

# Фундаментальные ограничения и перспективы развития наноэлектроники

***Константин Арутюнов***

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



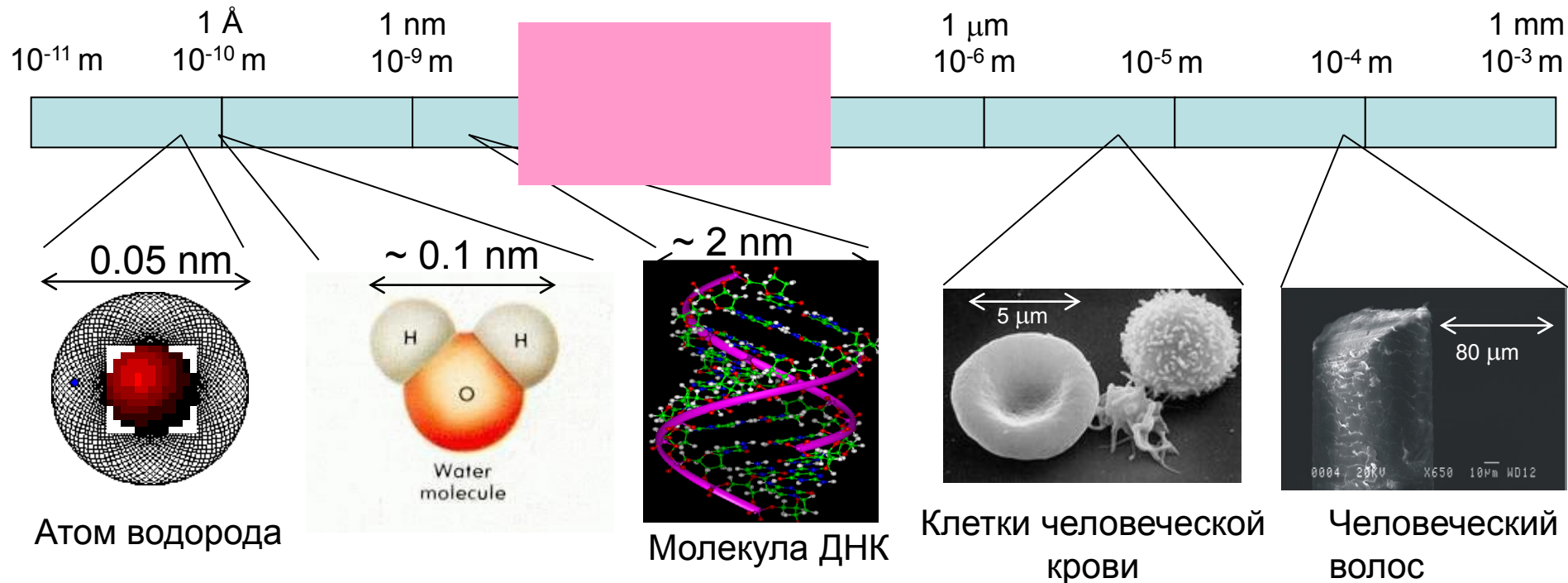
Московский институт электроники  
и математики НИУ ВШЭ

Нижний Новгород, 23 января 2015

# 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

42 nm – последнее поколение процессоров Intel

30 nm – опытный технолог

< 15 nm – на пределе возможного

Что такое много?



# Характерные физические масштабы

**Нормальный металл: движение отдельных электронов**

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

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

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

} **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.

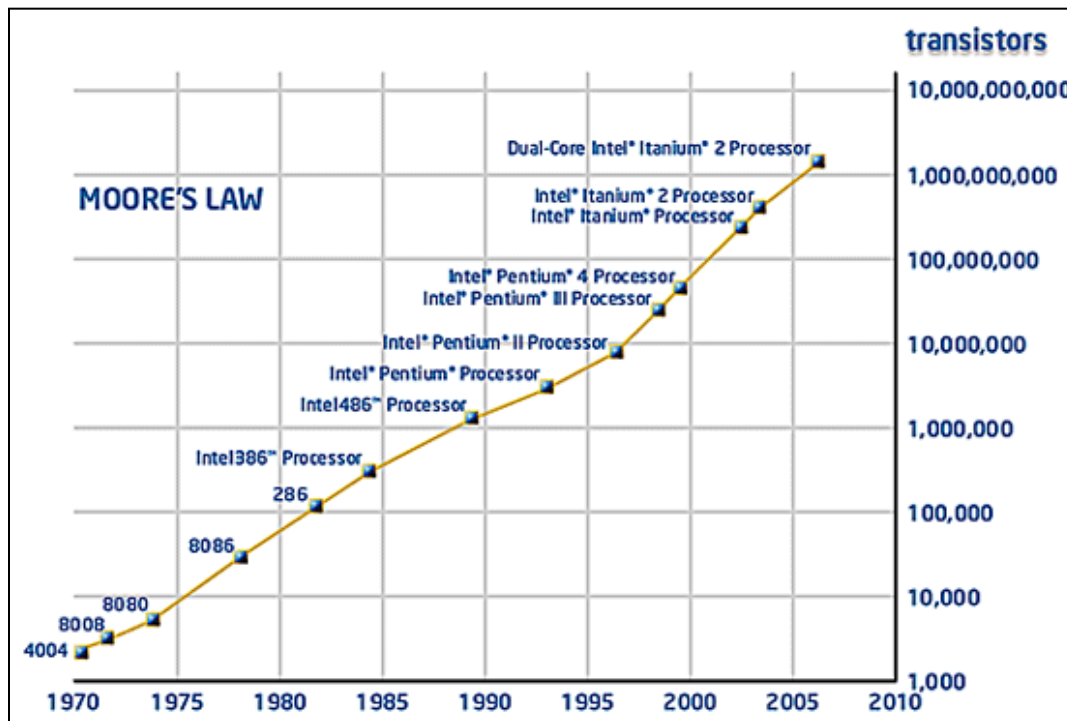
Электронные приборы и устройства используются в системах связи, автоматике, в вычислительной технике, измерительной технике и т. д.

# Правило Мура

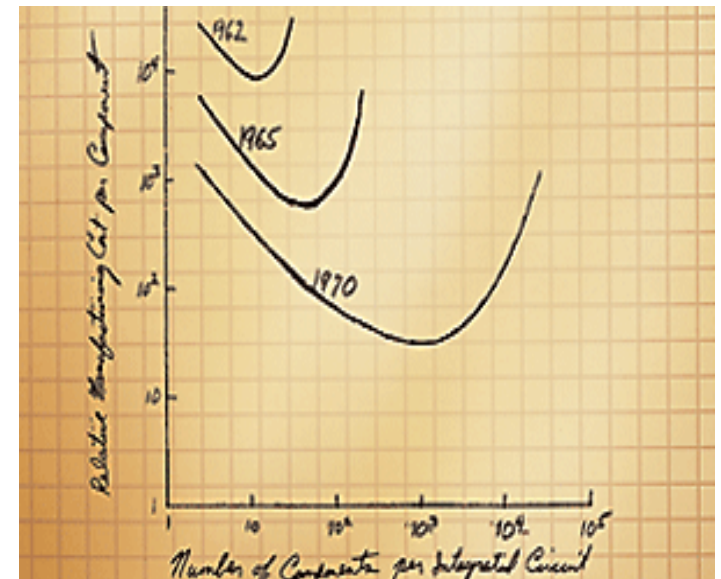
*[Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965]*

Количество транзисторов на интегральной схеме удваивается каждые 1.5 года

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



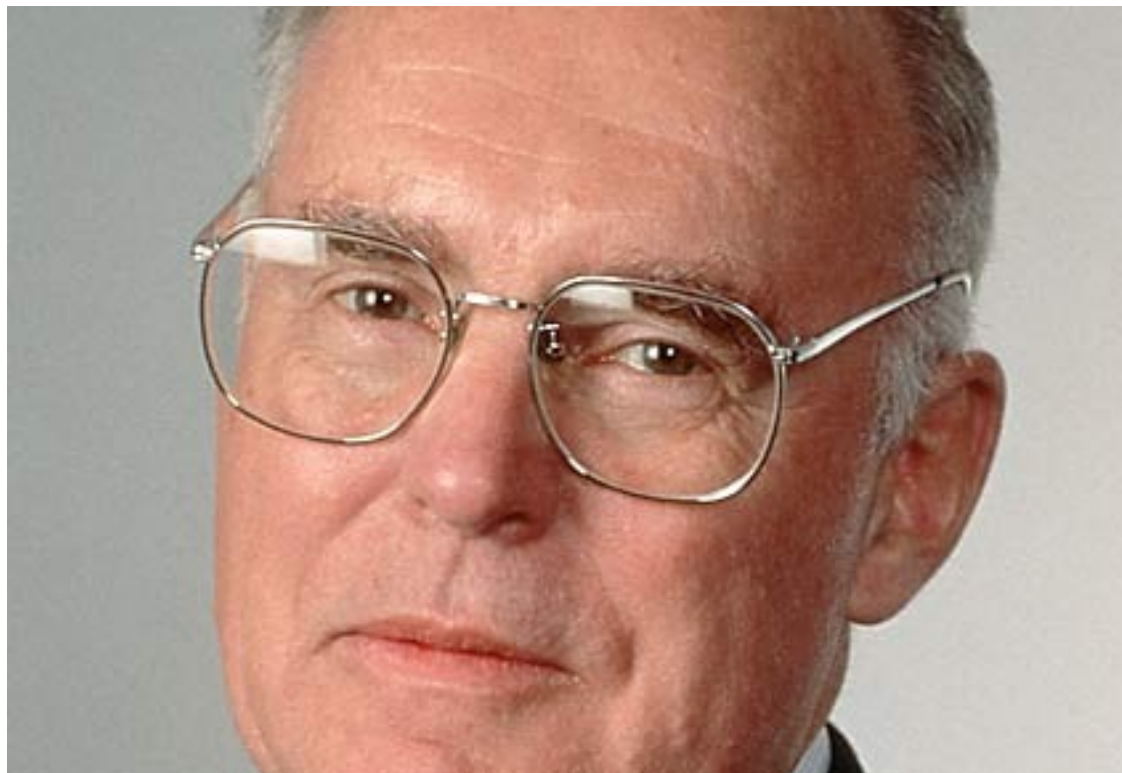
<http://www.intel.com/technology/mooreslaw/index.htm>



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

**Существует ли предел миниатюризации?**

# 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.»



**Технология изготовления**

**сверхмалых структур**

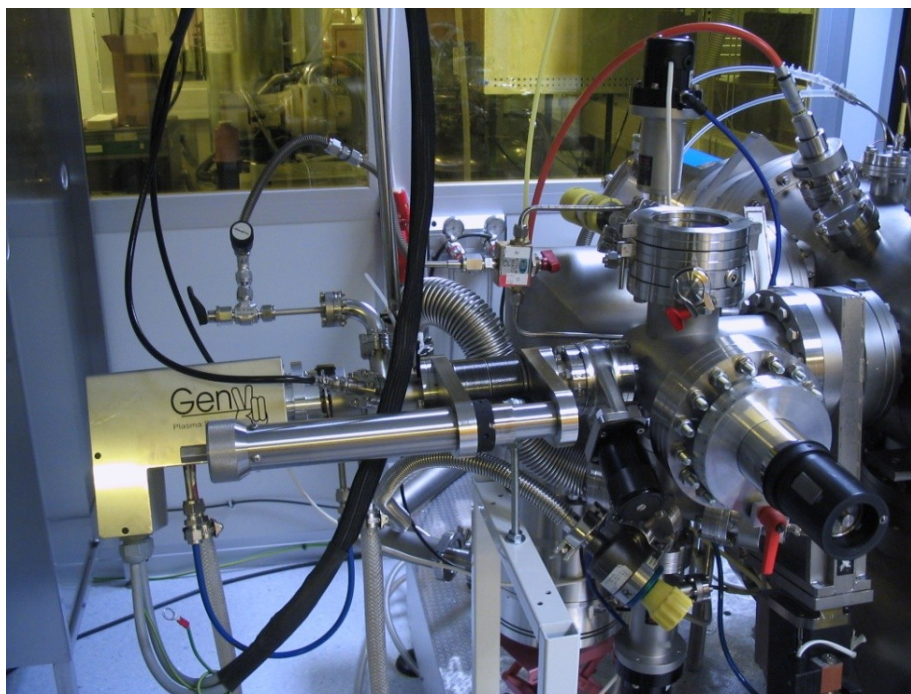
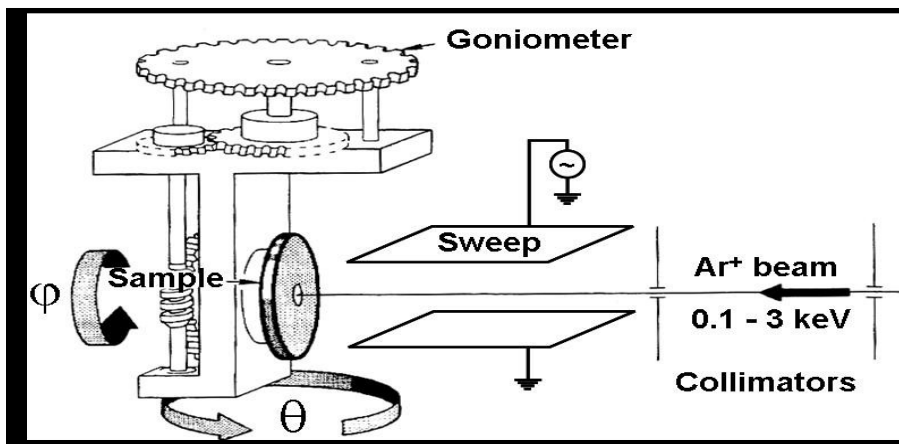
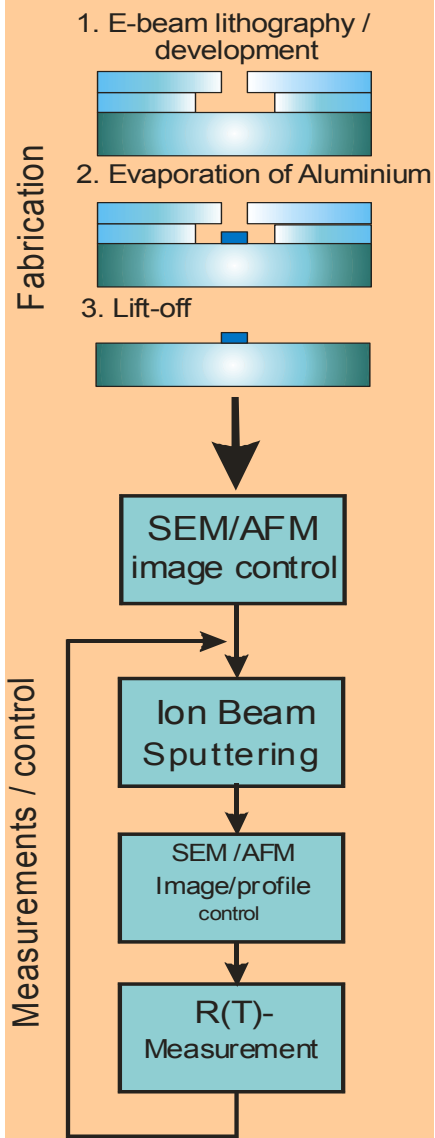
# Стандартные методы

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 (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

# Провод – базовый элемент любой цепи

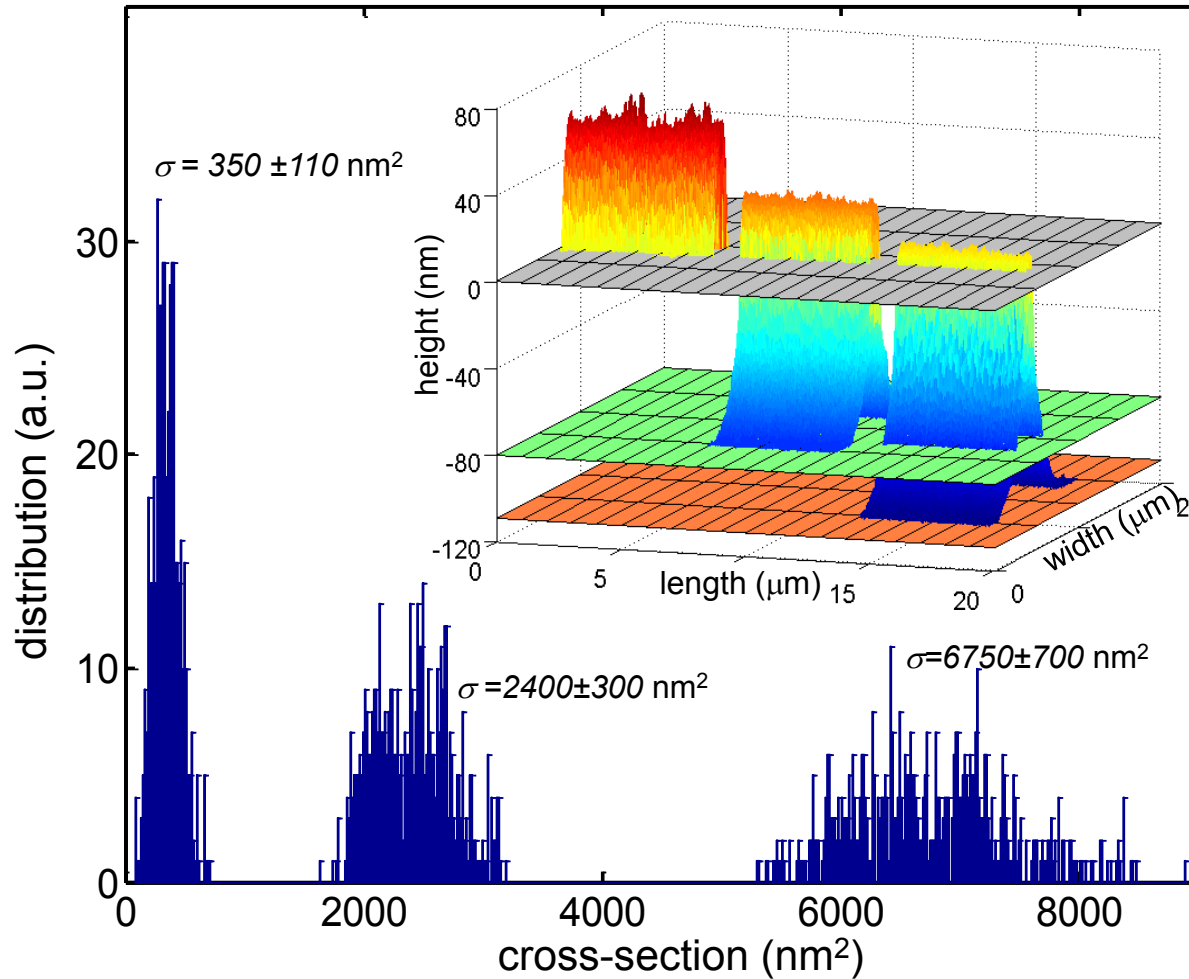
Исследовать размерный эффект на одном и том же образце постепенно уменьшая диаметр

## RESEARCH FLOW-CHART



# Ионная обработка

Ионная бомбардировка уменьшает размеры и полирует поверхность



Глубина проникновения ионов  $0.5 \text{ kV Ar}^+$  в металл  $1.5 \text{ nm}$

# 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

# Нормальный металл

Что определяет электрическую  
проводимость твердых тел?

# Электрическая проводимость

Periodic Table of Elements

1	2																	10
H	He																	Ne
3	4																	10
Li	Be																	Ne
11	12																	18
Na	Mg																	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110									
Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110									

Положение в таблице

Кристаллическая решетка: алмаз и графит.

\* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

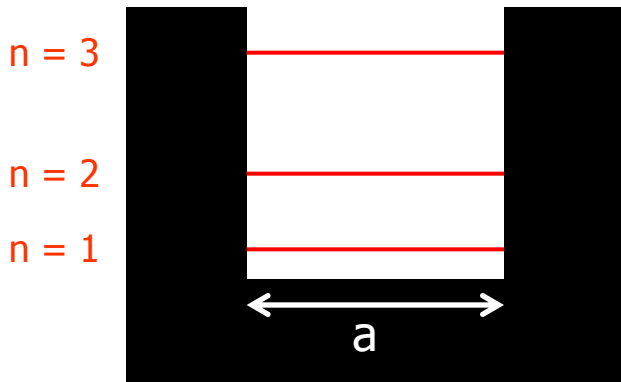
Legend - click to find out more...

- H - gas
- Li - solid
- Br - liquid
- Tc - synthetic
- Non-Metals
- Transition Metals
- Rare Earth Metals
- Halogens
- Alkali Metals
- Alkali Earth Metals
- Other Metals
- Inert Elements

Как размер системы влияет на электрическую проводимость?

# Размерное квантование

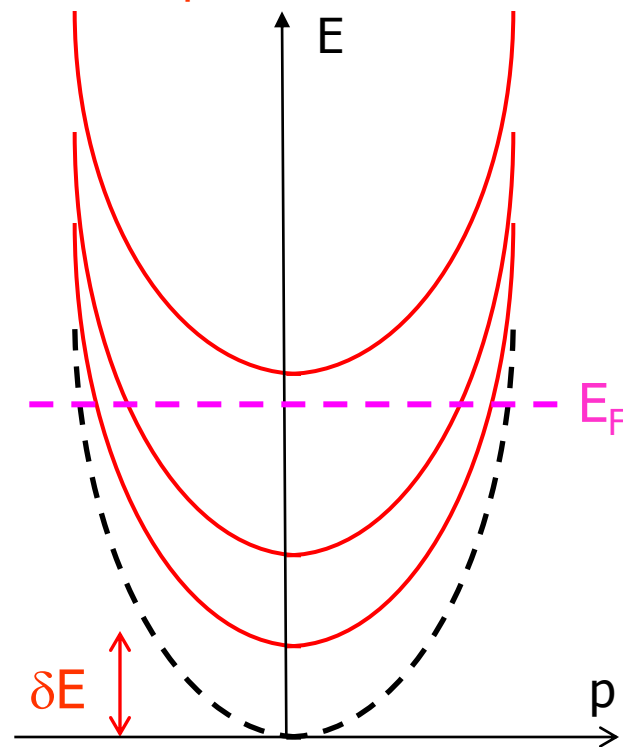
Частица в потенциальной яме



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

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

Электроны в металлах  
Размерное квантование



Если энергия Ферми  $E_F$  постоянна :

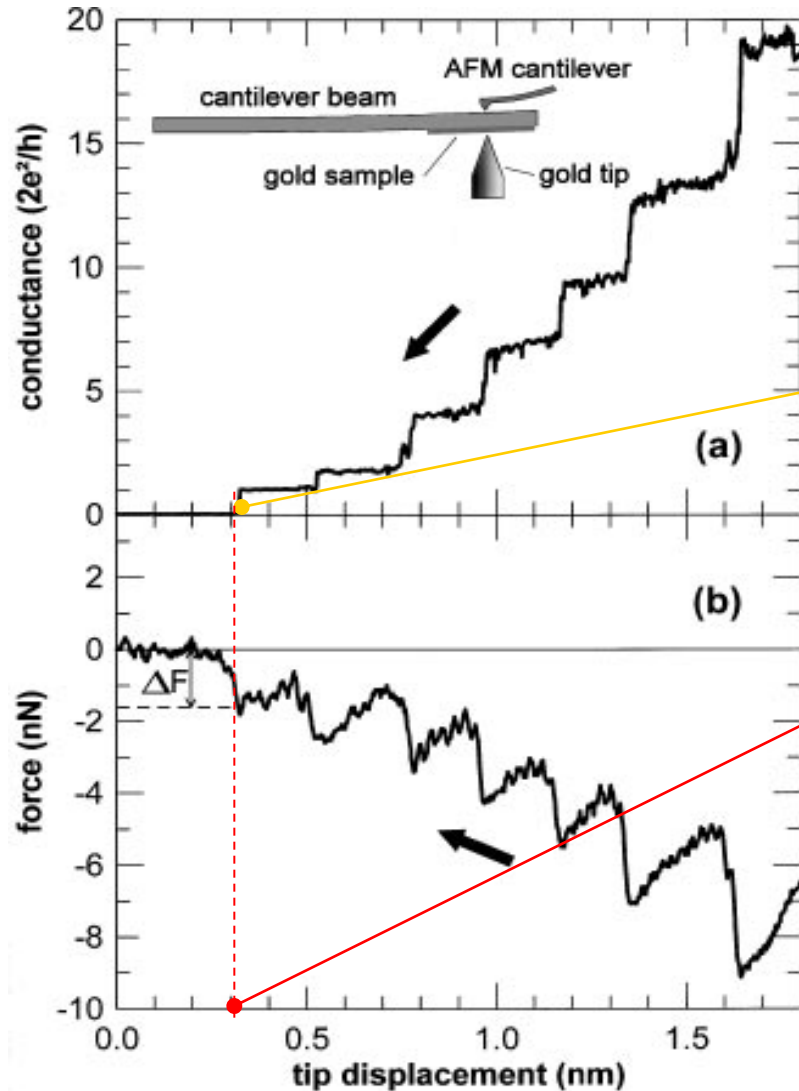
- свойства системы должны периодически меняться с размером  $a$
- ниже некого размера (= длина волны de Broglie )  $\delta E > E_F$  : переход металл-изолятор

**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. Agraït, 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  $\sim 0.3$  nm

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

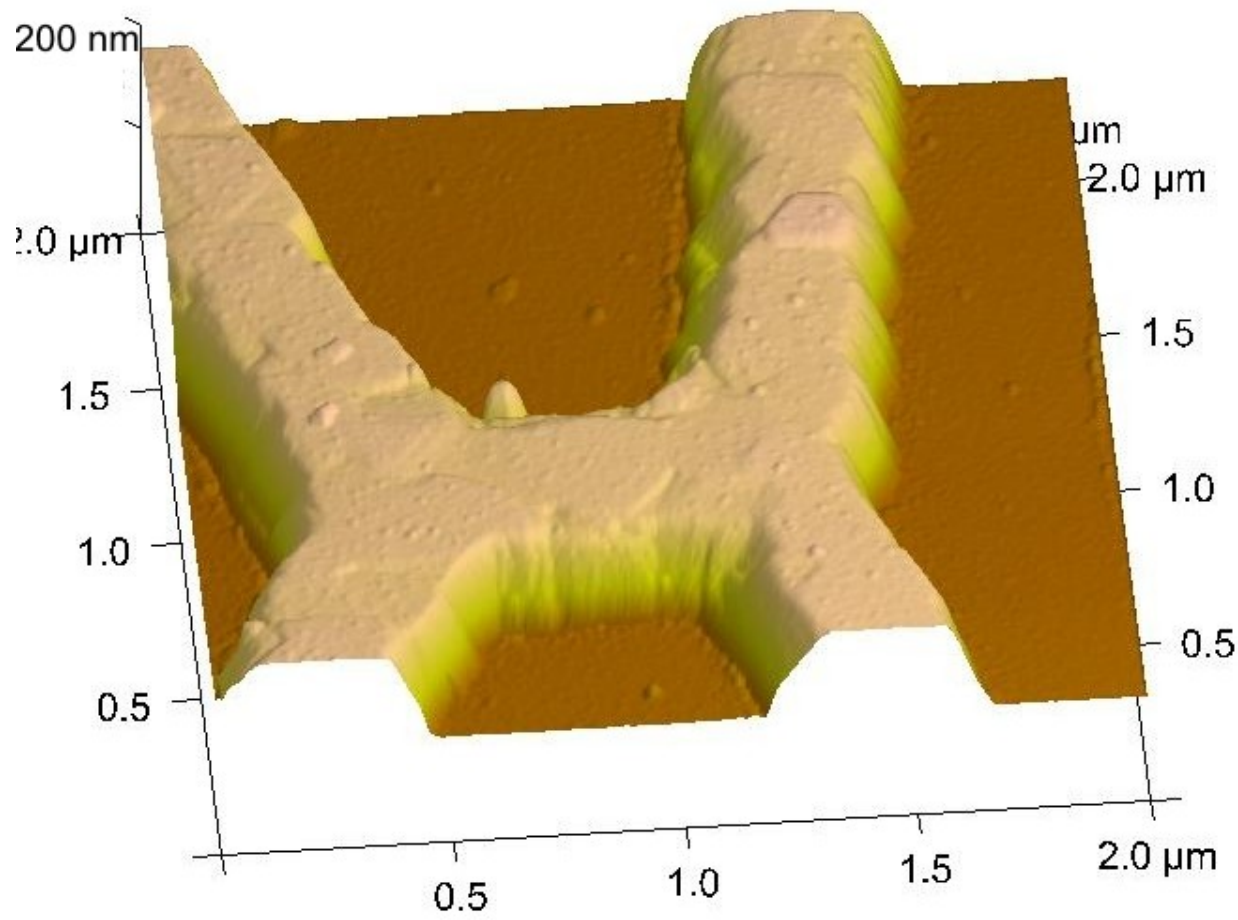
# Монокристаллическая наноструктура из висмута

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

Аномально малая энергия Ферми 28 мэВ

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

Сильная анизотропия свойств

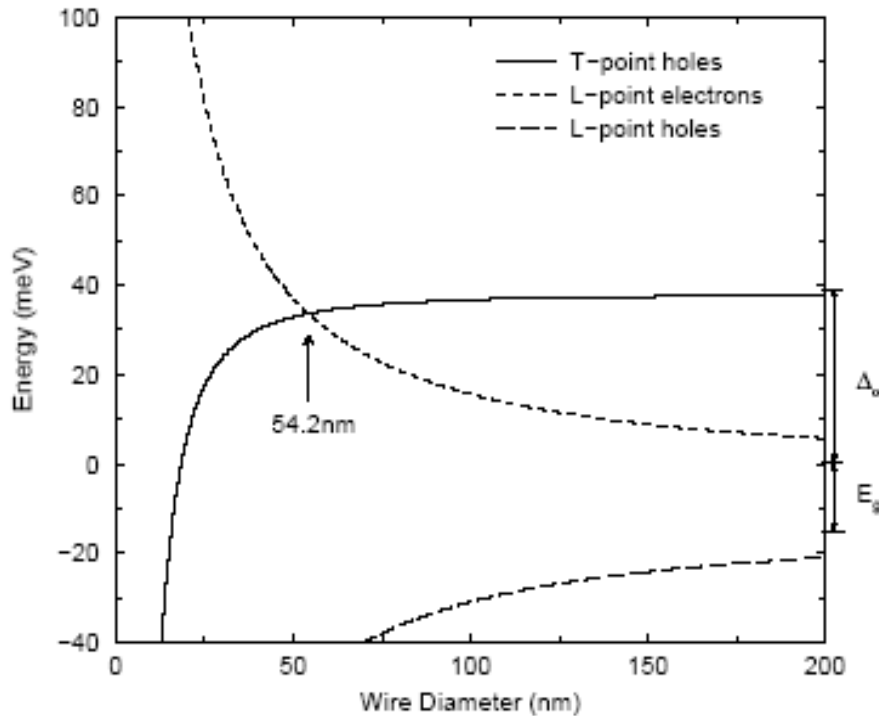


# Ві нанопровод: сопротивление-диаметр

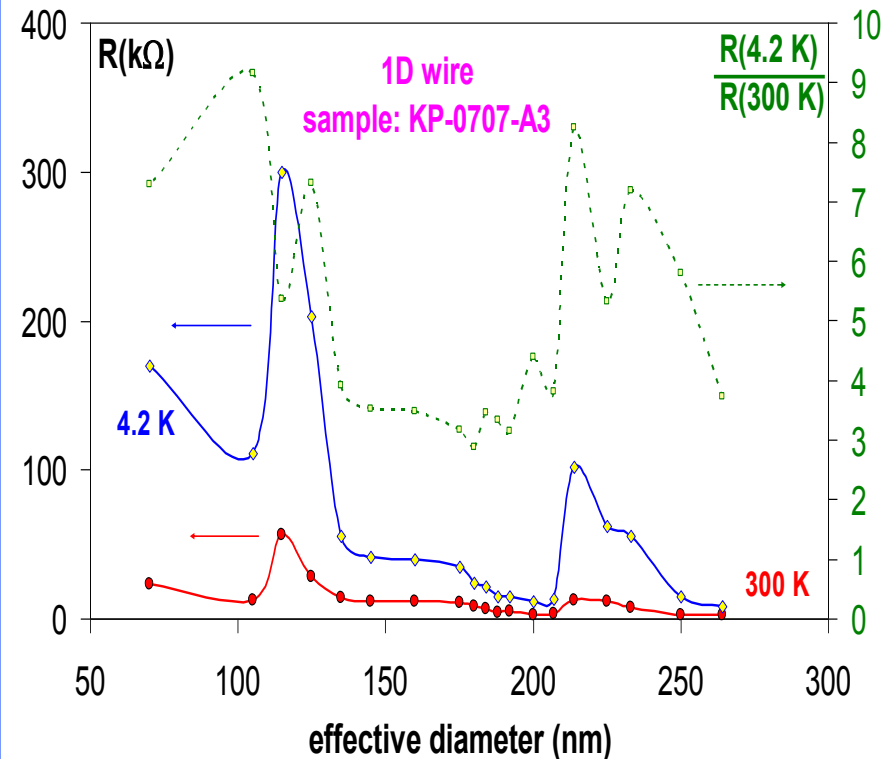
Что ожидается с уменьшением диаметра провода:

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

## THEORY



## EXPERIMENT



# Вывод по квантовым размерным эффектам в нормальных металлах

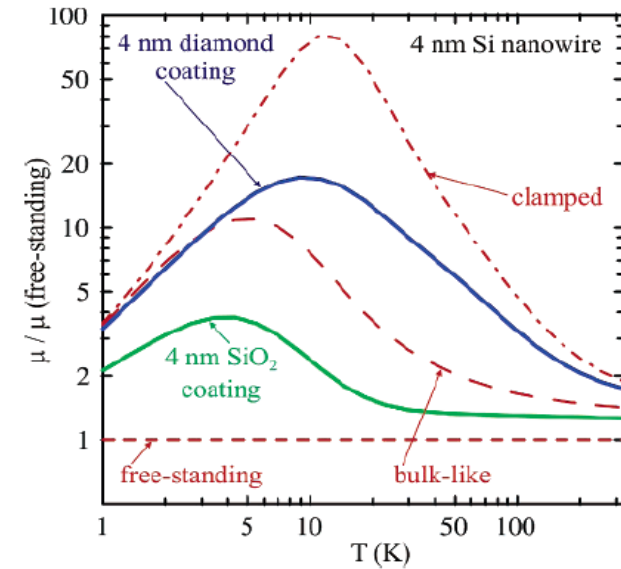
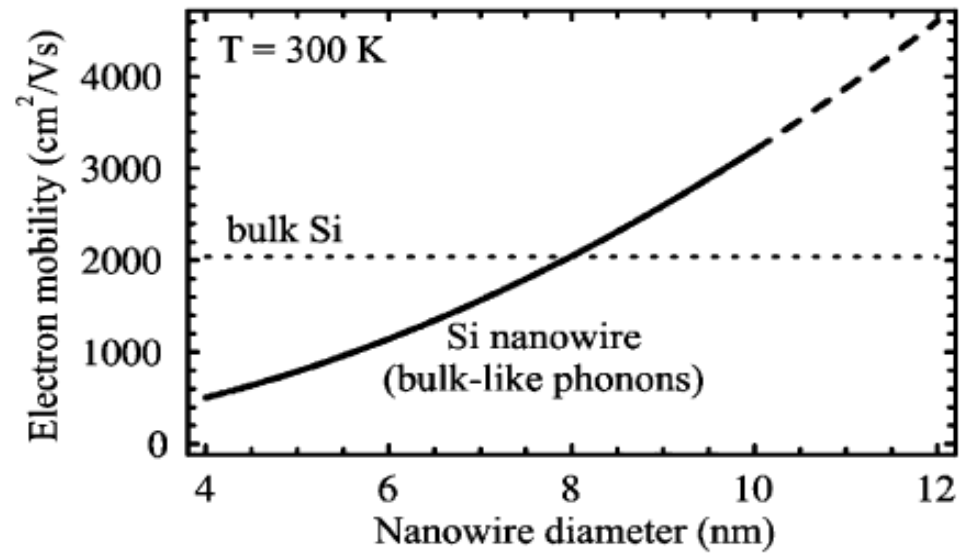
Наблюдение КРЭ в «хороших» металлах требует нереалистично малых диаметров

В полуметаллах или сильно допированных полупроводниках – КРЭ должны давать ощутимый вклад уже на уровне 10 нм

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

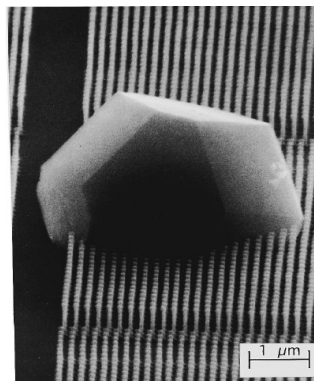
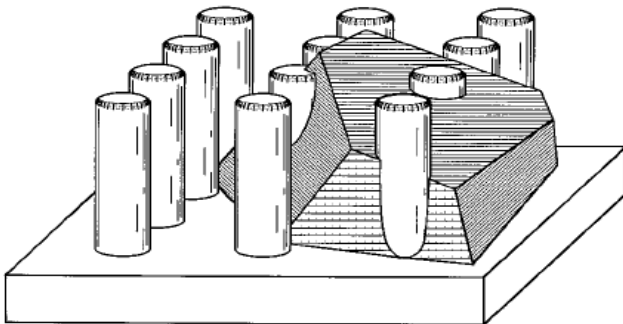
ПОЛУПРОВОДНИКИ

# 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)*



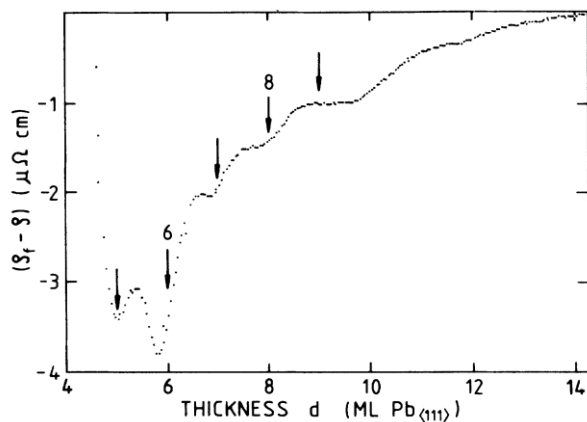
**Single diamond crystallites around nanometer-scale silicon wires, P. A. Dennig, et.al. Appl. Phys. Lett. 67, 14 (1995)**

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

# Другие явления связанные с КРЭ

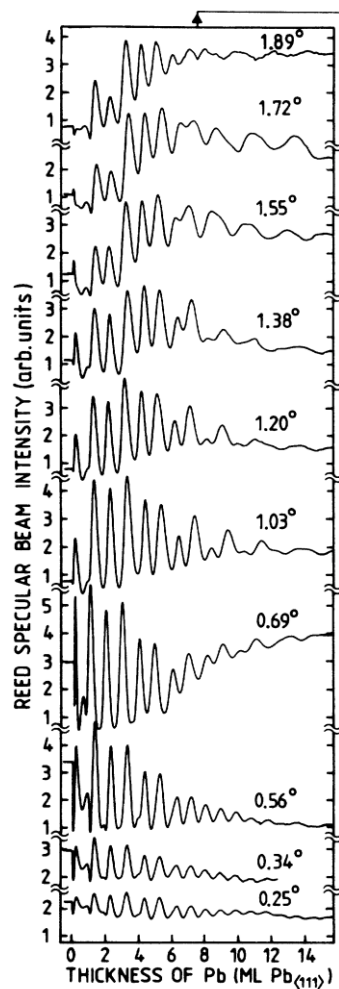
Очевидно, что КРЭ должны проявляться не только в проводах, но и в любых низкоразмерных системах. Например – тонких пленках.

Проводимость



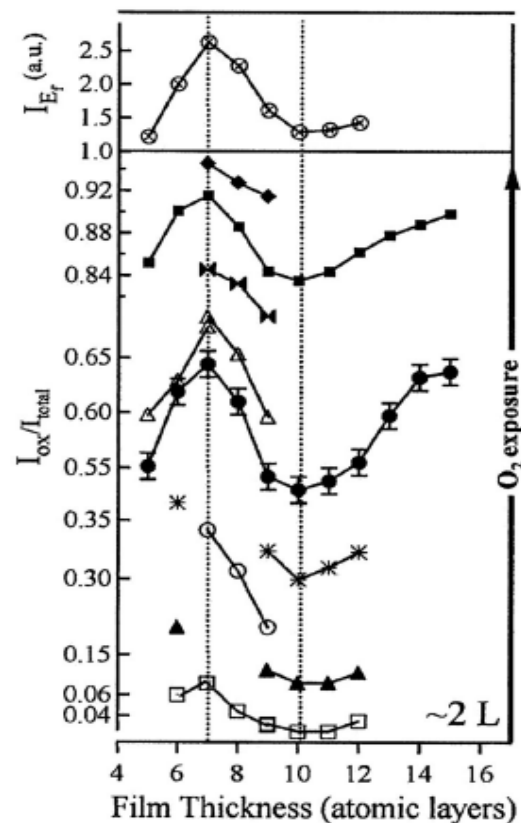
Epitaxial Pb films  
M. Jalochovski, E. Bauer  
PRB, 38, 5272 (1988)

Отражающая способность



Поверхностная

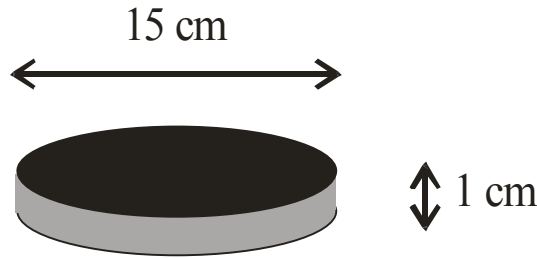
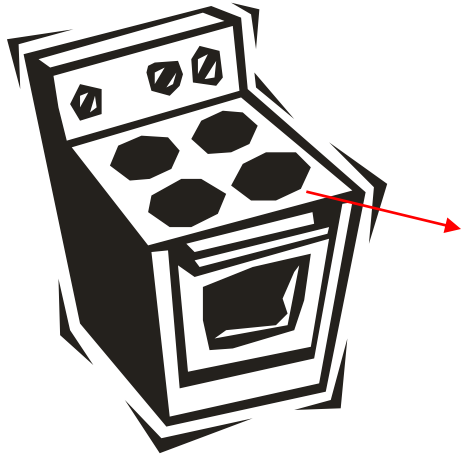
химическая активность



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



# Тепловыделение в электрических наносистемах



**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 <sup>3</sup> )
1997	Pentium® II	$450 \times 10^6$	250	$\sim 7.5 \times 10^6$	27	55	1.4 x 1.4 x 1.7	[Redacted]
2007	Quad-Core Intel® Xeon® 5300	$2.3 \times 10^9$	65 / 90	$\sim 2 \times 10^9$	80	66	3.4 x 3.4 x 0.37	


**Intel Core 2 Quad Xeon UP X32xx processor ~  $80 \text{ Вт} / \text{см}^2$**

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

# СВЕРХПРОВОДНИКИ

Есть ли размерные  
ограничения на протекание  
бездиссипативного  
сверхтока?

# Резистивное состояние 1D сверхпроводника

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

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

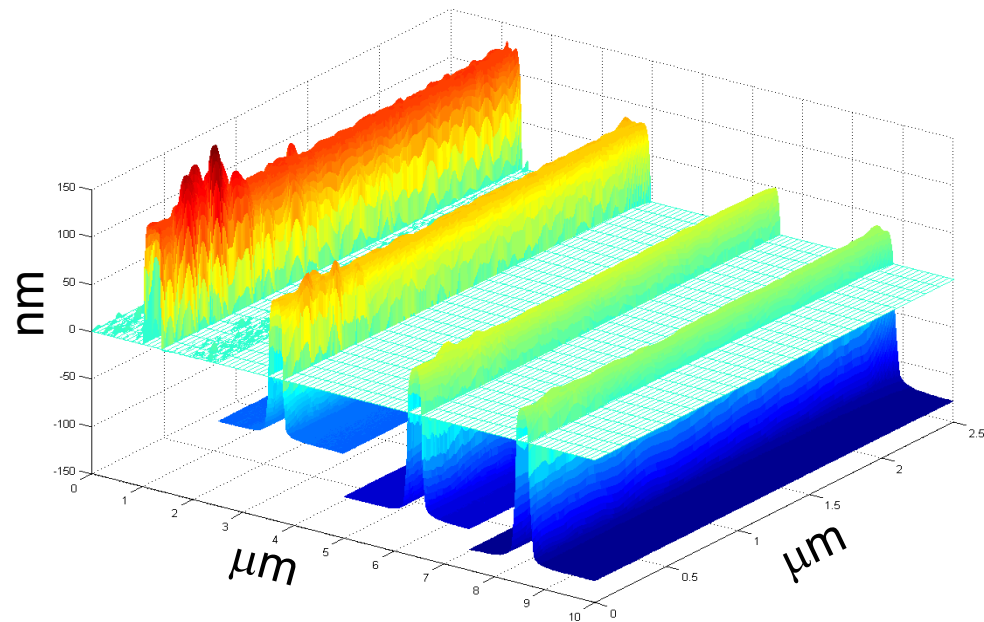
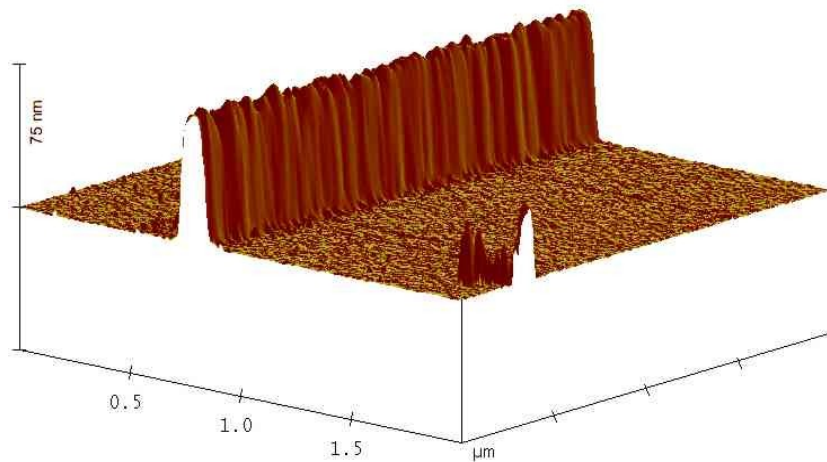
**Термические эффекты  
важны только вблизи  
точки сверхпроводящего  
перехода  $T \rightarrow T_c$**

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

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

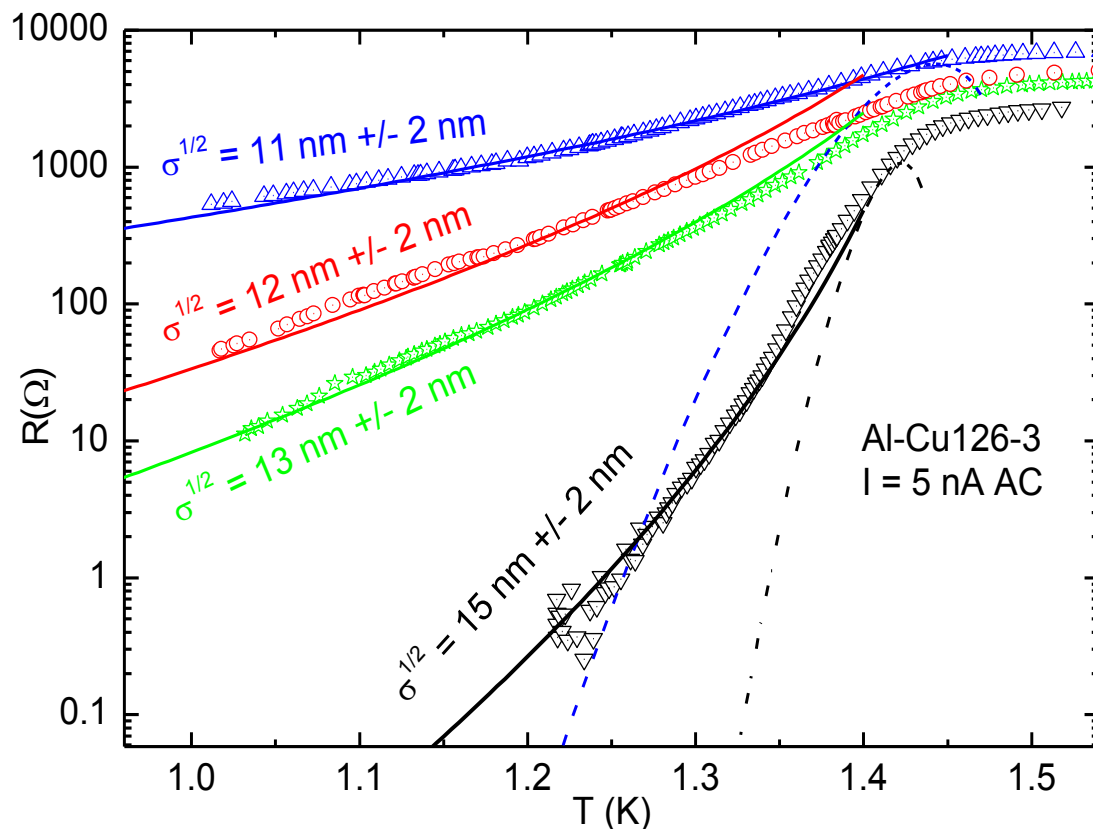
# Алюминиевый нанопровод

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



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

# Квантовые флуктуации в сверхпроводниках



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

**При диаметрах менее  $\sim 12$  нм – конечное сопротивление сверхпроводника!**

Теория:

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

Эксперимент:

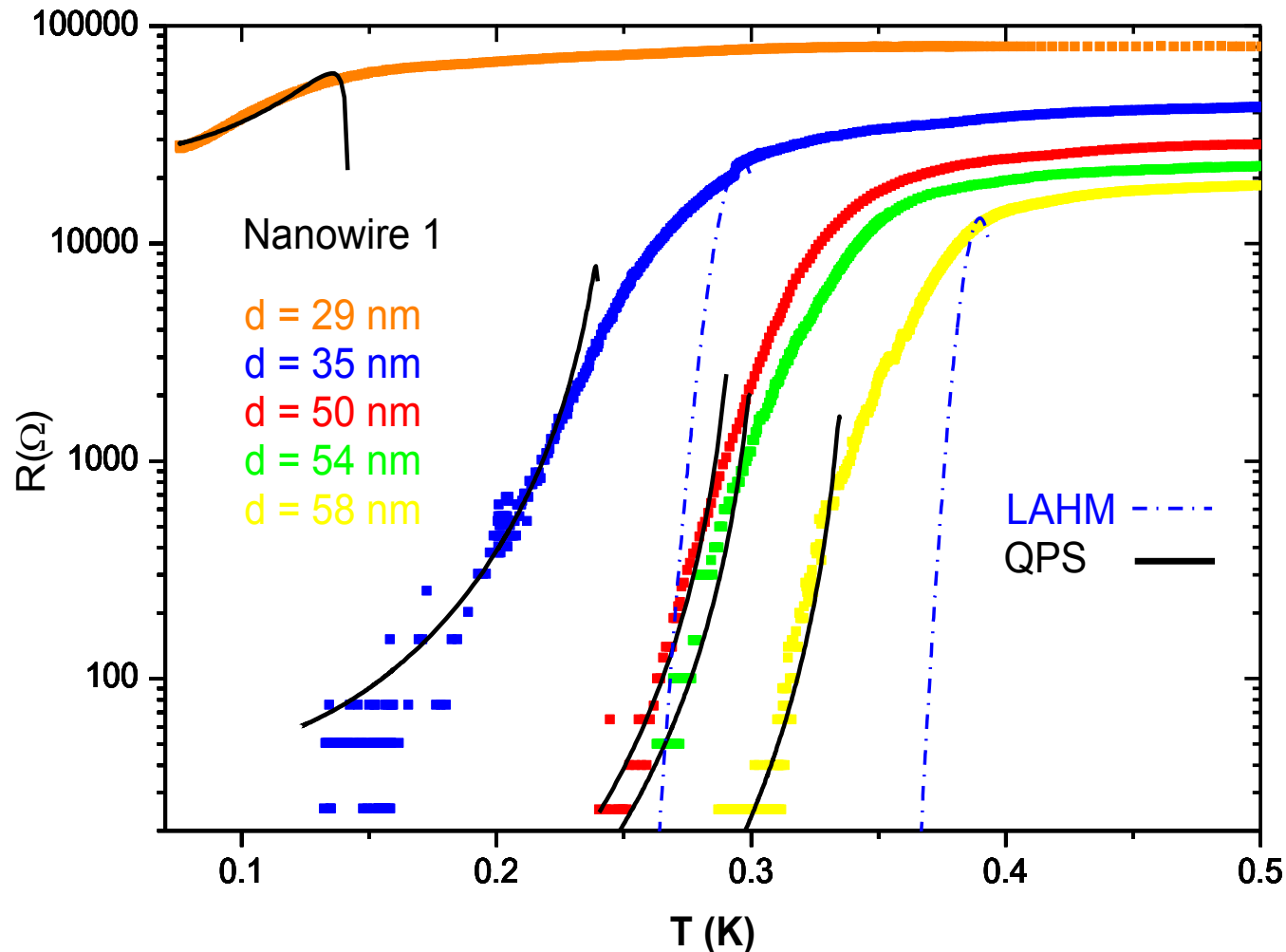
M. Zgirski, K.-P. Riihonen, V. Touboltsev, and K. Arutyunov, *Nano Letters* 5, 1029, (2005)

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  $\sim 30$  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**

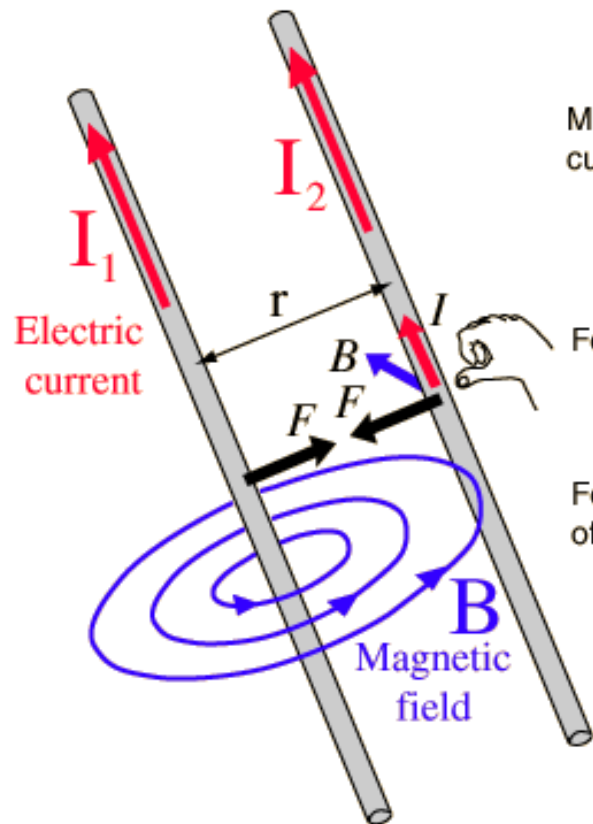
**Есть ли будущее у наноэлектроники ?**

**Прикладные  
задачи**



# Эталон электрического тока

## Определение ампера в системе СИ



Magnetic field at wire 2 from current in wire 1:

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

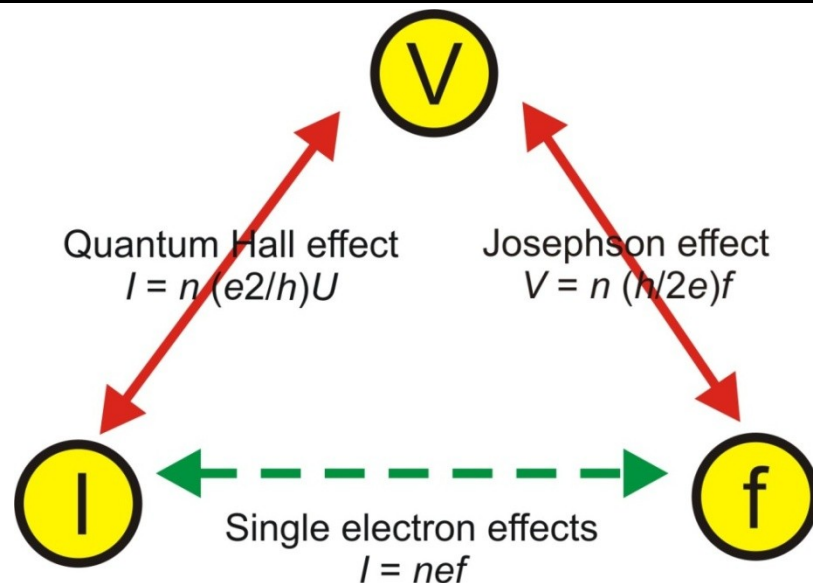
Force on a length  $\Delta L$  of wire 2:

$$F = I_2 \Delta L B$$

Force per unit length in terms of the currents:

$$\frac{F}{\Delta L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$$

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!

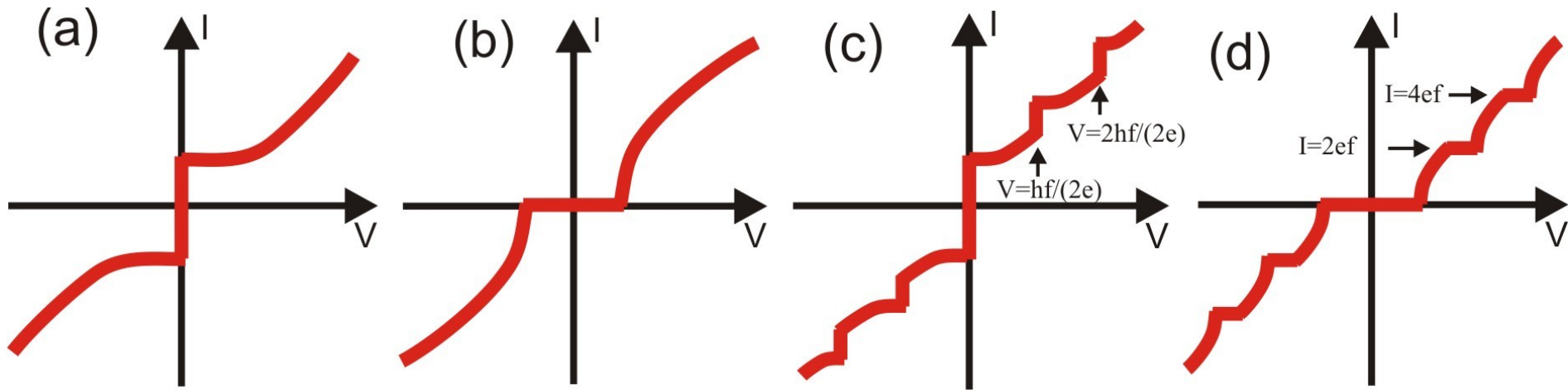
Реализация квантового эталона тока – одна из наиболее первоочередных задач современной метрологии!

# 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.*



Дж. контакт:  
критический ток

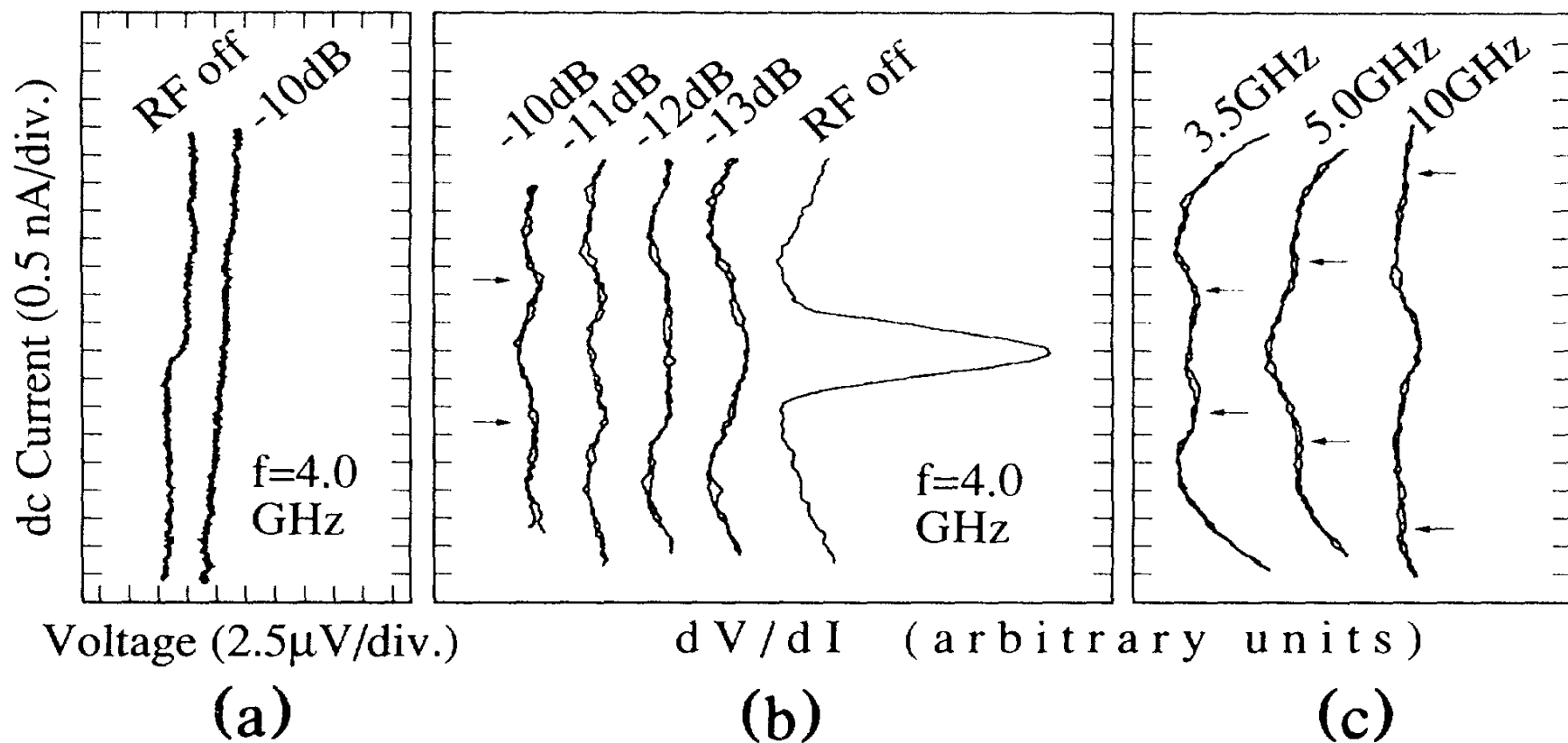
Провод:  
критическое  
напряжение

Дж. контакт:  
ступеньки напряжения  
(эффект Шапиро)

Провод:  
ступеньки тока (?)

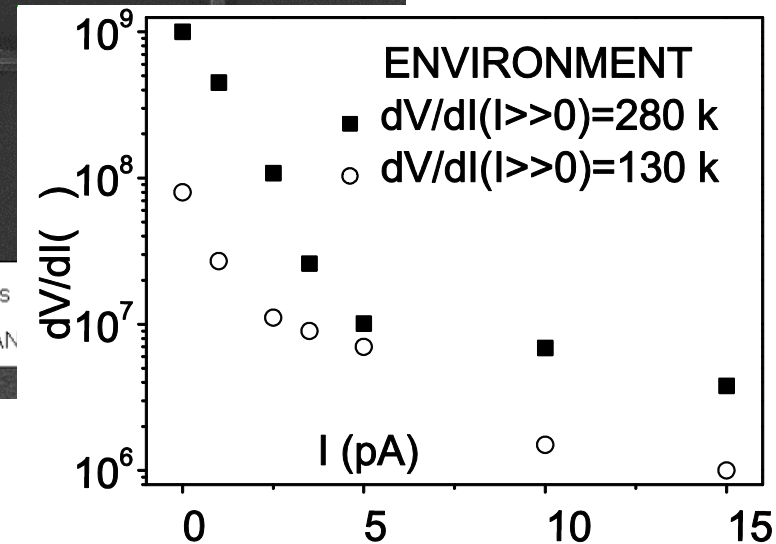
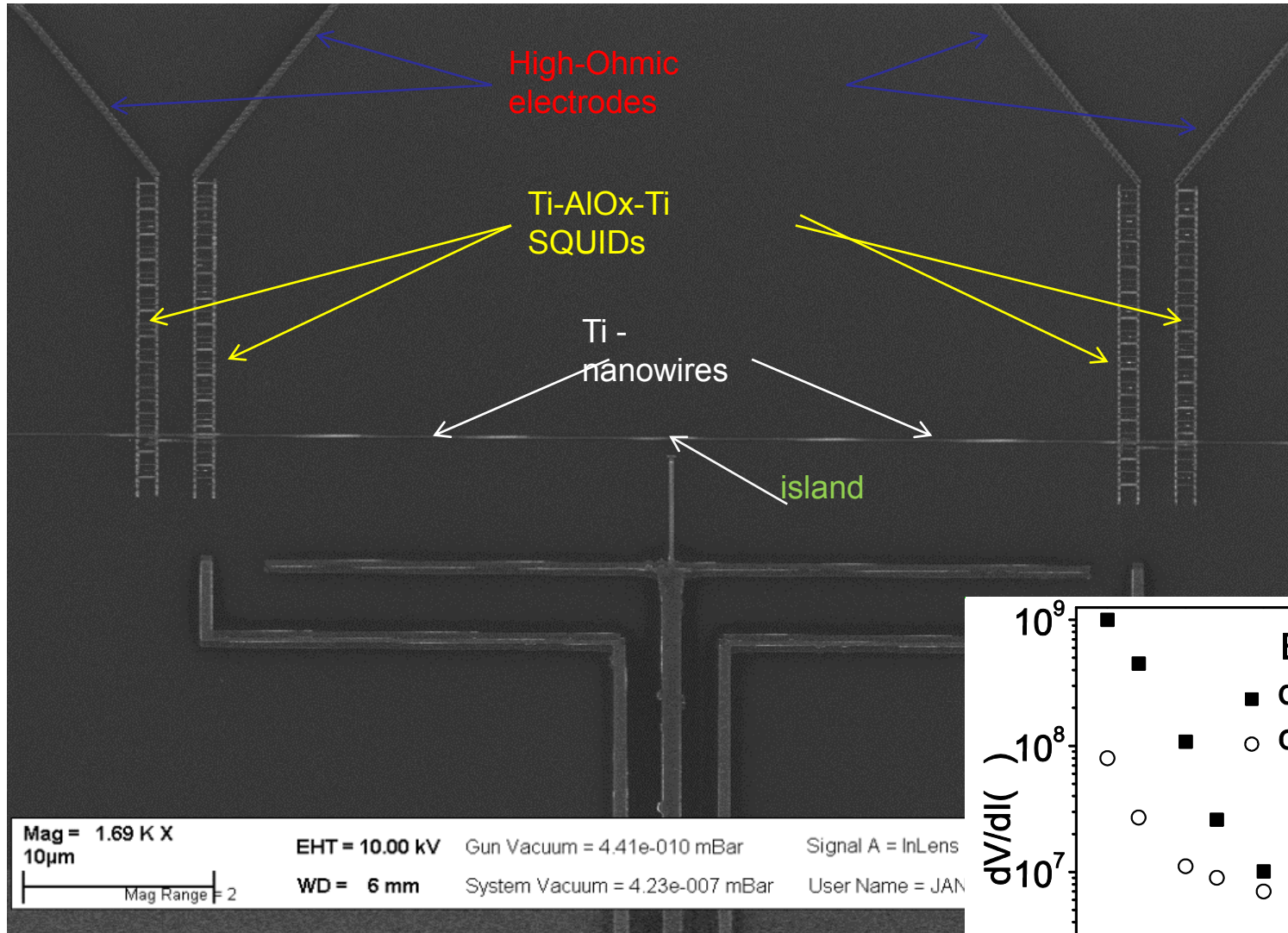
# Наблюдение блоховских осцилляций в джозефсоновских контактах сверхмалых размеров

Kuzmin & Haviland, PRL 67, 2890 (1991)

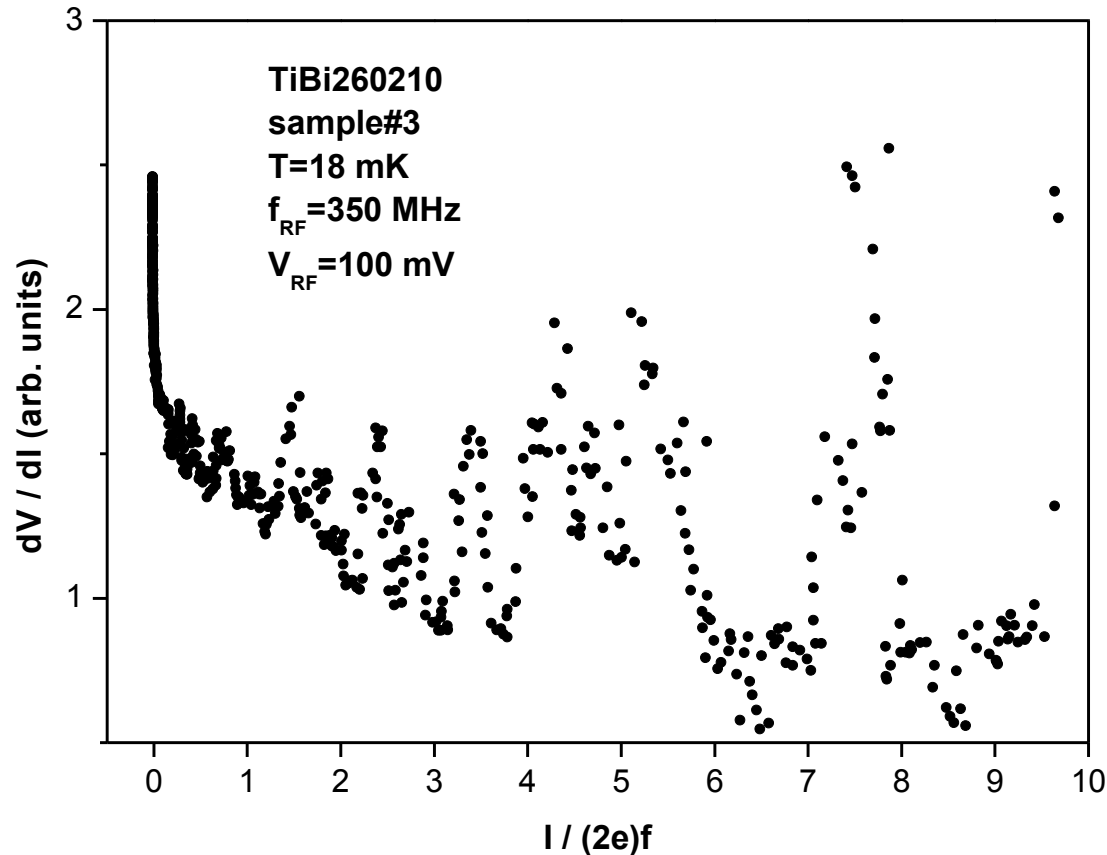


- Эффект принципиально наблюдается
- Амплитуда эффекта весьма мала

# Гибридная структура в высоком окружении



# Титановый нанопровод в высокоомном окружении

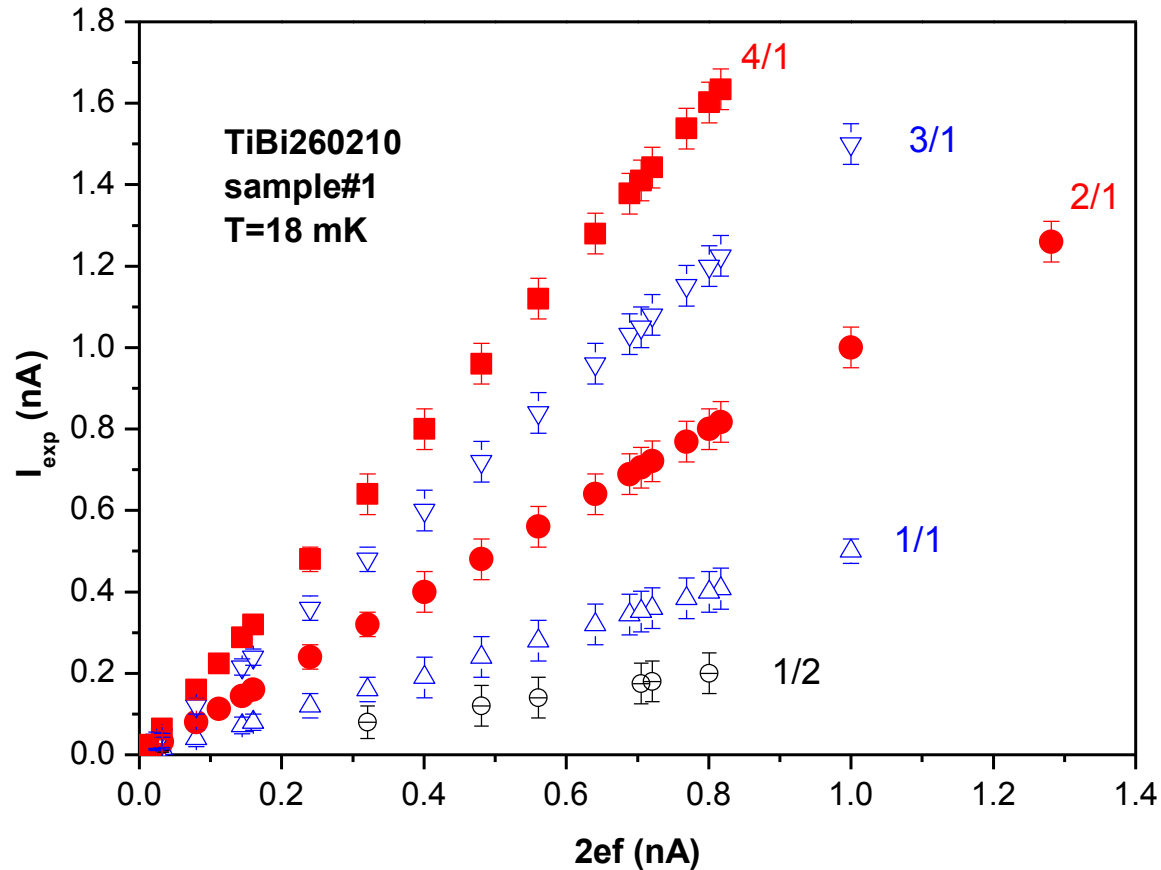


$dV/dI$  at  $f_{RF}=350$  МГц и амплитуда 100 мВ. Ток нормирован на величину  $(2e) \times f_{RF}$

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

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

# Положение ступенек



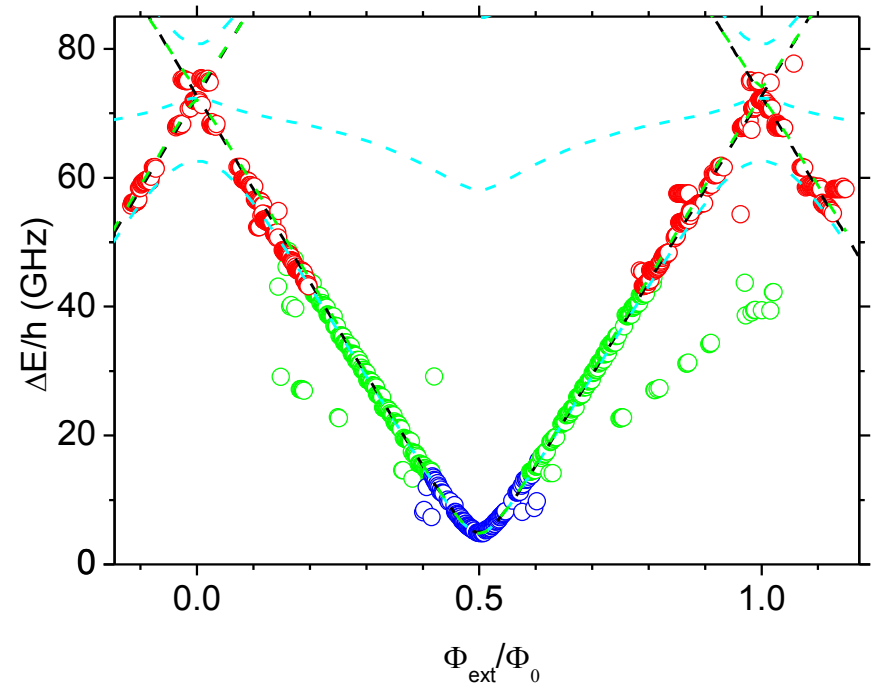
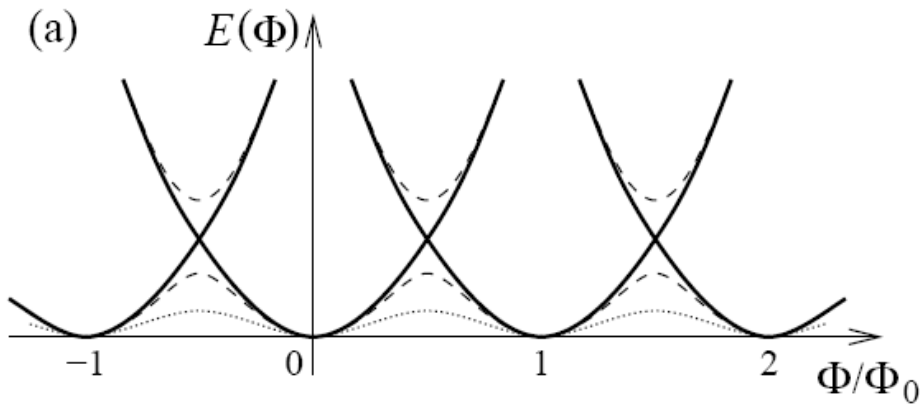
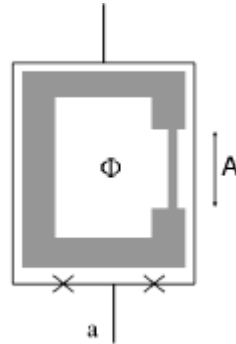
**Красные точки** соответствуют **блоховским ступенькам ( $2e$ )**,  
**синие** – **одноэлектронным особенностям ( $e$ )**, **черные** –  
одноэлектронным субгармоникам

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 может быть использована для решения широкого спектра прикладных задач



# 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.