

Настоящее и будущее наноэлектроники

Константин Арутюнов

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



Московский институт электроники
и математики НИУ ВШЭ



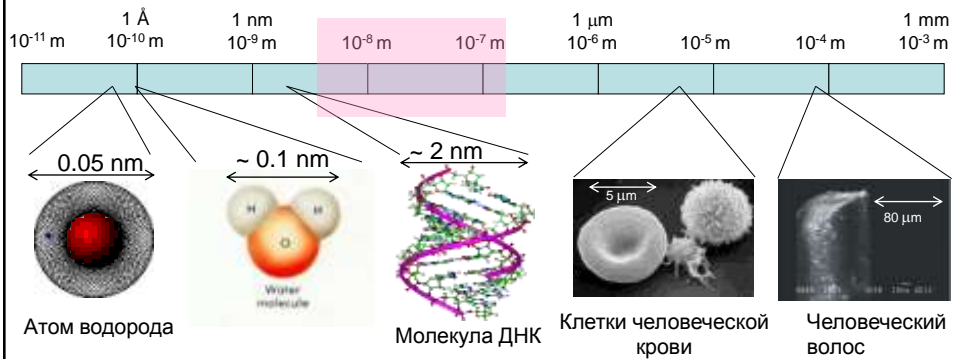
ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Семинар НУГ, 24 марта 2016

План доклада

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

Шкала размеров



Воспроизводимое изготовление наноструктур с шириной линии:

- 100 nm – рутинная задача
- 22 nm – коммерческие процессоры Intel
- 15 nm – опытный технолог
- 10 nm – на пределе возможного

Что такое много?



Характерные физические масштабы

Нормальный металл: движение отдельных электронов

Расстояние между атомами: $a \sim 0.5$ нм
 Длина пробега электрона: $l \sim 40$ нм @ $T=1$ К
 Сбой фазы электрона: $L_\phi \sim 1$ мкм @ $T=1$ К

} мезоскопика

Сверхпроводники: коррелированные электроны

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

} сверхпроводящая мезоскопика

Полупроводники: термически активированные электроны

Радиус ионизации примеси: $r_a \sim 3$ 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.

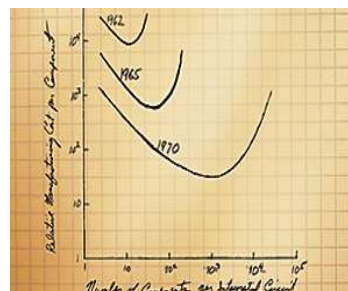
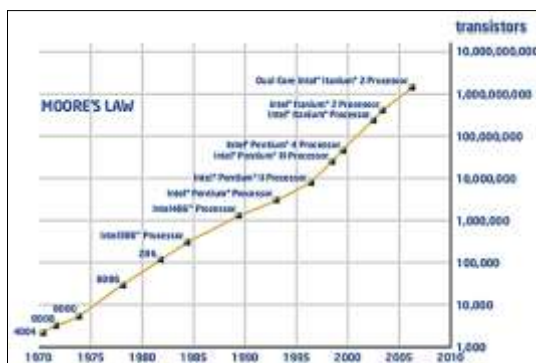
Электронные приборы и устройства используются в системах связи, автоматике, в вычислительной технике, измерительной технике и т. д.

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



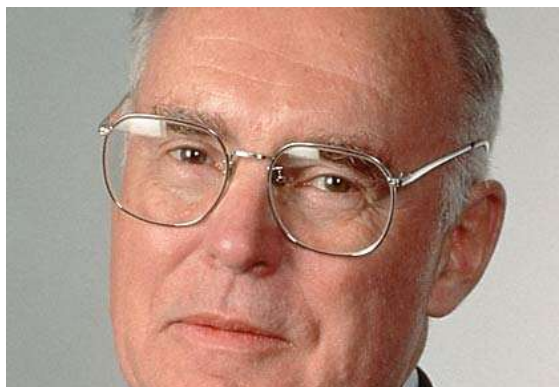
Gordon Moore, co-founder of Intel, original graph from 1965

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

Существует ли предел миниатюризации?

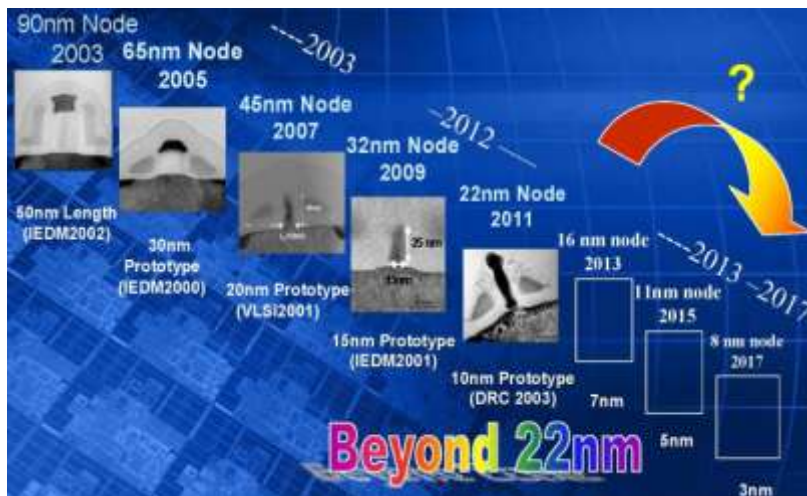
7

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.»

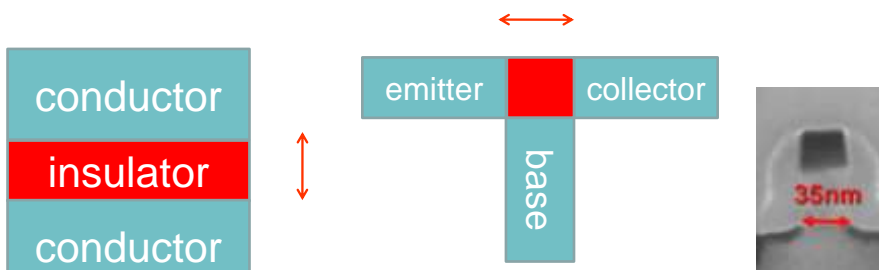
Прогноз INTEL



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>

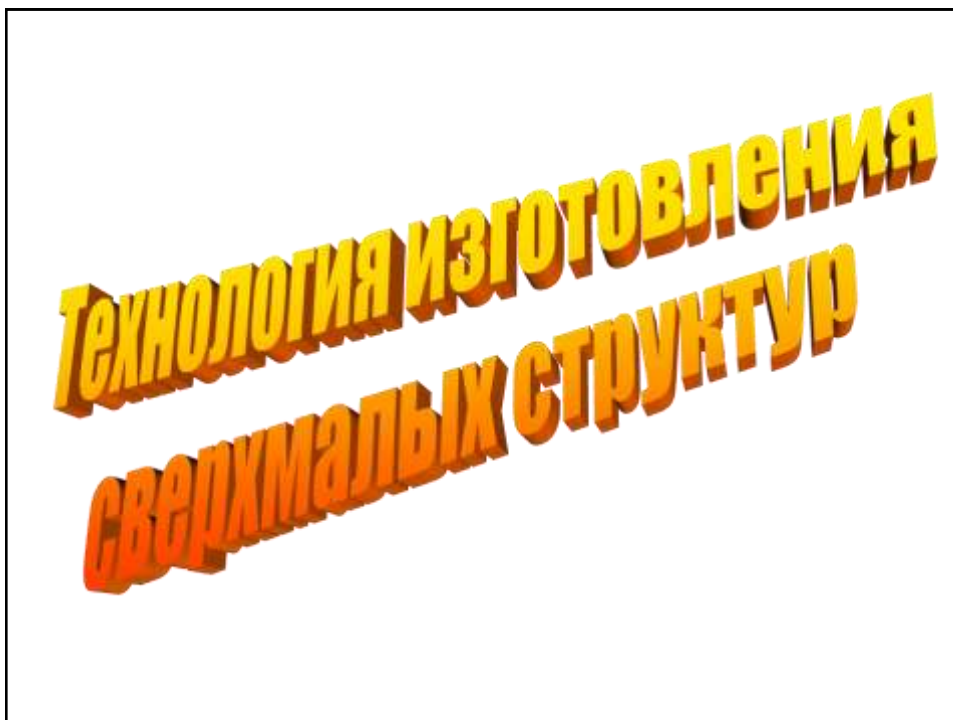
Уменьшение толщины диэлектрического слоя



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

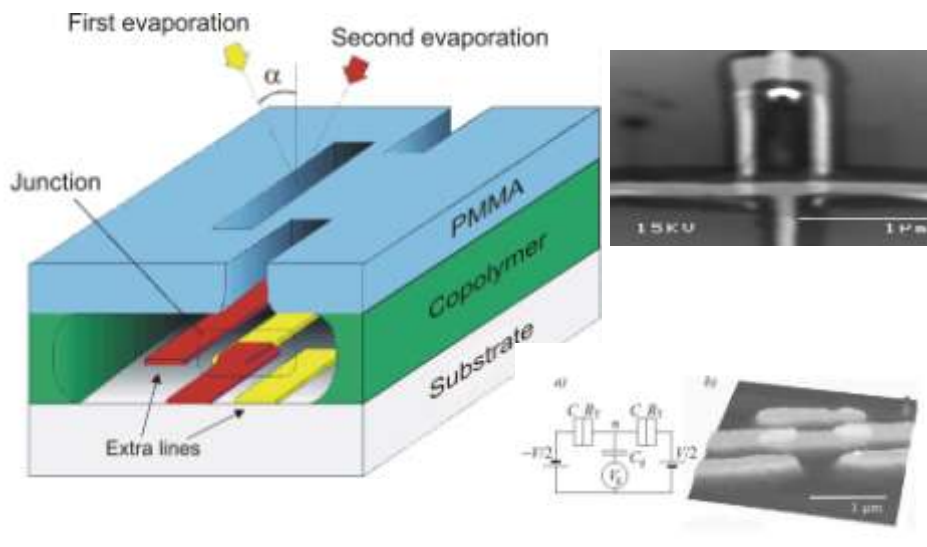
Огромная материаловедческая проблема: разработка сверхтонких слоев с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ .



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 (nanoimprinting)	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

RESEARCH FLOW-CHART

1. E-beam lithography / development
2. Evaporation of Aluminium
3. Lift-off

Fabrication

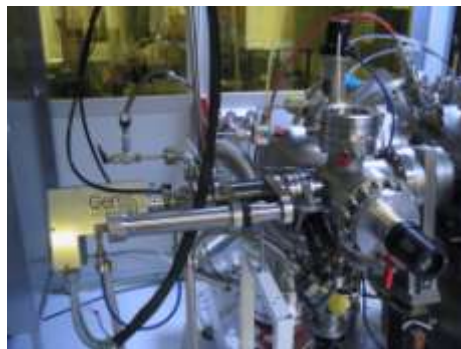
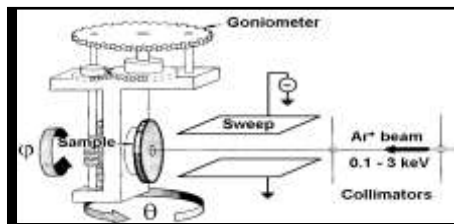
SEM/AFM image control

Ion Beam Sputtering

SEM/AFM Image/profile control

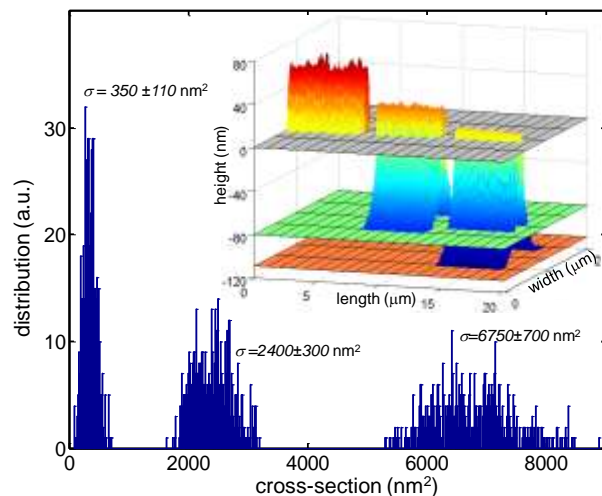
R(T)-Measurement

Measurements / control



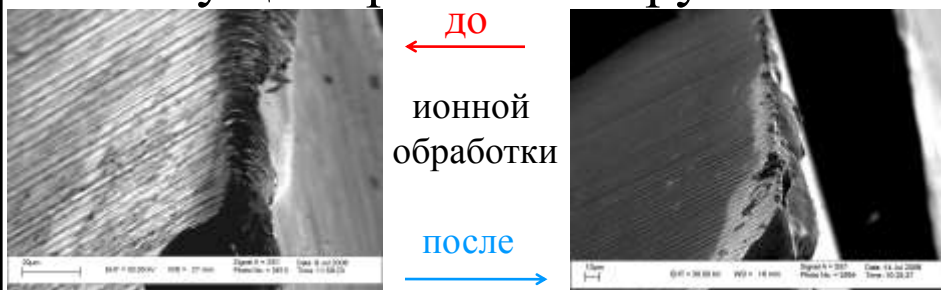
Ионная обработка

Ионная бомбардировка уменьшает размеры и полирует поверхность



Глубина проникновения ионов 0.5 kV Ar⁺ в металл 1.5 нм

Резущая кромка инструмента



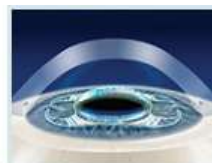
Полировка оптики



ARTISAN Lens



ARTISAN Lens Placed in the Eye



ARTISAN Lens Attached to the Iris

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

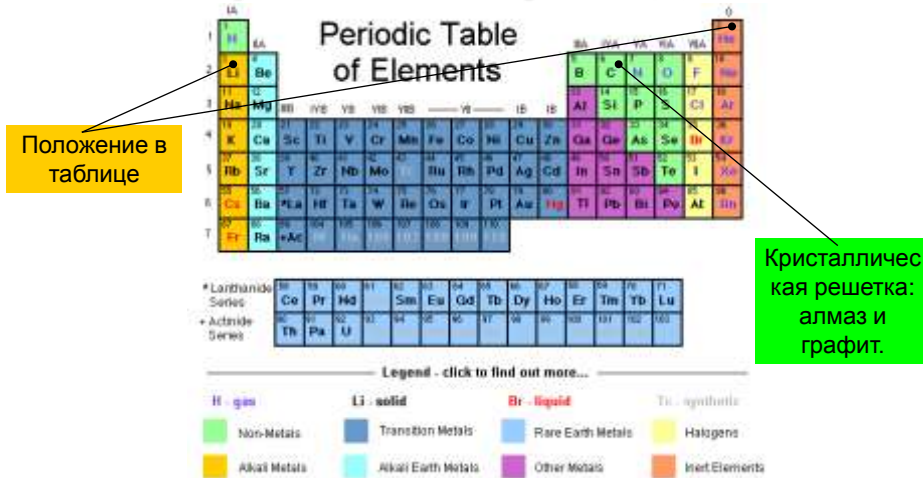
21

Нормальный металл

Что определяет электрическую
проводимость твердых тел?

22

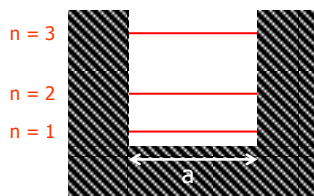
Электрическая проводимость



Как размер системы влияет на электрическую проводимость?

Размерное квантование

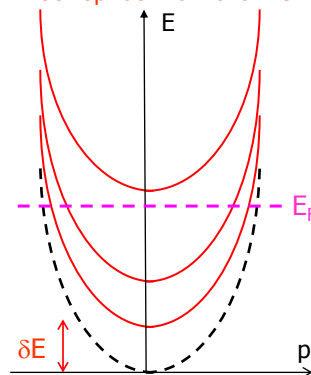
Частица в потенциальной яме



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

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

Электроны в металлах
Размерное квантование

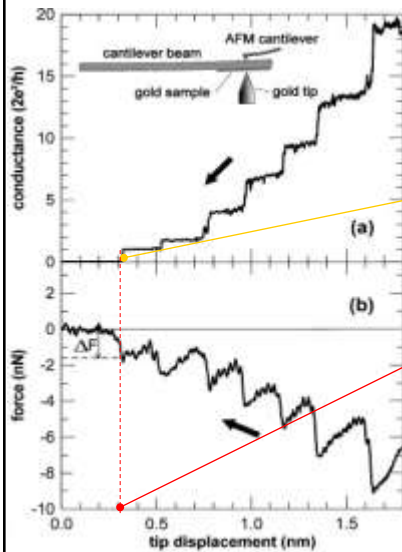


Если энергия Ферми E_F постоянна :

- 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 ($E_F \sim 1 \text{ eV}$, $m^* = m_0$) квантовые размерные эффекты актуальны на масштабах $< 1 \text{ nm}$

Chewing gum experiment



G. Rubio, N. Agrait, and S. Vieira,
Atomic-Sized Metallic Contacts: Mechanical Properties and Electronic Transport
 Phys. Rev. Lett. **76**, 2302 (1996)

Электрическая проводимость
 обращается в ноль

Диаметр перетяжки ~ 0.3 nm

Для золота 0.3 nm – примерно
 одно межатомное расстояние
 или два атомных радиуса...

25

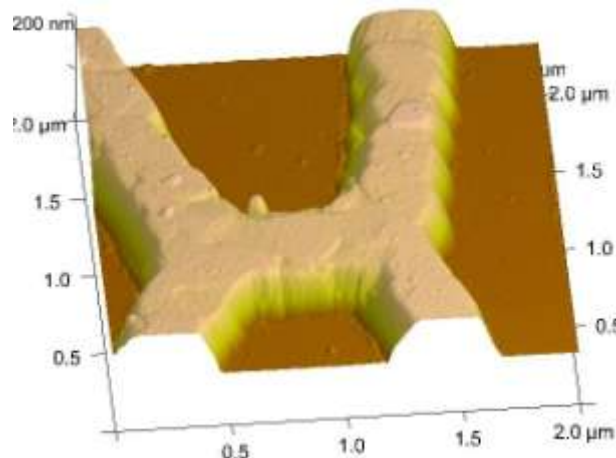
Монокристаллическая наноструктура из висмута

Аномально малая эффективная масса $m^*=0.01m_0$

Аномально малая энергия Ферми 28 мэВ

Аномально малая концентрация носителей 10^{-15} 1/cm^3

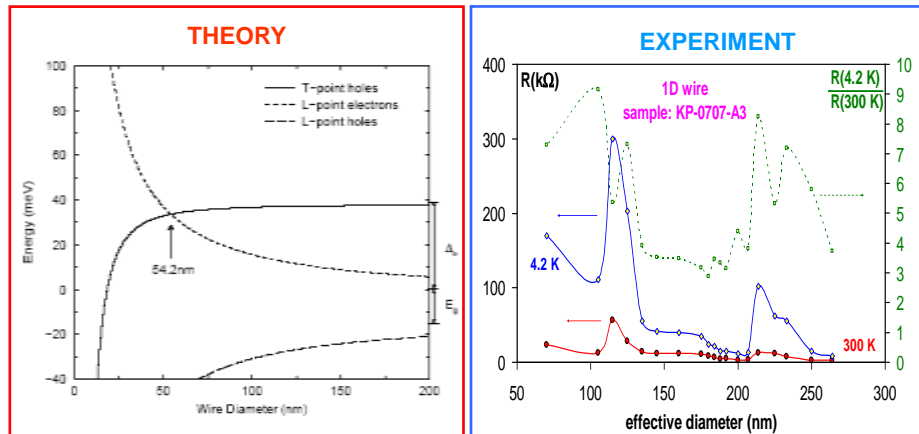
Сильная анизотропия свойств



Ві нанопровод: сопротивление-диаметр

Что ожидается с уменьшением диаметра провода:

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



Вывод по квантовым размерным эффектам в нормальных металлах

Наблюдение КРЭ в «хороших» металлах требует нереалистично малых диаметров

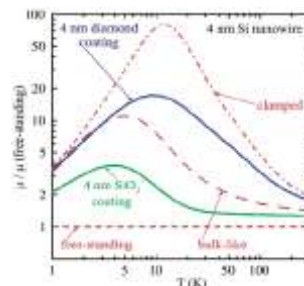
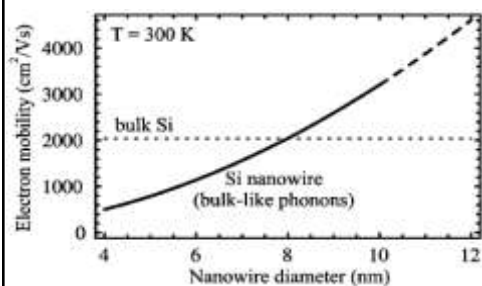
В полуметаллах или сильно допированных полупроводниках – КРЭ должны давать ощутимый вклад уже на уровне 50 нм

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

38

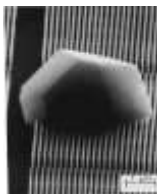
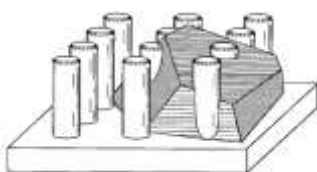
Полупроводники

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)



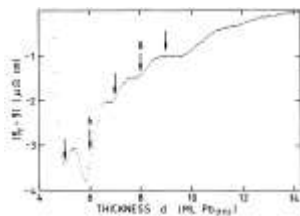
Single diamond crystallites around nanometer-scale silicon wires, P. A. Dennig, et.al. Appl. Phys. Lett. 67, 14 (1995)

Различные квантовые
размерные эффекты
подавляют электрическую
проводимость
полупроводникового
нанопровода на
масштабах ~ 10 nm

Другие явления связанные с КРЭ

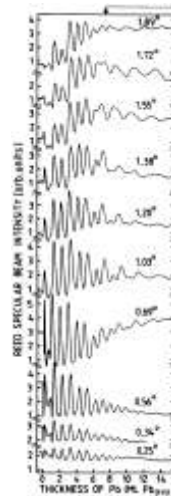
Очевидно, что КРЭ должны проявляться не только в проводах, но и в любых низкоразмерных системах. Например – тонких пленках.

Проводимость

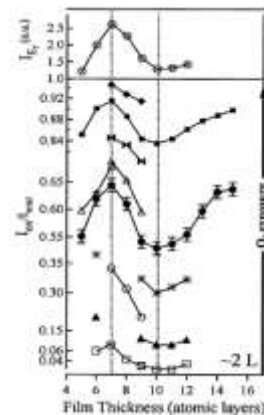


Epitaxial Pb films
M. Jalochoviski, E. Bauer
PRB, 38, 5272 (1988)

Отражающая способность

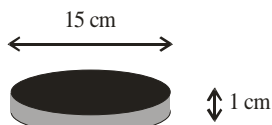


Поверхностная
химическая активность



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

Тепловыделение в электрических наносистемах



Нагревательный
элемент мощностью 1 кВт

Объемная плотность = $5.3 \text{ Вт} / \text{см}^3$

На единицу площади = $6 \text{ Вт} / \text{см}^2$

Intel processor data sheet



Year	Processor type	Clock speed (Hz)	Line width (nm)	Elements	Power (W)	T (°C)	Chip size (cm x cm x cm)	Power density (W/cm ²)
1997	Pentium® II	450×10^6	250	$\sim 7.5 \times 10^6$	27	55	1.4 x 1.4 x 1.7	8.1
2007	Quad-Core Intel® Xeon® 5350	2.3×10^9	65 / 90	$\sim 2 \times 10^9$	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  $\Leftrightarrow \sqrt{\sigma} \ll \xi(T) \ll L$

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

Минимальный объем, где флуктуация 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 :
 $R(T) \sim \exp(-\Delta F / \mathcal{E})$

Термическая активация:
 $\mathcal{E} \sim k_B T$

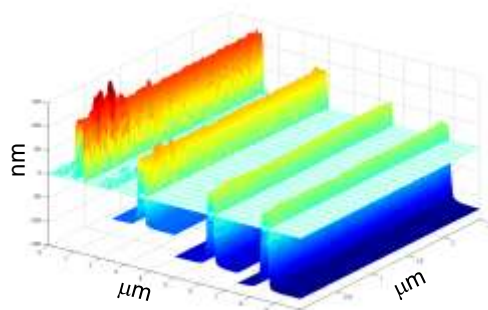
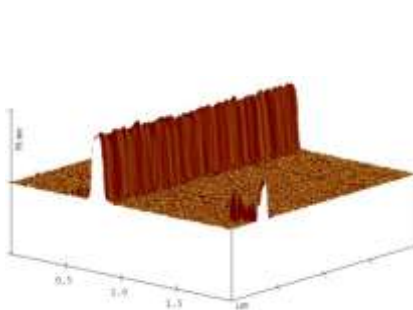
Термические эффекты
важны только вблизи
точки сверхпроводящего
перехода $T \rightarrow T_c$

Квантовая : $\mathcal{E} \sim \hbar \Gamma_{QPS}$
 $\Gamma_{QPS} \sim$ частота квантовых
флуктуаций

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

Алюминиевый нанопровод

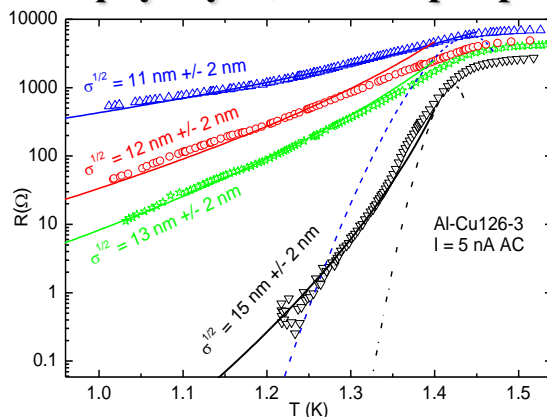
$8 \text{ nm} < \text{диаметр} < 100 \text{ nm}$



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

58

Квантовые флуктуации 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:

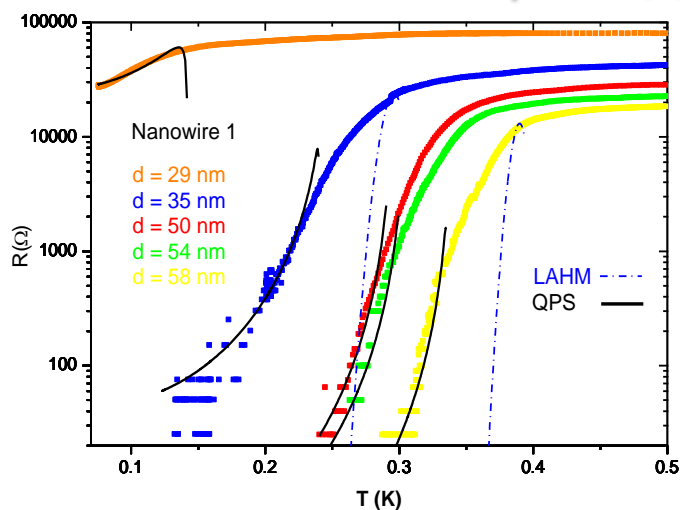
M. Zgirski, K.-P. Riikonen, V. Touboltsev, and K. Arutyunov, *Nano Letters* **5**, 1029, (2005)

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:

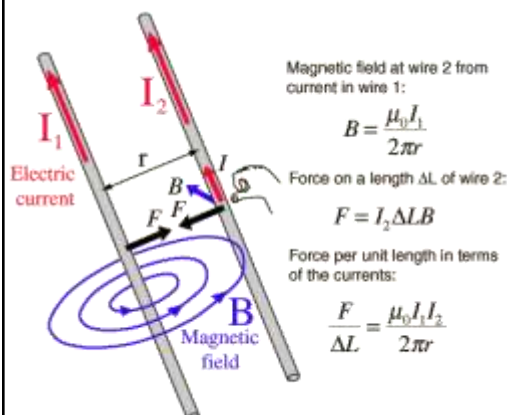
- в нормальных металлах подавлена проводимость
- в полупроводниках сильно падает подвижность
- в сверхпроводниках наблюдается конечное сопротивление

Есть ли будущее у наноэлектроники ?

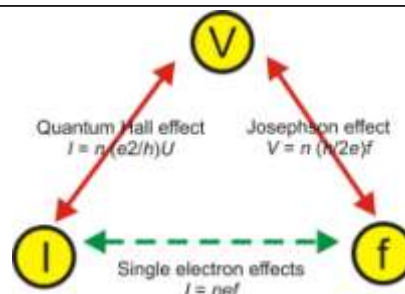
**Прикладные
задачи**

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!

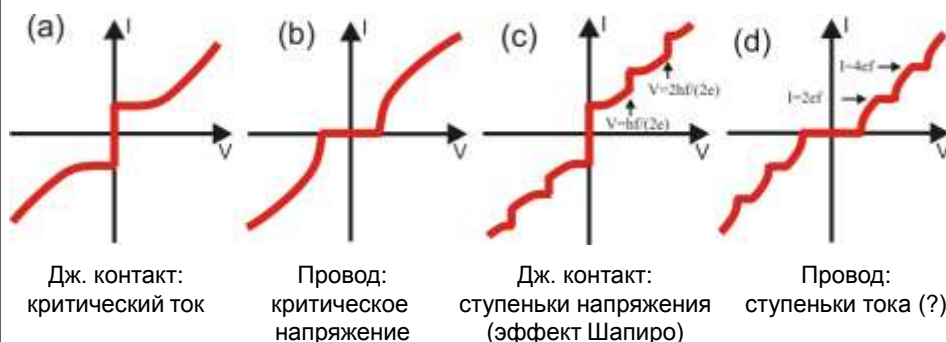
Реализация квантового эталона тока – одна из наиболее первоочередных задач современной метрологии!

Квантовый эталон тока

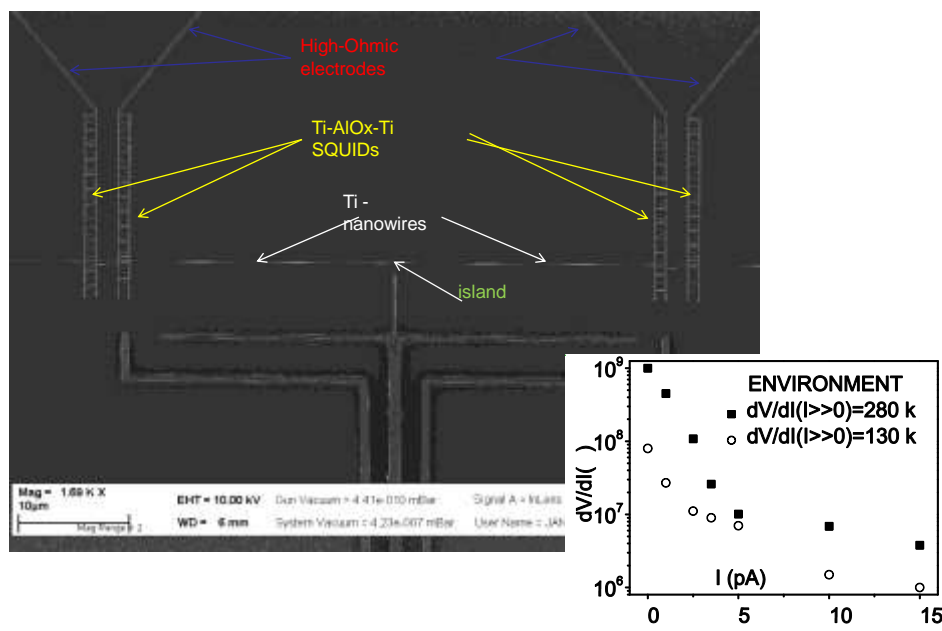
Модели, описывающие поведение тонкого сверхпроводящего провода (в режиме квантовых флуктуаций) и Джозефсоновского контакта дуальны - идентичны с точностью до замены переменных.

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

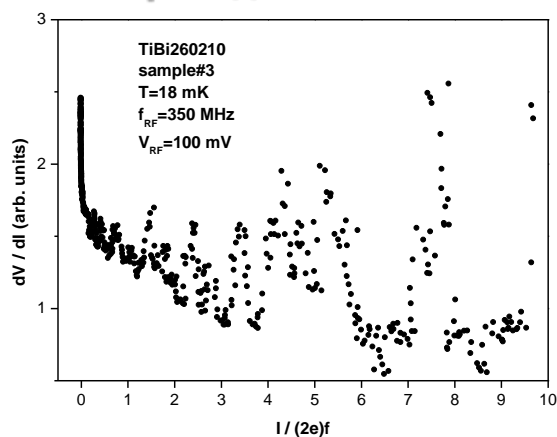
*J. E. Mooij and Yu. V. Nazarov, Nature Physics **2** (2006) 169.*



Гибридная структура в высокомном окружении



Титановый нанопровод в высокоомном окружении

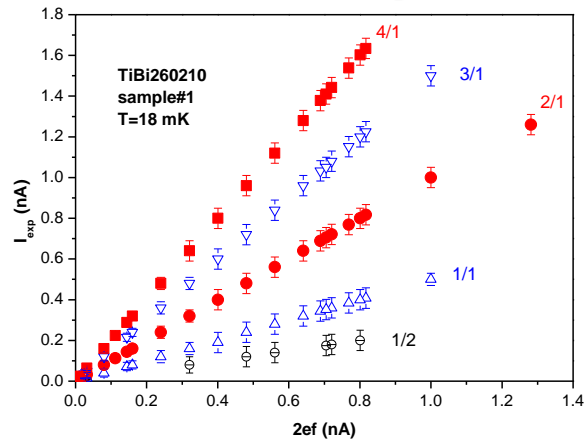


dV/dI at $f_{RF}=350$ МГц и амплитуда 100 мВ. Ток нормирован на величину $(2e) \times f_{RF}$

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

Универсальное соотношение $I(n) = (2e) \cdot n \cdot f_{RF}$

Положение ступенек



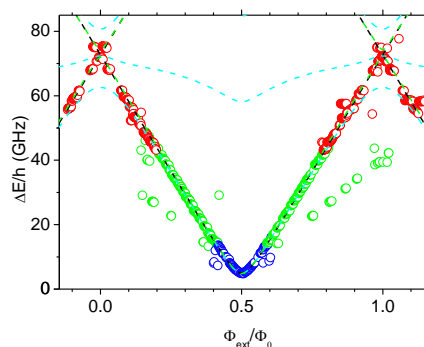
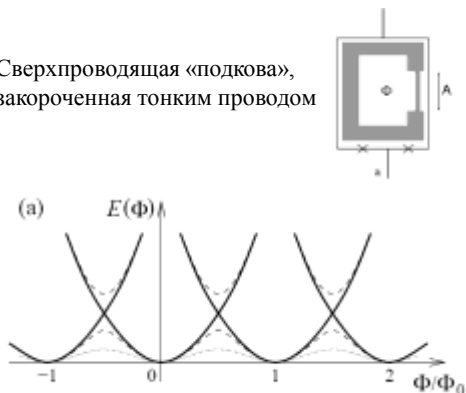
Красные точки соответствуют **блховским ступенькам** ($2e$),
синие – **одноэлектронным особенностям** (e), **черные** –
 одноэлектронным субгармоникам

Принципиальная демонстрация
 квантового эталона нового принципа

Новый тип квантовой логики (qbit)

Qbit = двух-уровневая система, позволяющая «смешивание»
 квантовых состояний

Сверхпроводящая «подкова»,
 закороченная тонким проводом



Phys. Rev. Lett. 89, 096802 (2002)
New Journal of Physics 7, 219 (2005)
Physics Reports 464, 1 (2008)

O. V. Astafiev, L. B. Ioffe, S. Kafanov,
 Yu. A. Pashkin, K. Yu. Arutyunov, D.
 Shahar, O. Cohen, and J. S. Tsai.
Nature 484, 355 (2012).

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 металлических наноструктурах*), в рамках Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2015- 2016 гг.