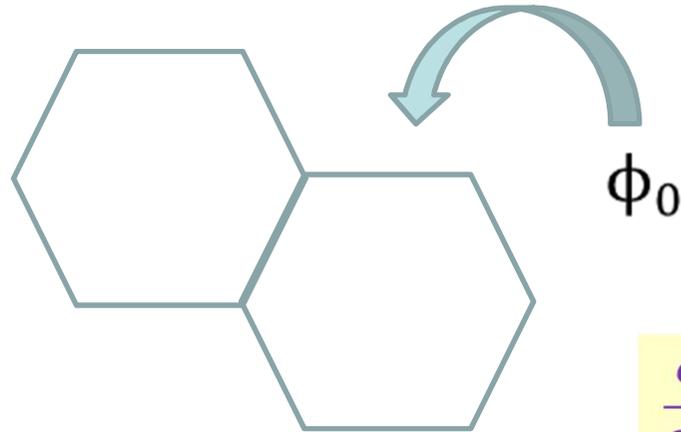
T = 150K



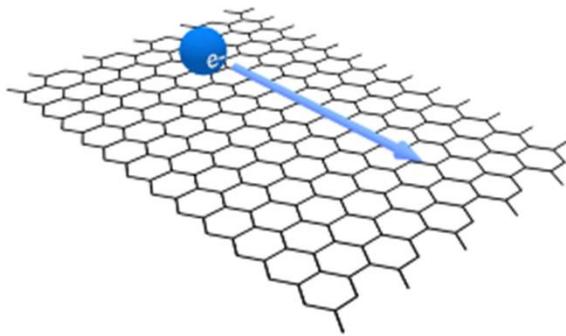
Осцилляции Брауна-Зака

$$\phi = BA$$

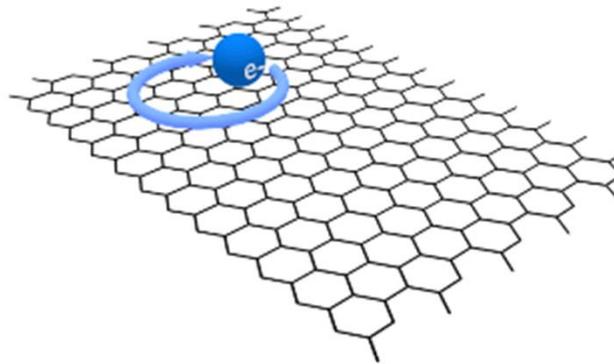
$$\phi_0 = \frac{h}{e}$$



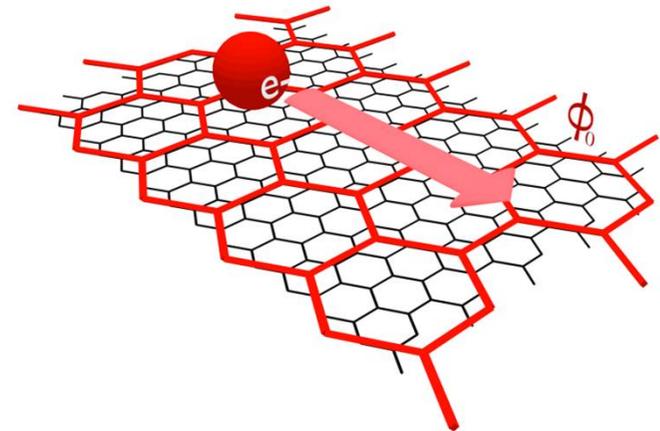
$$\frac{\phi}{\phi_0} = \frac{1}{2}$$



$$B = 0$$

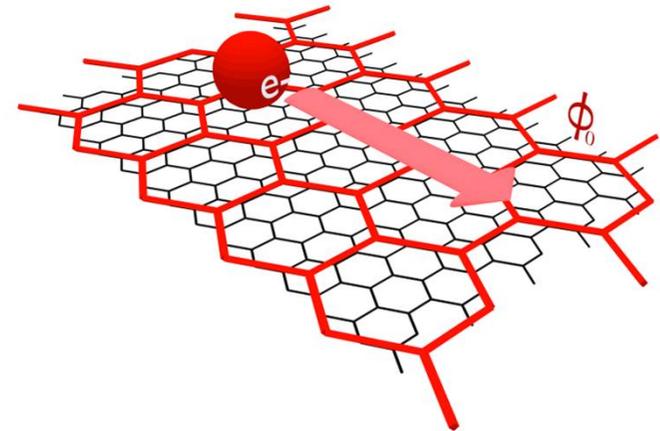
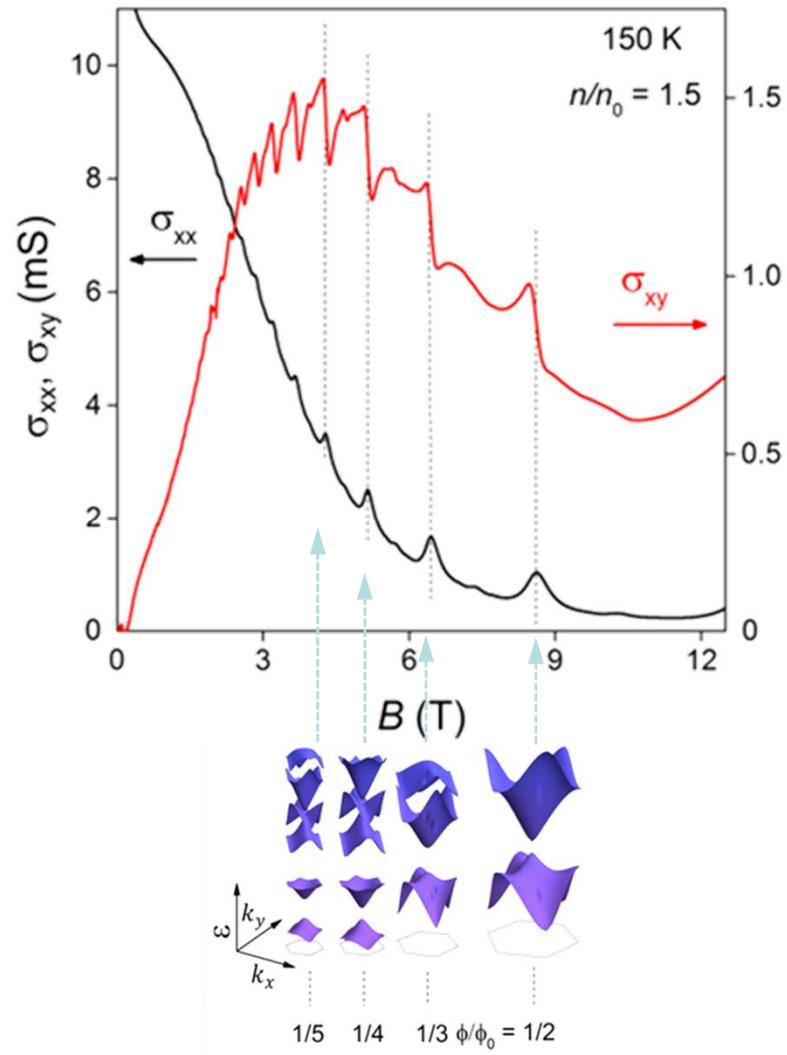


$$B > 0$$



$$\frac{\phi}{\phi_0} = \frac{p}{q}$$

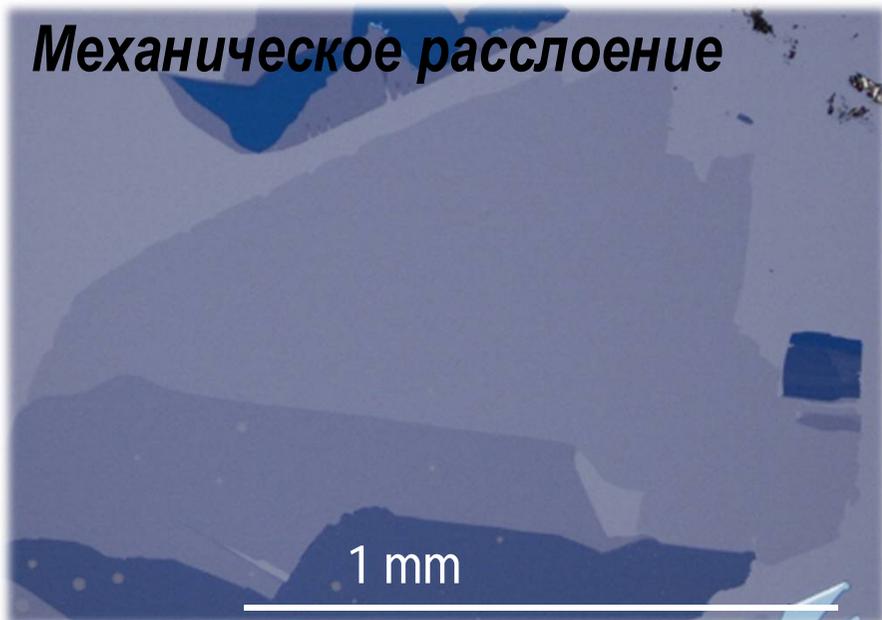
Осцилляции Брауна-Зака



$$\frac{\phi}{\phi_0} = \frac{p}{q}$$

Методы получения графена

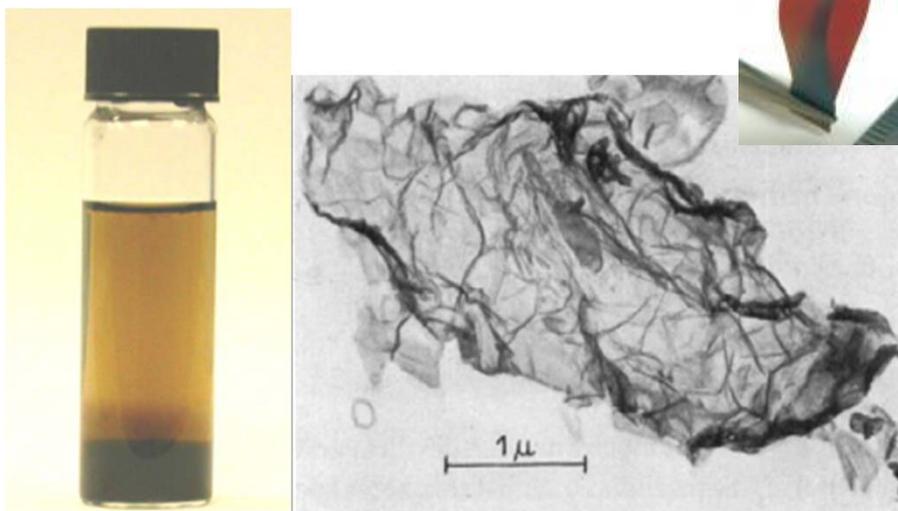
Механическое расслоение



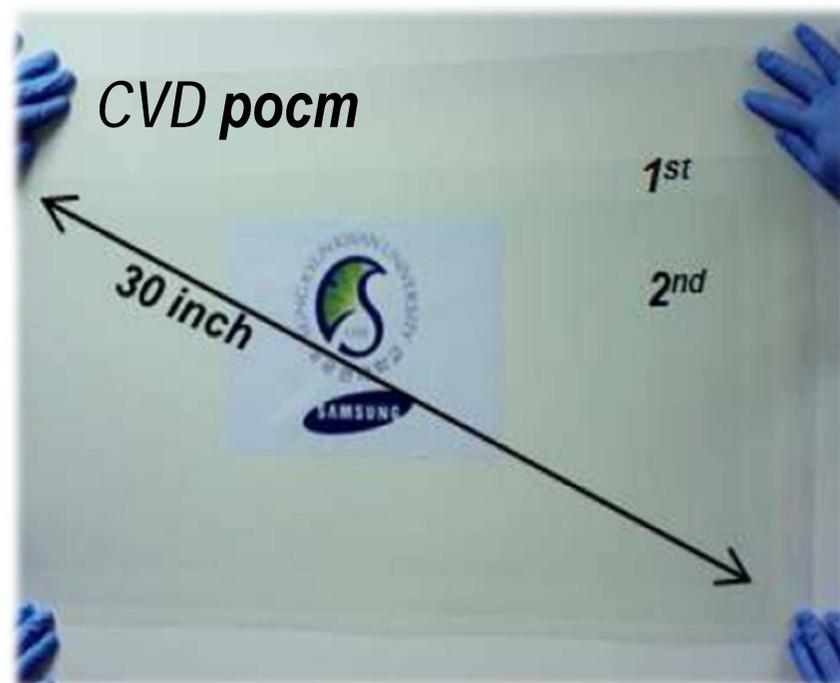
Эпитаксиальный рост на SiC



Химическое расслоение

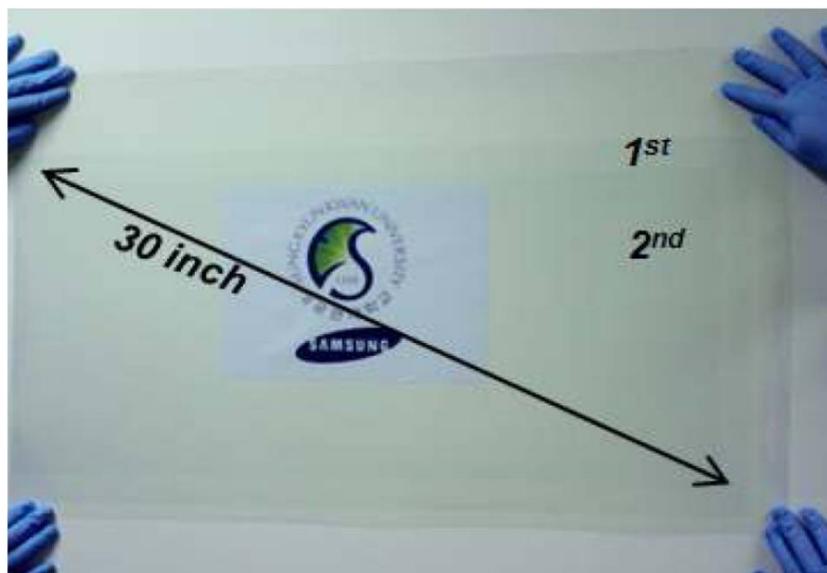
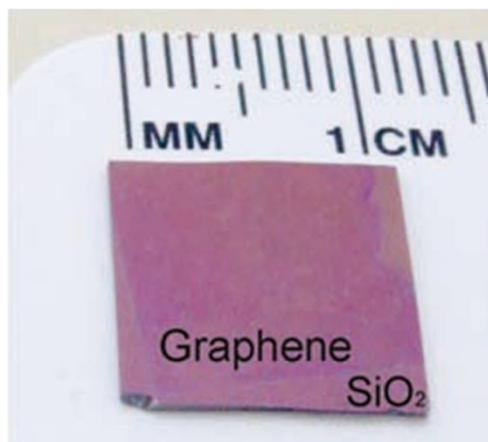


CVD рост

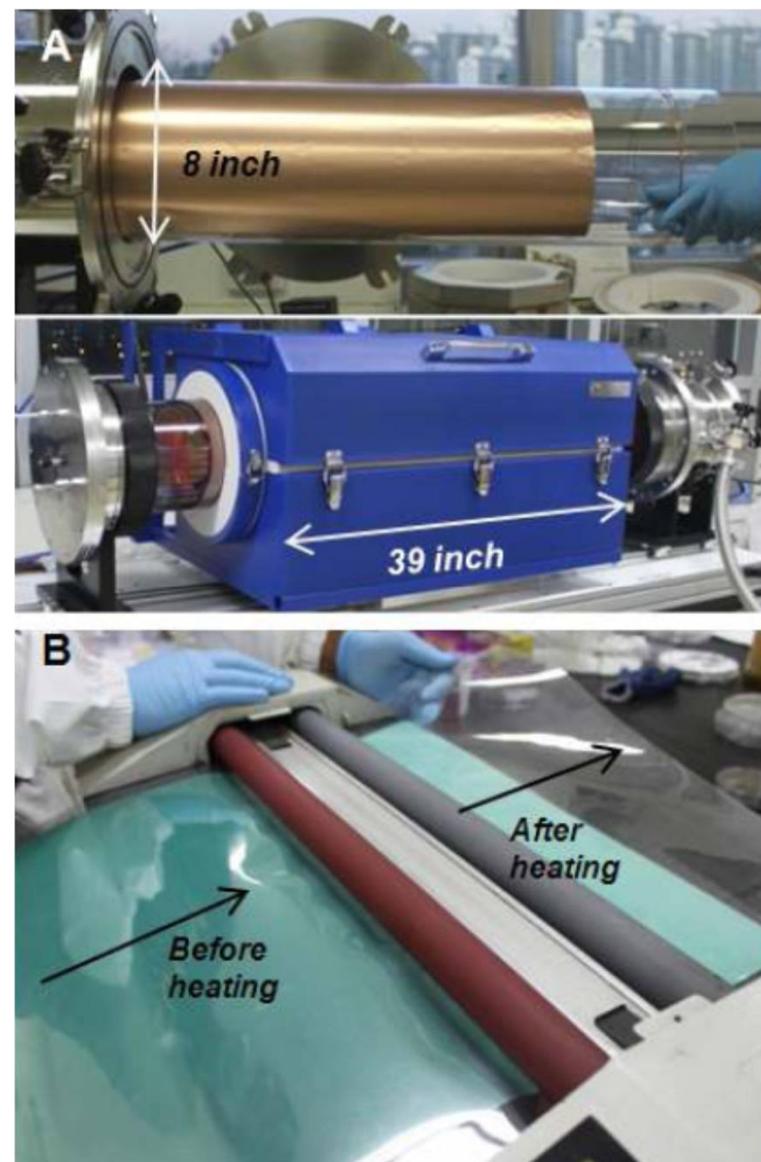


Получение графена

CVD рост и перенос на другую подложку

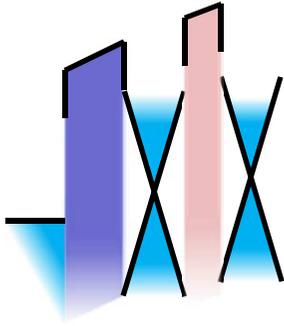


$r \sim 40W/\square$ прозрачность $\sim 90\%$
 $m \sim 5,000 \text{ cm}^2/Vs$

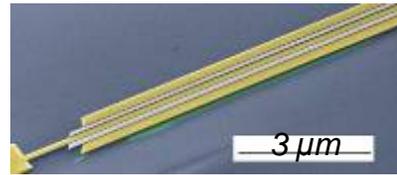


Kim, et al Nature 2009; Li et al Science 2009

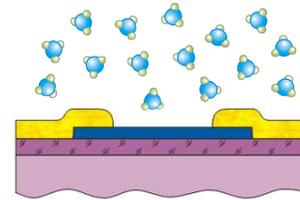
Приложения



Туннельный транзистор

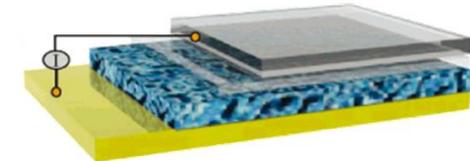
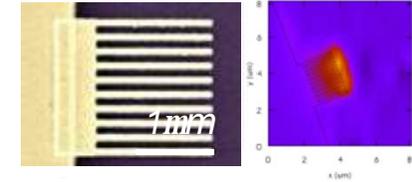


ВЧ-транзистор



Сверхчувствительные газовые датчики

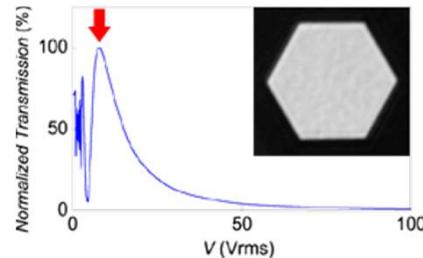
Фотодетекторы



Солнечные батареи



Сенсорные экраны

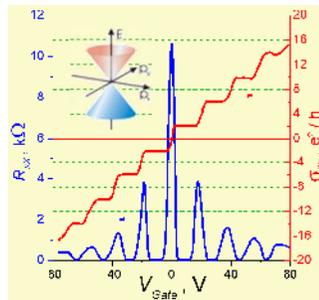
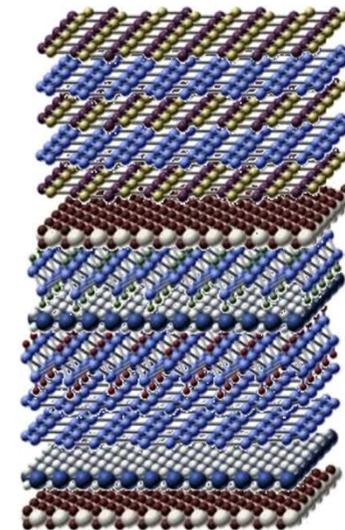


ЖК дисплеи

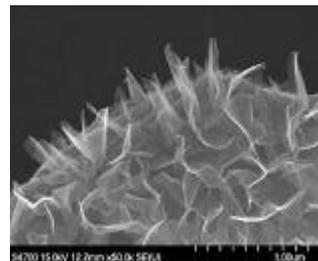


Гибкая электроника

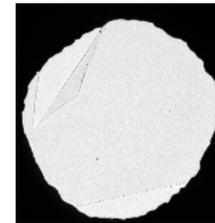
Гетероструктуры



Стандарт сопротивления



Суперконденсаторы



Сверхтонкие мембраны

Композитные материалы

Спасибо за внимание