

**Г.И. ЗЕБРЕВ**

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИБОРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ ГРАФЕНА В ЭЛЕКТРОНИКЕ



Совместный общероссийский научный семинар  
НИЯУ МИФИ и Нанотехнологического  
Общества России



# КРЕМНИЕВАЯ КМОП ТЕХНОЛОГИЯ

КРЕМНИЕВАЯ КМОП ТЕХНОЛОГИЯ

## ОСНОВА СОВРЕМЕННОЙ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ИНДУСТРИИ



# Кремниевый МОП транзистор – основа современной электроники

- ЖЕЛЕЗО – ОСНОВНОЙ КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ТРАНСПОРТЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ (16 век...НАВСЕГДА)
- КРЕМНИЙ – ОСНОВНОЙ КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ЭЛЕКТРОНИКИ (20 ВЕК...НАВСЕГДА)
- КОЛЕСО (МАШИНОСТРОЕНИЕ) (ИЗДАВНА...НАВСЕГДА)
- КРЫЛО (АВИАЦИЯ) (20 ВЕК...НАВСЕГДА)
- МОП ТРАНЗИСТОР (ЭЛЕКТРОНИКА) (20 ВЕК...НАВСЕГДА)



# ПОЧЕМУ КРЕМНИЙ ?

- КРЕМНИЙ ИМЕЕТ ПОЧТИ ИДЕАЛЬНЫЙ РОДНОЙ ИЗОЛЯТОР  $\text{SiO}_2$
- КРЕМНИЙ ИМЕЕТ ПОЧТИ ИДЕАЛЬНУЮ ШИРИНУ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ( $\sim 1$  эВ)
- КРЕМНИЙ ИМЕЕТ ПОЧТИ ИДЕАЛЬНУЮ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА  $\text{Si-SiO}_2$  (плотность дефектов  $\ll 10^{11} \text{ см}^{-2}$  )
- ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ В КРЕМНИИ ПРИЕМЛЕМА (СОТНИ  $\text{см}^2/\text{В С}$ )
- КРЕМНИЙ - РАСПРОСТРАНЕННЫЙ И ДЕШЕВЫЙ МАТЕРИАЛ, ОБЛАДАЮЩИЙ ПОЧТИ ИДЕАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬЮ

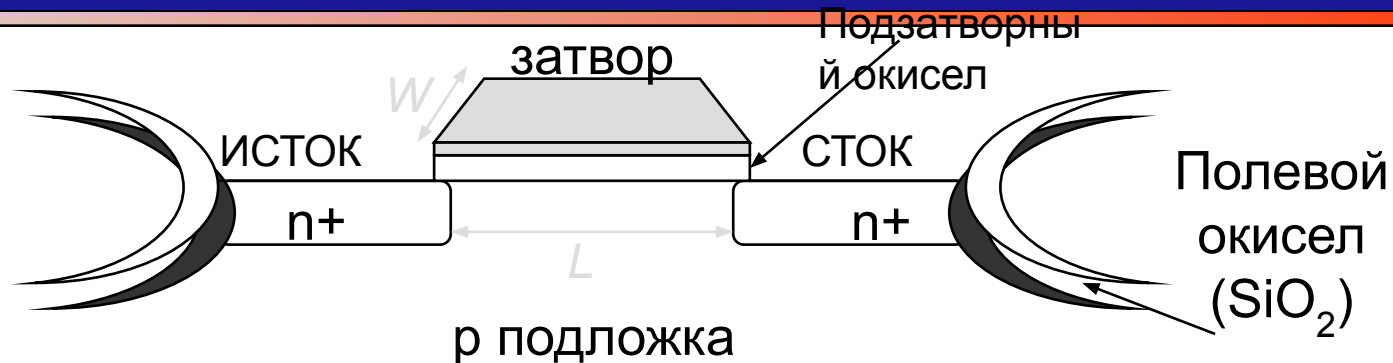


# ПОЧЕМУ МОП ТРАНЗИСТОР?

- МОПТ - ПРОСТЕЙШИЙ ПРИБОР, ОСНОВАННЫЙ НА ЗАКОНАХ **КЛАССИЧЕСКОЙ** ФИЗИКИ
- В СИЛУ ПРОСТОТЫ СТРУКТУРЫ МОПТ ПОДДАЕТСЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОМУ МАСШТАБИРОВАНИЮ
- МИЛЛИАРД ПОЧТИ ИДЕНТИЧНЫХ КОПИЙ **МОПТ** НА ПЛОЩАДИ  $1 \text{ см}^2$  !!!



# МОП ТРАНЗИСТОР – КЛАССИЧЕСКИЙ ПРИБОР



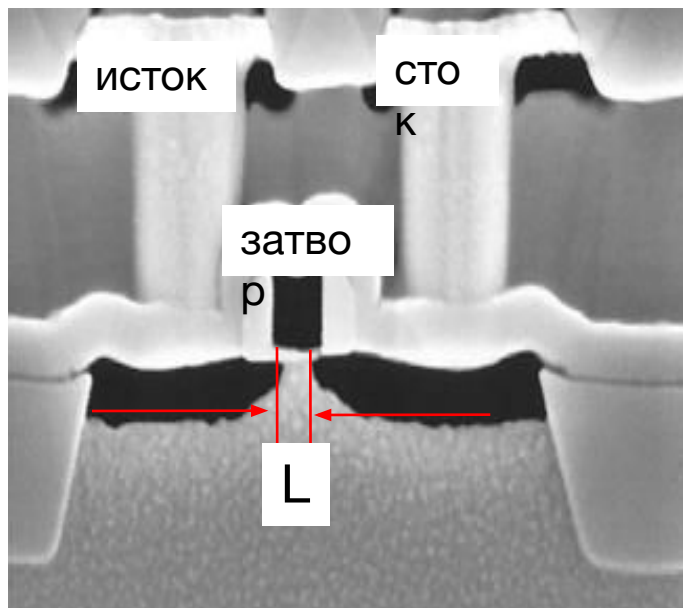
## ПРОЕКТНАЯ НОРМА 32 НМ

**Это длина канала < 20 нм!**

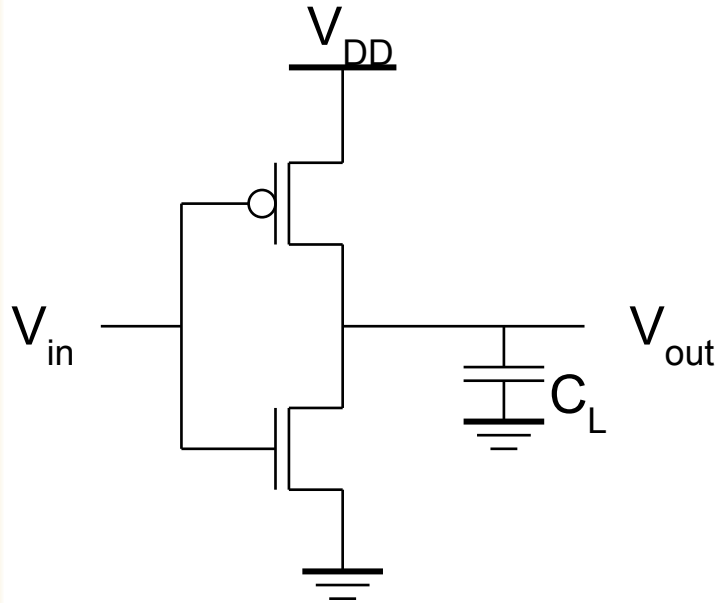
Длина канала уже сопоставима с длиной свободного пробега и даже длиной волны электрона!

Но вольтамперные характеристики такие же, как у МОПТ с  $L = 10$  мкм, **только хуже!**

Квантовые эффекты в кремниевых МОПТ играют роль **паразитных эффектов!**  
Пример: туннелирование через подзатворный окисел



# ПОЧЕМУ КМОП технология?



**КМОП инвертор:**

**вход – «0» выход – «1»**

**вход – «1» выход – «0»**

**В статике всегда один из транзисторов закрыт и блокирует ток.**

**Ток утечки при этом ~ 1 нА**

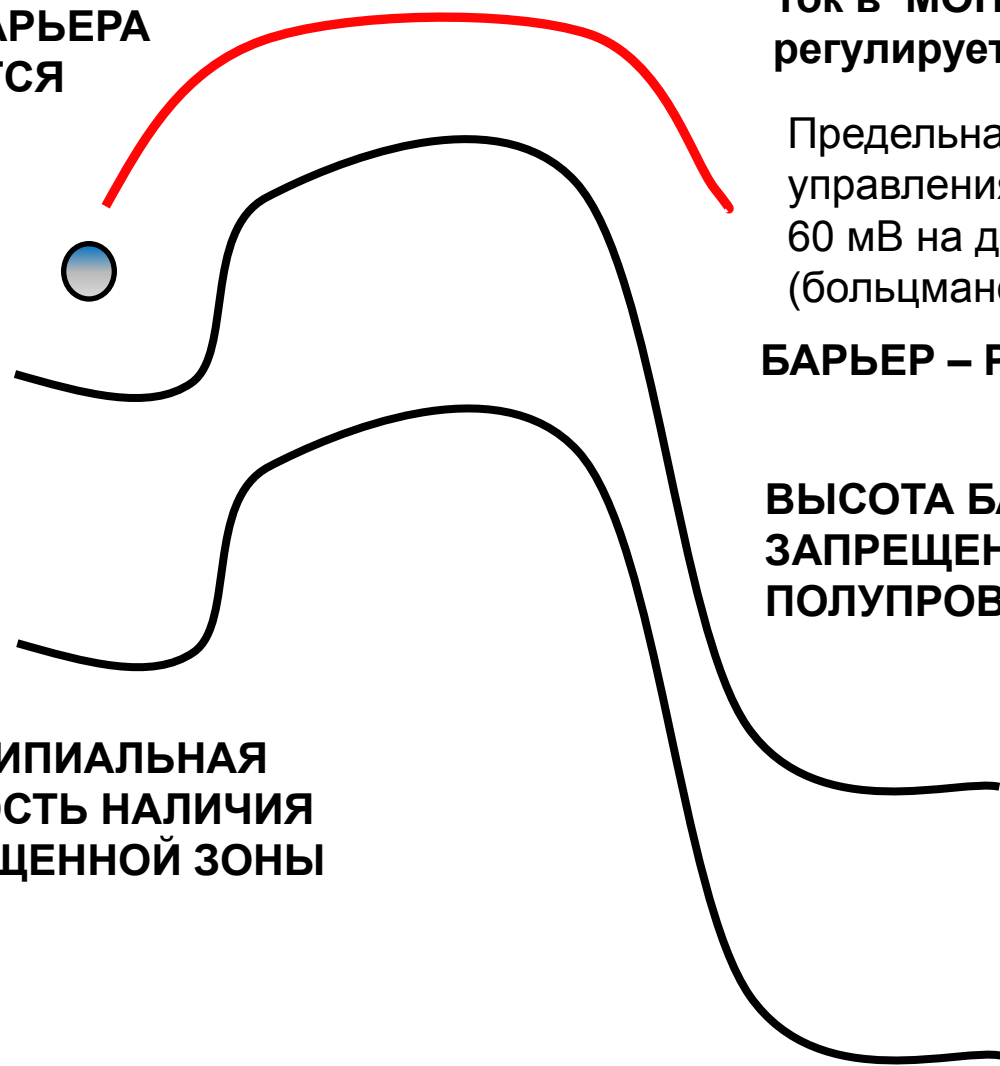
**Малость потребления в статике - это фундаментальное достоинство КМОП технологии, обеспечивающее ее полное доминирование в цифровой технике**



# БАРЬЕР КАК НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ЦИФРОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

**ВЫСОТА БАРЬЕРА  
УПРАВЛЯЕТСЯ  
ЗАТВОРОМ**

**ИСТОК**



**Ток в МОП транзисторе  
регулируется высотой барьера**

Предельная эффективность  
управления током в МОПТ –  
60 мВ на декаду  
(больцмановская статистика)

**БАРЬЕР – PN ПЕРЕХОД**

**ВЫСОТА БАРЬЕРА < ШИРИНЫ  
ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ  
ПОЛУПРОВОДНИКА**

**ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ  
ВАЖНОСТЬ НАЛИЧИЯ  
ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ**

**СТОК**





# Альтернативные материалы для электроники

Material	Bulk Mobility	Bandgap	Effective Mass
	cm <sup>2</sup> /Vs	eV	m*/m <sub>o</sub>
GaN	2,000 <sup>4</sup>	3.47 <sup>5</sup>	0.2 <sup>5</sup>
Si	1,400 <sup>1,3</sup>	1.12 <sup>1,2</sup>	0.19 <sup>1,2</sup>
Ge	3,900 <sup>1,3</sup>	0.661 <sup>1,2,3</sup>	0.082 <sup>1,2</sup>
GaAs	8,500 <sup>1,3</sup>	1.424 <sup>1,2,3</sup>	0.067 <sup>1,2,3</sup>
InGaAs	12,000 <sup>6</sup>	0.74 <sup>7</sup>	0.041 <sup>8</sup>
InAs	40,000 <sup>1</sup>	0.354 <sup>1,3</sup>	0.023 <sup>1,3</sup>
InSb	70,000 <sup>1,3</sup>	0.17 <sup>1,3</sup>	0.014 <sup>1,3</sup>
graphene	100,000 <sup>9</sup>	0	0

- Слишком большая запрещенная зона : большое напряжение питания
- Слишком узкая запрещенная зона : большие токи утечки в статике
- Отсутствие хорошего («родного») изолятора
- Плохая технологичность и дороговизна



# ГРАФЕН: Почему это интересно с практической точки зрения?

## Экстенсивные и интенсивные факторы развития кремниевой микроэлектроники:

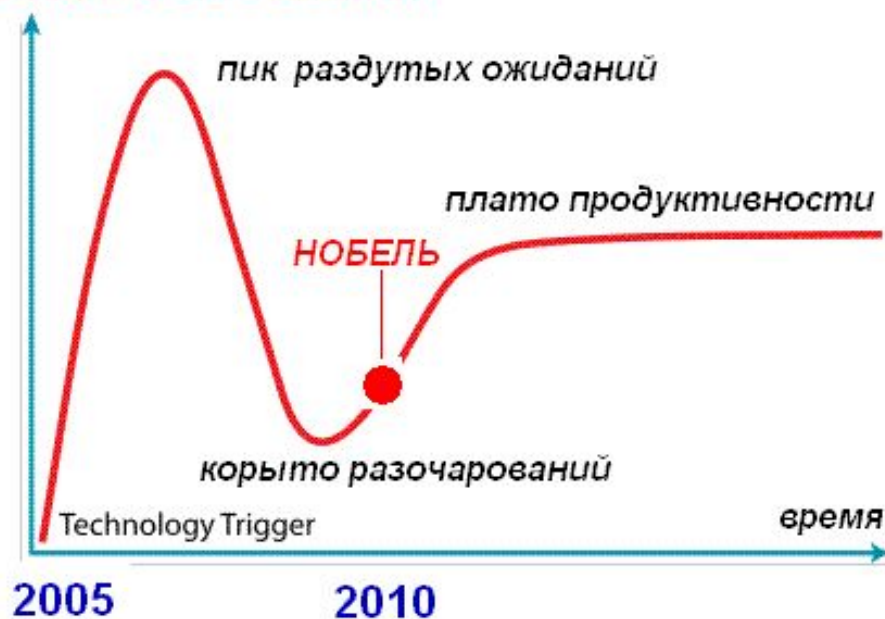
- Кремниевая КМОП технология до сих пор развивалась, главным образом, за счет экстенсивного фактора , т.е. за счет уменьшения размеров элементов.
- Интенсивные факторы (например, подвижность) при миниатюризации не улучшаются, а ухудшаются!
- Борьба за увеличение подвижности (напряженный кремний, сплавы кремний-германий и т.п.) – дорогостоящее усложнение технологии и незначительный эффект ( в пределах 10...30% увеличения подвижности)
- Графен дает увеличение подвижности в десятки, и возможно даже в сотни раз!



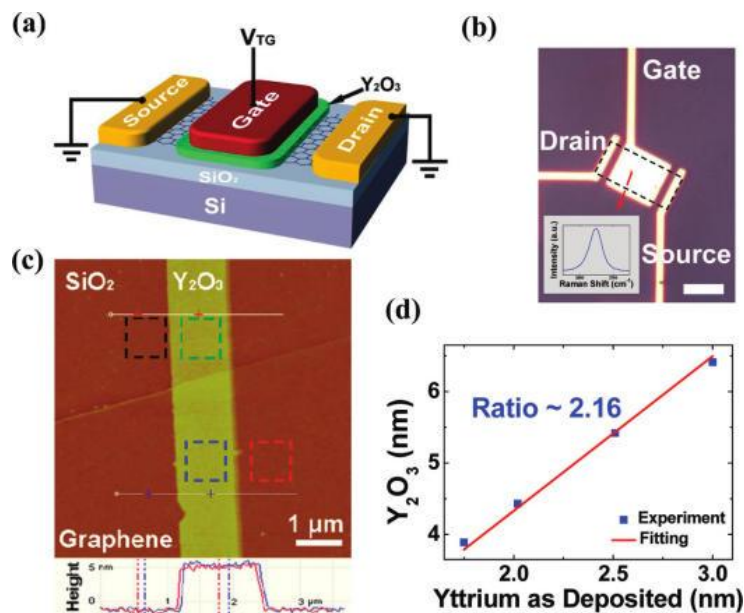
# ЦИКЛ ГРАФЕНОВОЙ ЛИХОРАДКИ

## КРИВАЯ ГРАФЕНОВОЙ АЖИТАЦИИ

ВИДИМОСТЬ СОБЫТИЙ



# Предельные размеры графеновых структур



## Quantum Capacitance Limited Vertical Scaling of Graphene Field-Effect Transistor

Huilong Xu, Zhiyong Zhang,<sup>\*</sup> Zhenxing Wang, Sheng Wang, Xuelei Liang, and Lian-Mao Peng<sup>\*</sup>

Key Laboratory for the Physics and Chemistry of Nanodevices and Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China

**Ограничение тока в одном монослое дает возможность улучшить электростатическое качество**

- [China, 2011] Эквивалентная толщина изолятора ~1.5 нм (как и в Si МОПТ)
- Утверждают, что технология позволяет снизить длину канала до 1 нм!
- Предел Si КМОП ~ 5 нм (лет через 15-20)

# Свойства графена

Самый тонкий: ~0.1 нм (1 атомный слой)

Самый легкий: 2700 кв.м на грамм;

Самый прочный: ( хим.  $sp_2$  связи прочнее чем  $sp_3$  связи в алмазе!)

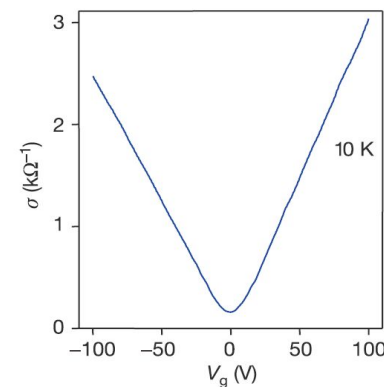
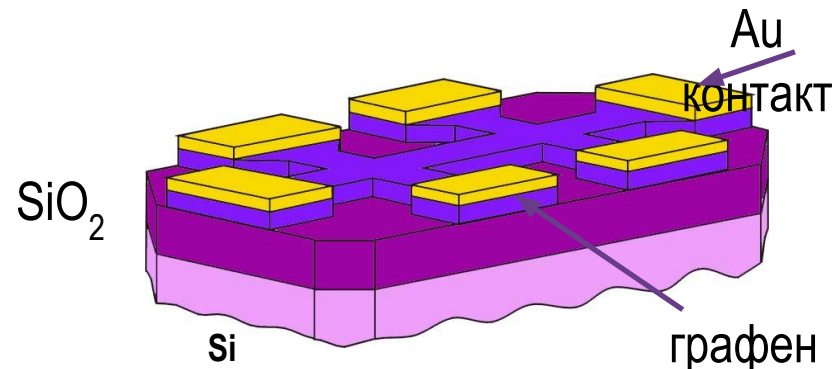
Максимальный плотность тока: в миллион раз больше чем в меди

Рекордная теплопроводность

Рекордная подвижность: сотни тысяч  $cm^2 / (V \cdot c)$

Максимальная длина свободного пробега при  $T=300K$  : около микрона

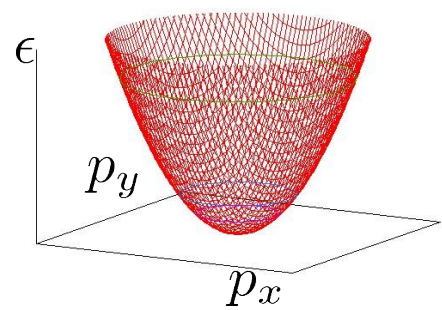
Индукцированная затвором концентрация электронов или дырок до  $10^{14} cm^{-2}$



# НЕОБЫЧНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОСИТЕЛЕЙ В ГРАФЕНЕ

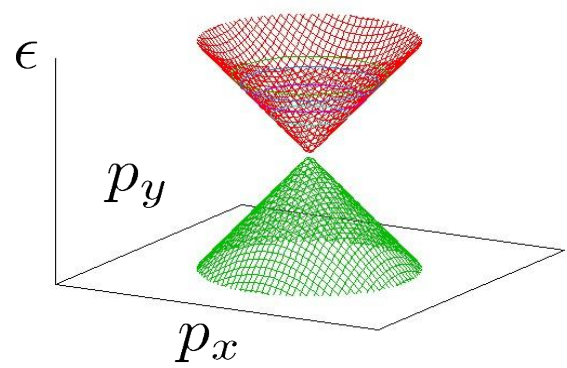
Дисперсия электронов в кремнии

$$\epsilon_p = \frac{p_x^2}{2m} + \frac{p_y^2}{2m}$$



Дисперсия электронов в 2D графене как у фотона  $\epsilon_{photon} = c \hbar k$

$$\epsilon_p = \pm v_0 \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$



1. В графене у носителя нет массы! (псевдорелятивистская динамика)

2. Скорость носителей в графене постоянна

$$v_0 \cong 10^8 \text{ см/с}$$

3. Величина импульса носителя в графене не связана со скоростью, а только с его энергией (как у фотона)

$$p \neq m v$$



# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ГРАФЕНА

$$\varepsilon_p = \pm v_0 |\mathbf{p}|$$

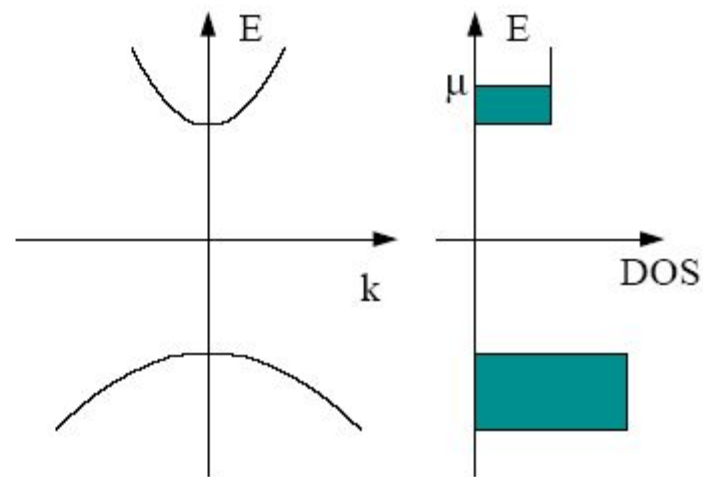
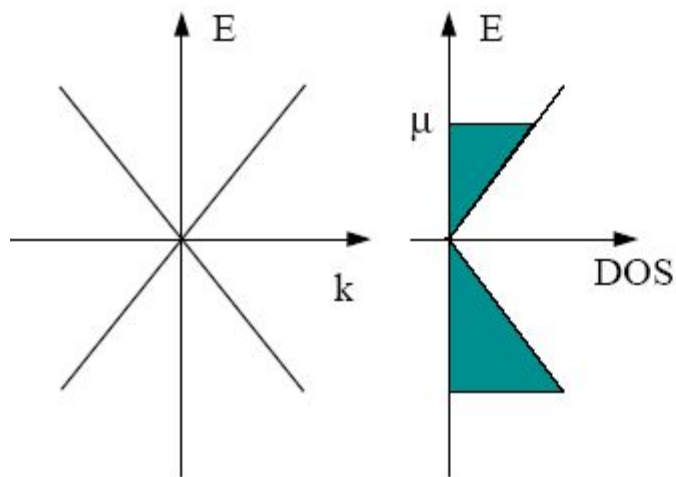
**Графен**

НУЛЕВАЯ ШИРИНА  
ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

ЛИНЕЙНЫЙ СПЕКТР

$$\varepsilon_p = \frac{p^2}{2m}$$

**2D инверсионный слой в Si**



$$n_S = \frac{\varepsilon_F}{\pi \hbar^2 v_0^2} = \frac{k_F^2}{\pi}$$

$$g_{2D}(\varepsilon_F) = \frac{dn_S}{d\varepsilon_F} = \frac{2\varepsilon_F}{\pi \hbar^2 v_0^2}$$

Плотность состояний

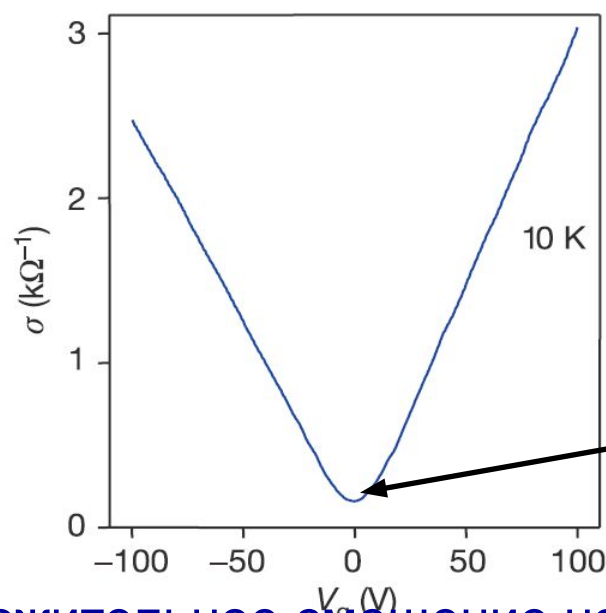
$$n_S = \frac{m \varepsilon_F}{\pi \hbar^2} \propto k_F^2$$

$$g_{2D} = \frac{m}{\pi \hbar^2}$$



# ЭФФЕКТ ПОЛЯ В ГРАФЕНЕ

Проводимость как функция напряжения на затворе



Novoselov et al. Nature **438** (2005) 04233

Точка  
электронейтральности

Эффект поля: положительное смещение на затворе индуцирует в графене электроны, отрицательные - дырки

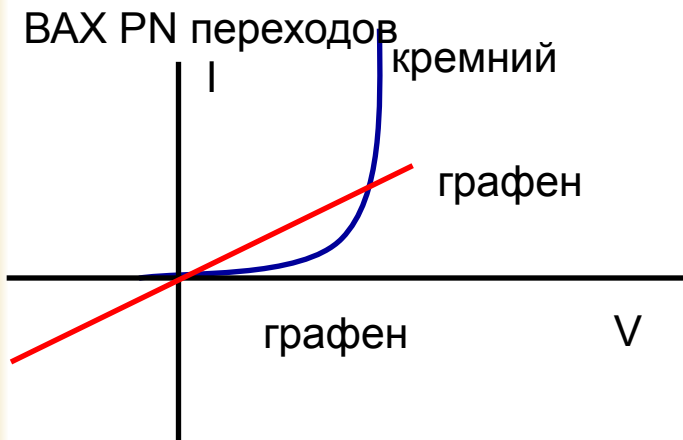
В точке электронейтральности не очень большое сопротивление (~нескольких кОм на квадрат), что плохо для цифровых транзисторов!

Квантовые эффекты затрудняют применение в электронике графеновых полевых структур



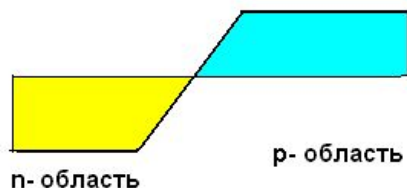


# Туннельная генерация и рекомбинация в графеновом P-N переходе



**PN переход в графене – это РЕЗИСТОР!**

Ток в графеновом PN-переходе эквивалентен аннигиляции (прямое смещение) и генерации (обратное смещение) электронно-дырочных пар



В графене этот эффект эквивалентен межзонному зинеровскому туннелированию в полупроводнике с нулевой шириной запрещенной зоны

Подбарьерное туннелирование релятивистских частиц известно в КЭД как парадокс Клейна

**НЕВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАТЬ В ГРАФЕНЕ PN ПЕРЕХОД, БЛОКИРУЮЩИЙ ТОК !**



## Электрические проблемы с графеном

Отсутствие энергетической щели – конечная проводимость при нулевом затворном напряжении – малое отношение токов в открытом и закрытом состоянии ( $I_{on}/I_{off} < 10$ )

Графен – это почти металл!

Непосредственно графен не может быть использован в полевых транзисторах – необходимо индуцировать запрещенную зону

**Как это можно сделать?**

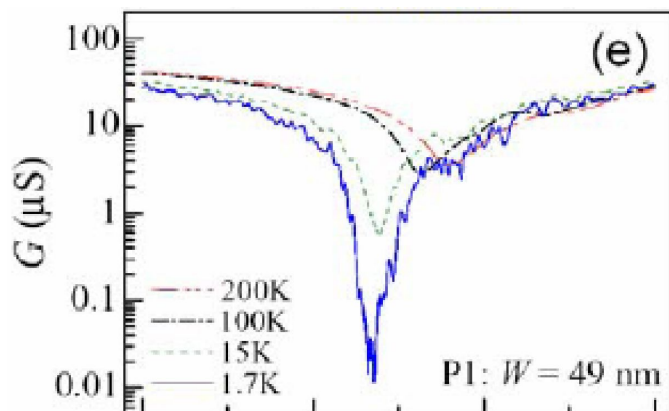


# ГРАФЕНОВЫЕ НАНОЛЕНТЫ

**Графеновые наноленты (ГНЛ)** – нарезанные из графена ленты с шириной  $\sim 10$  нм имеют запрещенную зону  $> 0.1$  эВ (благодаря поперечному квантованию), что позволяет увеличить отношение токов  $I_{on}/I_{off}$  до значений,  $> 10^3$  !

**Проблема:** доказано, что такие ленты устойчивы, но:

- ГНЛ сложно изготовить, особенно с хорошей воспроизводимостью параметров
- Подвижность в ГНЛ резко падает из-за рассеяния на несовершенных границах



Уже лента – шире запрещенная зона, [Kim, 2008]



# ДВУХСЛОЙНЫЙ ГРАФЕН

**Двухслойный графен** – имеет параболический спектр с малым значением эффективной массы  
Появляется возможность индуцировать запрещенную зону с помощью внешнего электрического поля

**Проблема:** Фиксированное внешнее электрическое поле затрудняет электростатическую модуляцию тока, лежащую в основе всех полевых приборов



# ПРОБЛЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЩЕЛИ В ГРАФЕНЕ НА СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОДЛОЖКАХ

Эквивалентные атомы элементарной ячейки **графена** на подложке с близкой симметрией ( например, гексагональная решетка **нитрида бора** ) оказываются в разном окружении, что теоретически может привести к появлению щели в энергетическом спектре графена

**Проблема:** Экспериментальная ситуация противоречивая. Похоже, по каким-то причинам это сделать , по крайней мере, сложно.



# Возможность создания барьеров за счет «родных» изоляторов

## СОЗДАНИЕ «РОДНЫХ» ИЗОЛЯТОРОВ ЗА СЧЕТ ПАССИВАЦИИ БОЛТАЮЩИХСЯ ПИ-СВЯЗЕЙ УГЛЕРОДА ГРАФЕНА

**ГРАФАН (C-H)** – полупроводник, образующийся за счет насыщения связей углерода водородом

**НЕДОСТАТОК:** Термическая неустойчивость. Фактически это пластик, отдающий водород при повышенной температуре.

## ФТОРГРАФЕН (FLUOROGRAPHENE)

[Manchester, 2010] – двумерный тефлон C-F

- Ширина  $E_g \sim 3$  эВ,
- Удельное сопротивление  $10^{12}$  Ом на квадрат
- Термическая и механическая стабильность

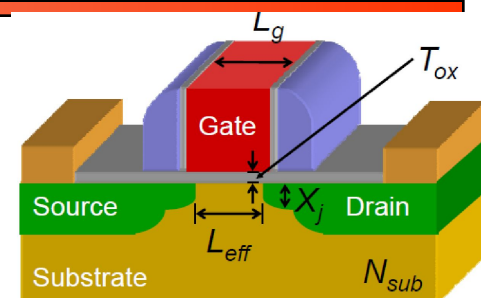
**Возможность создания искусственных барьеров в рамках единой технологии открывает дополнительные возможности!**



# ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

## ТЕМ НЕ МЕНЕЕ:

НЕВОЗМОЖНОСТЬ ПЕРЕКРЫТЬ ТОК,  
ОБУСЛОВЛЕННАЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ  
СВОЙСТВАМИ **ПРОТЯЖЕННОГО** ГРАФЕНА ДЕЛАЕТ  
ПРАКТИЧЕСКИ НЕВОЗМОЖНЫМ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В  
**КЛАССИЧЕСКИХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ ЦИФРОВОЙ**  
**ЭЛЕКТРОНИКИ**



**НО ЕСТЬ ЕЩЕ АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА,**  
В КОТОРОЙ БЛОКИРОВКА ТОКА НЕ ИГРАЕТ СУЩЕСТВЕННОЙ РОЛИ



# Аналоговая электроника

Аналоговый сигнал на входе (затворе) преобразуется в усиленный сигнал на выходе (на стоке) транзистора

С ростом частоты входного сигнала усиление падает

Пороговая частота (частота отсечки), соответствующее единичному усилению

$$f_{\text{отсечки}} = \frac{g_m}{2\pi W L C_{GG}}$$

В аналоговых усилителях можно использовать основное практическое преимущество графена – высокую подвижность!!!

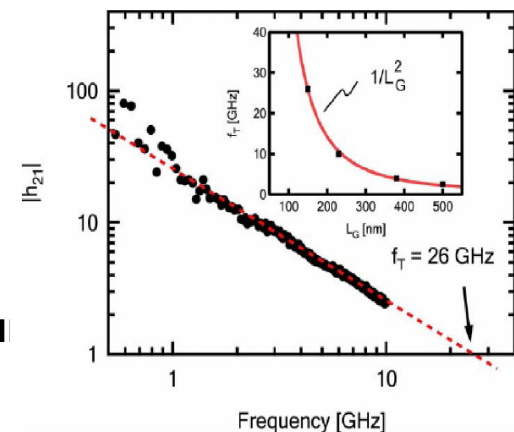




# Высокочастотная (ВЧ) электроника

## ВЧ ЭЛЕКТРОНИКА – ТРАДИЦИОННАЯ ВОТЧИНА ВОЕННЫХ

- До 1980 г. только военные применения
- Конец 1990-х: взрывное появления гражданского рынка мобильной
- После 2000 г: Активное развитие кремниевых КНИ ВЧ техни  
Достижение уровня 500 МГц ( для длин канала 90 нм) – нелинейности из-за короткоканальности и возрастание роли паразитных элементов
- 2005 : появление графена (на порядок более высокая подвижность)
- 2010 Samsung и IBM (MIT) – 230 ГГц для  $L = 240$  нм – **лучший показатель для такой длина канала среди приборов всех типов!!!**



# Графен для высокочастотной электроники

## ПРОГРАММА МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ США

### «УГЛЕРОДНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВЯЗИ»

#### CERA (CARBON ELECTRONICS FOR RF APPLICATIONS)

- Разработка ИС для ВЧ связи, основанных на углеродных (графеновых) технологиях.
- Программа, поддерживаемая правительственным военным агентством DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), ставит своей целью создание графеноэлектронных средств с беспрецедентными характеристиками для широкополосной связи, радарных систем и т.п.
- Ключевым элементом программы является создание ультрабыстродействующего графенового полевого транзистора, позволяющего разрабатывать широкополосные (> 90 ГГц) маломощные и малопотребляющие усилители.
- Подчеркивается особая роль графена, как наиболее перспективного кандидата для создания военных систем связи следующего поколения. Программа CERA стартовала в июле 2008 года и ее завершение ожидается в сентябре 2012.



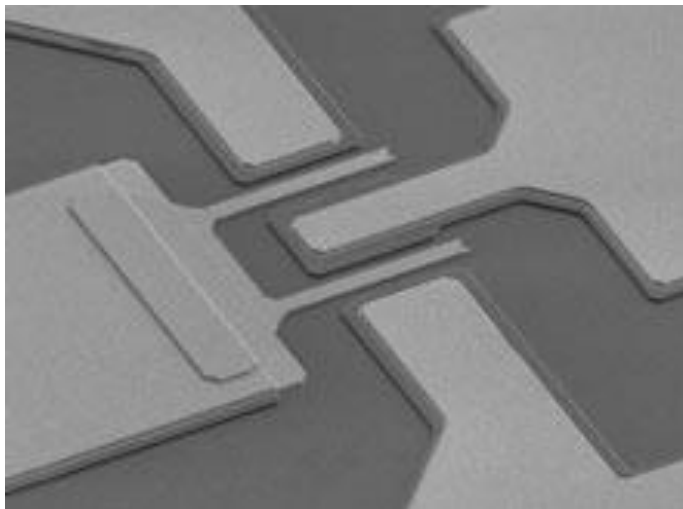
# Графен для высокочастотной электроники

CERA (**C**ARBON **E**LECTRONICS FOR RF **A**PPPLICATIONS)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОТ ДВУХ ГРУПП (обе финансируются военными)

- 1) HRL Laboratories (родственная Boeing и NRL) в Калифорнии
- 2) IBM T. J. Watson Research Center

## Планарная технология HRL:



- (1) Возгонка атомов кремния при 1200 °C с поверхности SiC с последующей рекристаллизацией сотовой структуры графена
- (2) Нанесение тонкого изолятора ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  или  $\text{HfO}_2$  для создания верхнего затвора
- (3) Максимальная частота – 14 ГГц при длине затвора 2 мкм

ЭТО РЕЗУЛЬТАТЫ 2008 г.!



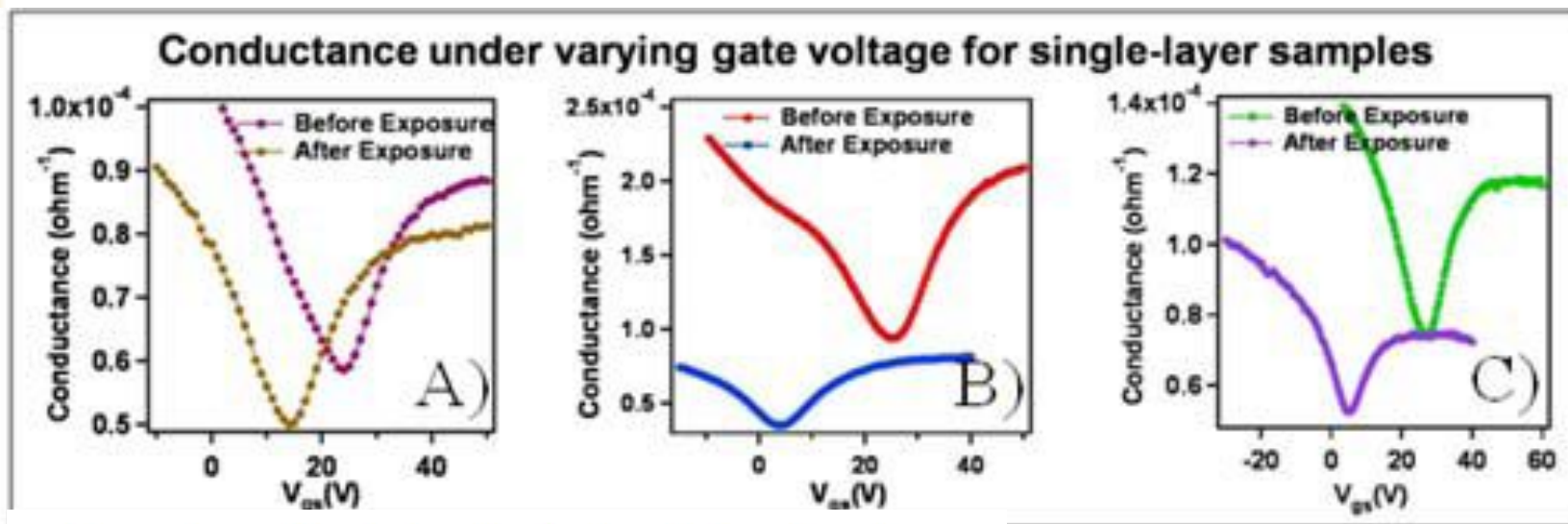
# Радиационный отклик графеновых структур

Программа Ежегодной американской конференции NSREC 2010

## Radiation Effects in Carbon-Based Electronic Materials

*C. D. Cress, J. T. Robinson, F. K. Perkins, U.S. Naval Research Laboratory*

Total ionizing dose (TID) effects are investigated in single walled carbon nanotube and graphene field effect transistors. Device degradation and threshold voltage / Dirac point shifts with TID are discussed.



## Detection of Ionizing Radiation Using Graphene Field Effect Transistors

Michael Foxe\*, *Student Member, IEEE*, Gabriel Lopez\*, *Student Member, IEEE*, Isaac Childres, Romaneh Jalilian, Caleb Roecker, John Boguski, Igor Jovanovic<sup>#</sup>, and Yong P. Chen<sup>#</sup>, *Member, IEEE*



# Основные задачи моделирования полевых транзисторов на основе графена

- Электростатика затворных структур графен – изолятор – затвор
- Учет роли поверхностных состояний и квантовой емкости
- Модель ВАХ графенового транзистора
- Малосигнальные емкостные характеристики графеновых ПТ
- Частота отсечки ВЧ транзистора

Особенности:

- специфика и невозможность использовать результаты для Si MOSFET
- почти полное отсутствие теоретических работ по этим темам ;
- очень малое количество экспериментальных работ по измерениям полной ВАХ ( $< 10$ );

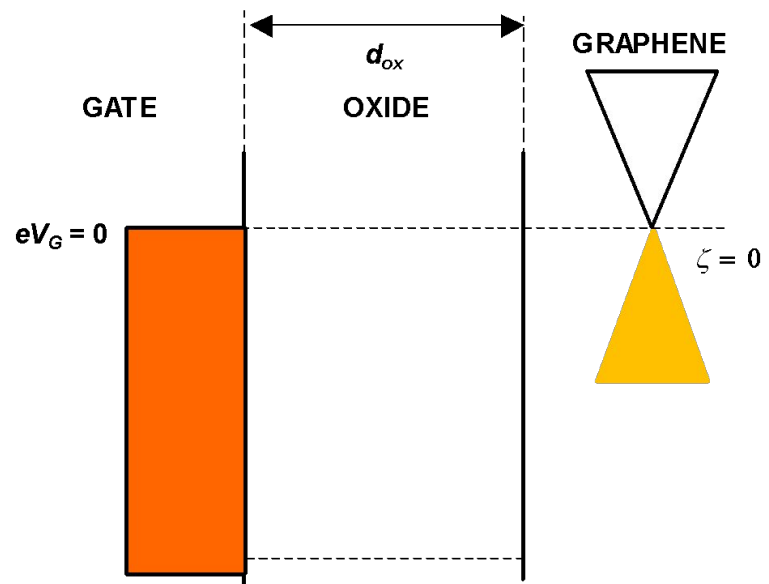
G.I. Zebrev, “Diffusion-drift theory of GFETs”, in *Graphene: theory and applications*, INTECH, 2011

G.I. Zebrev, Graphene nanoelectronics: electrostatics&kinetics, SPIE Proc. 2008



# Зонные диаграммы раздела графена с изолятором

Зонная диаграмма ( $V_g = 0$ )



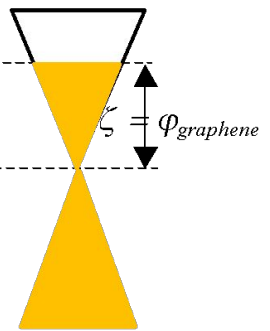
GATE

$eV_g > 0$

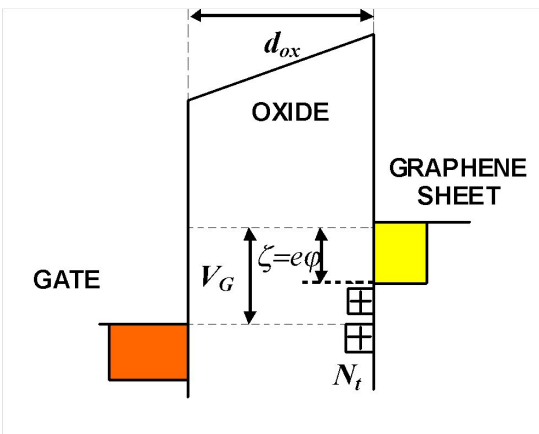
$d_{ox}$   
OXIDE

GRAPHENE

$e(\Phi_{gate} - \Phi_{graphene})$



Зонная диаграмма ( $V_g > 0$ )



# Поверхностные состояния в графеновых структурах

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ СОСТОЯНИЯ (INTERFACE TRAPS)

на поверхности и границе раздела – основной бич всех полевых структур

Джон Бардин в 1939 г. впервые осознал, что перезаряжающиеся дефекты на поверхности полупроводника препятствуют проникновению электрического поля в его объем.

По этой причине тривиальный МОП транзистор был впервые изготовлен в 1960 году, в то время как гораздо менее тривиальный биполярный транзистор в 1948 г.

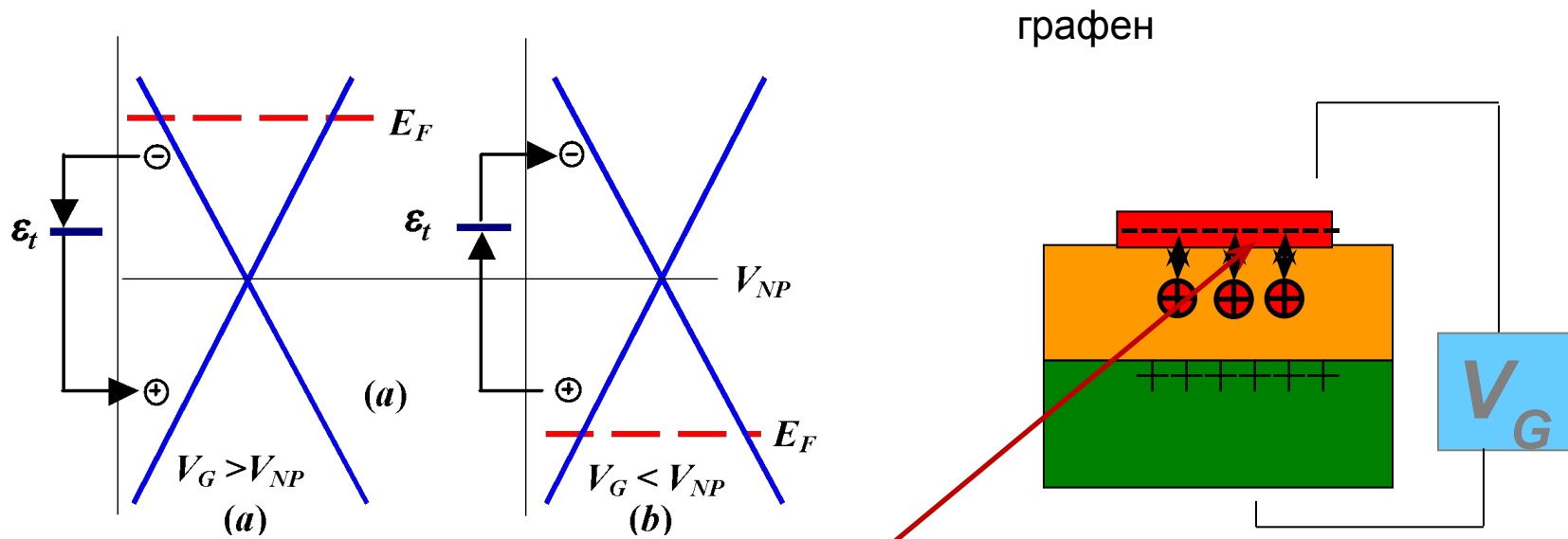
Проблема ПС практически решена в современной Si КМОП технологии (за технологической счет минимизации )

В графеновой электронике она еще только осознается!



# Перезаряжаемые дефекты (ПС) на границе раздела графен-изолятор

Учет поверхностных состояний (емкостей) – необходимое условие правильного описания электростатики всех полевых приборов!



Обратимая перезарядка поверхностных состояний «графен – изолятор»

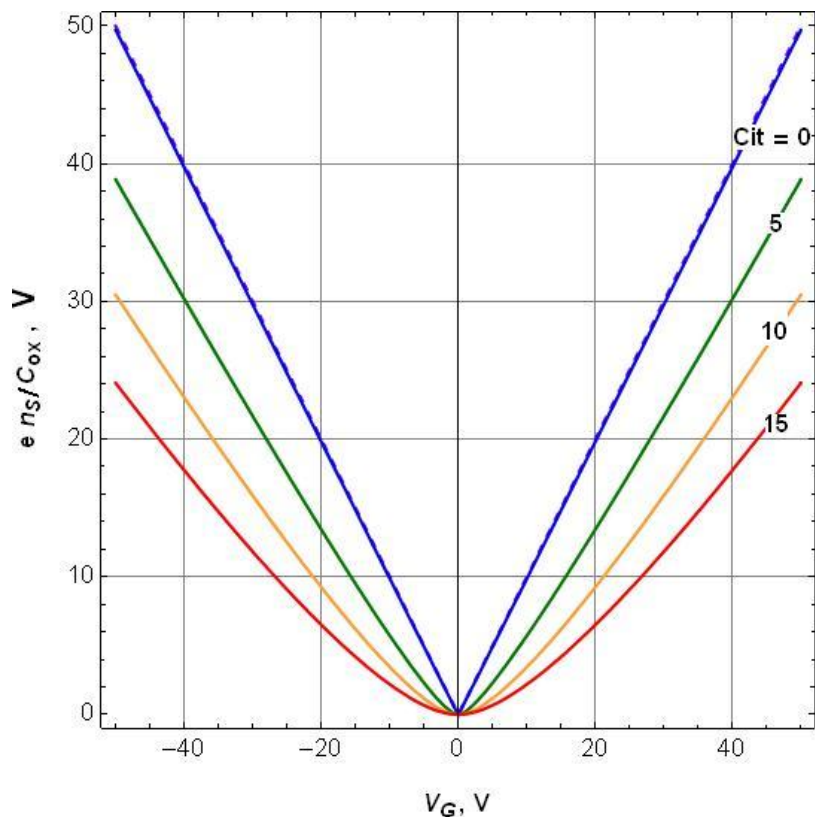
Перезаряжаемые дефекты = поверхностные состояния



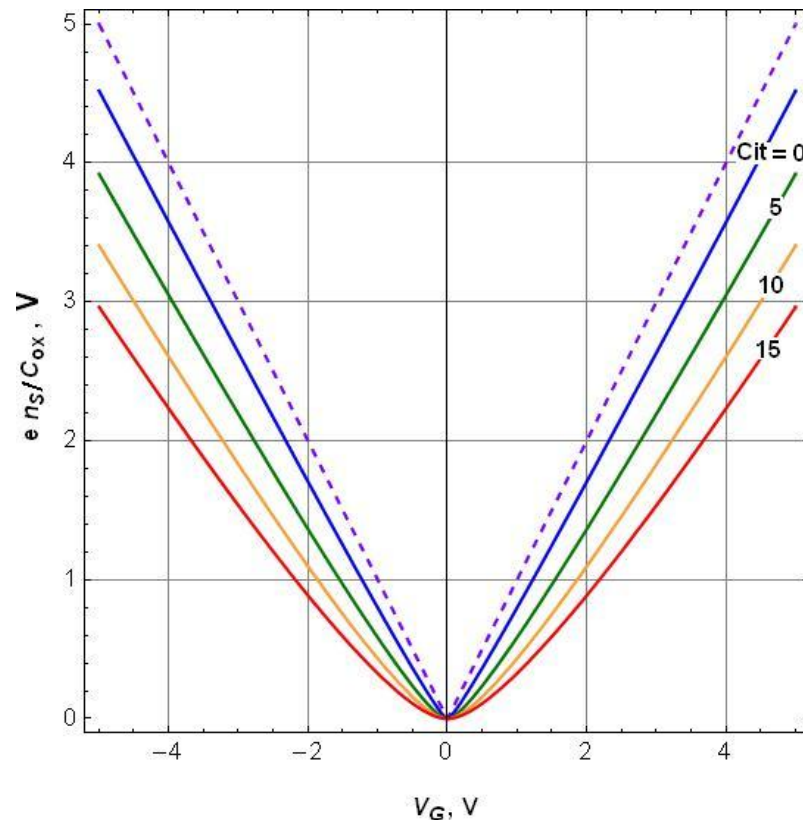


# Плотности носителей в графене как функции напряжения на затворе

## Влияние емкостей поверхностных состояния



Толщина окисла - 100 нм



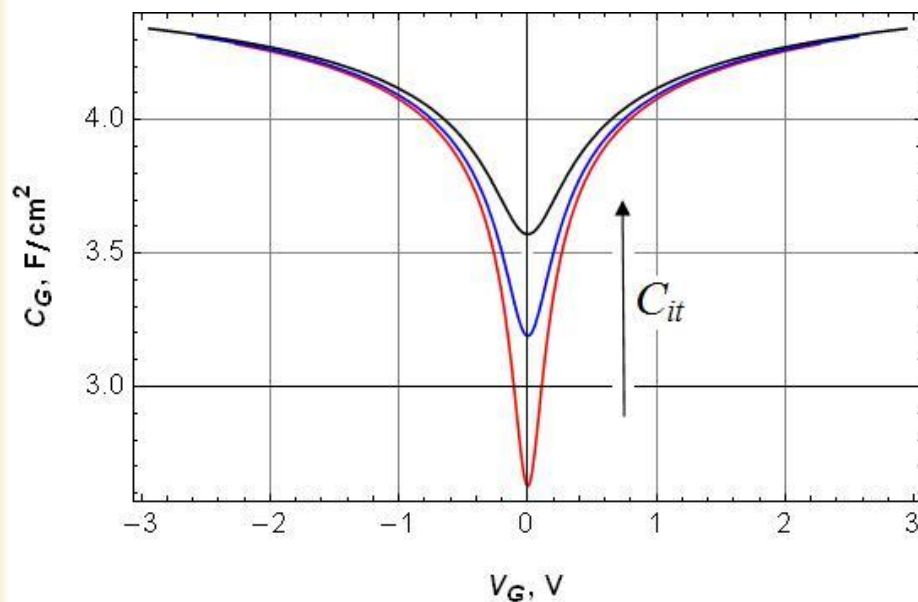
Толщина окисла - 10 нм

$$1 \text{ фФ/мкм}^2 = 6 \cdot 10^{11} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$$



# Затворные емкостные характеристики графена с изолятором

Влияние емкостей поверхностных состояния на емкостные характеристики



$$C_{CH} = e \frac{dn_S}{dV_G} = C_{ox} \left[ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + 2|V_G - V_{NP}|/V_0 \right]^{1/2}} \right]$$

Формула получена в 2007 – до последнего времени было не с чем сравнивать



# Квантовая емкость в графене

## “QUANTUM CAPACITANCE IS A HUGE PROBLEM IN GRAPHENE” A. GEIM

Что такое квантовая емкость  $C_q$ ?

Это емкость самого канала по отношению к изменению уровня Ферми в графене (не потенциала затвора)

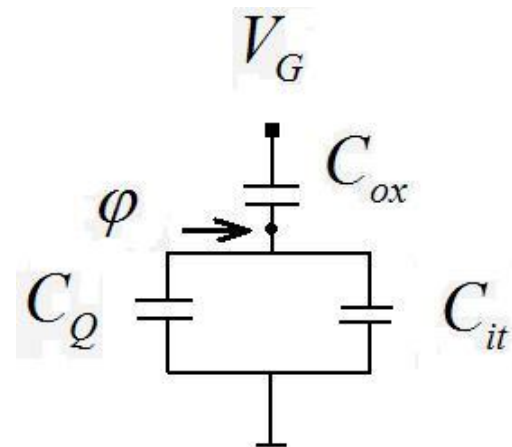
- не зависит от геометрии;
- определяется только фундаментальными константами;
- в эквивалентной схеме параллельна и сопоставима с  $C_{it}$ ;

-Существует в МОПТ но традиционно игнорируется т.к.:

Слишком мала в подпороге по сравнению с  $C_{it}$  и  $C_{depl}$   
Слишком велика в надпороге по сравнению с  $C_{ox}$

В графене квантовую емкость игнорировать невозможно т.к.

- (1) графен всегда почти металл
- (2)  $C_q$  всегда сопоставим с  $C_{it}$  и  $C_{ox}$



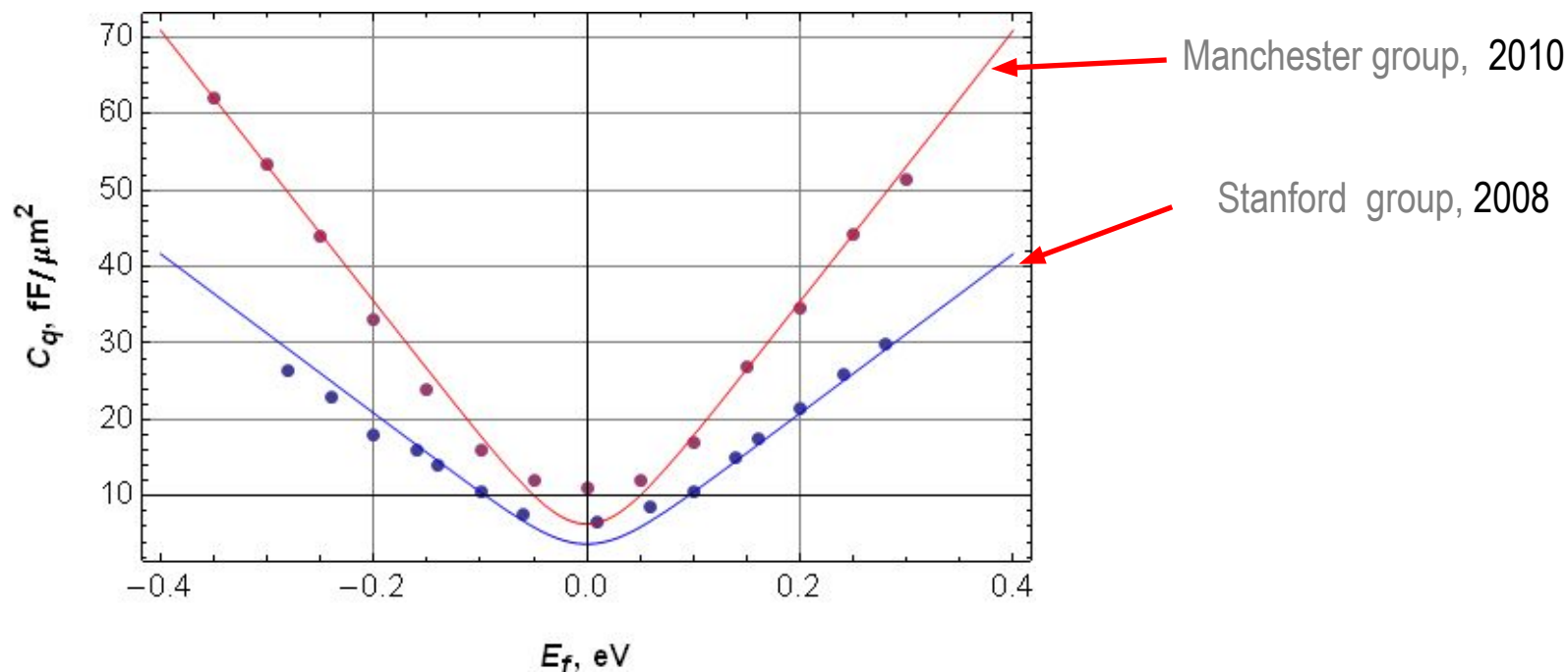
Эквивалентная схема GFET

**ЗАДАЧА:** РАЗДЕЛИТЬ КВАНТОВУЮ ЕМКОСТЬ  $C_q$  и ЕМКОСТЬ ПС  $C_{it}$  !



# Экспериментальные данные по квантовой емкости графена с изолятором

Игнорирование учета поверхностных состояний приводит к разногласиям в определении зависимости квантовой емкости от уровня Ферми!



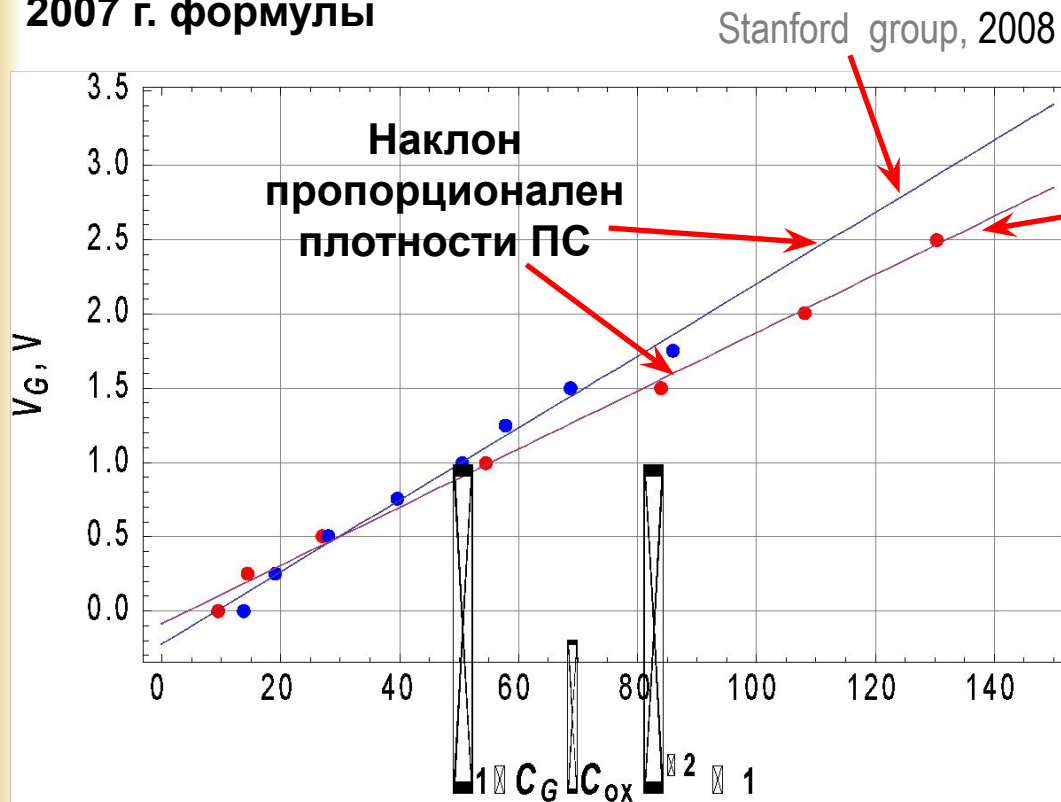
Эта зависимость должна быть универсальной!

Но пересчеты, выполненные в разных группах без корректного учета плотностей ПС дают совершенно разные результаты с разными значениями «графеновой скорости»



# Метод извлечения плотности ПС по емкостным характеристикам

Обработка низкочастотных емкостных характеристик с помощью полученной в 2007 г. формулы



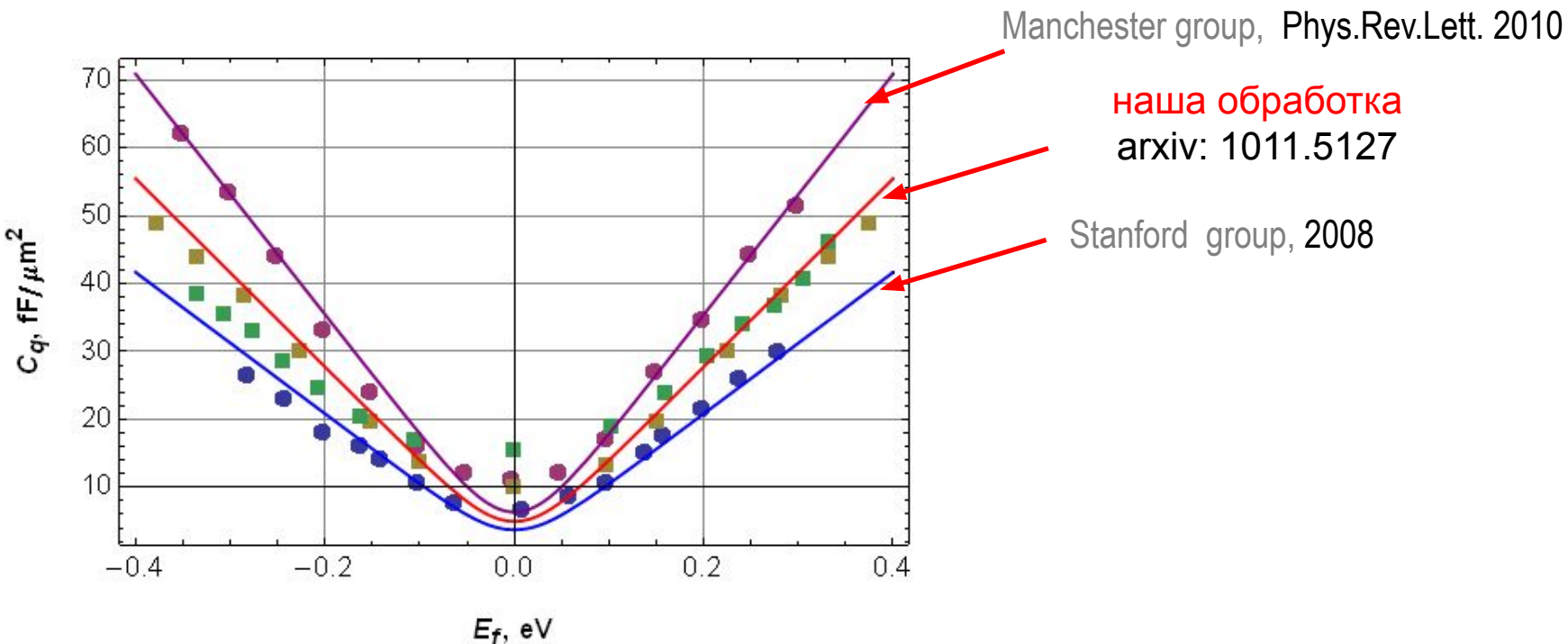
$$C_{CH} = e \frac{dn_s}{dV_G} = C_{ox} \left[ 1 - \frac{1}{[1 + 2|V_G - V_{NP}|/V_0]^{1/2}} \right]$$

Из наклона получаем плотность ПС

1. Переставиваем экспериментальные данные
2. Метод наименьших квадратов дает величину наклона



# Зависимости квантовой емкости от уровня Ферми для 2-х экспериментальных групп и наш пересчет



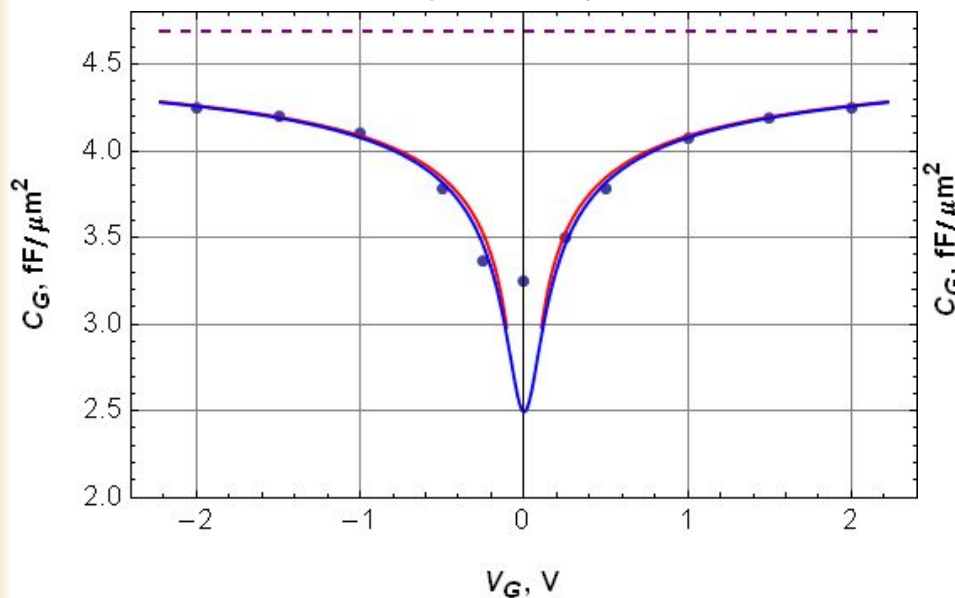
С учетом найденных для каждой структуры плотностей ПС зависимости квантовой емкости легли на одну кривую с одним значением  $v_F$



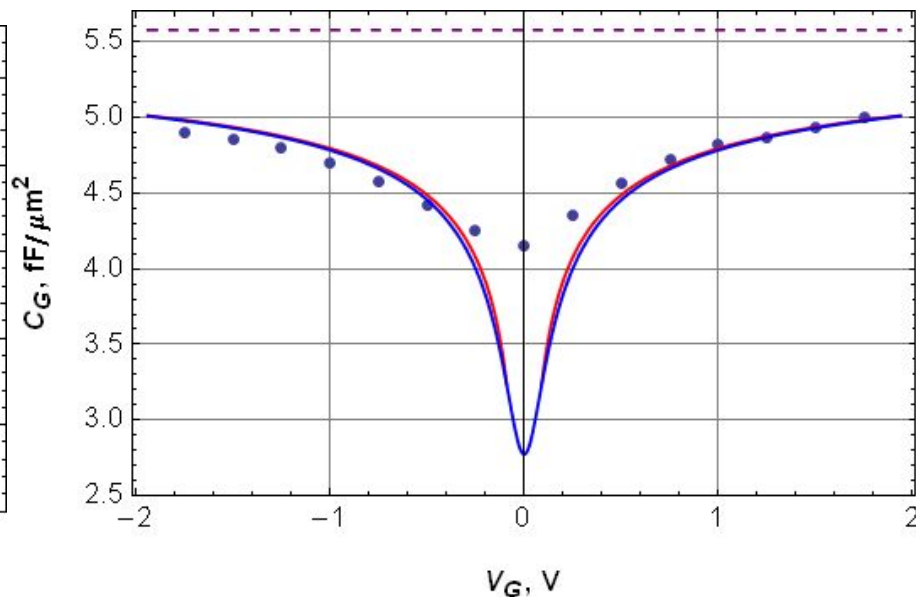
# Экспериментальные данные по квантовой емкости графена с изолятором

Экспериментальные емкостные характеристики (точки) и наш расчет с учетом извлеченных плотностей ПС

Manchester group, Phys.Rev.Lett. 2010



Stanford group, 2008

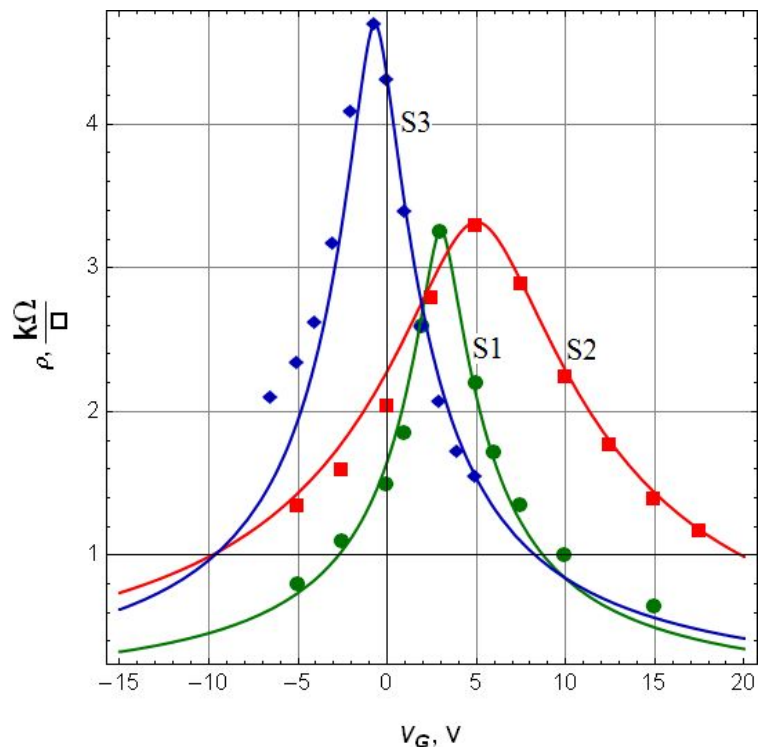


Расчет по полученным нами формулам для идеального графена с учетом извлеченных по нашей методике плотности ПС

Роль беспорядка в точке нейтральности: отличие от идеальности за счет электронно-дырочных луж



# Моделирование сопротивление как функции затворного напряжения



Experimental points: Kozikov et al., Phys.Rev., 2010

3 образца с разной т.н. «шириной дираковского пика»- происхождение которой не обсуждалось

**Мы полагаем, что ширина пика также обусловлена плотностью ПС!**

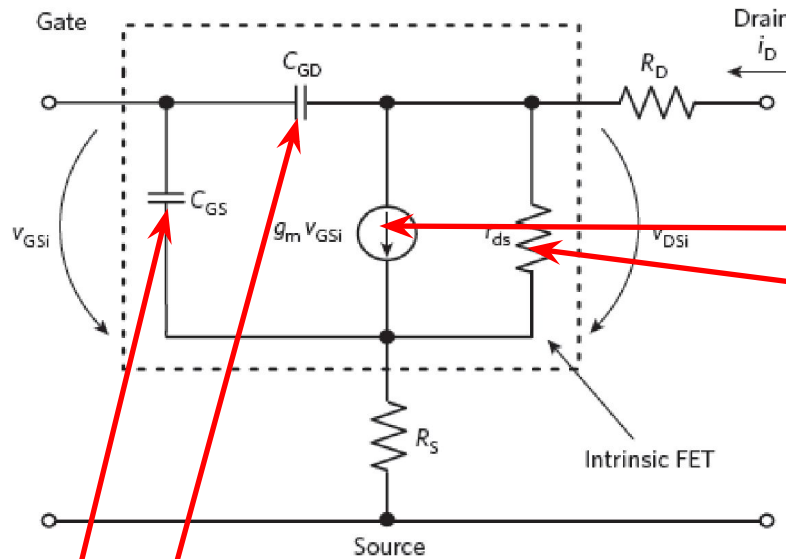
Подвижности были взяты из самой работы подгонялись только плотности ПС - почти идеальное описание

Все извлеченные значения плотностей ПС лежат в разумном диапазоне  $10^{12} - 10^{13} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$





# Малосигнальные характеристики высокочастотных графеновых транзисторов



Токовые :

- Крутизна
- Выходная проводимость

Емкостные:

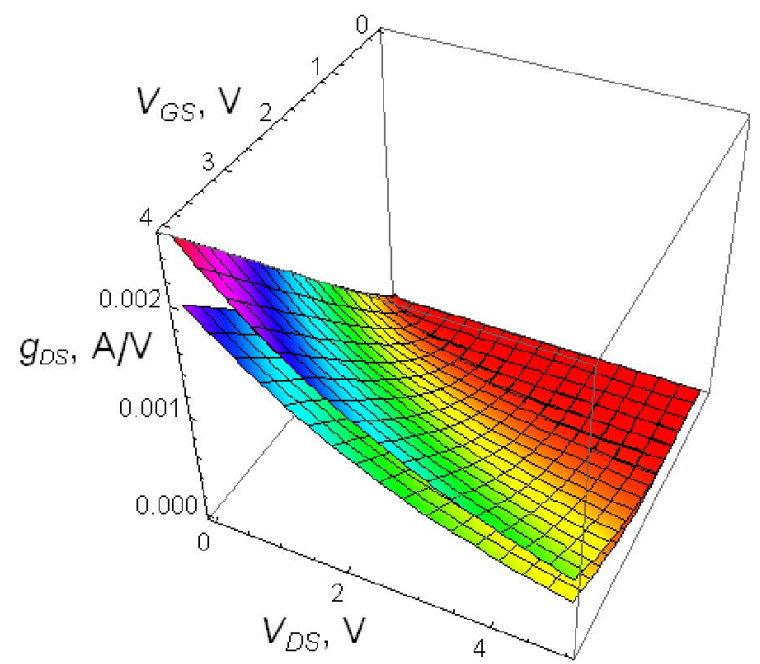
- Емкость затвор-исток
- Емкость затвор-сток

Используя нашу модель ВАХ  
получена выражение для  
полного заряда на затворе

$$Q_G(V_{GS}, V_{DS}) = eWL \int_0^L N_G(x) \frac{dx}{L} = WL \int_0^L C_{ox} [V_{GS} - V_{NP} - \varphi(x)] \frac{dx}{L}$$

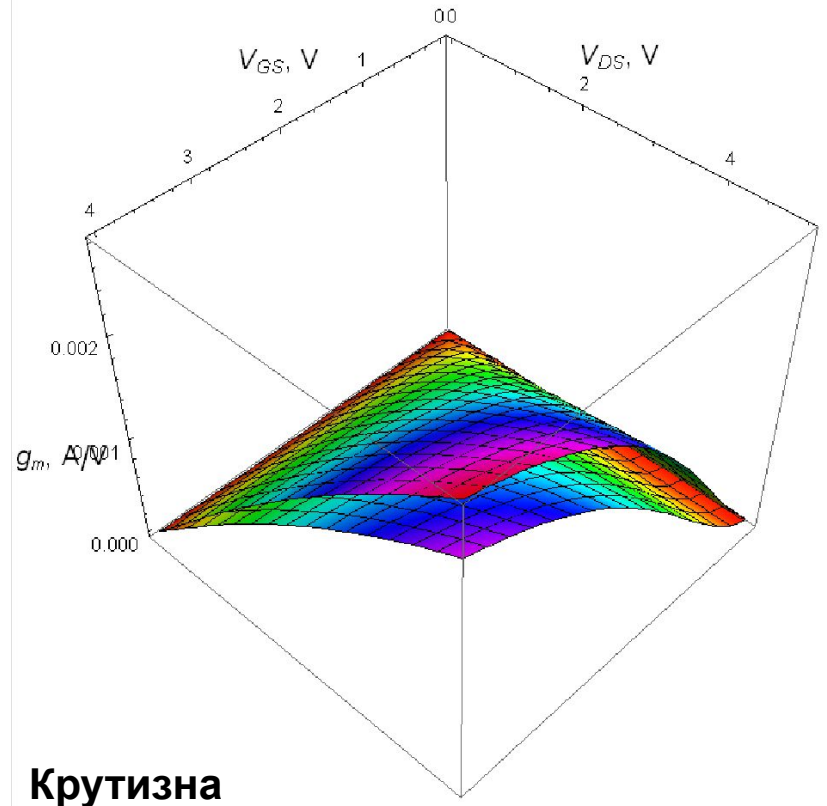


# Выходная проводимость и крутизна ГПТ как функция $V_G$ и $V_D$ для разных плотностей ПС



**Выходной  
кондактанс**

$$g_D = \left( \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right)_{V_{GS}}$$



**Крутизна**

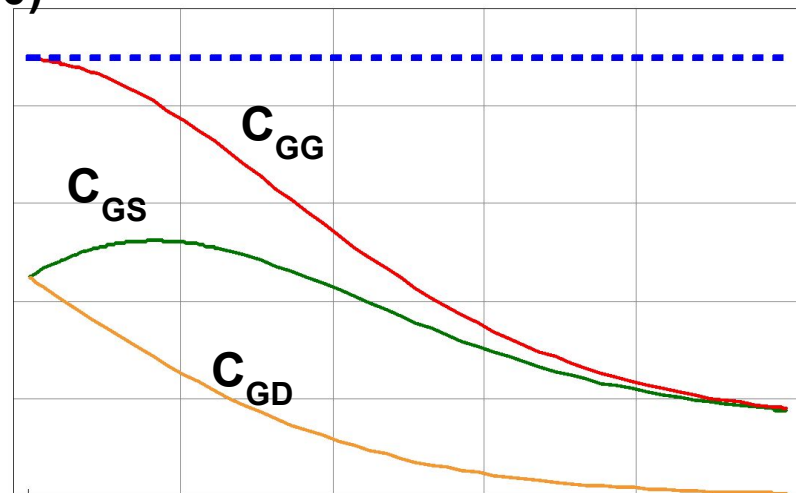
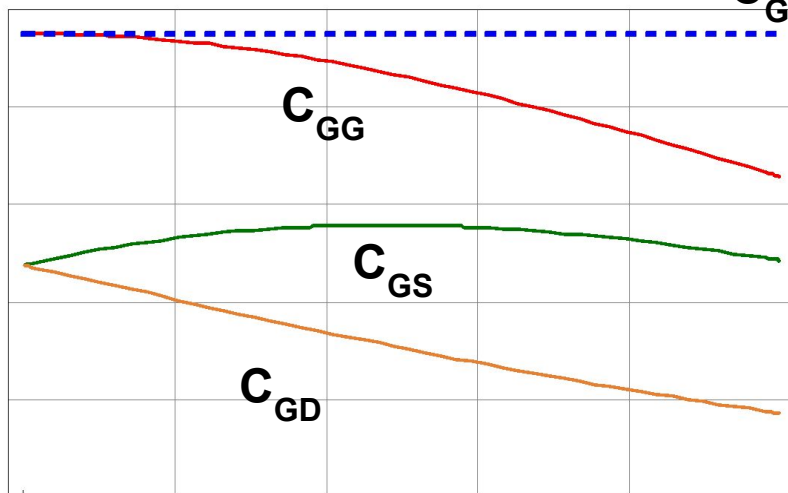
$$g_m = \left( \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right)_{V_{DS}}$$



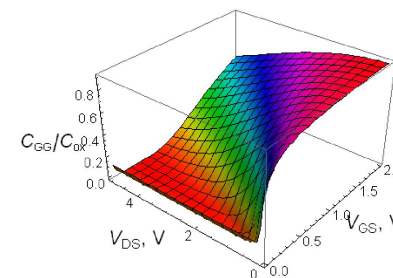
# Емкостные характеристики затвор-исток и затвор-сток как функция $V_{DS}$

Нормированные на  $C_{ox}$  емкостные характеристики (расчет)

$C_G(V_{DS} = 0)$

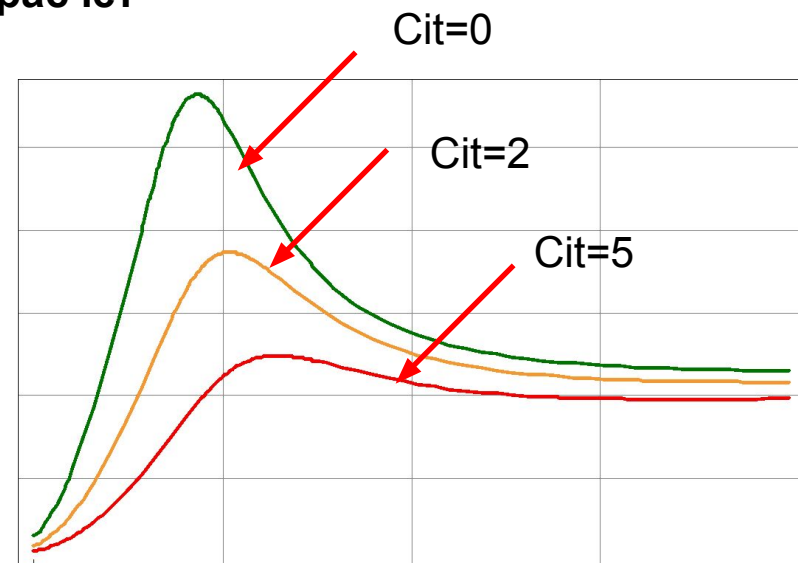
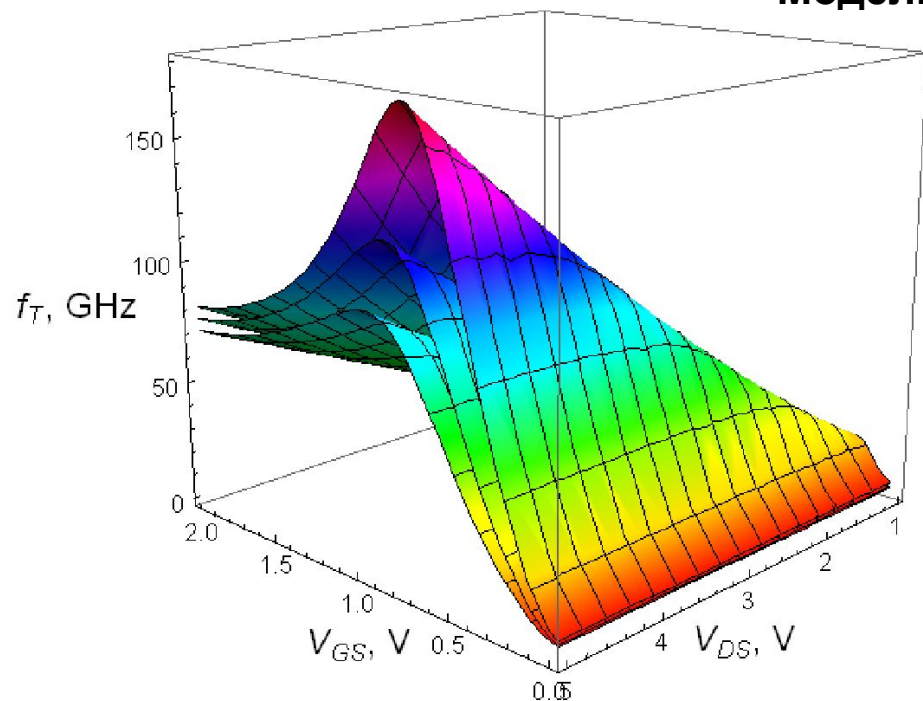


$C_{GG} = C_{GS} + C_{GD}$  - полная емкость затвора



# Частота отсечки при разных плотностях ПС

Модельный расчет



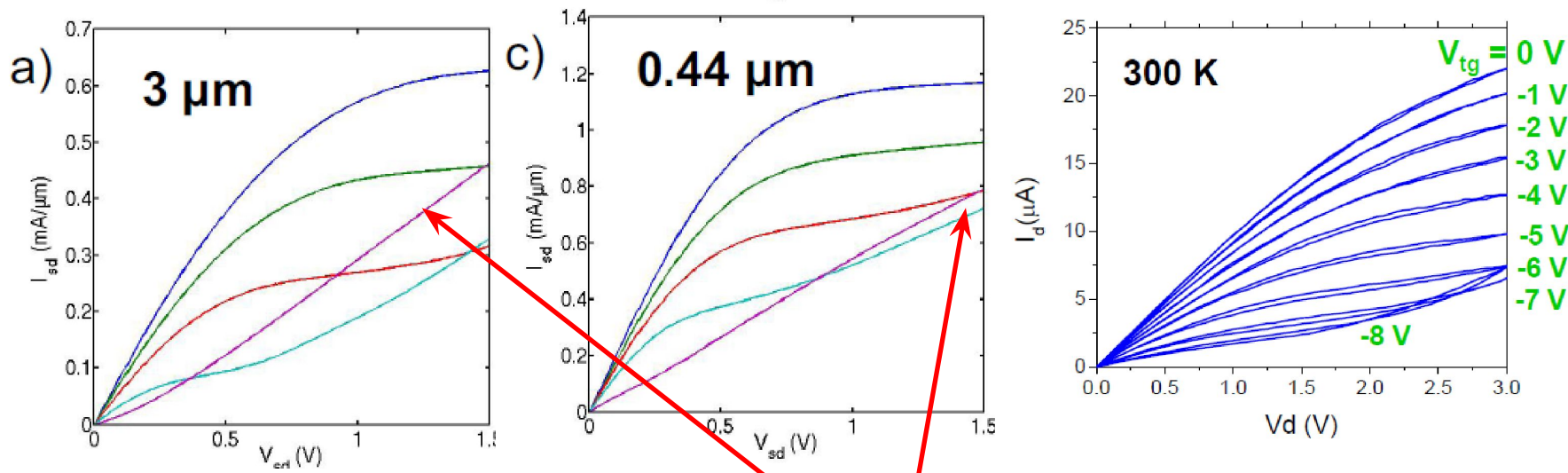
$$f_T = \frac{g_m}{2\pi W L C_{GG}}$$

Cut-off frequency  $f_T$  as function of  $V_{GS}$  and  $V_{DS}$  simulated for parameters  $W = L = 1\mu\text{m}$ ,  $\mu_0 = 1000$ ;  $d_{ox} = 10\text{ nm}$ ,  $\epsilon_{ox} = 4$ ,  $T = 300\text{K}$  and two values of the interface trap capacitances  $C_{it} = 0\text{ fF}/\mu\text{m}^2$  (upper curve),  $2\text{ fF}/\mu\text{m}^2$  and  $5\text{ fF}/\mu\text{m}^2$  (lower curve).



# Несобственная проводимость в точке нейтральности

Эксперимент (December, 2010)



Graphene field-effect transistors based on boron nitride gate dielectrics

Inane Meric<sup>1</sup>, Cory Dean<sup>1,3</sup>, Andrea Young<sup>2</sup>, Jim Hone<sup>3</sup>, Philip Kim<sup>2</sup>, and Kenneth L. Shepard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, <sup>2</sup>Department of Physics, <sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Columbia University, New York, NY, 10027

Tel: (212) 854-2529, Fax: (212) 932-9421, Email: [shepard@ee.columbia.edu](mailto:shepard@ee.columbia.edu)

**Ток при формально меньшей концентрации превосходит ток при большей равновесной концентрации!**

**Это несобственная проводимость: генерация тока в точке нейтральности!**

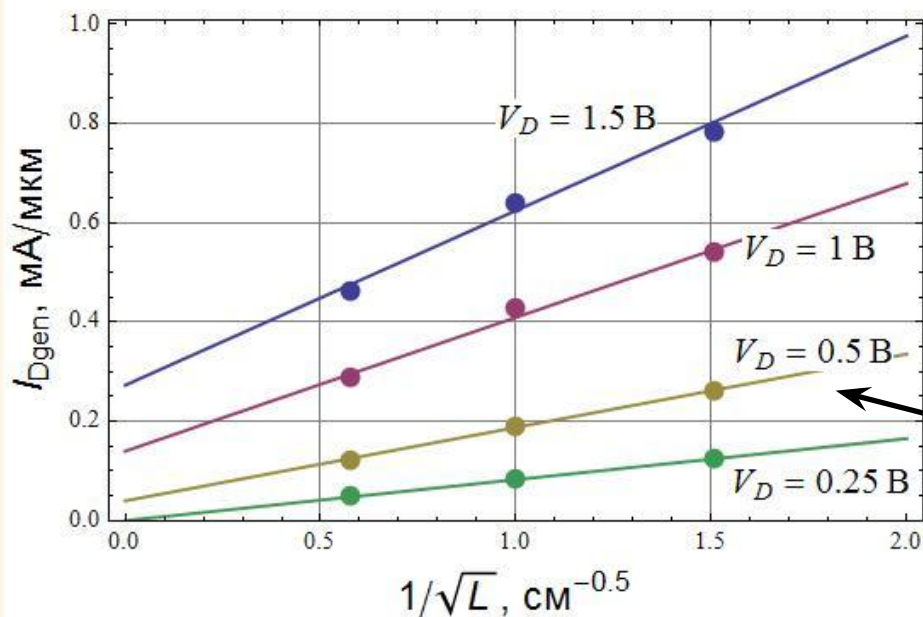
**Природа генерации пока неизвестна точно:**

- Оже-генерация (?)
- Туннельная генерация e-h пар в электрическом поле (?)



# Генерация носителей в собственном графене

Квантовое туннелирование (генерация e-h) из извлеченных плотностей ПС



Плотность генерационного тока как функция  $1/L^{1/2}$  при  $V_G = 0$ ,  $d_{ox} = 8,5$  нм,  $\epsilon_{ox} = 3,9$ ,  $C_{it} = 0$  и различных  $V_D$  (эксп. данные: Meric, 2010)

Наша теория

$$I_{gen} = WL \frac{v_0}{L_F^3} I_0 \left( \frac{\pi L_F^2}{2 \lambda_F^2} \right) \exp \left( -\frac{\pi L_F^2}{2 \lambda_F^2} \right) \propto \frac{1}{\sqrt{L}}$$

Характеристическая особенность туннельно-генерационного тока в графене!

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

- Приблизительный аналог эффекта:
- Туннелирование в pn переходе узкозонного полупроводника;
  - Образование пар электрон-позитрон в сверхсильном электрическом поле – никогда не наблюдался экспериментально (нереализуем)



# НЕОЛИТ?

# ПАЛЕОЛИТ

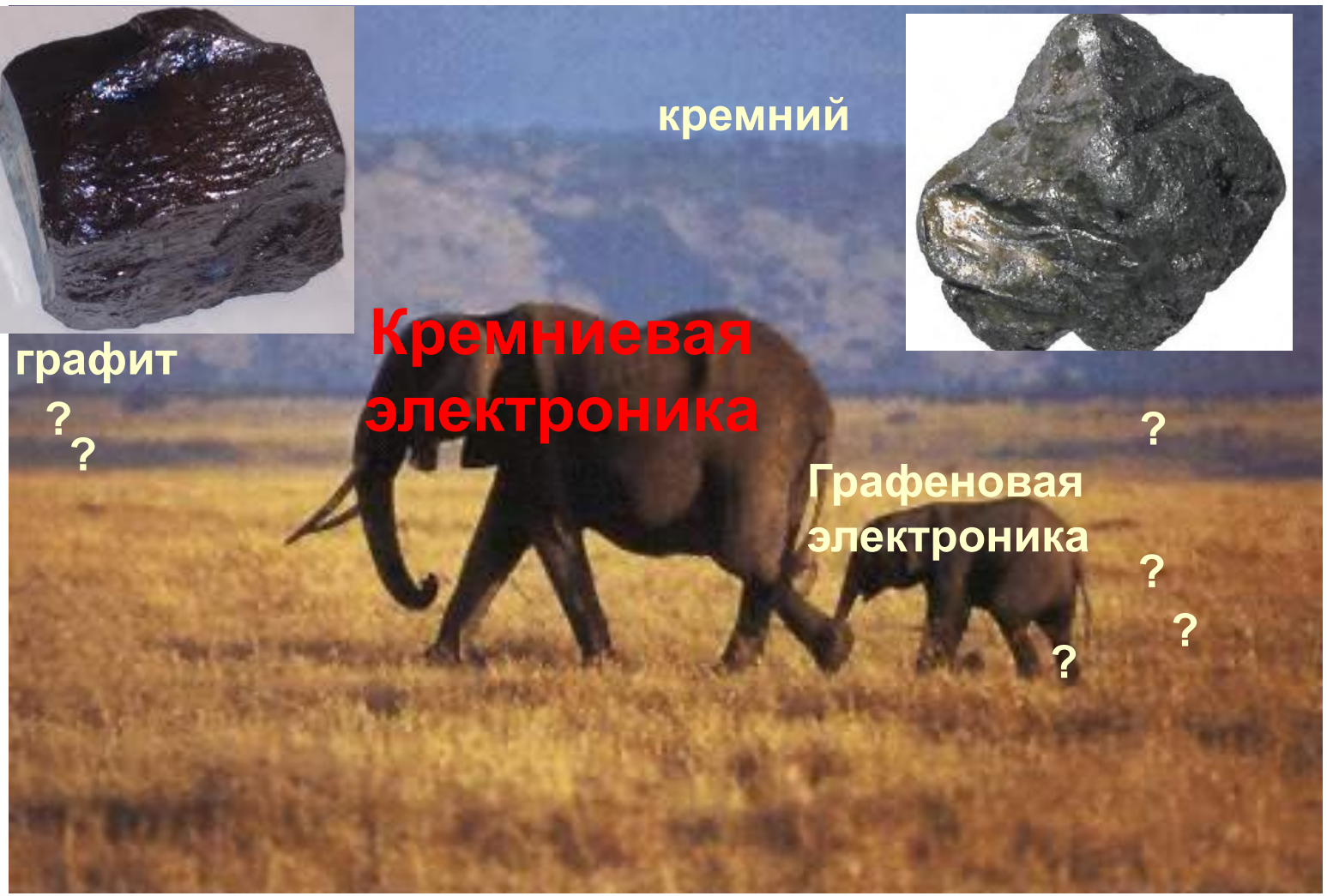


графит

?  
?

**Кремниевая  
электроника**

кремний



Графеновая  
электроника

?  
?  
?



# БУДУЩЕЕ ЗА МОНОСЛОЙНОЙ ЭЛЕКТРОНИКОЙ...?

**Nature Nanotechnology January 30, 2011**

Транзистор на основе **монослоя дисульфида молибдена** шириной 0.5 нм:

- Ширина запрещенной зоны --- 1.8 эВ
- Подвижность --- 200 (не хуже, чем в кремниевых МОПТ)
- On/off --- 100 000 000 ! (лучше, чем в кремниевых МОПТ)
- **УЖЕ очень неплохо...**

**Возможно графен, - первый, но не лучший с точки зрения применений в электронике в целом классе новых монослойных материалов...**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

