

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 SiO_2
- КРЕМНИЙ ИМЕЕТ ПОЧТИ ИДЕАЛЬНУЮ ШИРИНУ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ (~ 1 эВ)
- КРЕМНИЙ ИМЕЕТ ПОЧТИ ИДЕАЛЬНУЮ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА 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

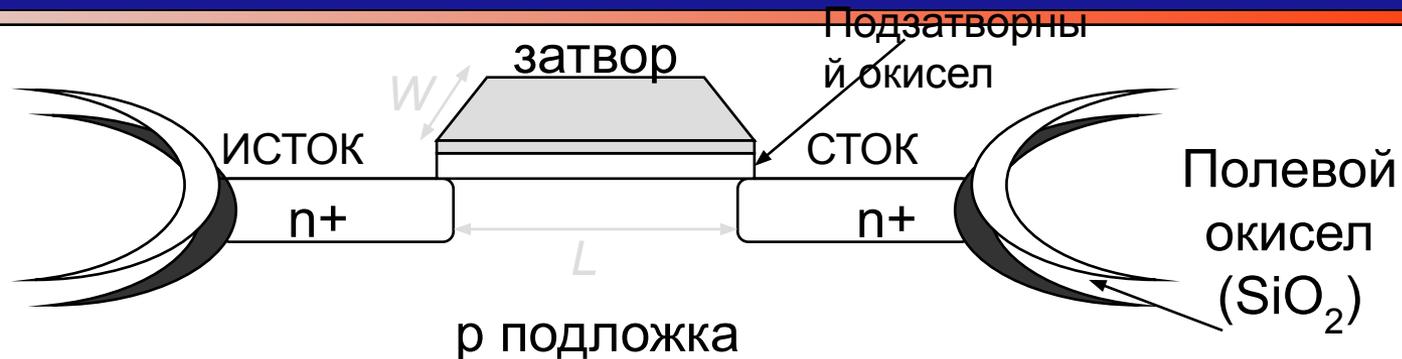


ПОЧЕМУ МОП ТРАНЗИСТОР?

- МОПТ - ПРОСТЕЙШИЙ ПРИБОР, ОСНОВАННЫЙ НА ЗАКОНАХ **КЛАССИЧЕСКОЙ** ФИЗИКИ
- В СИЛУ ПРОСТОТЫ СТРУКТУРЫ МОПТ ПОДДАЕТСЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОМУ МАСШТАБИРОВАНИЮ
- МИЛЛИАРД ПОЧТИ ИДЕНТИЧНЫХ КОПИЙ **МОПТ** НА ПЛОЩАДИ 1 CM^2 !!!



МОП ТРАНЗИСТОР – КЛАССИЧЕСКИЙ ПРИБОР



ПРОЕКТНАЯ НОРМА 32 НМ

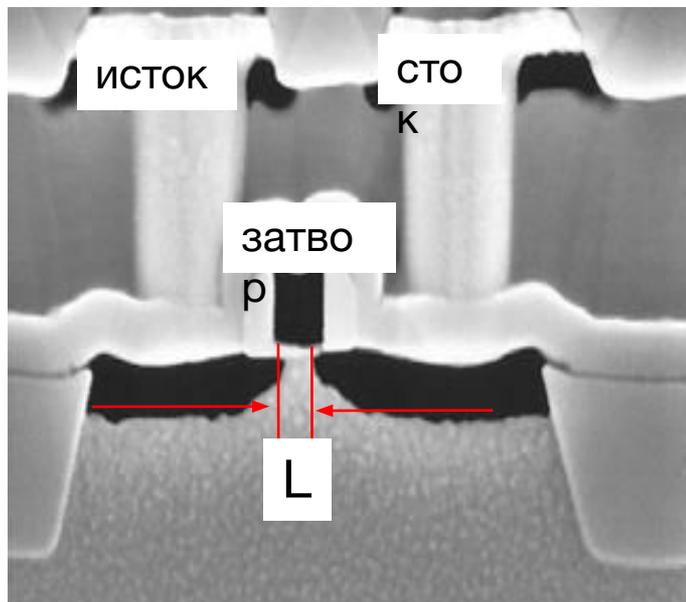
Это длина канала < 20 нм!

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

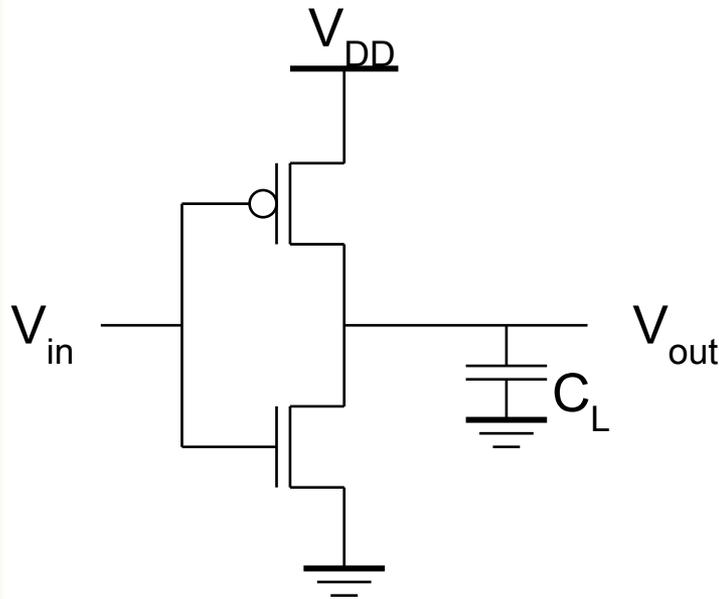
Но вольтамперные характеристики такие же, как у МОПТ с $L = 10$ мкм, **только хуже!**

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



ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ
ВАЖНОСТЬ НАЛИЧИЯ
ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

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

СТОК



Альтернативные материалы для электроники

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



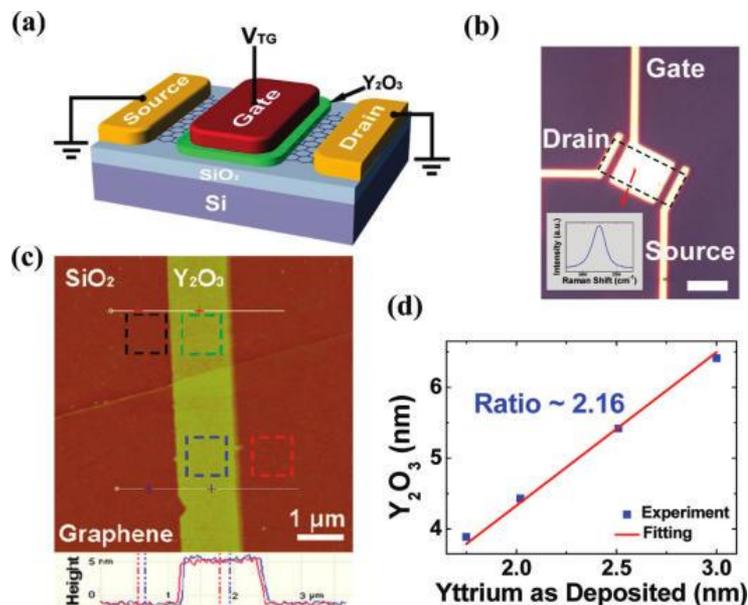
ЦИКЛ ГРАФЕНОВОЙ ЛИХОРАДКИ

КРИВАЯ ГРАФЕНОВОЙ АЖИТАЦИИ

ВИДИМОСТЬ СОБЫТИЙ



Предельные размеры графеновых структур



Quantum Capacitance Limited Vertical Scaling of Graphene Field-Effect Transistor

Huilong Xu, Zhiyong Zhang,^{*} Zhenxing Wang, Sheng Wang, Xuelei Liang, and Lian-Mao Peng^{*}

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!)

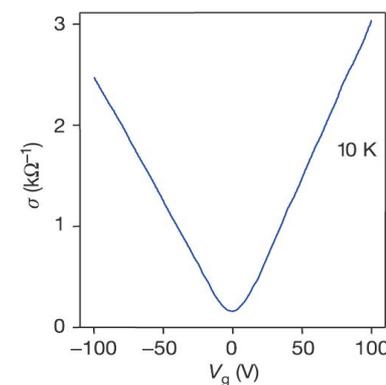
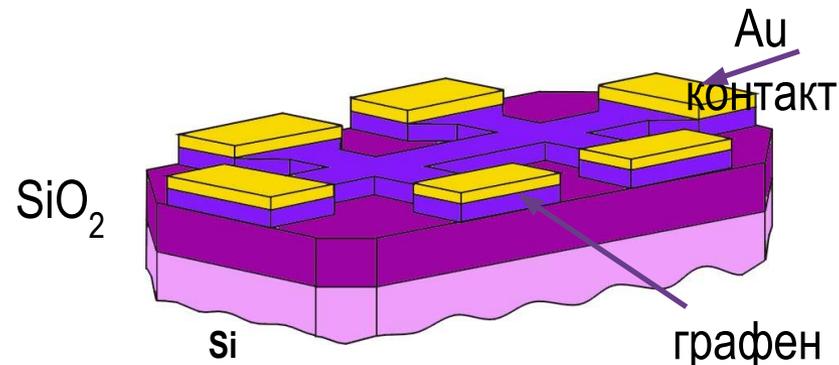
Максимальный плотность тока: в миллион раз больше чем в меди

Рекордная теплопроводность

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

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

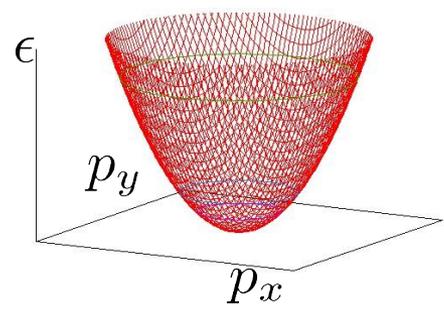
Индукцированная затвором концентрация электронов или дырок до $10^{14} cm^{-2}$



НЕОБЫЧНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОСИТЕЛЕЙ В ГРАФЕНЕ

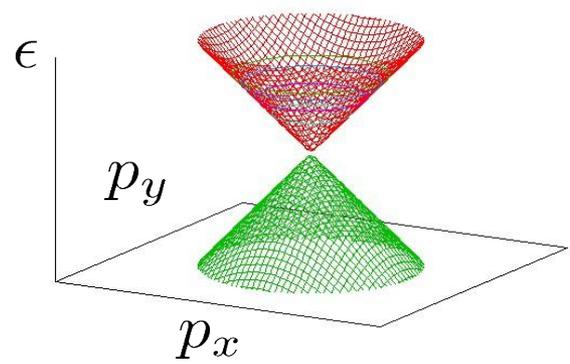
Дисперсия электронов в кремнии

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



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

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

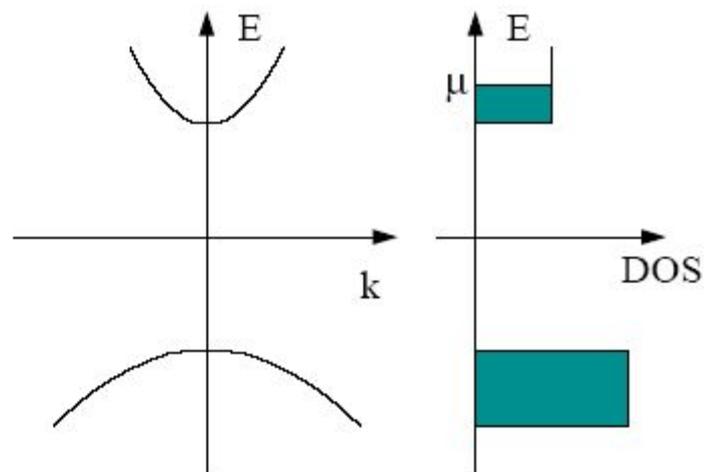
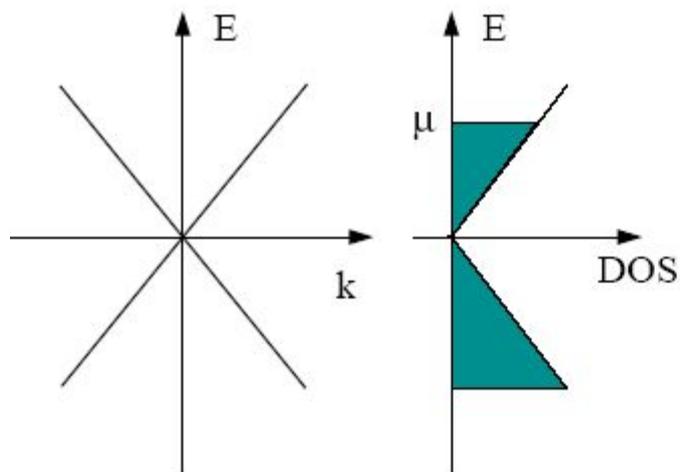
Графен

НУЛЕВАЯ ШИРИНА
ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

ЛИНЕЙНЫЙ СПЕКТР

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

2D инверсионный слой в Si



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

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

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

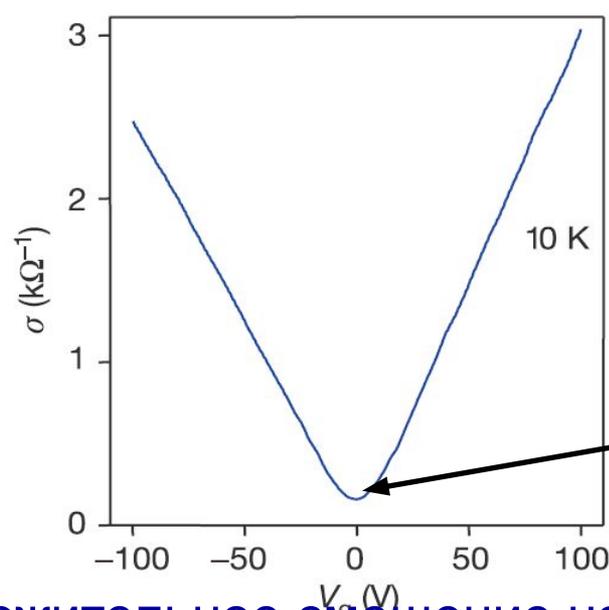
Плотность состояний

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



ЭФФЕКТ ПОЛЯ В ГРАФЕНЕ

Проводимость как функция напряжения на затворе



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

Точка
электронейтральности

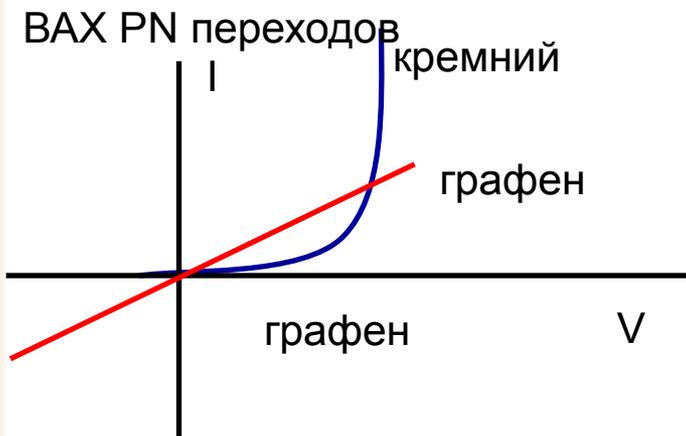
Эффект поля: положительное смещение на затворе индуцирует в графене электроны, отрицательные - дырки

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

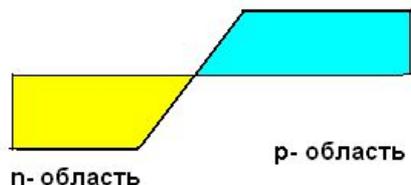


Туннельная генерация и рекомбинация в графеновом P-N переходе



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?

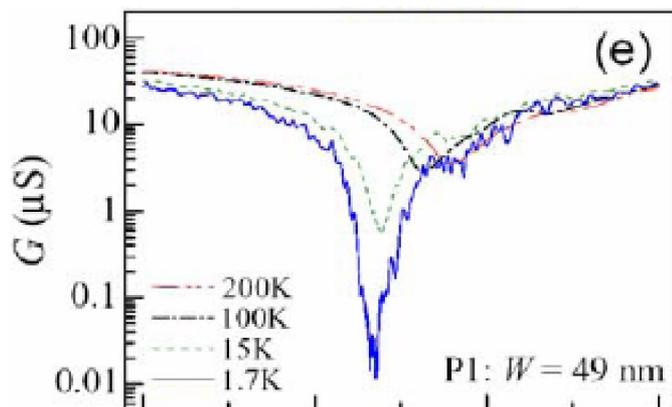


ГРАФЕНОВЫЕ НАНОЛЕНТЫ

Графеновые наноленты (ГНЛ) – нарезанные из графена ленты с шириной ~ 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

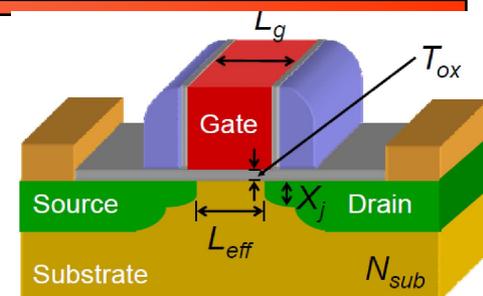
Возможность создания искусственных барьеров в рамках единой технологии открывает дополнительные возможности!



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

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

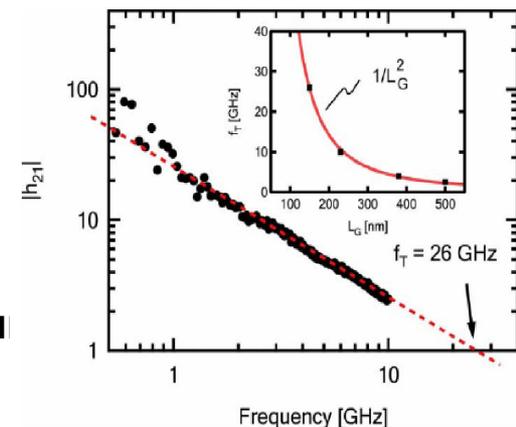
В аналоговых усилителях можно использовать основное практическое преимущество графена – высокую подвижность!!!



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 ультра-быстродействующего 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.



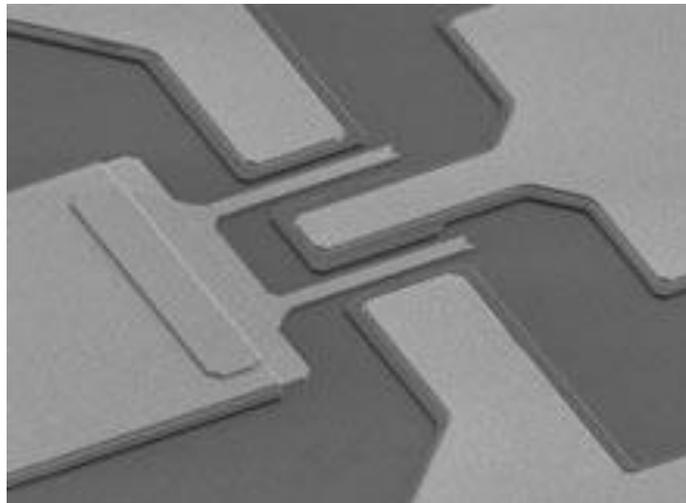
Графен для высокочастотной электроники

CERA (CARBON ELECTRONICS FOR RF APPLICATIONS)

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 (Al_2O_3 или HfO_2 для создания верхнего затвора
- (3) Максимальная частота – 14 ГГц при длине затвора 2 мкм

ЭТО РЕЗУЛЬТАТЫ 2008 г.!



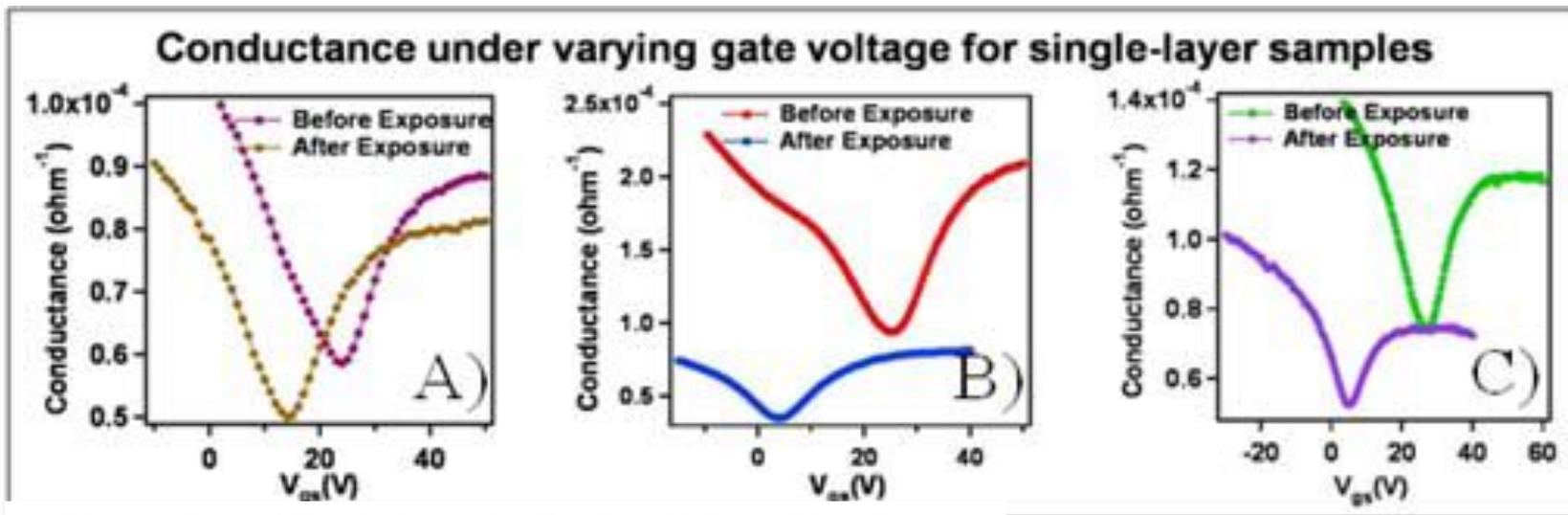
Радиационный отклик графеновых структур

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[#], and Yong P. Chen[#], *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:

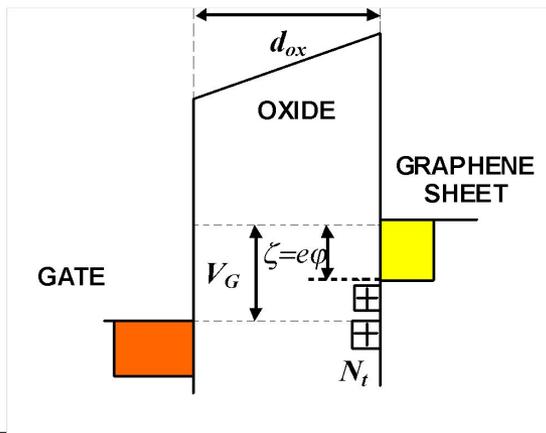
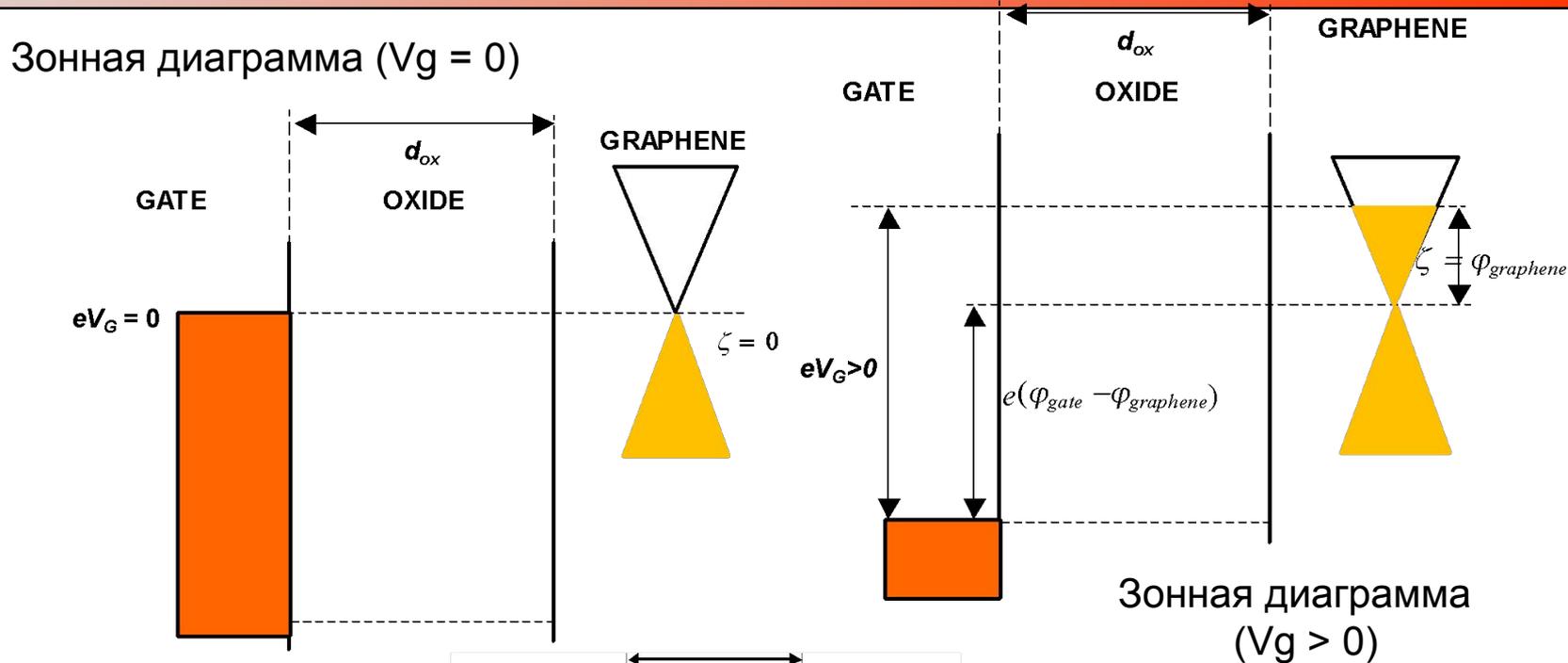
- специфика и невозможность использовать результаты для Si MOSFET
- почти полное отсутствие теоретических работ по этим темам ;
- очень малое количество экспериментальных работ по измерениям полной ВАХ (< 10);

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



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.

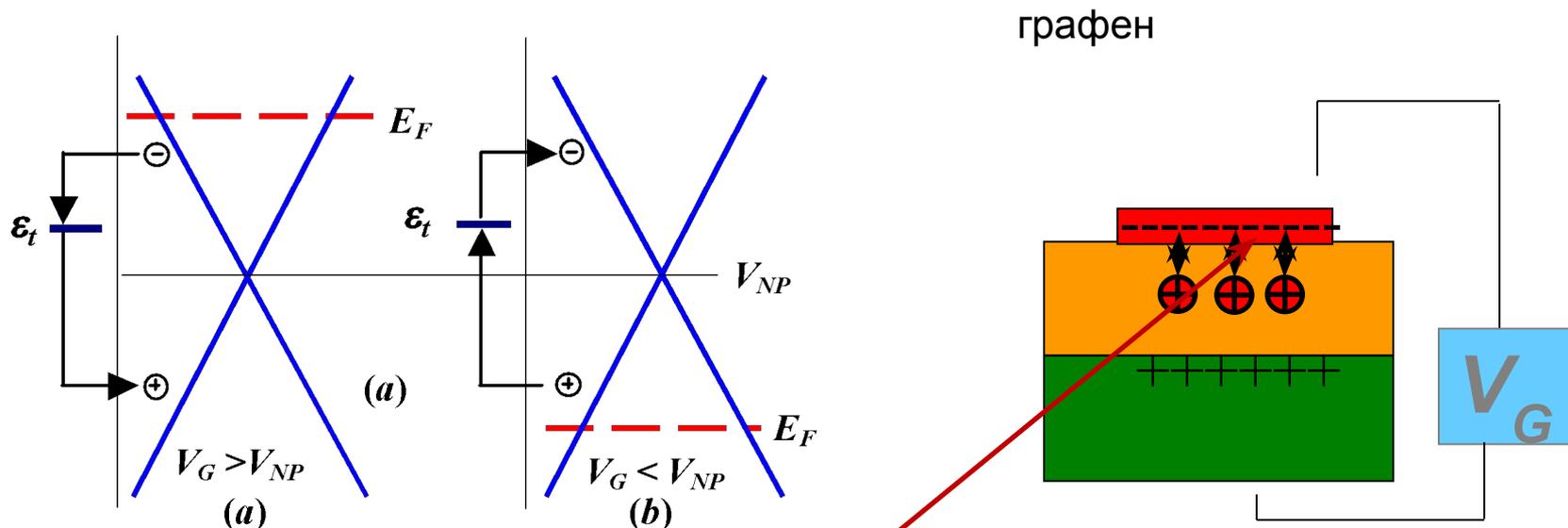
Проблема ПС практически решена в современной Si КМОП технологии (за технологической счет минимизации)

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!



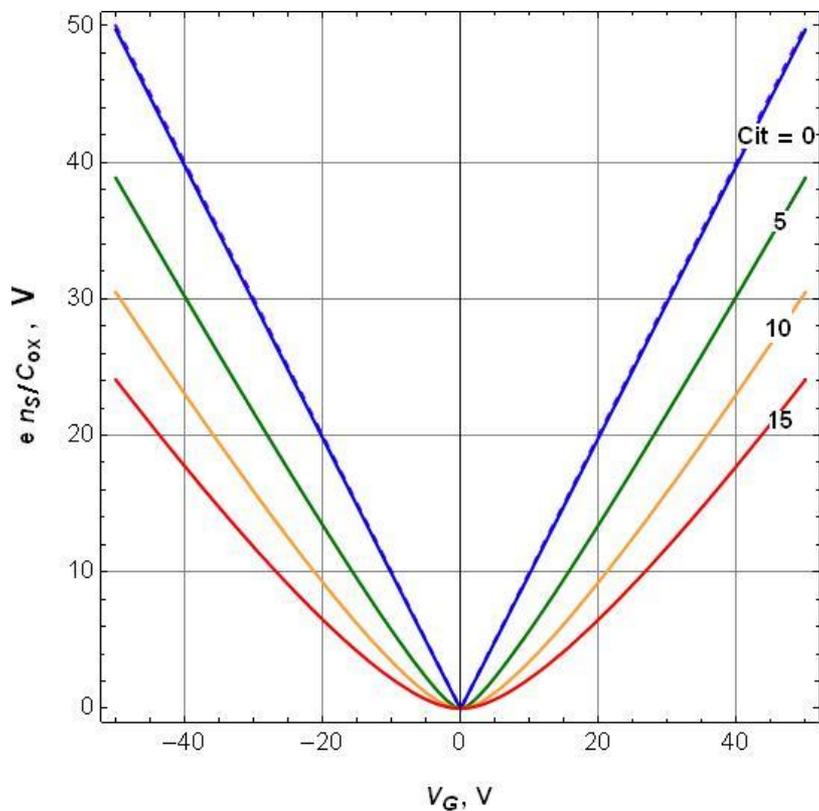
Обратимая перезарядка поверхностных состояний «графен – изолятор»

Перезаряжаемые дефекты = поверхностные состояния

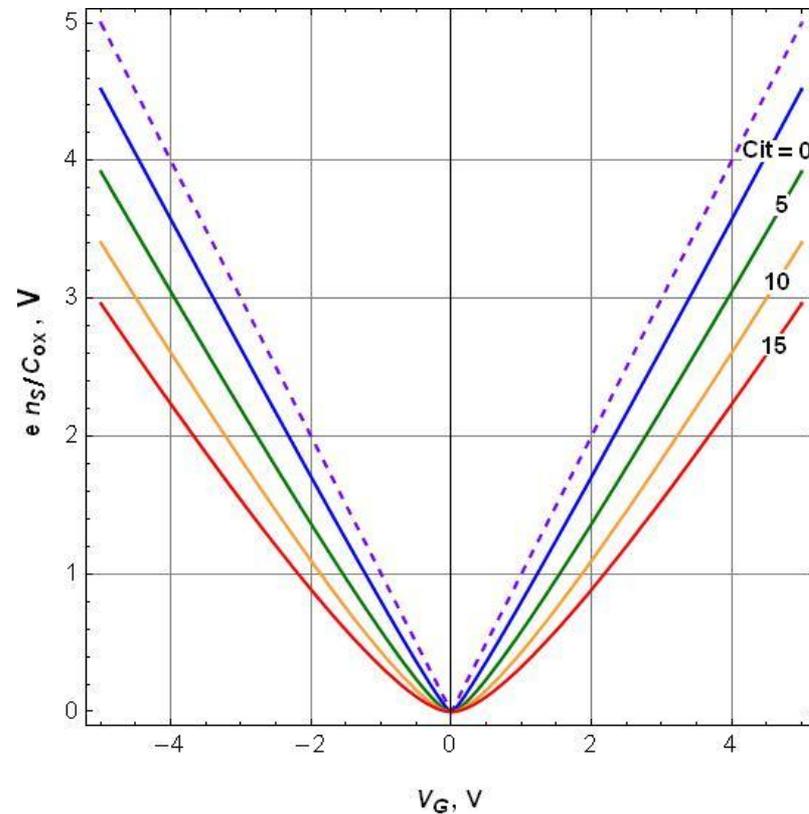


Плотности носителей в графене как функции напряжения на затворе

Влияние емкостей поверхностных состояния



Толщина окисла - 100 нм



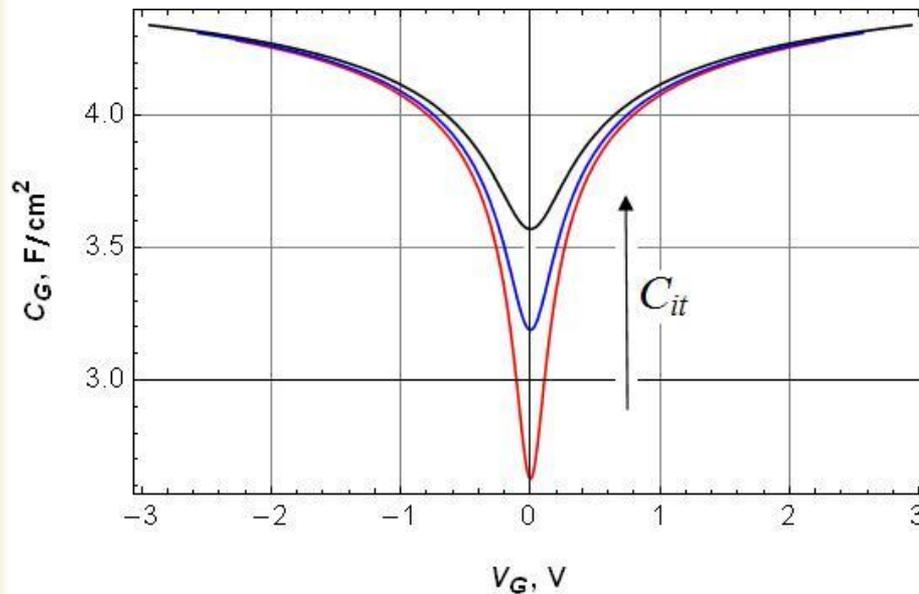
Толщина окисла - 10 нм

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



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)

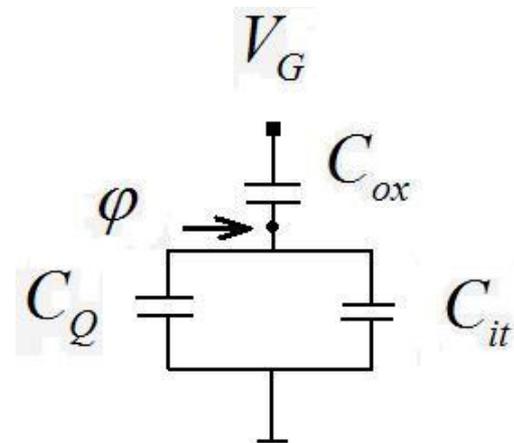
- не зависит от геометрии;
- определяется только фундаментальными константами;
- в эквивалентной схеме параллельна и сопоставима с C_{it} ;

-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}



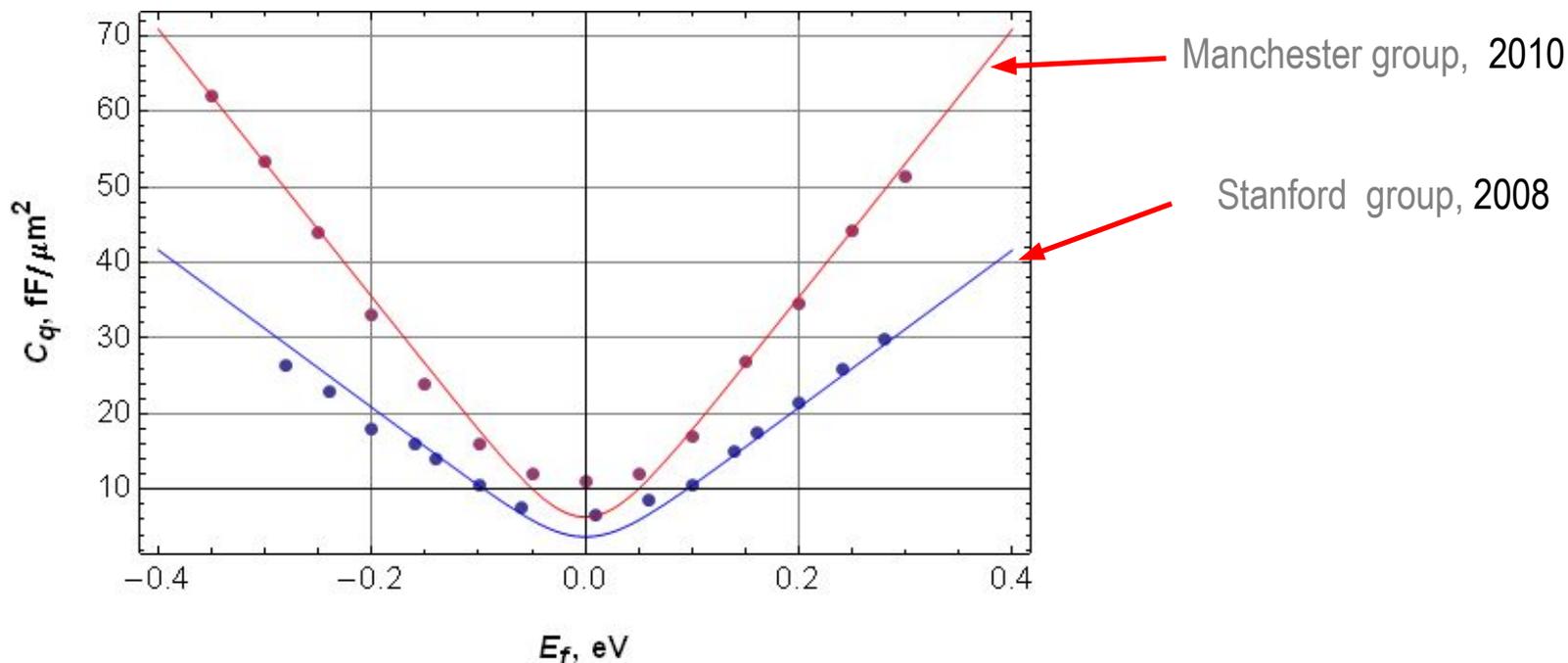
Эквивалентная схема GFET

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!



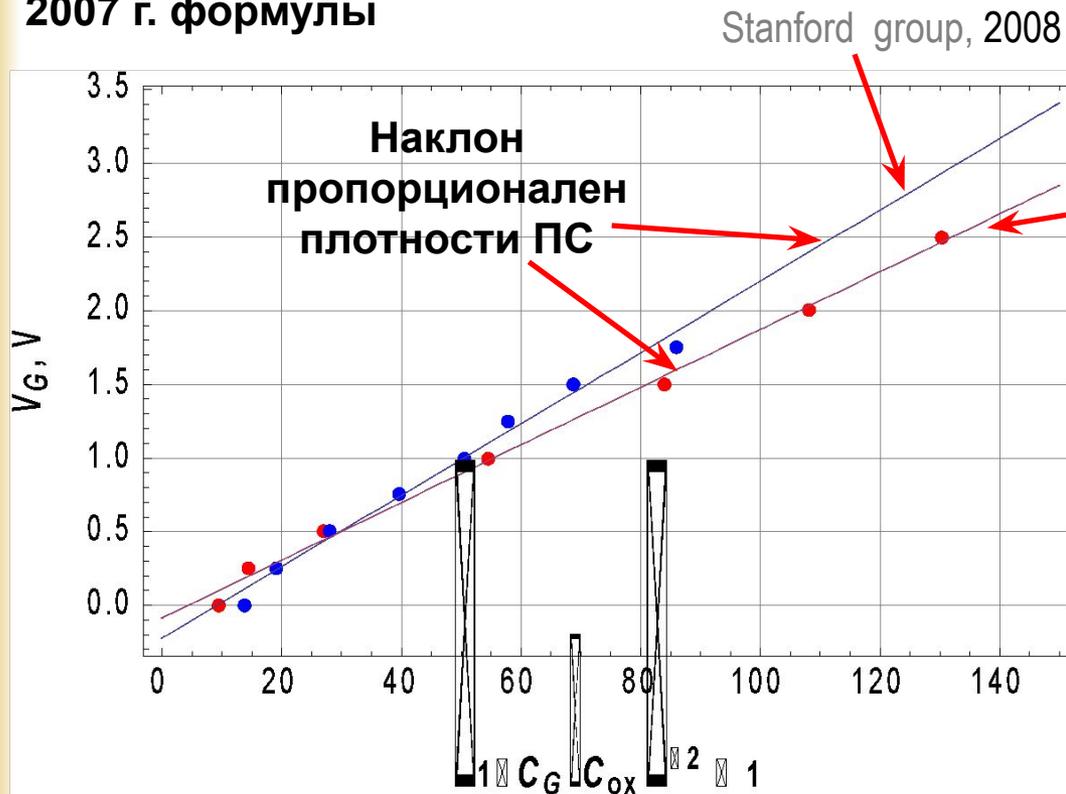
Эта зависимость должна быть универсальной!

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



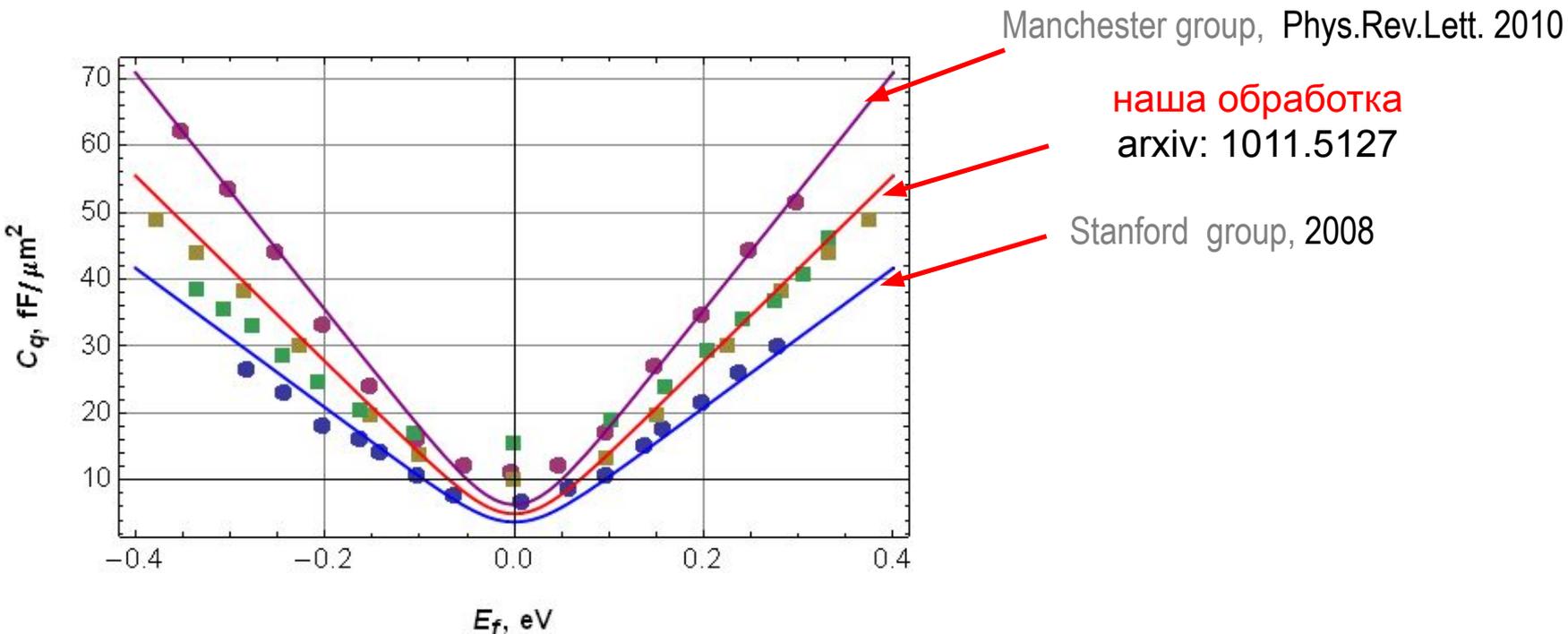
$$C_{CH} = e \frac{dn_s}{dV_G} = C_{ox} \left[1 - \frac{1}{[1 + 2|V_G - V_{NP}|/V_0]^{1/2}} \right]$$

Из наклона получаем плотность ПС

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



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



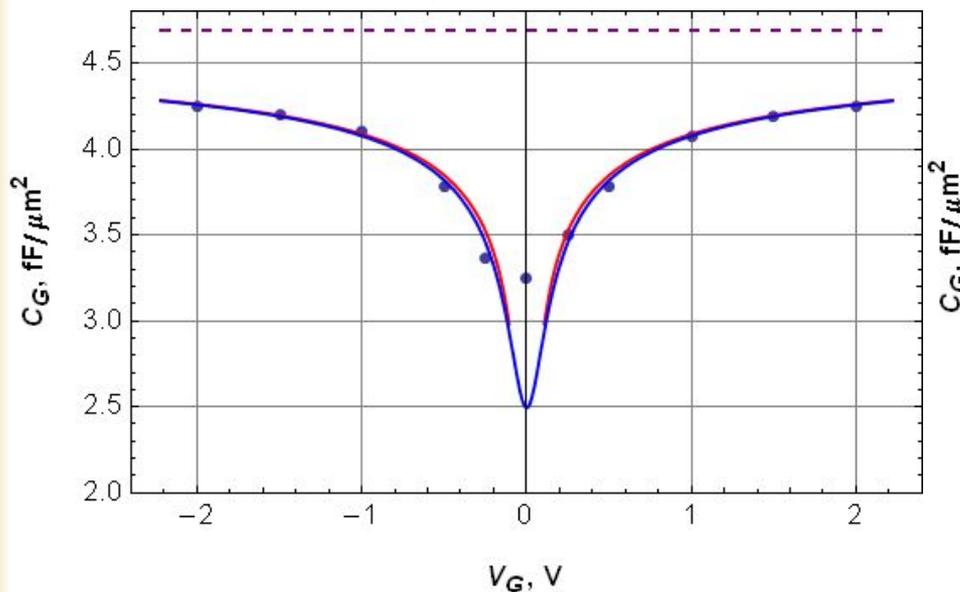
С учетом найденных для каждой структуры плотностей ПС зависимости квантовой емкости легли на одну кривую с одним значением v_F



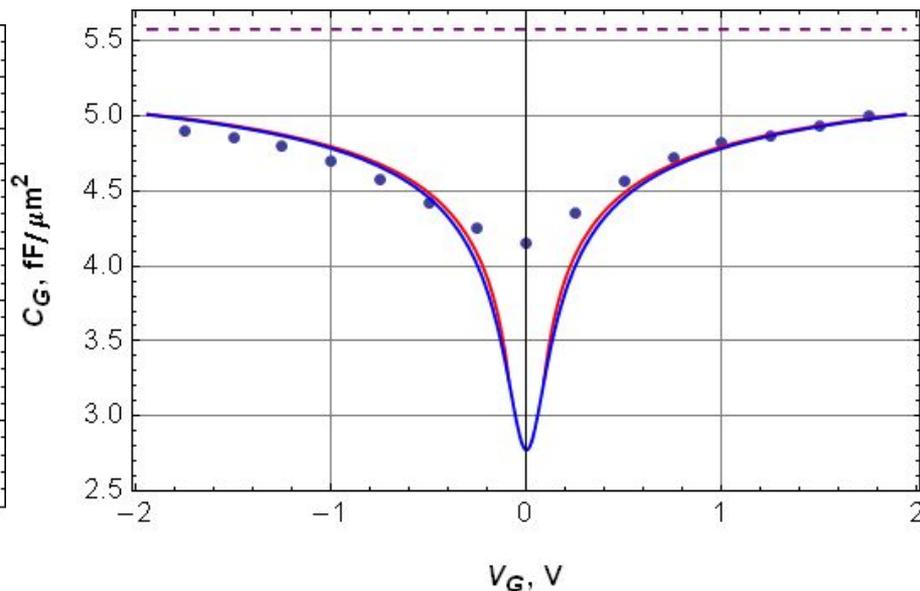
Экспериментальные данные по квантовой емкости графена с изолятором

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

Manchester group, Phys.Rev.Lett. 2010



Stanford group, 2008

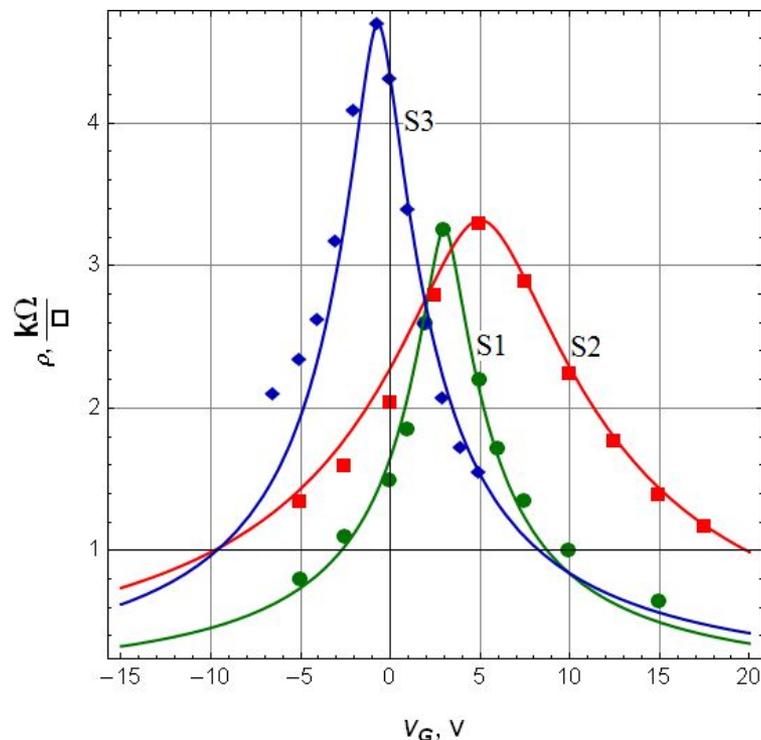


Расчет по полученным нами формулам для идеального графена с учетом извлеченных по нашей методике плотности ПС

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

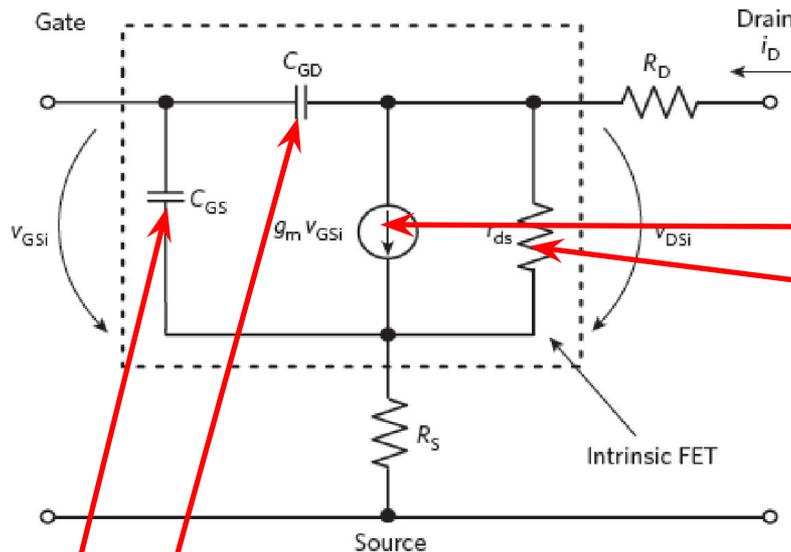
Мы полагаем, что ширина пика также обусловлена плотностью ПС!

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:

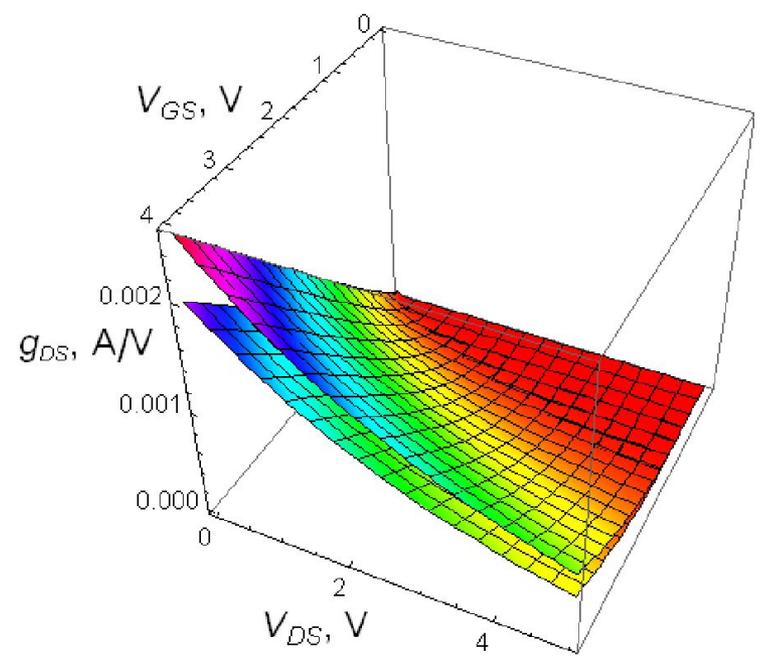
- Емкость затвор-исток
- Емкость затвор-сток

Используя нашу модель ВАХ получена выражение для полного заряда на затворе

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

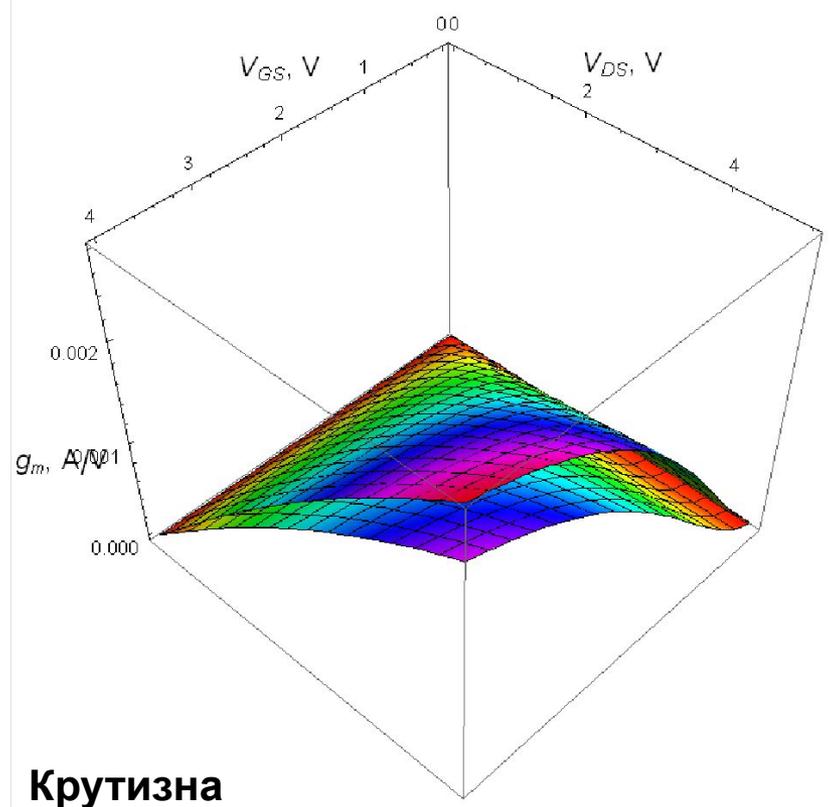


Выходная проводимость и крутизна ГПТ как функция V_G и V_D для разных плотностей ПС



**Выходной
кондактанс**

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



Крутизна

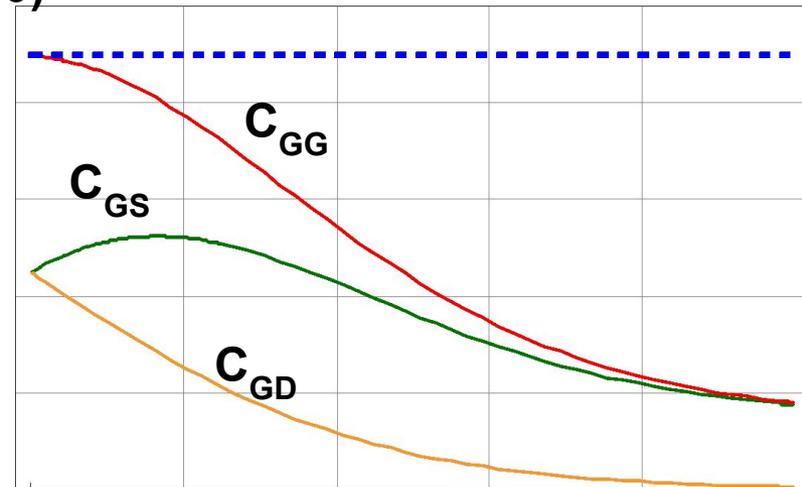
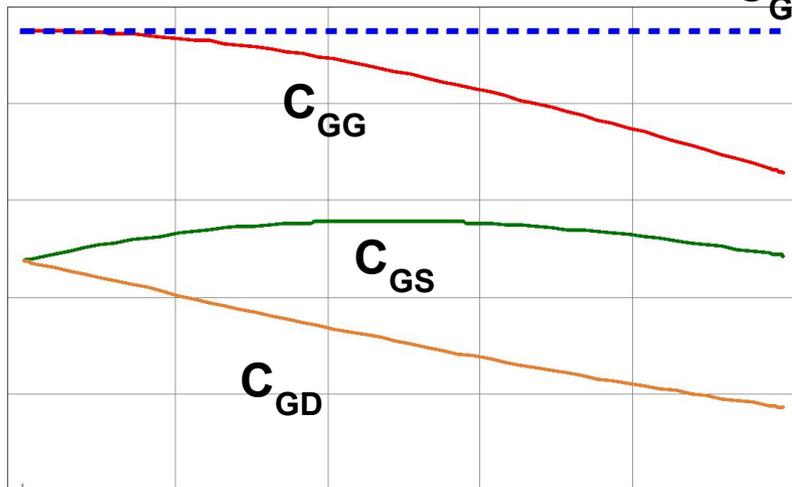
$$g_m = \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right)_{V_{DS}}$$



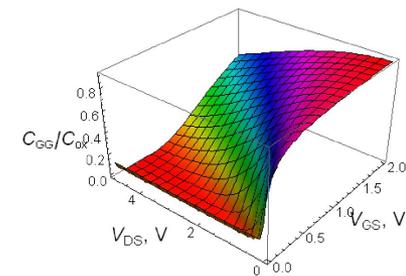
Емкостные характеристики затвор-исток и затвор-сток как функция V_{DS}

Нормированные на C_{ox} емкостные характеристики (расчет)

$C_G(V_{DS} = 0)$

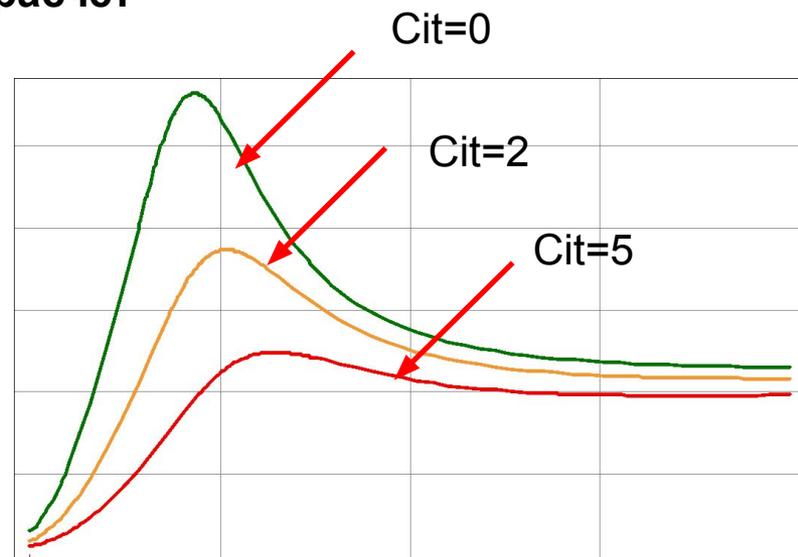
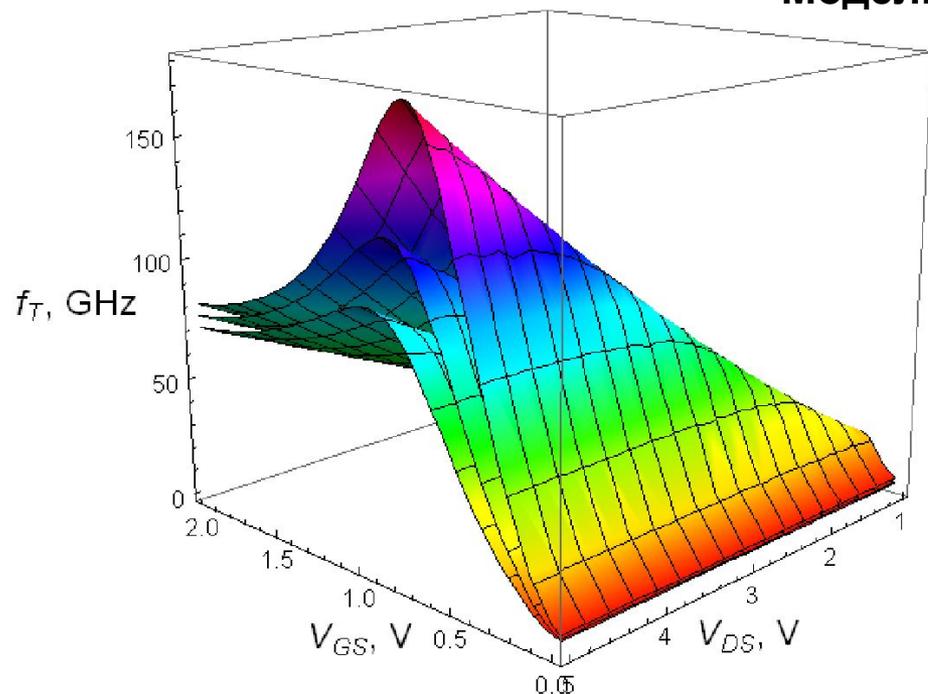


$C_{GG} = C_{GS} + C_{GD}$ - полная емкость затвора



Частота отсечки при разных плотностях ПС

Модельный расчет



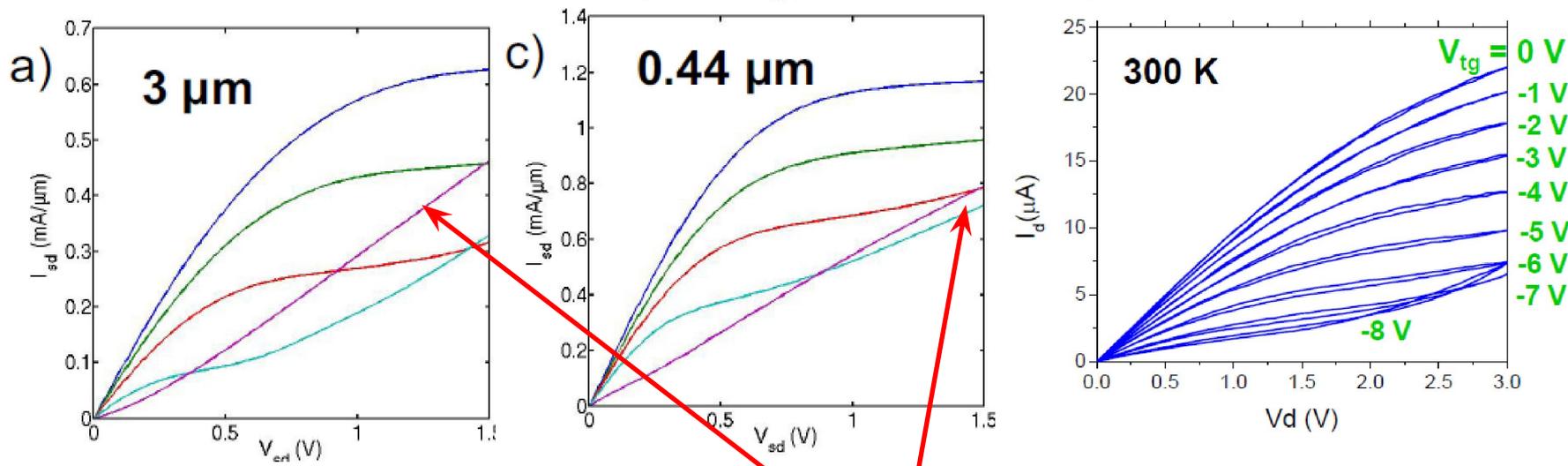
$$f_T = \frac{g_m}{2\pi W L C_{GG}}$$

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 Meric¹, Cory Dean^{1,3}, Andrea Young², Jim Hone³, Philip Kim², and Kenneth L. Shepard¹

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

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

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

Это несобственная проводимость: генерация тока в точке нейтральности!

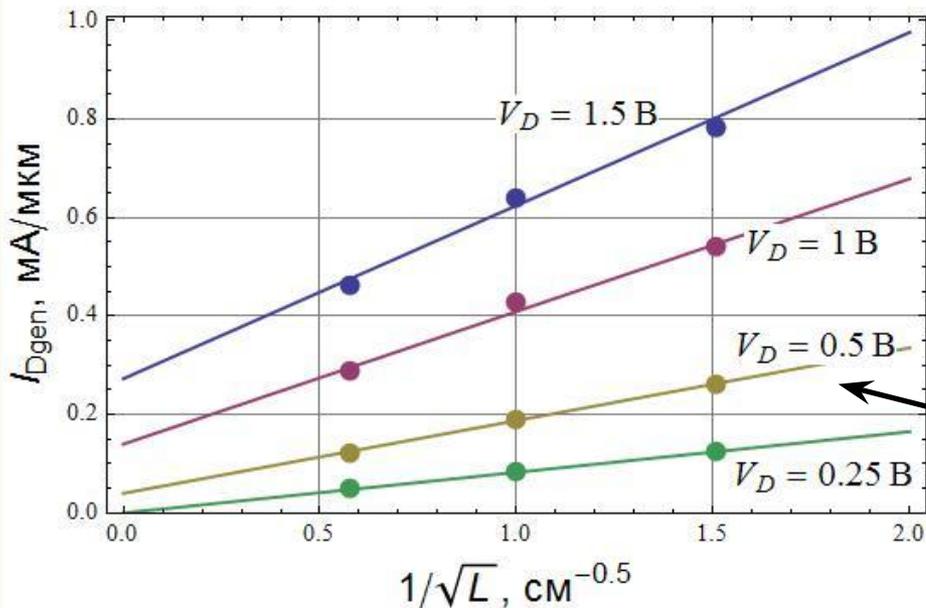
Природа генерации пока неизвестна точно:

- 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 рп переходе узкозонного полупроводника;
 - Образование пар электрон-позитрон в сверхсильном электрическом поле – никогда не наблюдался экспериментально (нереализуем)



НЕОЛИТ?

ПАЛЕОЛИТ

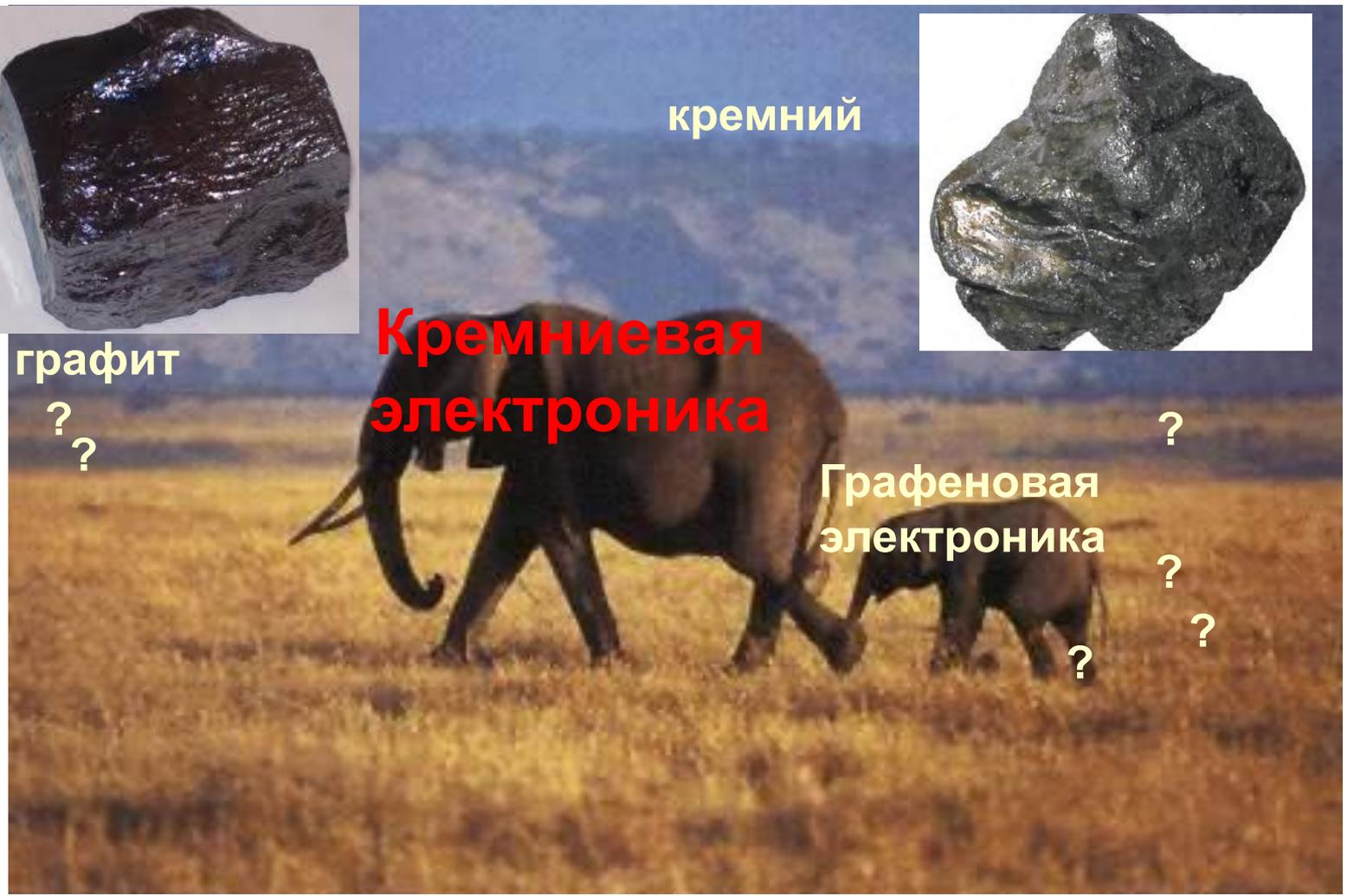


графит

?
?

**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

