

Настоящее и будущее nanoэлектроники

Константин Арутюнов

Московский Институт Электроники и Математики
при Национальном исследовательском университете
«Высшая школа экономики»



Московский институт электроники
и математики НИУ ВШЭ

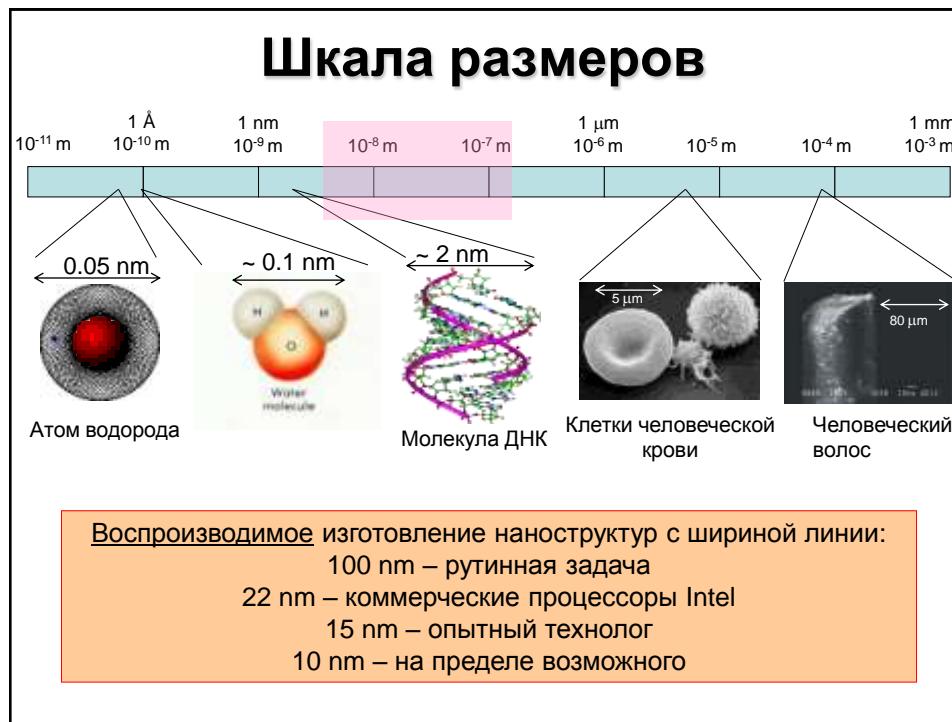


ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Семинар НУГ, 24 марта 2016

План доклада

- Что такое «nanoэлектроника»?
- Технология изготовления наноструктур сверхмалых размеров
- Квантовые размерные эффекты в:
нормальных металлах
полупроводниках
сверхпроводниках
- Прикладные задачи



Характерные физические масштабы

Нормальный металл: движение отдельных электронов

Расстояние между атомами: $a \sim 0.5 \text{ нм}$

Длина пробега электрона: $\ell \sim 40 \text{ нм} @ T=1 \text{ К}$

Сбой фазы электрона: $L_\phi \sim 1 \text{ мкм} @ T=1 \text{ К}$

} мезоскопика

Сверхпроводники: коррелированные электроны

Длина когерентности: $\xi(T) \sim 150 \text{ нм}$

} сверхпроводящая мезоскопика

Полупроводники: термически активированные электроны

Радиус ионизации примеси: $r_a \sim 3 \text{ нм}$

} полупроводниковые наноструктуры

Чем занимается электроника?

Большой энциклопедический словарь русского языка

ЭЛЕКТРОНИКА, наука о взаимодействии заряженных частиц электронов, ионов) с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств (вакуумных, газоразрядных, полупроводниковых), используемых в основном для передачи, обработки и хранения информации.

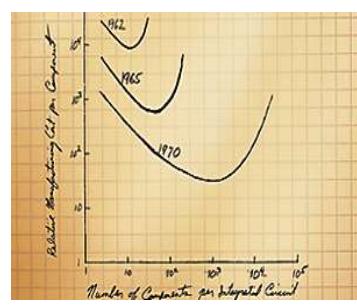
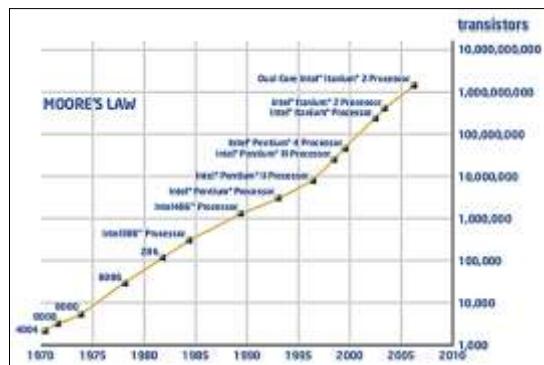
Электронные приборы и устройства используются в системах связи, автоматики, в вычислительной технике, измерительной технике и т. д.

Правило Мура

[*Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965*]

Количество транзисторов на интегральной схеме удваивается каждые 1.5 года

Для каждого уровня развития технологии существует оптимальное количество элементов интегральной схемы минимизирующее себестоимость производства



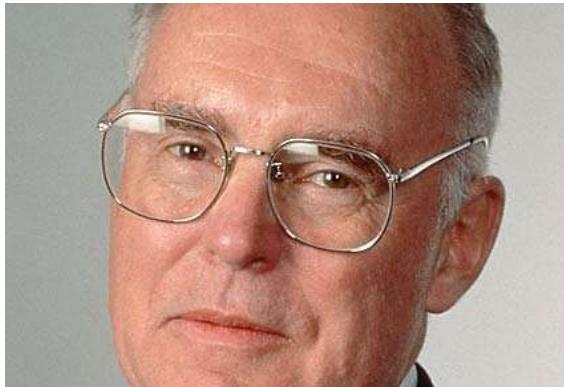
Gordon Moore, co-founder of Intel,
original graph from 1965

<http://www.intel.com/technology/mooreslaw/index.htm>

Существует ли предел миниатюризации?

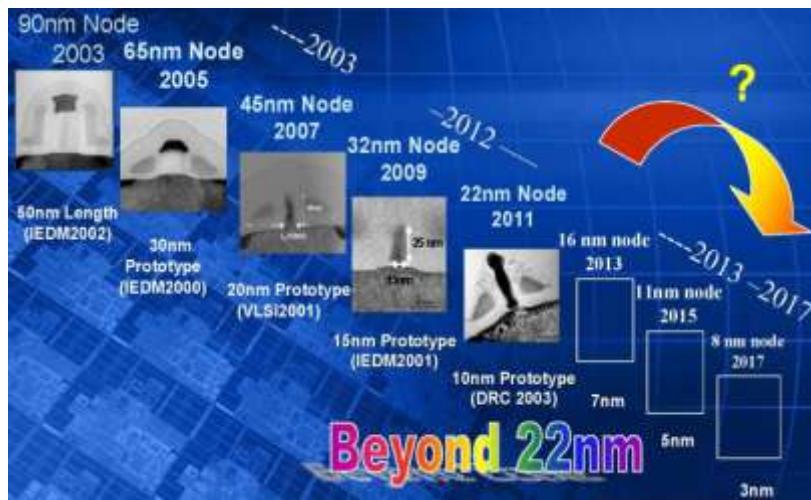
7

Гордон Мур 40 лет спустя



GM, 2005: «Для каждого процесса, растущего экспоненциально, рано или поздно наступает предел. В электронике такой предел наступит через 10 – 15 лет.»

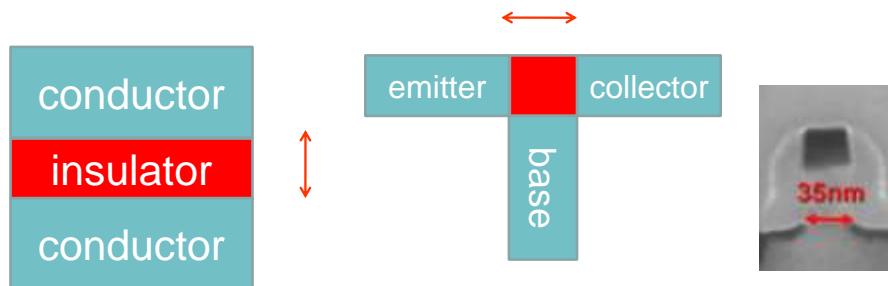
Прогноз INTEL



К 2015-2018 должен произойти коллапс CMOS технологии при достижении толщины диэлектрического слоя ~5 nm.

<http://asia.stanford.edu/events/Spring05/slides/050331-Gargini.pdf>

Уменьшение толщины диэлектрического слоя



С уменьшением толщины диэлектрического слоя до 2-3 нм начинают «прорастать» проводящие закоротки

С уменьшением толщины диэлектрического слоя до 5 нм этот слой перестает быть «изолирующим»: наблюдается эффект квантового туннелирования и нарушается штатный режим работы транзистора

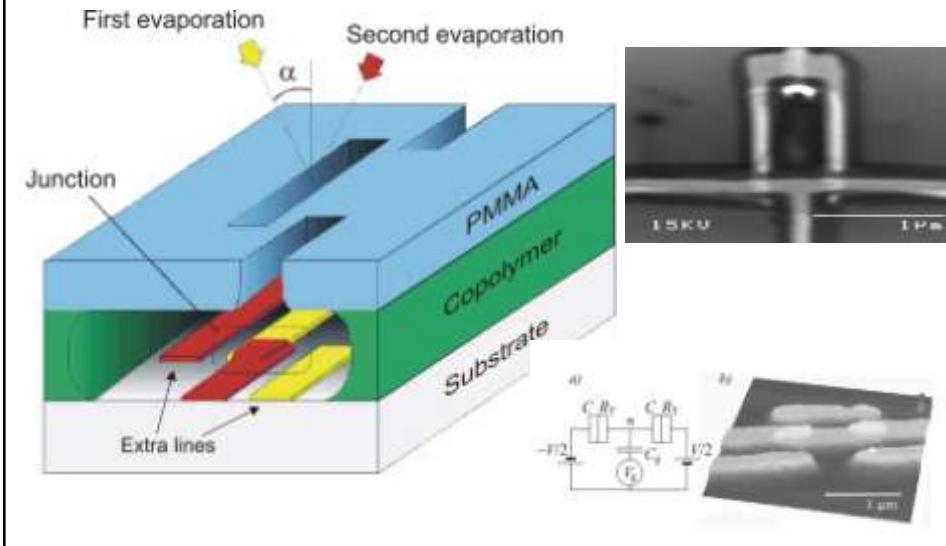
Огромная материаловедческая проблема: разработка сверхтонких слоев с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ .

Технология изготовления сверхмалых структур

Стандартные методы

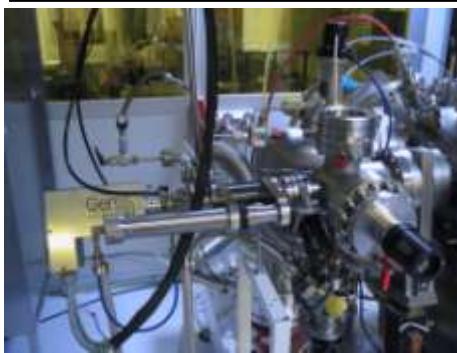
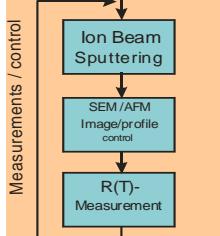
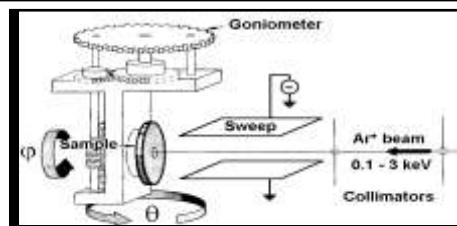
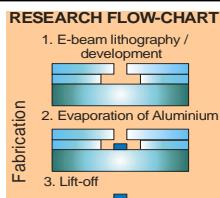
Метод	Мин. размер, нм	+	-
Фотолитография	32 нм	Стандартный процесс для массового производства, быстота, хорошая воспроизводимость	Принципиальное ограничение по мин. размеру
Электронная литография	суб-10 нм	Высокое разрешение, хорошая воспроизводимость	Медленный и дорогой процесс
Рентгеновская (X-ray) литография	50 нм	Потенциально можно достичь суб-10 нм размеров	Очень сложная, медленная и дорогая технология
Нанопечать (nanolithography)	50 нм	Быстрый и дешевый процесс	Пока в стадии разработки
Наноманипуляция	суб-10 нм	Можно использовать «готовые» блоки нанометровых размеров	Очень сложный, медленный и трудоемкий процесс, плохая воспроизводимость, проблематичен для массового производства

Пример электронной литографии



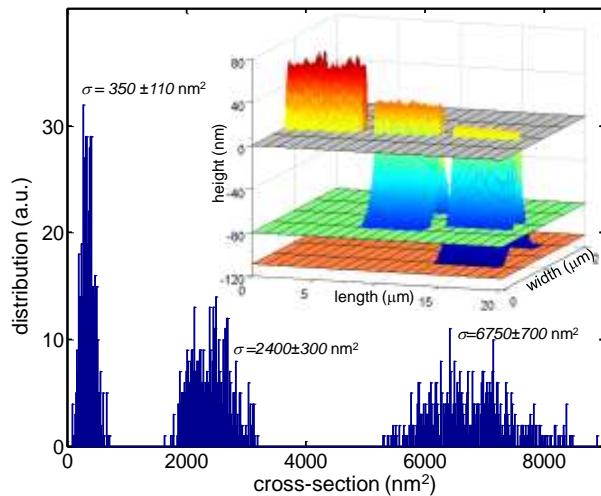
Провод – базовый элемент любой цепи

Исследовать размерный эффект на **одном и том же** образце постепенно уменьшая диаметр



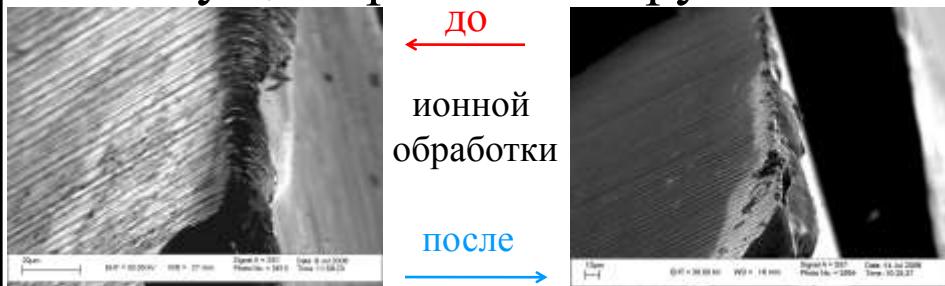
Ионная обработка

Ионная бомбардировка уменьшает размеры и полирует поверхность



Глубина проникновения ионов 0.5 kV Ar⁺ в металл 1.5 нм

Режущая кромка инструмента



Полировка оптики



Полировка может совмещаться с чисткой, ионной имплантацией и химической модификацией поверхности!

Заключение по технологии

Ионное травление дает возможность постепенного уменьшения размеров 3х-мерных наноструктур

Ионная обработка полирует поверхность, убирая неизбежные шероховатости на нм уровне

Appl. Phys. A 79, 1769, (2004), cond-mat/0311383.
Nanotechnology 19, 055301 (2008)

K. Arutyunov, *Recent Patents in Nanotechnology*, 1 (2007)

K. Arutyunov, V. Tuboltsev, M. Karre, **patent** FI-20060719

21

Нормальный металл

Что определяет электрическую проводимость твердых тел?

22

Электрическая проводимость

Положение в таблице

Кристаллическая решетка: алмаз и графит.

Periodic Table of Elements

Legend - click to find out more...

- H : gas
- Li : solid
- Br : liquid
- Tl : synthetic
- Non-Metals
- Transition Metals
- Rare Earth Metals
- Halogens
- Alkal Metal
- Alkal Earth Metals
- Other Metals
- Inter.Elements

Как размер системы влияет на электрическую проводимость?

Размерное квантование

Частица в потенциальной яме

$n = 3$

$n = 2$

$n = 1$

a

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2a^2 m} n^2,$$

where $n = 1, 2, 3 \dots$

Электроны в металлах

Размерное квантование

E

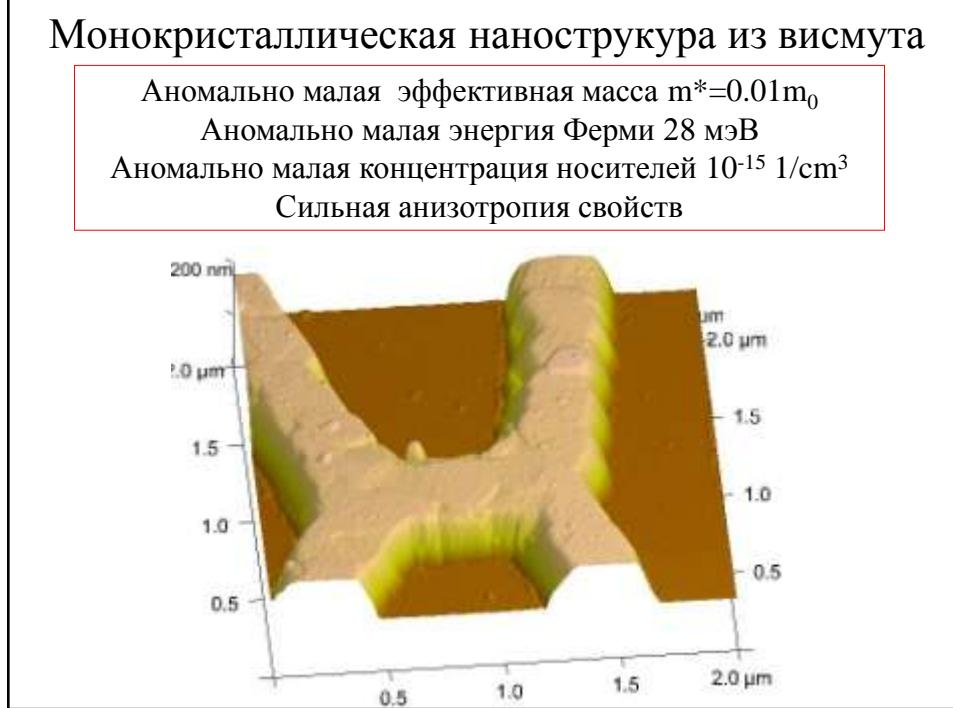
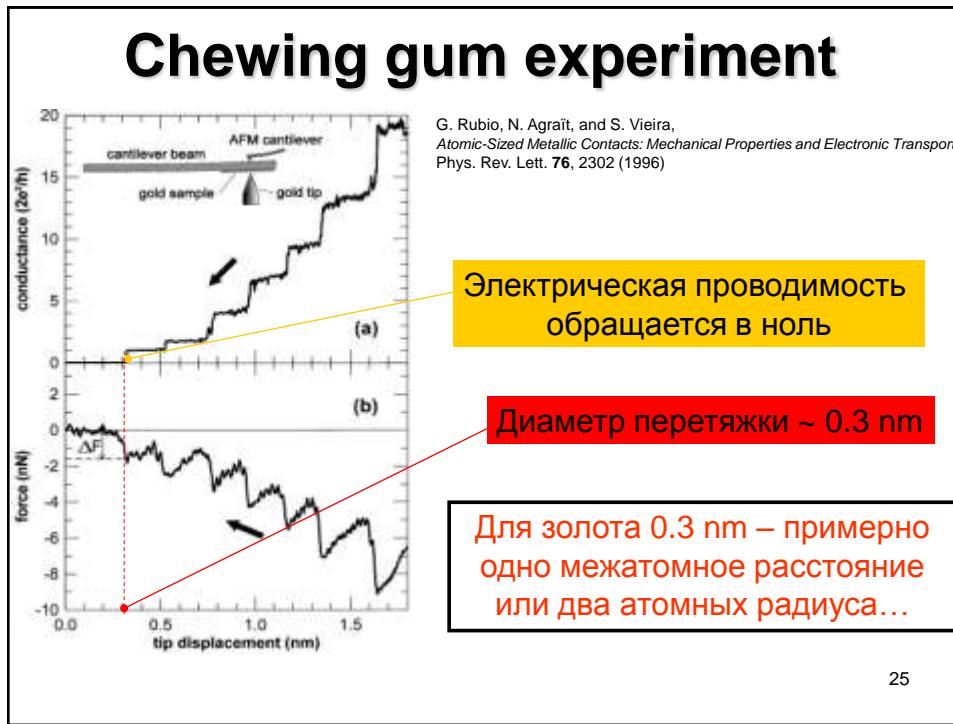
E_F

δE

Если энергия Ферми E_F постоянна :

- свойства системы должны периодически меняться с размером a
- ниже некого размера (= длина волны de Broglie) $\delta E > E_F$: переход металл-изолятор

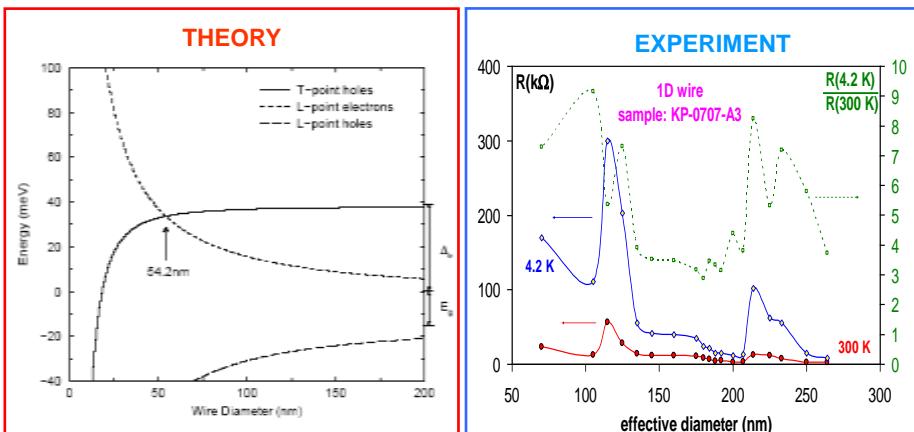
Для «хорошего» металла ($E_F \sim 1$ eV, $m^* = m_0$) квантовые размерные эффекты актуальны на масштабах < 1 нм



Ві нанопровод: сопротивление-диаметр

Что ожидается с уменьшением диаметра провода:

- периодическое увеличение-уменьшение электрического сопротивления
- при достижении некого конечного диаметра – переход в изолирующее состояние



Вывод по квантовым размерным эффектам в нормальных металлах

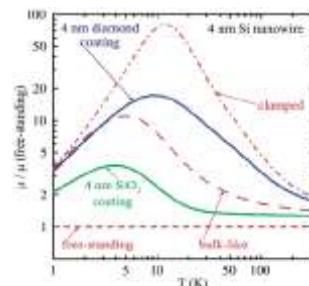
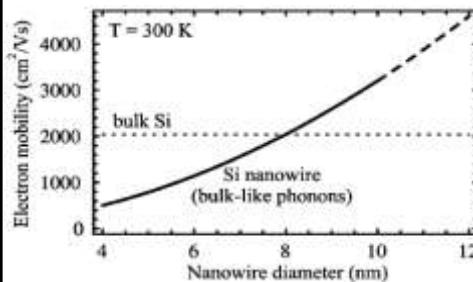
Наблюдение КРЭ в «хороших» металлах требует нереалистично малых диаметров

В полуметаллах или сильно дopedированных полупроводниках – КРЭ должны давать ощутимый вклад уже на уровне 50 нм

K. A., M. Zgirski, K.-P. Riikonen, and P. Jalkanen,
International Review of Physics 1, 28 (2007)

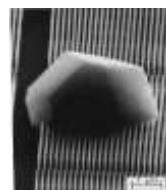
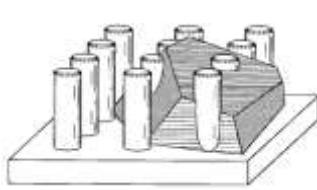
Полупроводники

Полупроводниковый нанопровод



Размерная перенормировка фононного спектра снижает подвижность электронов.
Решение: покрыть полупроводник «жестким» материалом – например - алмазом.

V. Fonoberov and A. Balandin, *Nano Lett.* 6, 2442 (2006)



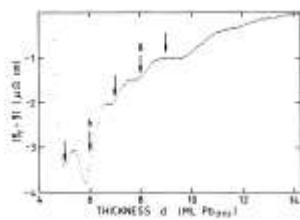
Single diamond crystallites
around nanometer-scale silicon
wires, P. A. Dennig, et.al. *Appl.
Phys. Lett.* 67, 14 (1995)

Различные квантовые размерные эффекты подавляют электрическую проводимость полупроводникового нанопровода на масштабах $\sim 10 \text{ nm}$

Другие явления связанные с КРЭ

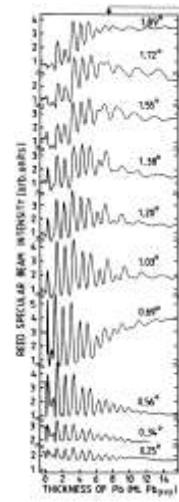
Очевидно, что КРЭ должны проявляться не только в проводах, но и в любых низкоразмерных системах. Например – тонких пленках.

Проводимость

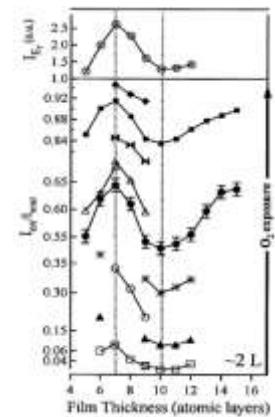


Epitaxial Pb films
M. Jalochovski, E. Bauer
PRB, 38, 5272 (1988)

Отражающая способность



Поверхностная химическая активность



Thickness-dependent variations in the oxidation rate of Mg film
L. Aballe, et.al. PRL 93, 196103 (2004)

Тепловыделение в электрических наносистемах



15 cm
↑ 1 cm

**Нагревательный
элемент мощностью 1 кВт**

Объемная плотность = 5.3 Вт / см³

На единицу площади = 6 Вт / см²

Intel processor data sheet



Year	Processor type	Clock speed (Hz)	Line width (nm)	Elements	Power (W)	T (C)	Clip size (cm x cm x cm)	Power density (W/cm ²)
1997	Pentium® II	450×10^6	250	-7.5×10^8	27	55	1.4 x 1.4 x 1.7	8.1
2007	Quad-Core Intel® Xeon® 5300	2.3×10^9	65 / 90	-2×10^9	80	66	3.4 x 3.4 x 0.37	18.6

Intel Core 2 Quad Xeon UP X32xx processor ~ 80 Вт / см²

**Может ли использование сверхпроводников быть
радикальным решением?**

Сверхпроводники

Есть ли размерные
ограничения на протекание
бездиссипативного
сверхтока?

Резистивное состояние 1D сверхпроводника

Длинный 1D провод сечения σ  $\Downarrow \sqrt{\sigma} \ll \xi(T) \ll L$

Если провод длинный – всегда есть вероятность, что где-либо флюктуация на очень короткое время разрушит сверхпроводимость

Минимальный объем, где флюктуация может произойти $\sim \xi(T) \sigma$ и соответствующая энергия: $\Delta F = B_c^2 \xi(T) \sigma$, где $B_c(T)$ – критическое поле.

В пределе $R(T) \ll R_N$ эффективное сопротивление :
 $R(T) \sim \exp(-\Delta F / \varepsilon)$

Термическая активация:
 $\varepsilon \sim k_B T$

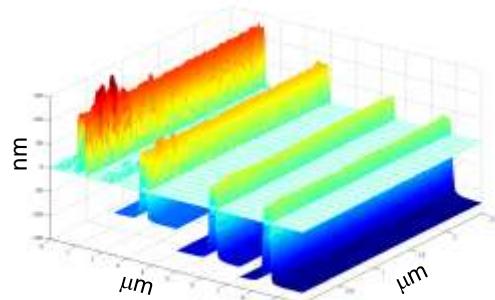
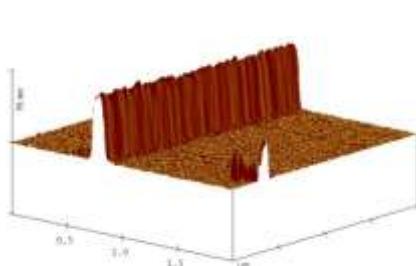
Квантовая : $\varepsilon \sim h \Gamma_{QPS}$
 $\Gamma_{QPS} \sim$ частота квантовых флюктуаций

Термические эффекты важны только вблизи точки сверхпроводящего перехода $T \rightarrow T_c$

Квантовые флюктуации вступают в силу при низких температурах:
 $h \Gamma_{QPS} > k_B T$

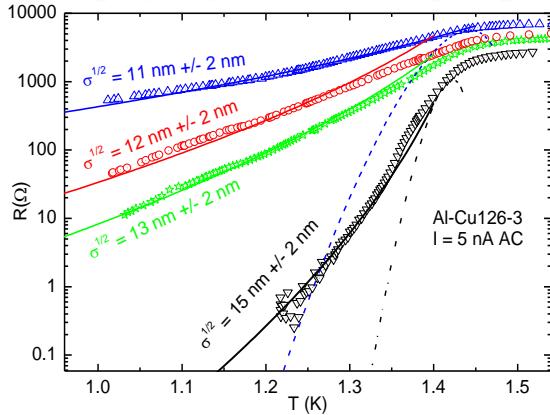
Алюминиевый нанопровод

8 nm < диаметр < 100 nm



Ионной бомбардировкой уменьшается диаметр и после каждого цикла травления измеряется $R(T)$

Квантовые флюктуации в сверхпроводниках



Гигантские изменения формы зависимости $R(T)$ от диаметра провода при его уменьшении на несколько нанометров.

При диаметрах менее ~ 12 нм – конечное сопротивление сверхпроводника!

Теория:

A. Zaikin, D. Golubev, A. van Otterlo, and G. T. Zimanyi, *PRL* 78, 1552 (1997)

Эксперимент:

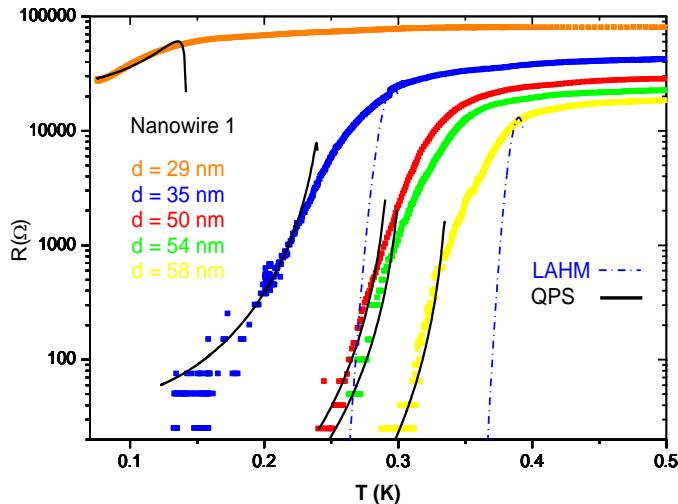
M. Zgirski, K.-P. Rikkonen, V. Touboltsev, and K. Arutyunov, *Nano Letters* 5, 1029, (2005)

M. Zgirski and K. Arutyunov, *PRB*, 75, 172509 (2007)

Обзор:

K. Yu. Arutyunov, D. S. Golubev, and A.D. Zaikin, *Physics Reports* 464, 1 (2008)

Титановые нанопровода



В титане нулевое сопротивление уже подавляется на диаметрах ~ 30 нм.

Выводы

Квантовые размерные эффекты присутствуют во всех твердотельных системах

Электрические свойства нанопроводов достаточно пессимистичны - начиная с некоторого размера:

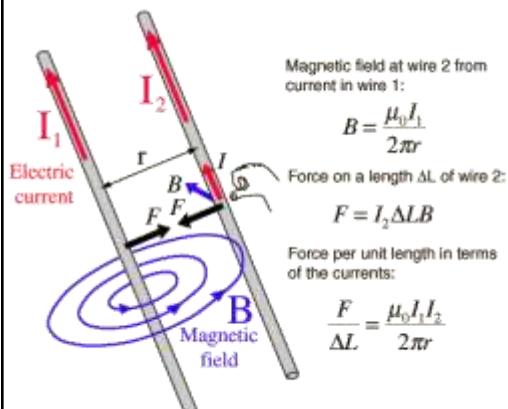
- в нормальных металлах подавлена проводимость
- в полупроводниках сильно падает подвижность
- в сверхпроводниках наблюдается конечное сопротивление

Есть ли будущее у наноэлектроники ?

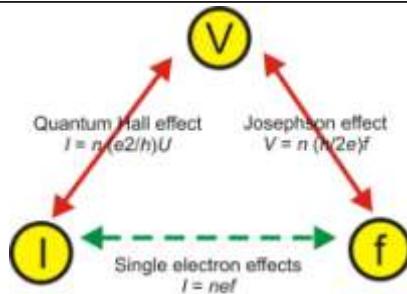
Прикладные
задачи

Эталон электрического тока

Определение ампера в системе СИ



В настоящий момент в системе СИ отсутствует эталон тока необходимой точности. Вместо этого, *de facto* электрические величины определяются через напряжение и сопротивление по квантовым эффектам Джозефсона и Холла, соответственно.



Исключительно неудобно!

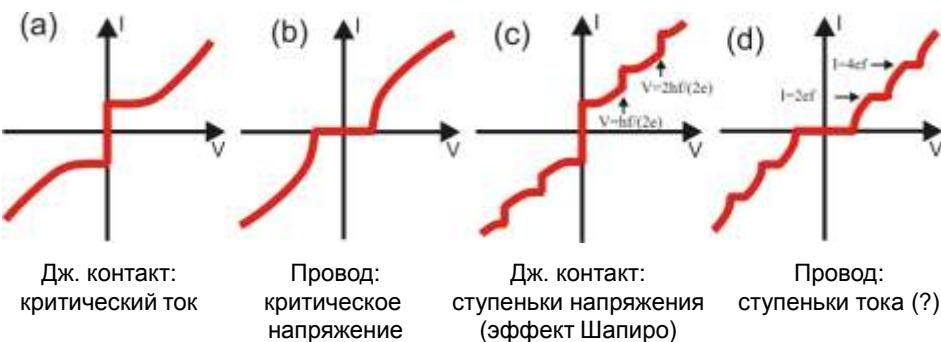
Реализация квантового эталона тока – одна из наиболее первоочередных задач современной метрологии!

Квантовый эталон тока

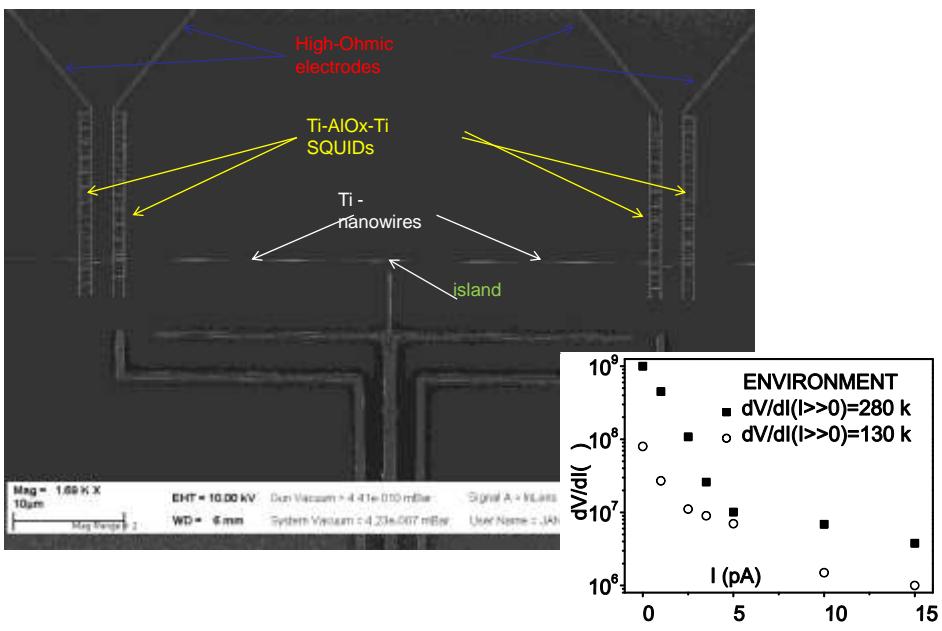
Модели, описывающие поведение тонкого сверхпроводящего провода (в режиме квантовых флюктуаций) и Джозефсоновского контакта дуальны – идентичны с точностью до замены переменных.

D. V. Averin and A. A. Odintsov, Phys. Lett. A **140** (1989) 251.

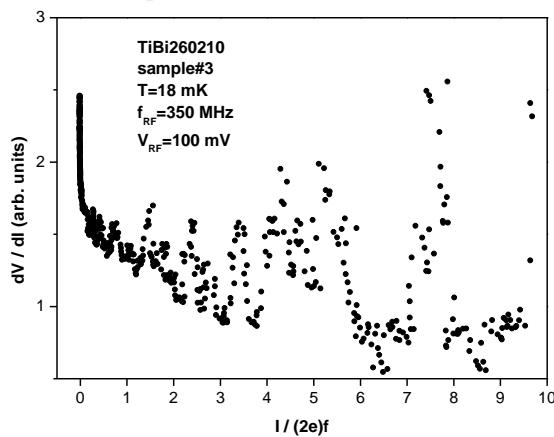
J. E. Mooij and Yu. V. Nazarov, Nature Physics **2** (2006) 169.



Гибридная структура в высокомомкном окружении



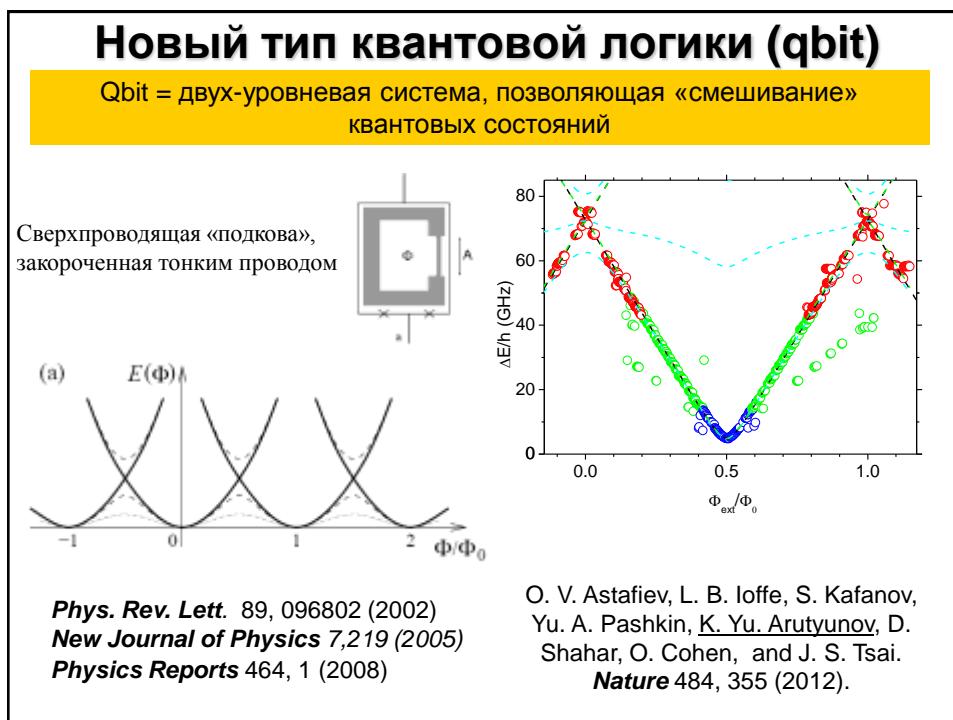
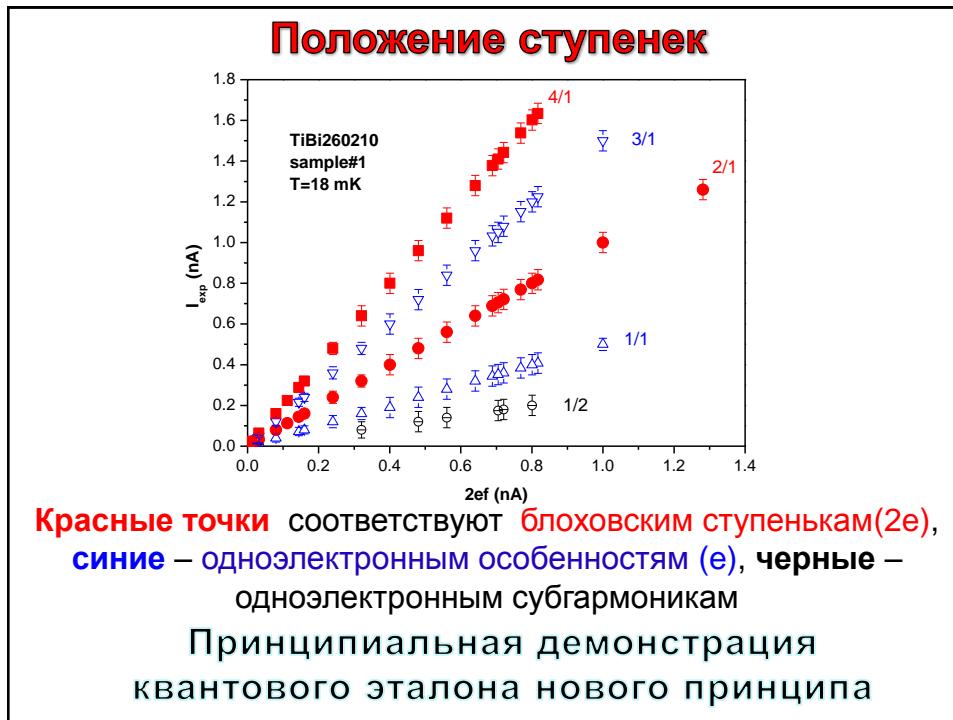
Титановый нанопровод в высокомомкном окружении



dV/dI at $f_{RF}=350$ МГц и амплитуда 100 мВ. Ток нормирован на величину $(2e) \times f_{RF}$

Можно различить квантовые ступеньки с номером $n \leq 8$.

Универсальное соотношение $I(n) = (2e)^* n^* f_{RF}$



Выводы

- Уменьшение размеров наноэлектронных устройств неизбежно приведет к переходу в новый (квантовый) режим
- Качественно новые эффекты могут привести к ряду применений
- Высокотехнологичная методика с учетом квантовых эффектов может быть использована для решения широкого спектра прикладных задач

Да здравствует квантовая
наноэлектроника!

Благодарю за
внимание!

В докладе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта (15-01-0153, Исследование квантовых размерных эффектов в металлическихnanoструктурах), в рамках Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2015- 2016 гг.