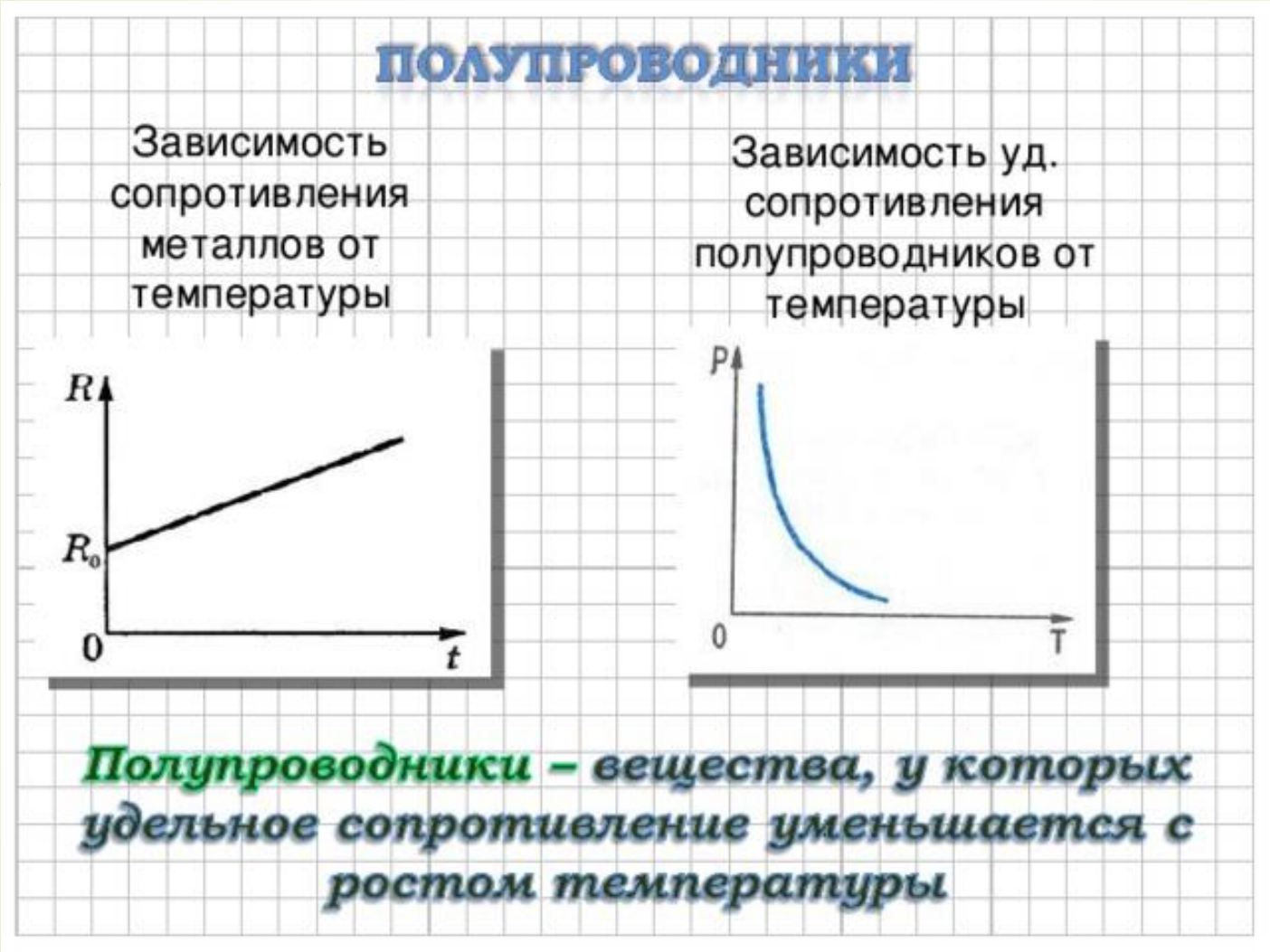
Одноатомные транзисторы и другие элементы компьютеров будущего

О.В. СНИГИРЕВ

Cryo Lab

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Что такое полупроводник?



Физика 10 класс Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский (2010 год)

Какие бывают полупроводники?

- I

$$n_A \sim 5 \times 10^{22}/\text{см}^3$$

$$n_e(300\ \text{К}) \sim 1.4 \times \frac{10^{10}}{\text{см}^3}\ (\text{Si}) - \ 3 \times \frac{10^{13}}{\text{см}^3}(\text{Ge})$$

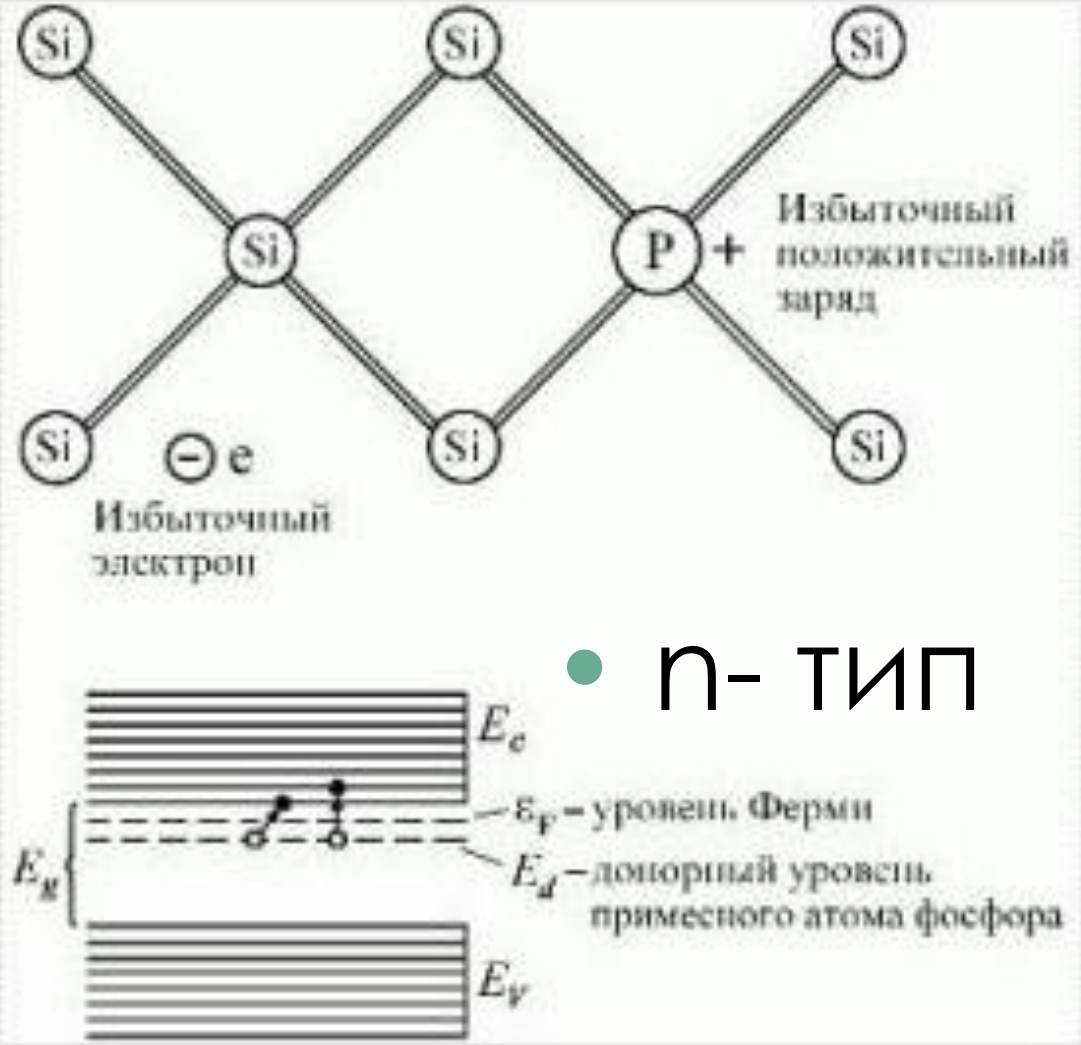
- n

$$n_e(300\ \text{К}) \sim 5 \times \frac{10^{14}}{\text{см}^3} - 5 \times \frac{10^{16}}{\text{см}^3}$$

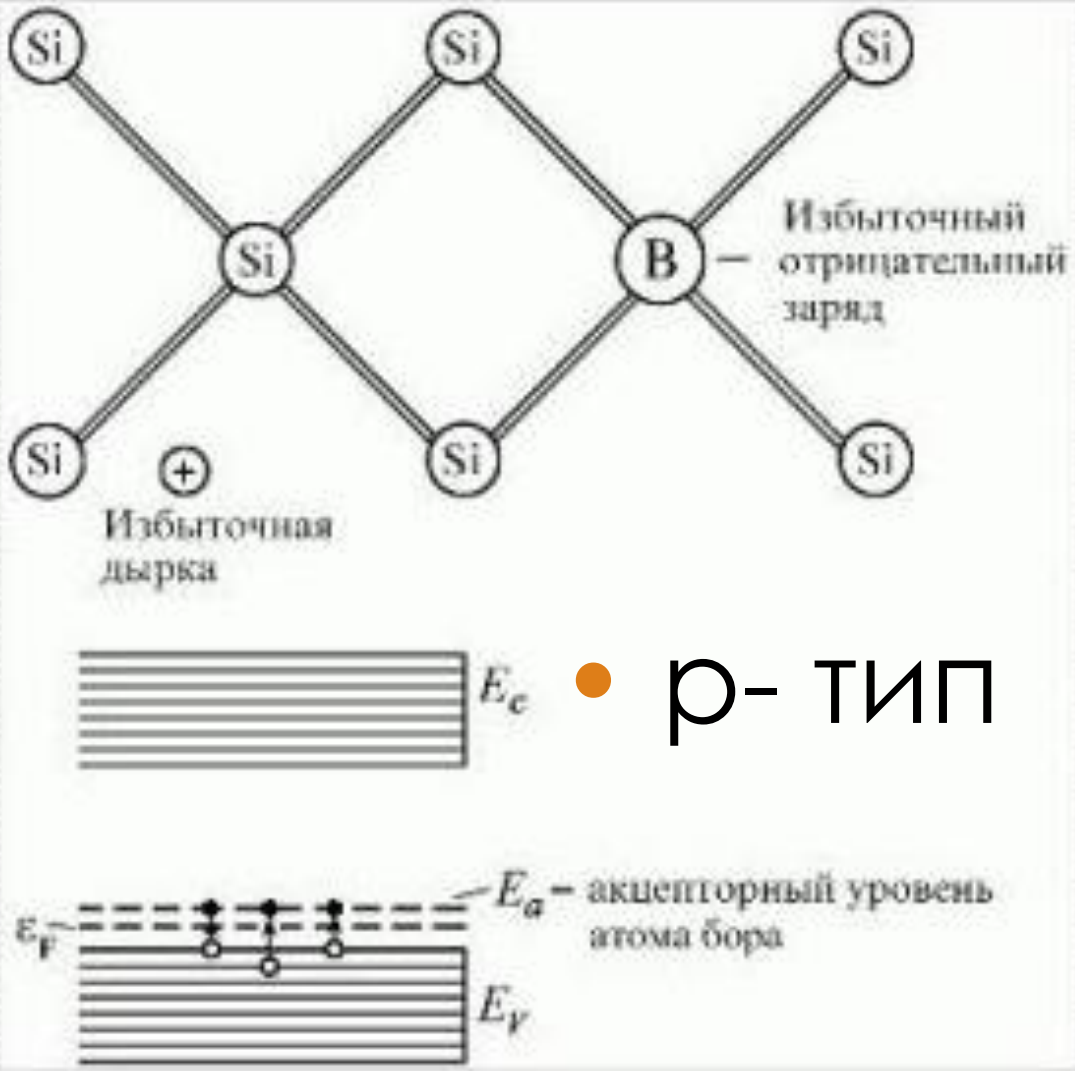
- p

$$n_p(300\ \text{К}) \sim 5 \times \frac{10^{14}}{\text{см}^3} - 5 \times \frac{10^{16}}{\text{см}^3}$$

Какие бывают полупроводники?

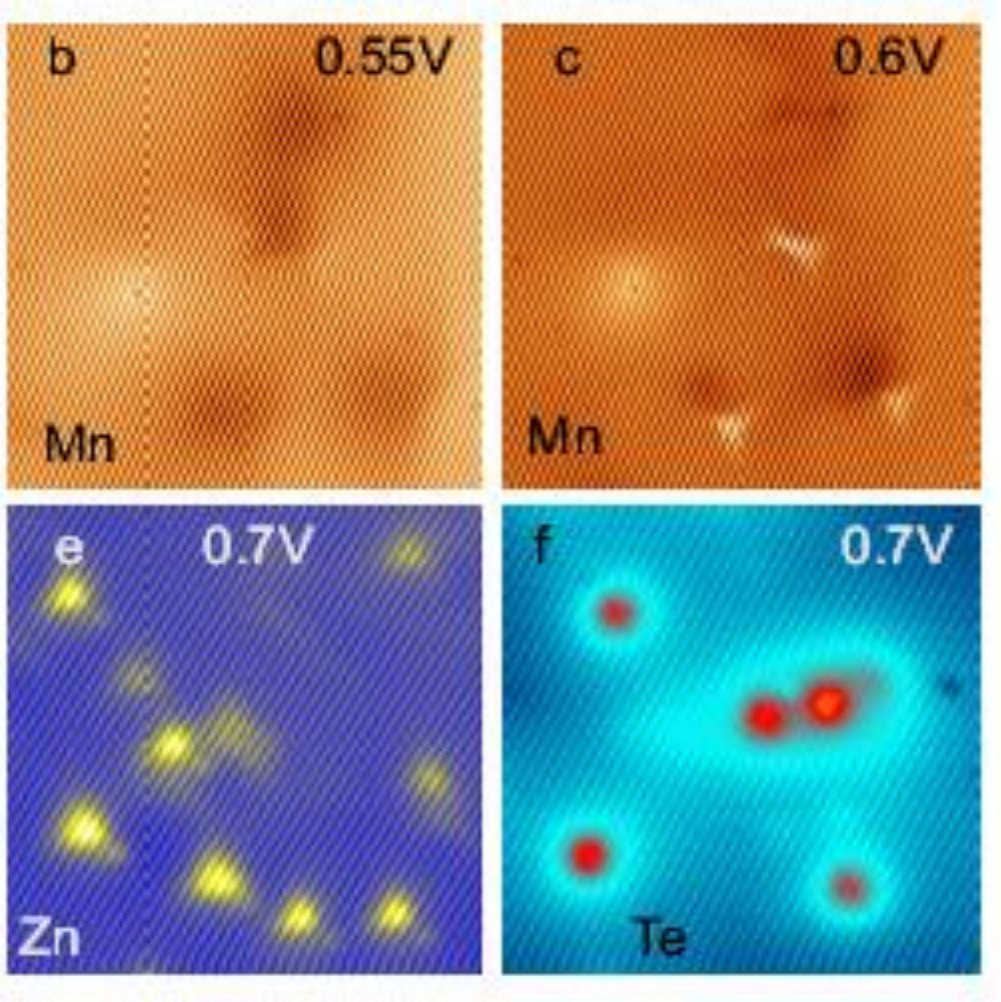


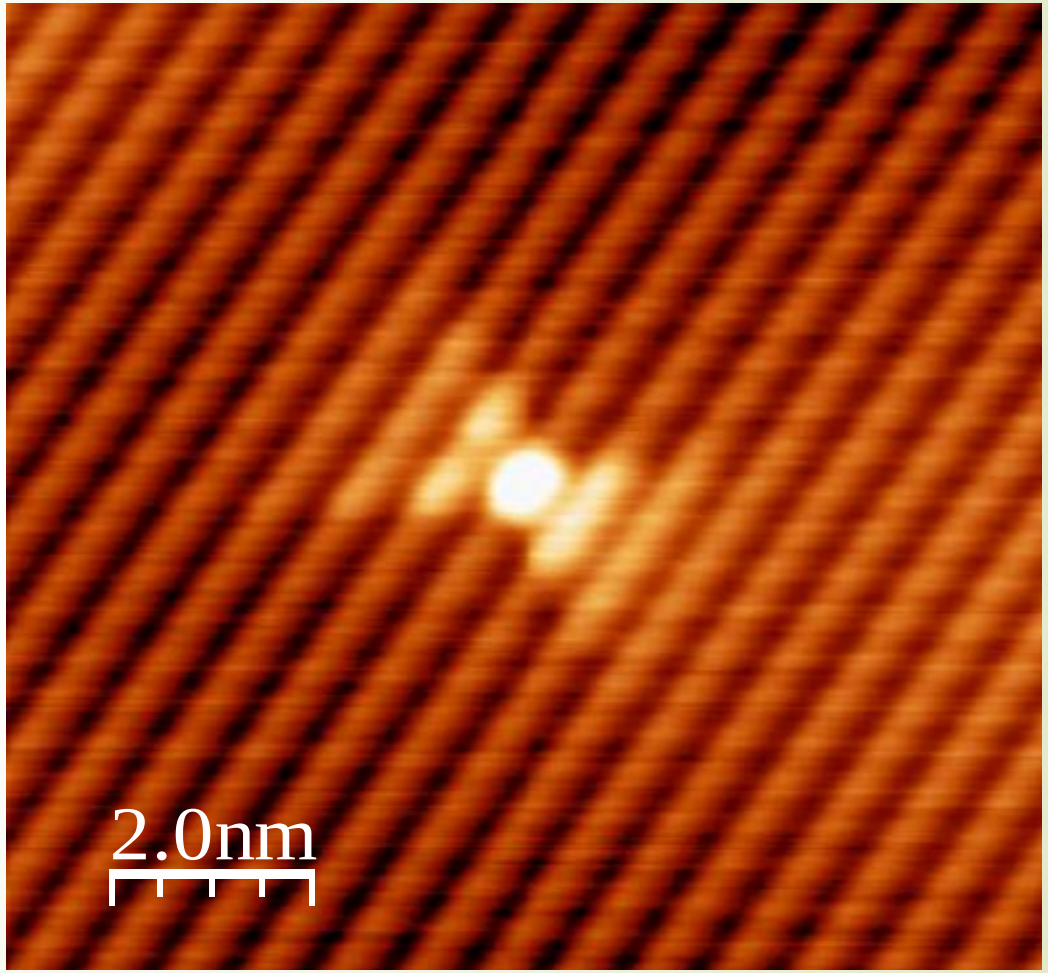
- n- тип



- p- тип

СТМ изображения примесных атомов и орбиталей их электронных состояний

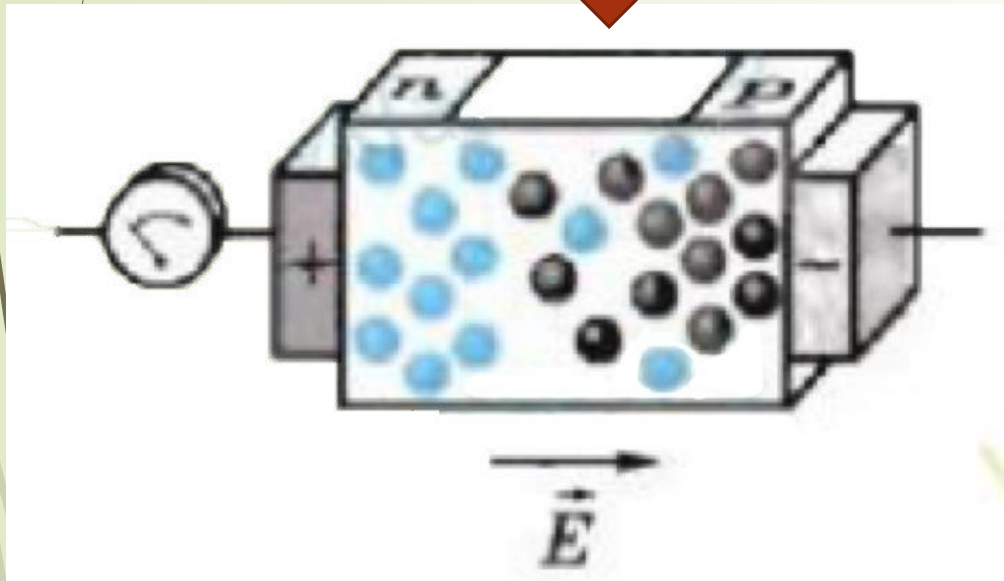


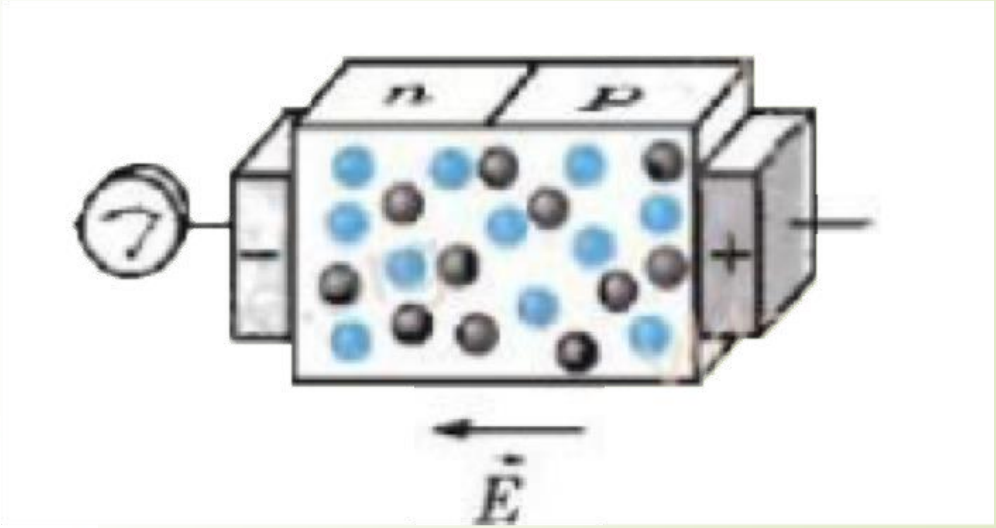


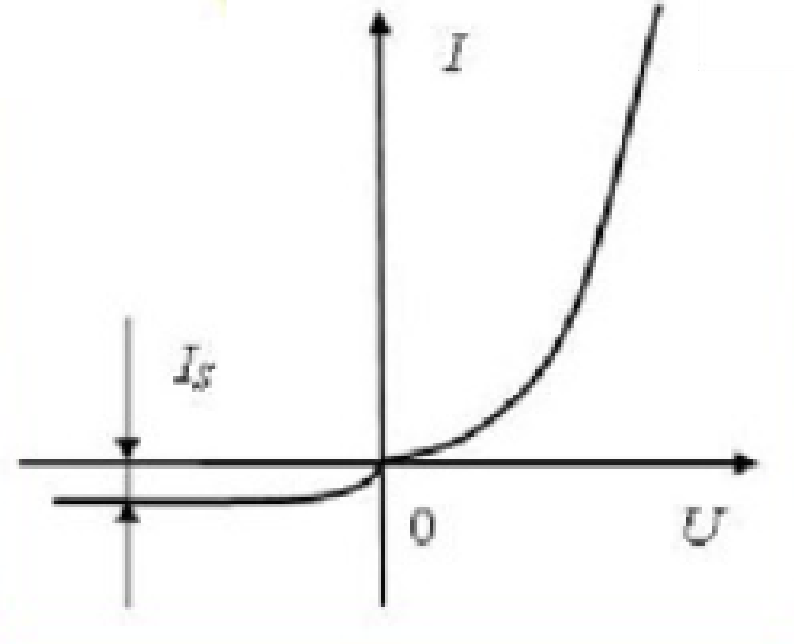
. D.A. Muzychenko, S.V. Savinov, N.S. Maslova, V.I. Panov, K. Schouteden, C. Van Haesendonck/ **Phys. Rev. B**, V. **81**, p. 035313, (**2010**)

Свойства p-n перехода

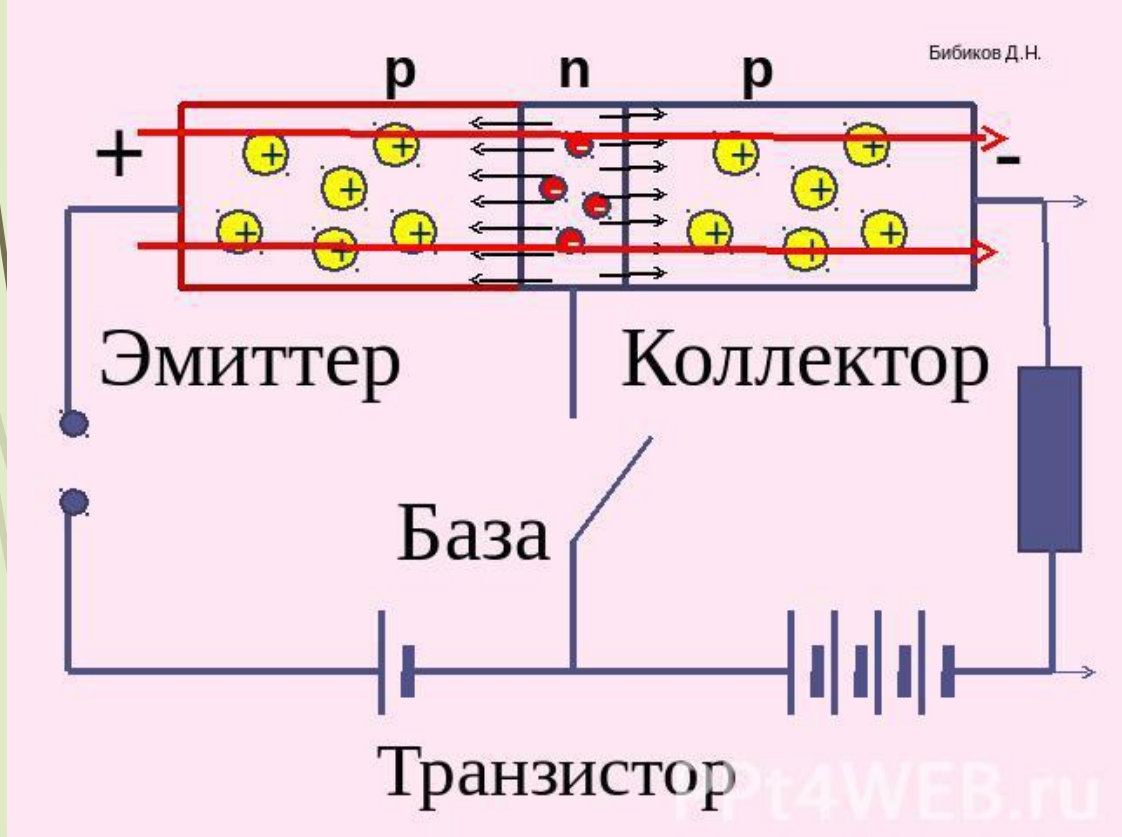
Обедненный слой

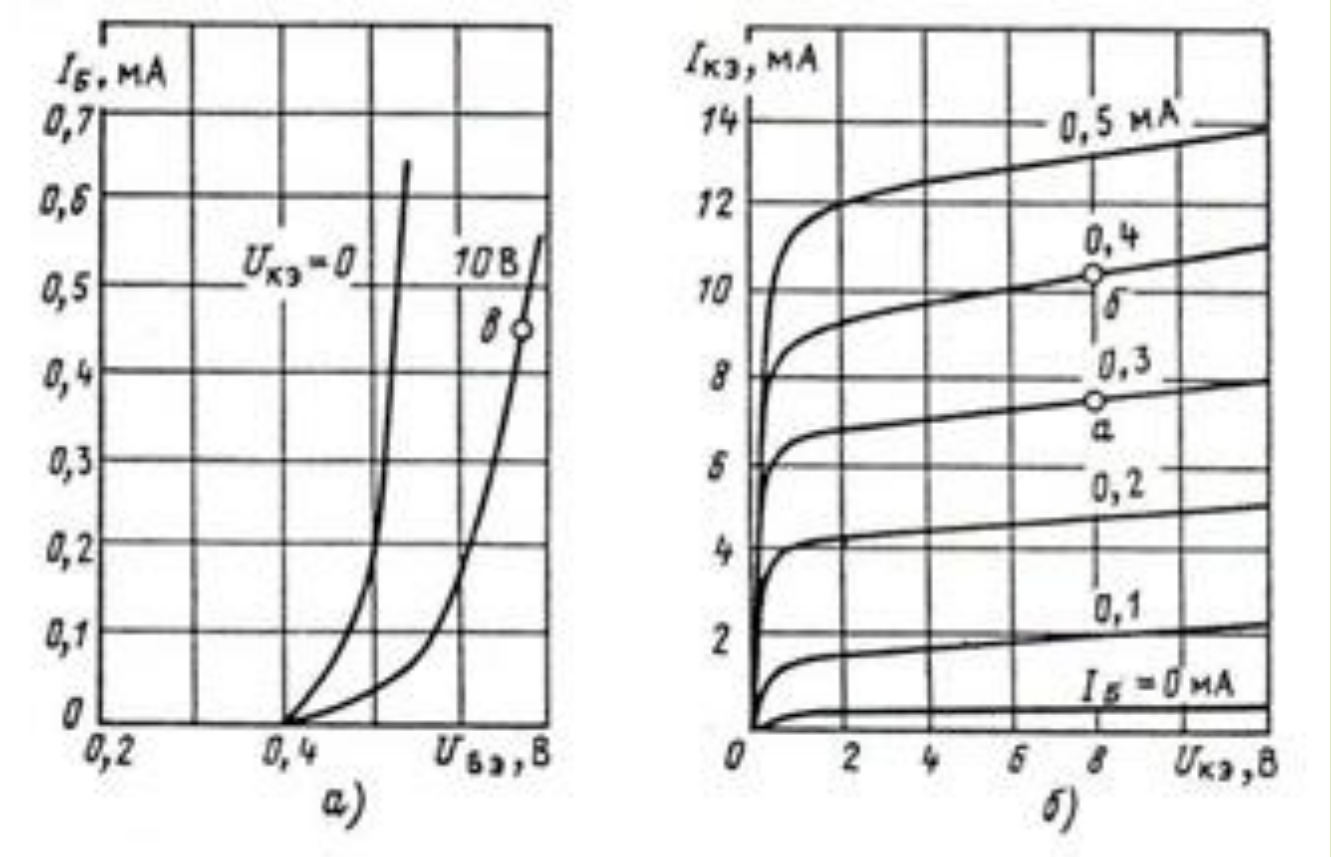






Биполярный транзистор





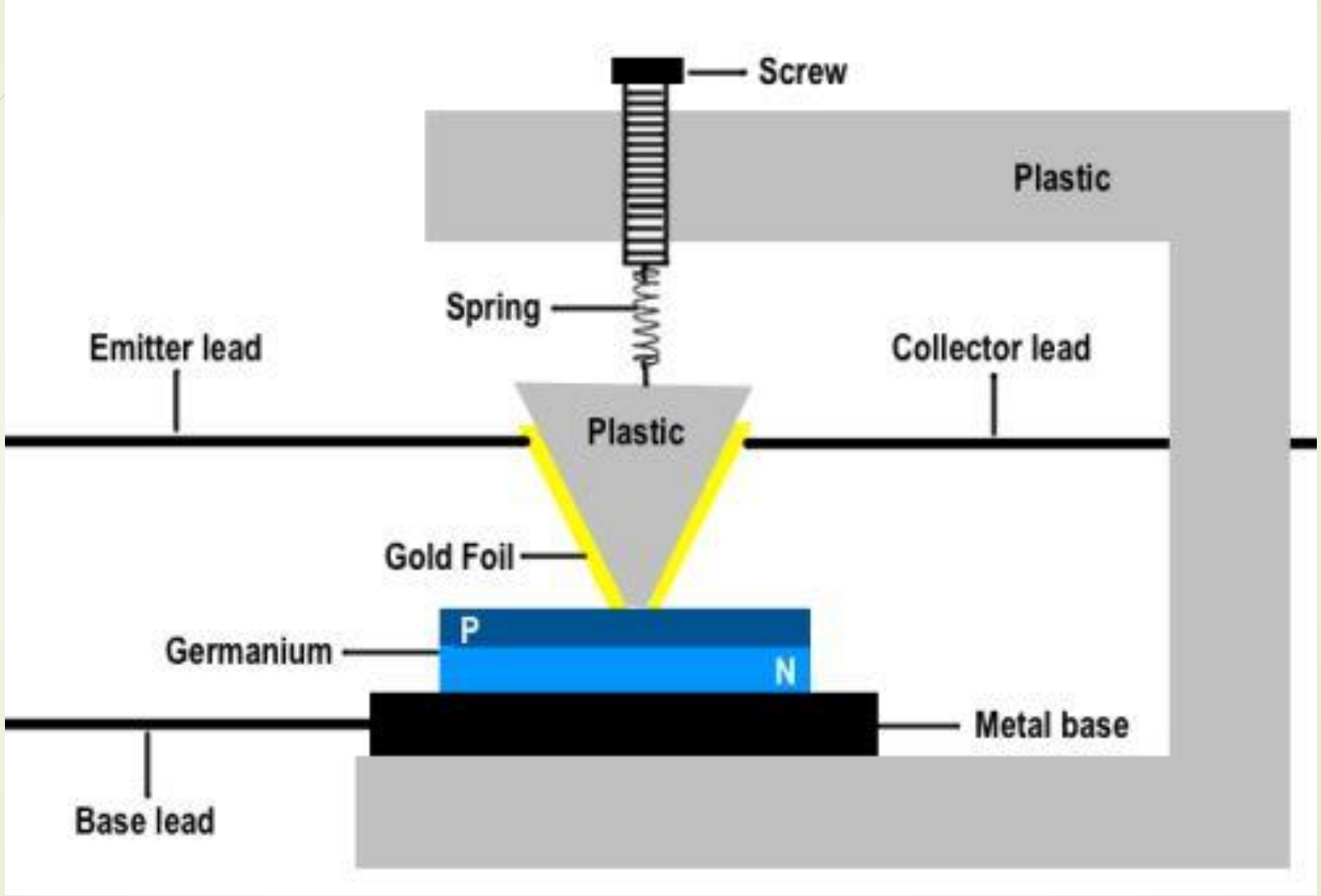
Немного истории

- 1947 first point-contact transistor

- **30 июня 1947 года** ученые Уильям Шокли, Уолтер Браттейн и Джон Бардин объявили о создании транзистора, а **23 декабря 1947** года изобретение было официальное представлено публике. Именно эту дату принято считать днем изобретения транзистора (от англ. **Tran**sver Re**sistor** – трансформатор сопротивлений).
- Нобелевская премия **1956** года.

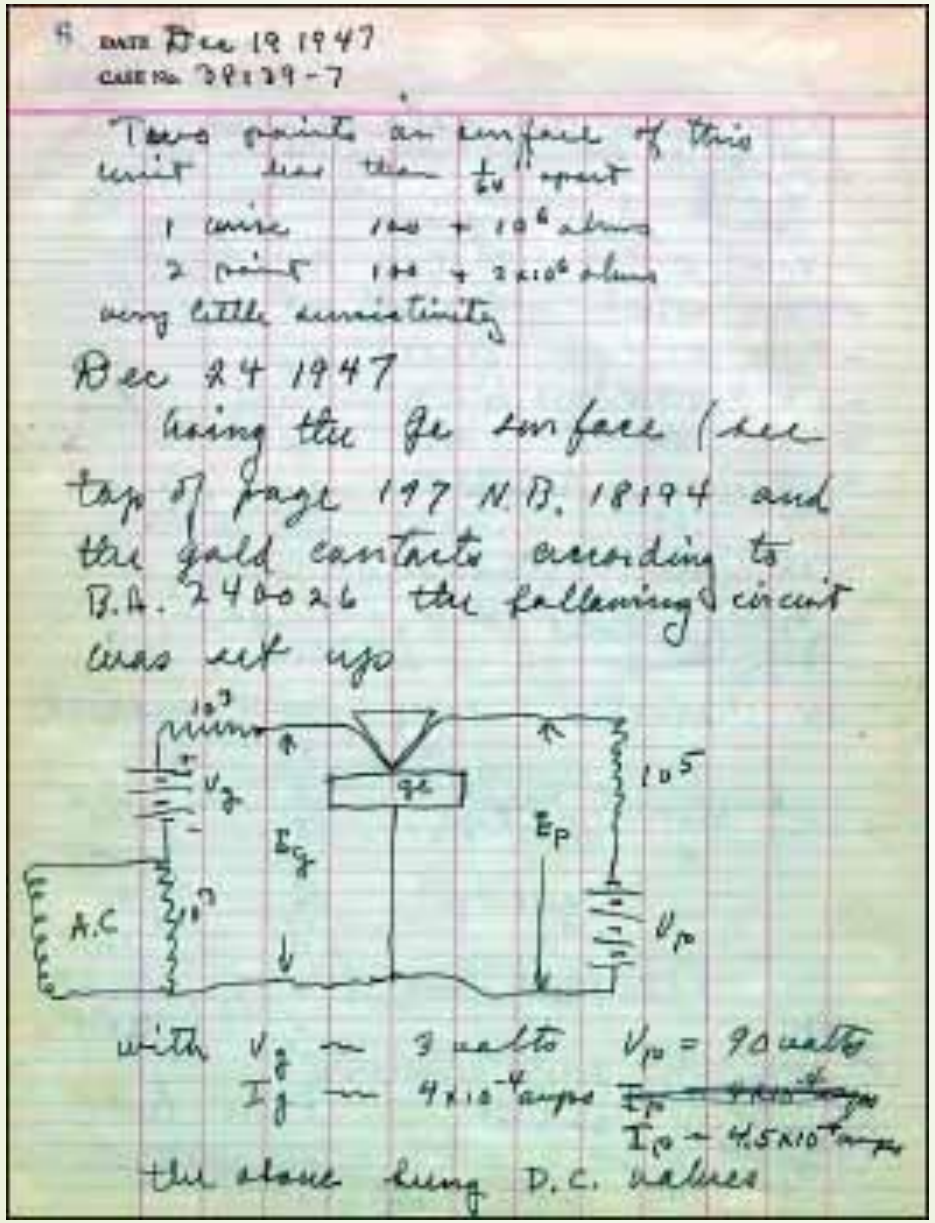
https://classes.soe.ucsc.edu/cmpe012/Fall09/lectures/01_Digital_Logic_Transistors.pdf

Схема устройства первого транзистора



http://www.computer-museum.ru

Первый усилитель на транзисторе



DATE Dec 19 1947
CASE No. 38139-7

Two points on surface of this unit less than ½" apart

1 wire 100 + 10^6 ohms
2 points 100 + 2×10^6 ohms
very little unidirectivity

Dec 24 1947

Using the Ge surface (see top of page 197 N.B. 18194 and the gold contacts according to B.A. 240026 the following circuit was set up

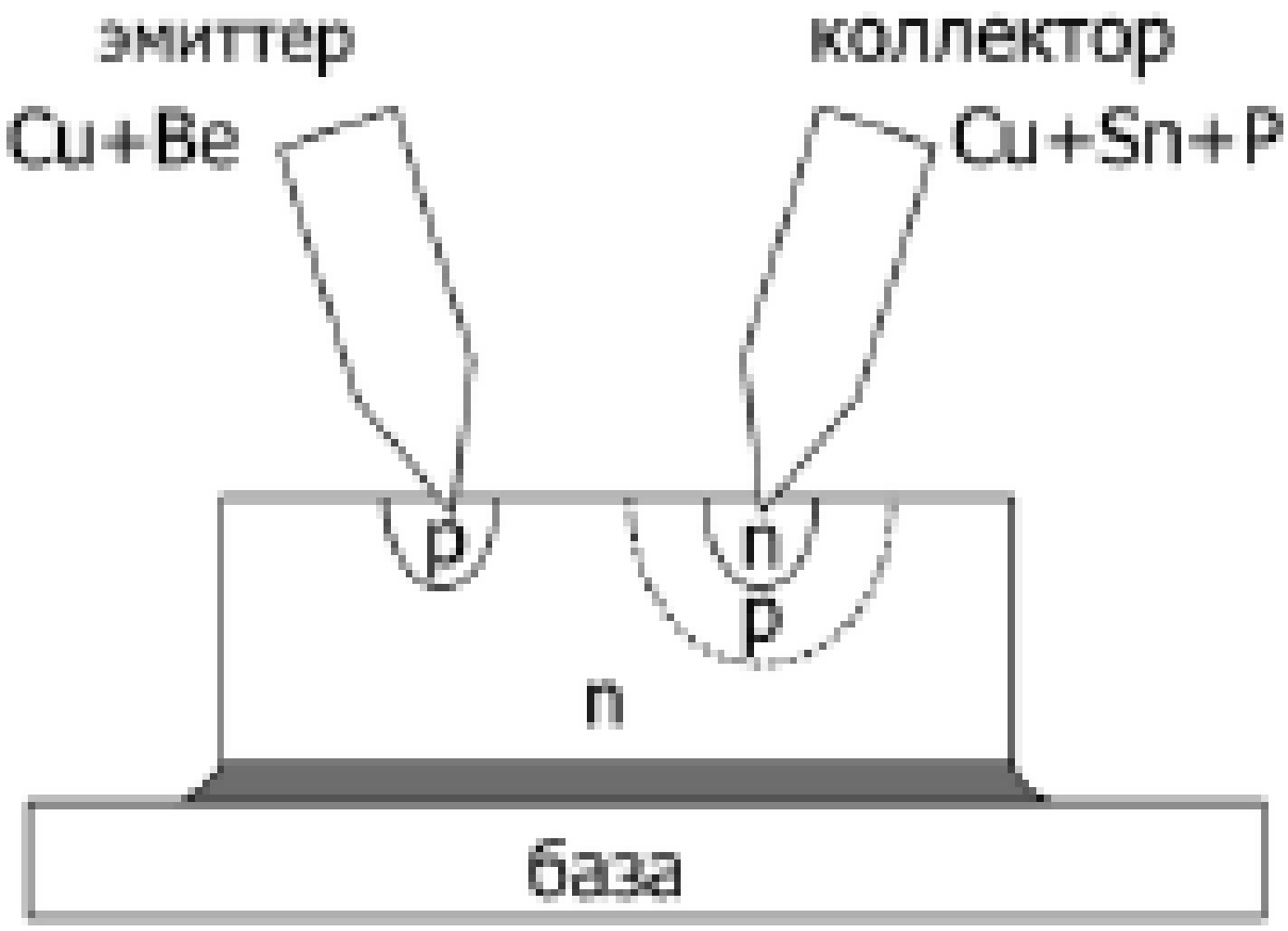
with V_g ~ 3 volts V_p = 90 volts
I_g ~ 4×10^{-4} amps ~~I_p = 4×10^{-4} amps~~
I_p ~ 4.5×10^{-4} amps
the above being D.C. values

Первые советские транизисторы

Советские транзисторы П1А и П3А(с радиатором).

Начиная с 1947 г. в СССР интенсивно ведись работы в области полупроводниковых усилителей - в ЦНИИ-108 (лаб. С. Г. Калашникова) и в НИИ-160 (НИИ «Исток», Фрязино, лаб. А. В. Красилова). 15 ноября 1948 года в журнале «Вестник информации» А.В. Красилов опубликовал статью «Кристаллический триод». Это была первая публикация в СССР о транзисторах.

Устройство первых транзисторов



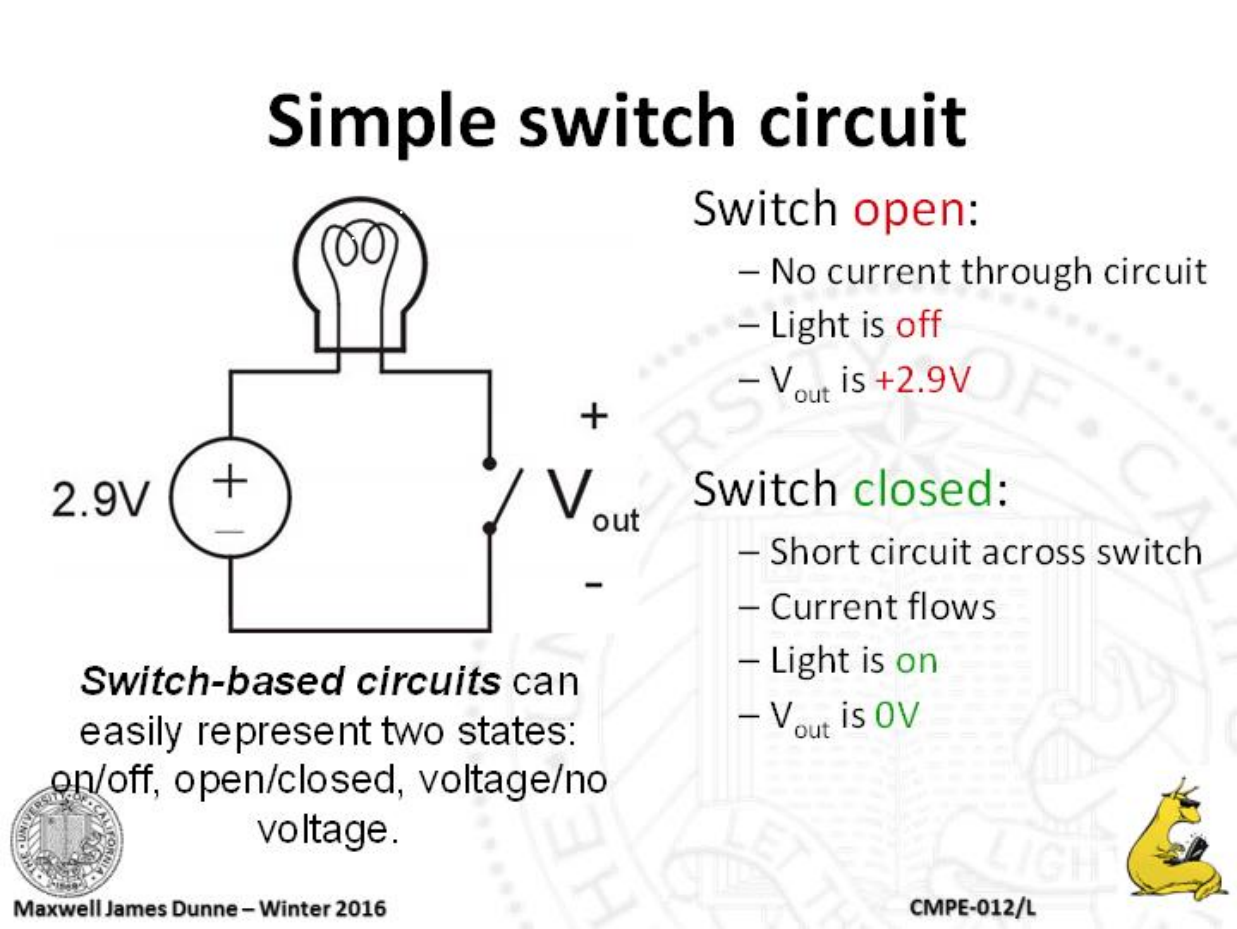
Недостатки:

- Нестабильность
- характеристик
- Разброс
- параметров

Первый кремниевый транизистор

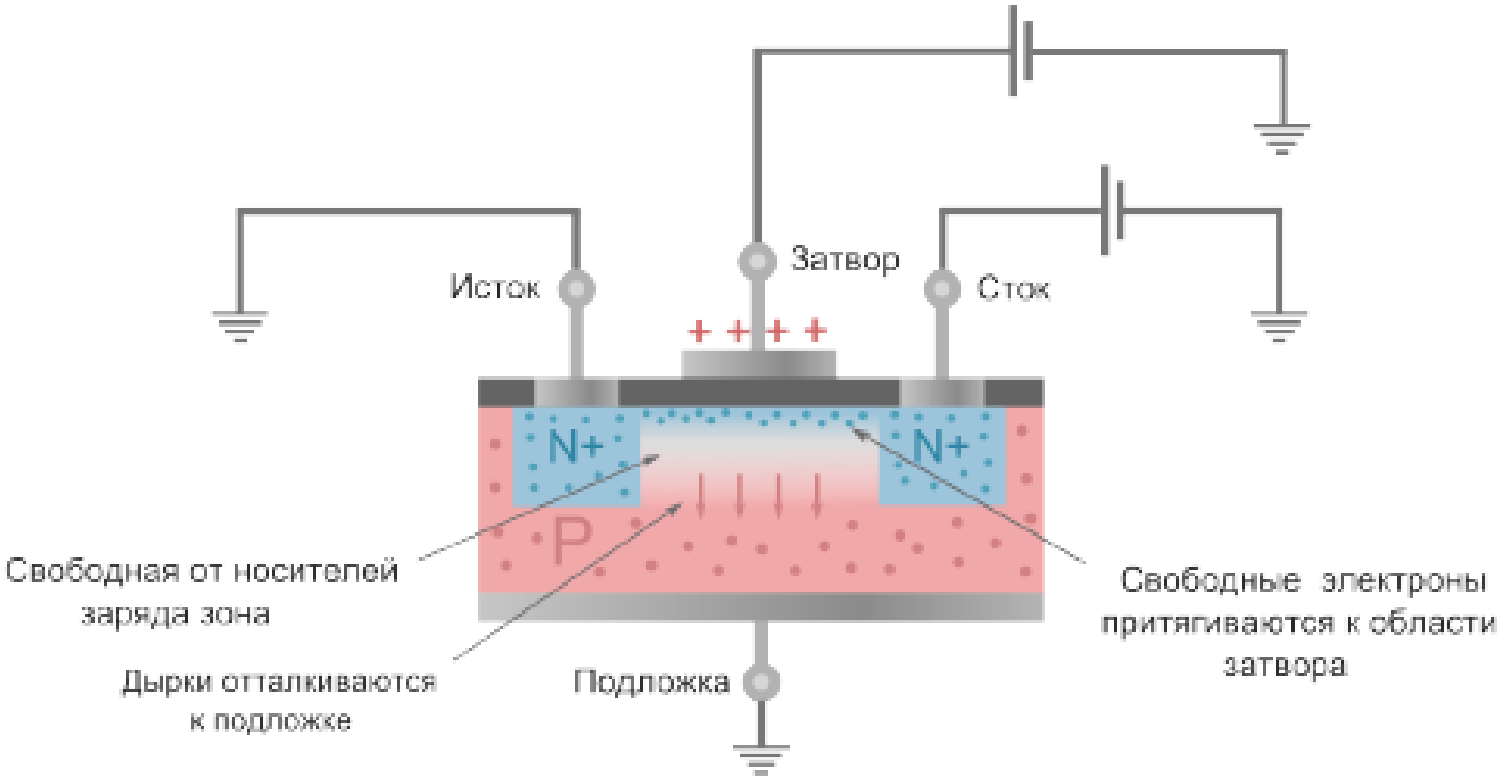
1954 год

Что делает транзистор в ЭВМ?



Полевой транзистор как ключ

Уильям Шокли, 1952 год



Работа МДП-транзистора с индуцированным каналом N-типа

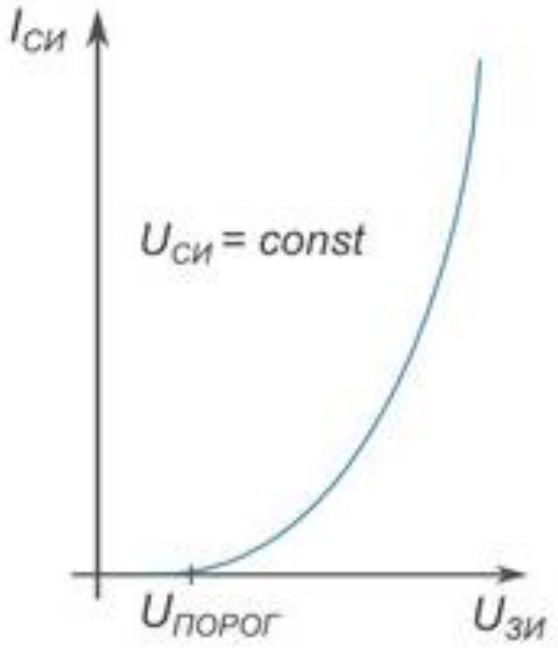
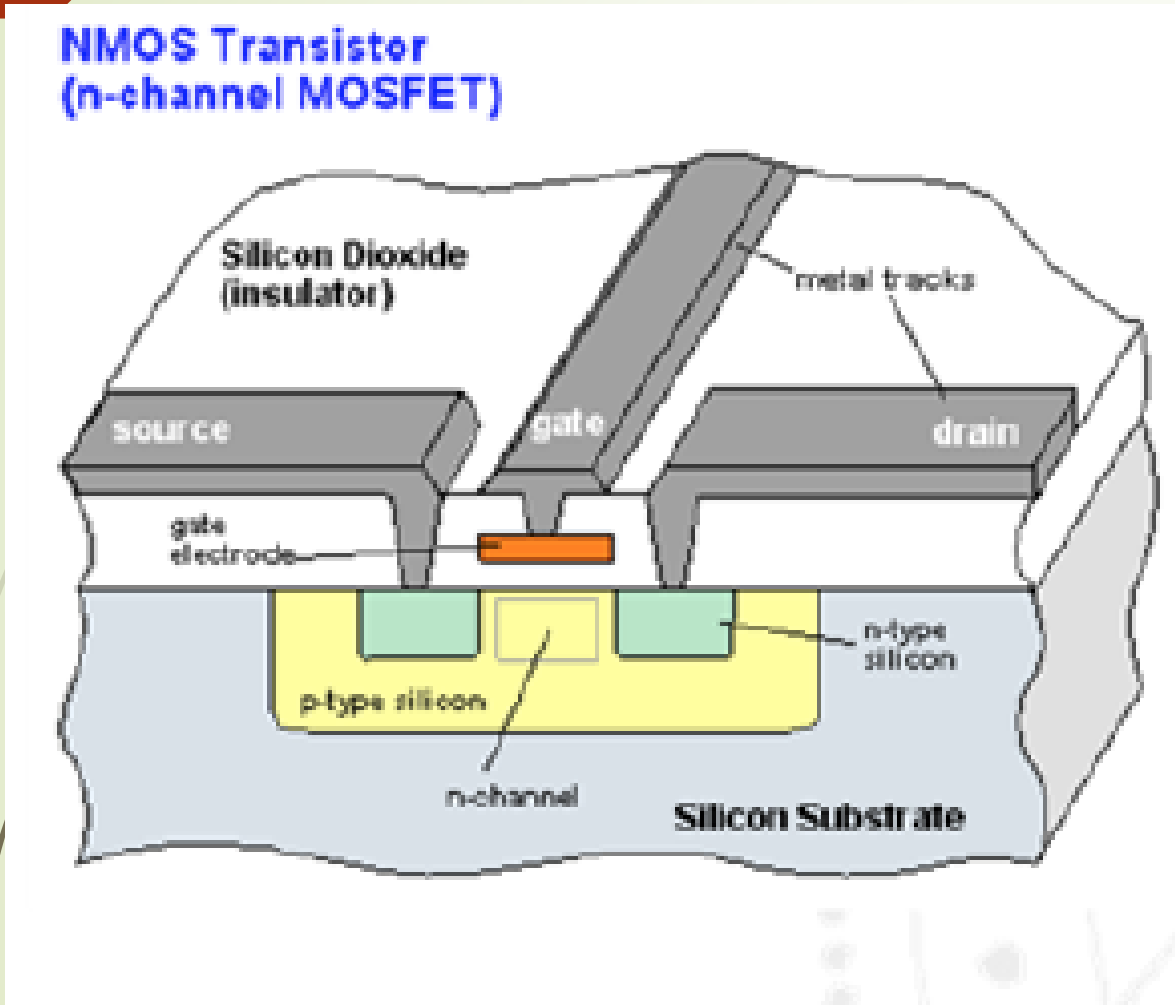
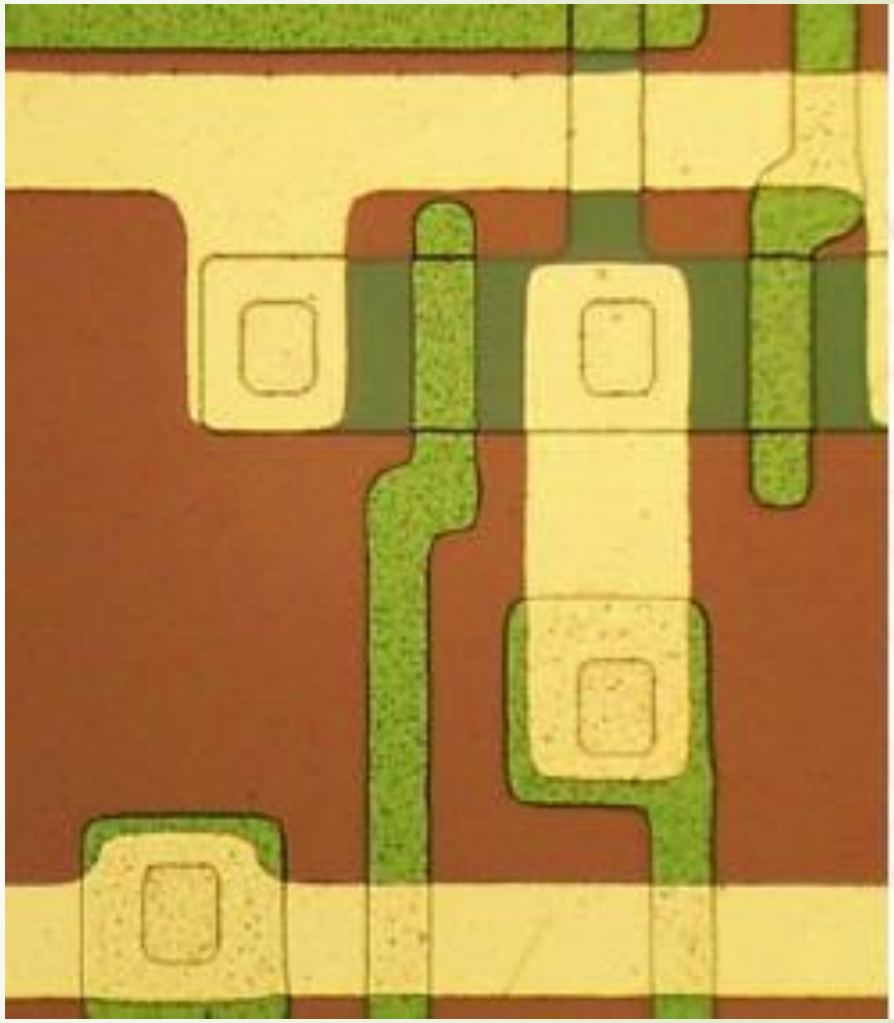


График б)

Стоко-затворная характеристика МДП-транзистора с индуцированным каналом

Планарные полевые транзисторы



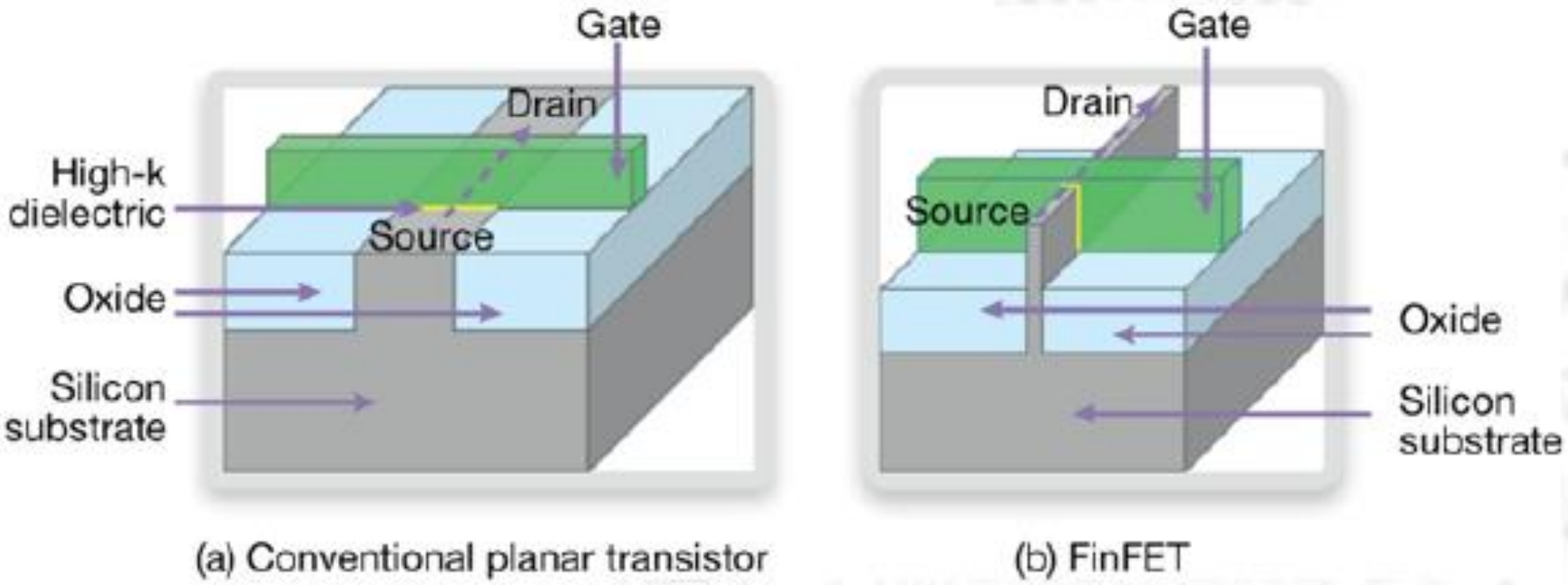


~ 1960 год

«Плавниковые» полевые транзисторы ~ 2000 год

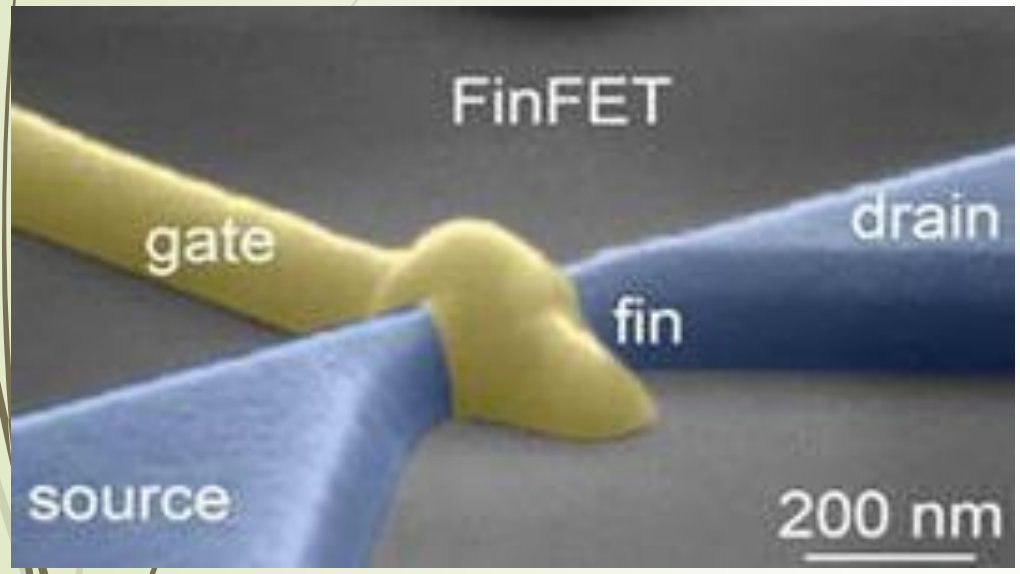
FinFET

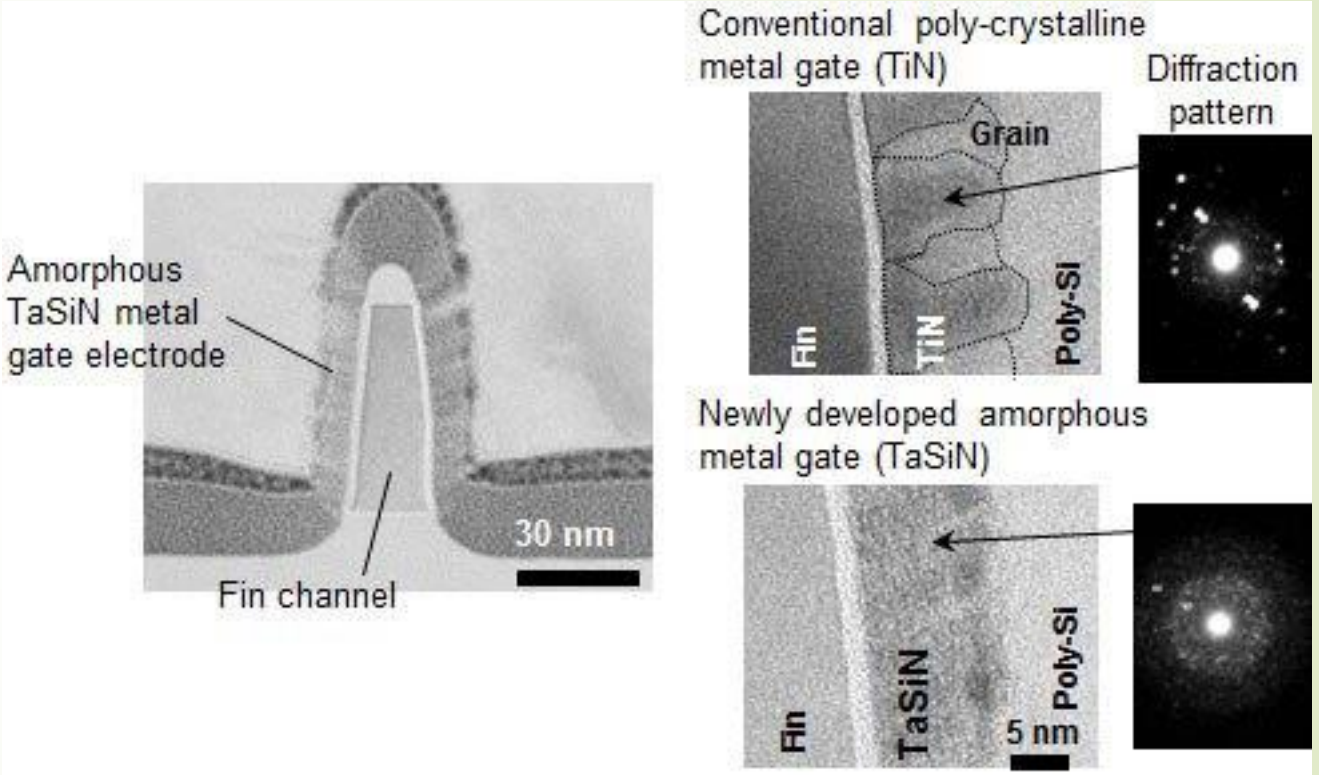
- Higher performance at lower voltages
- Less power



(a) Conventional planar transistor (b) FinFET

Технологические тонкости изготовления «плавниковых» полевых транзисторов





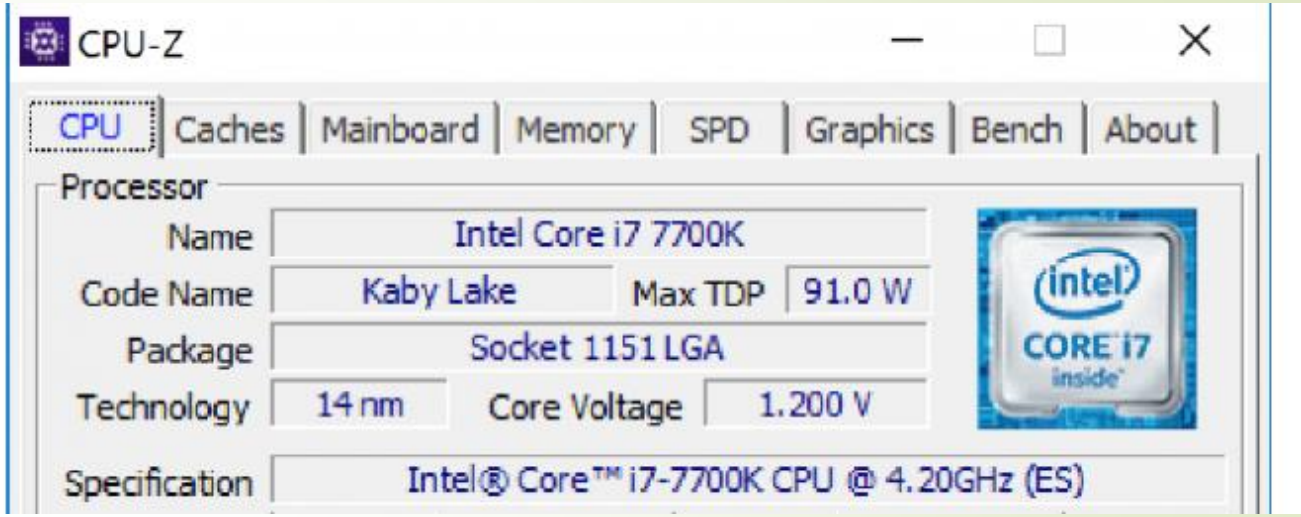
$$E_D = E_0/\varepsilon$$

Al_2O_3 (ε ~ 9), HfO_2 (ε ~ 20) and La_2O_3 (ε ~ 30) gate dielectric.

7 поколение процессоров Intel

Intel® Core™ i7 7700K

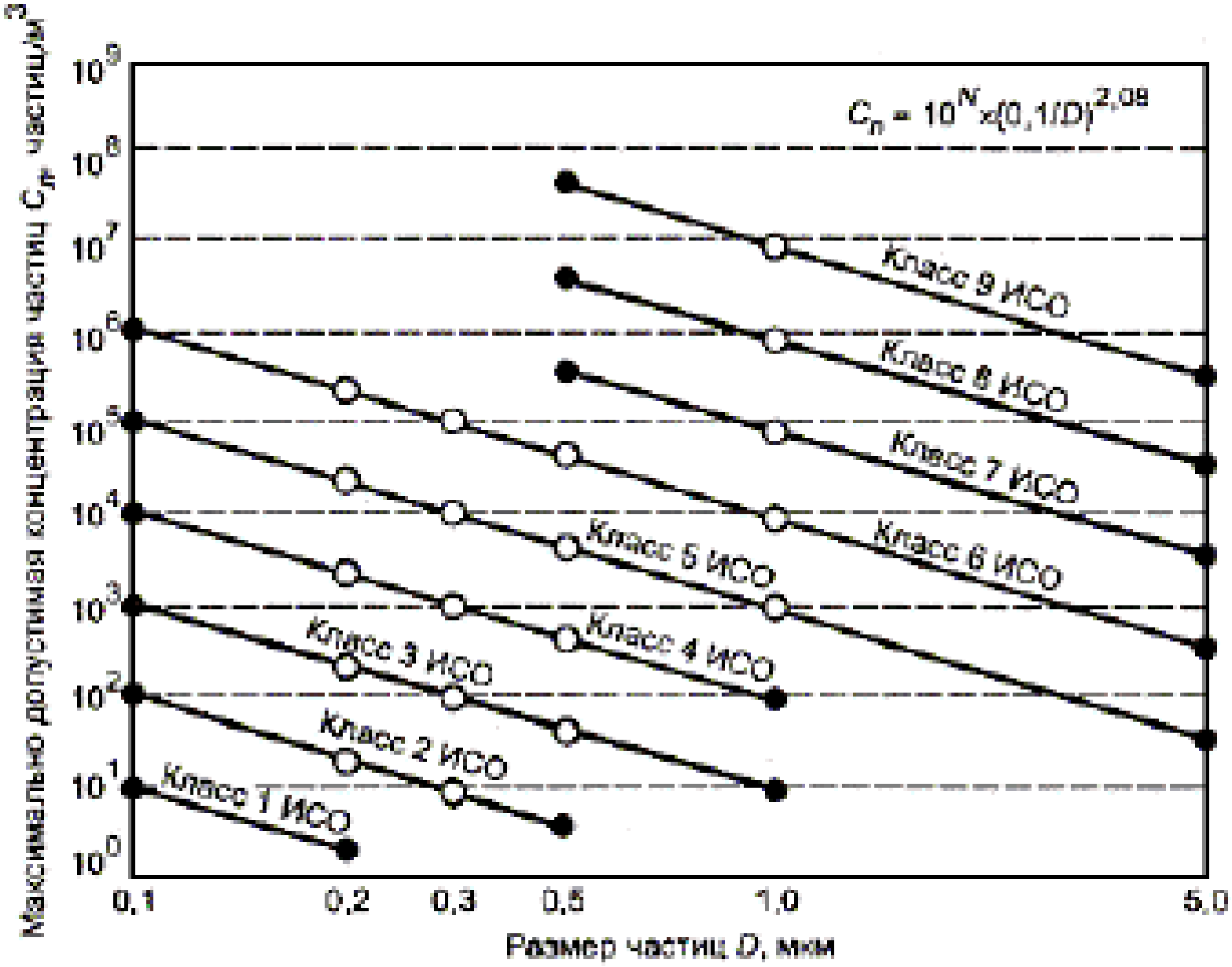
- Тактовая частота до 4.50 ГГц,
- 14 нм литография,
- более 7 миллиардов транзисторов на площади около 120 мм^2



Сравните: 85 -100 миллиардов нейронов в мозге человека

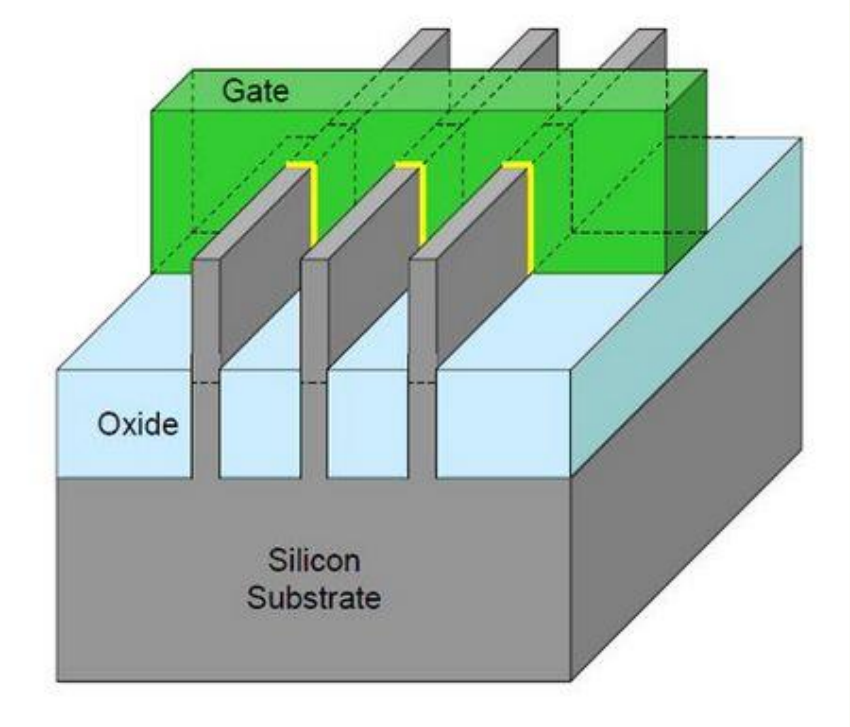
https://se7en.ws/statya-obzor-processora-core-i7-7700k-kaby-lake-ili-skylake-refresh/

Классы чистоты ISO 1 – ISO 3



Графическое представление границ классов ИСО

Зачем нужны многозатворные (многоканальные) транзисторы?



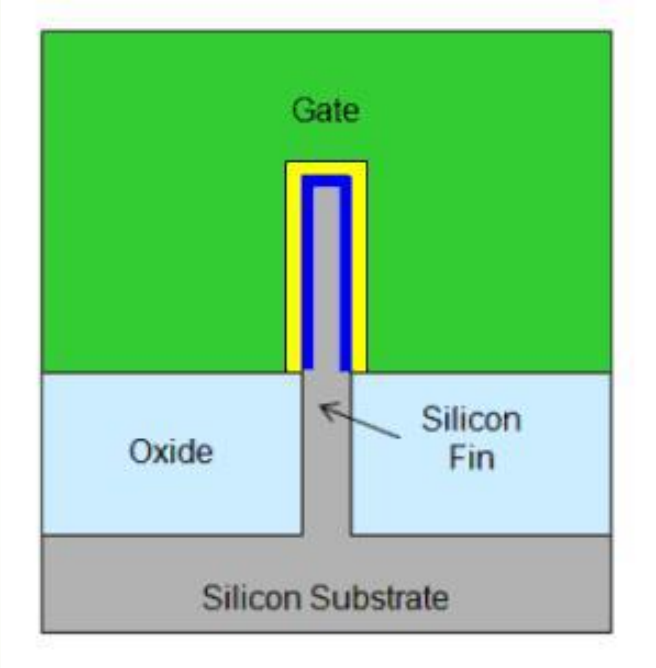
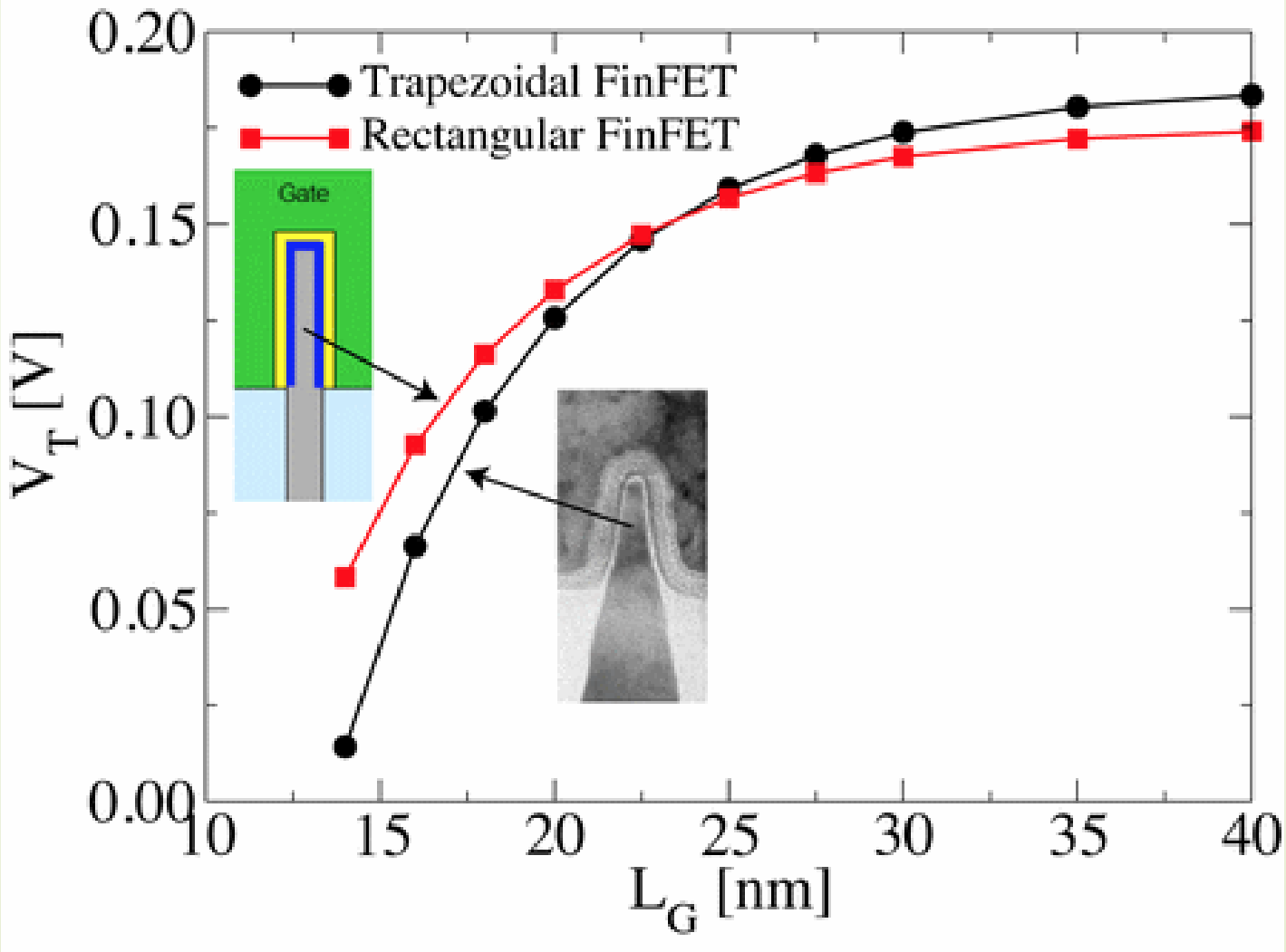


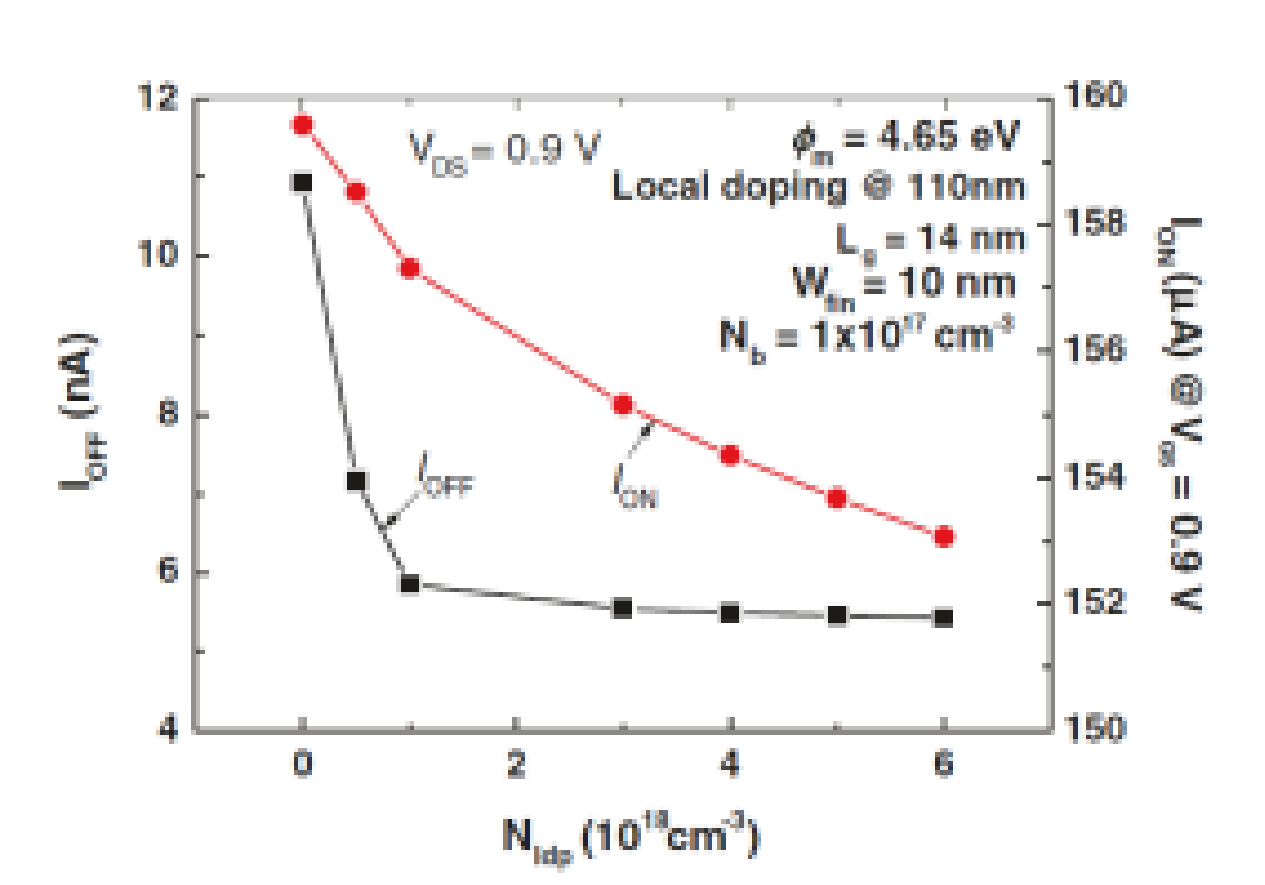
Схема трёхзатворного транзистора.

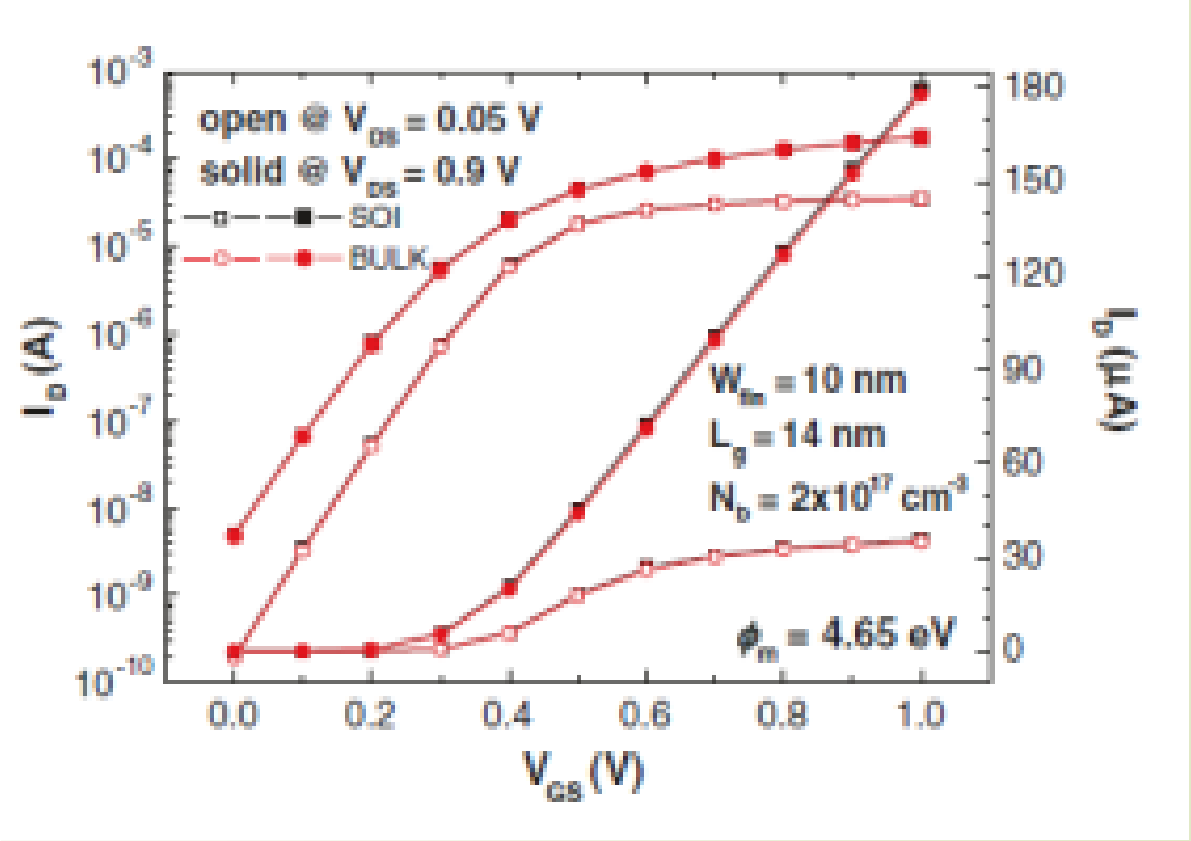
Схематичный вид затвора (FinFET) транзистора

Зависимость порогового напряжения от длины затвора двух форм: трапециевидной и идеальной прямоугольной



Рассеяние энергии при переключениях





Ток транзистора в закрытом и открытом состояниях

Краткие промежуточные выводы

$$\Delta I_{SD} \sim 100 \text{ мкА}, \quad V \sim 1 \text{ В}, \quad \Delta t \sim 2.5 \times 10^{-10}\, c,$$

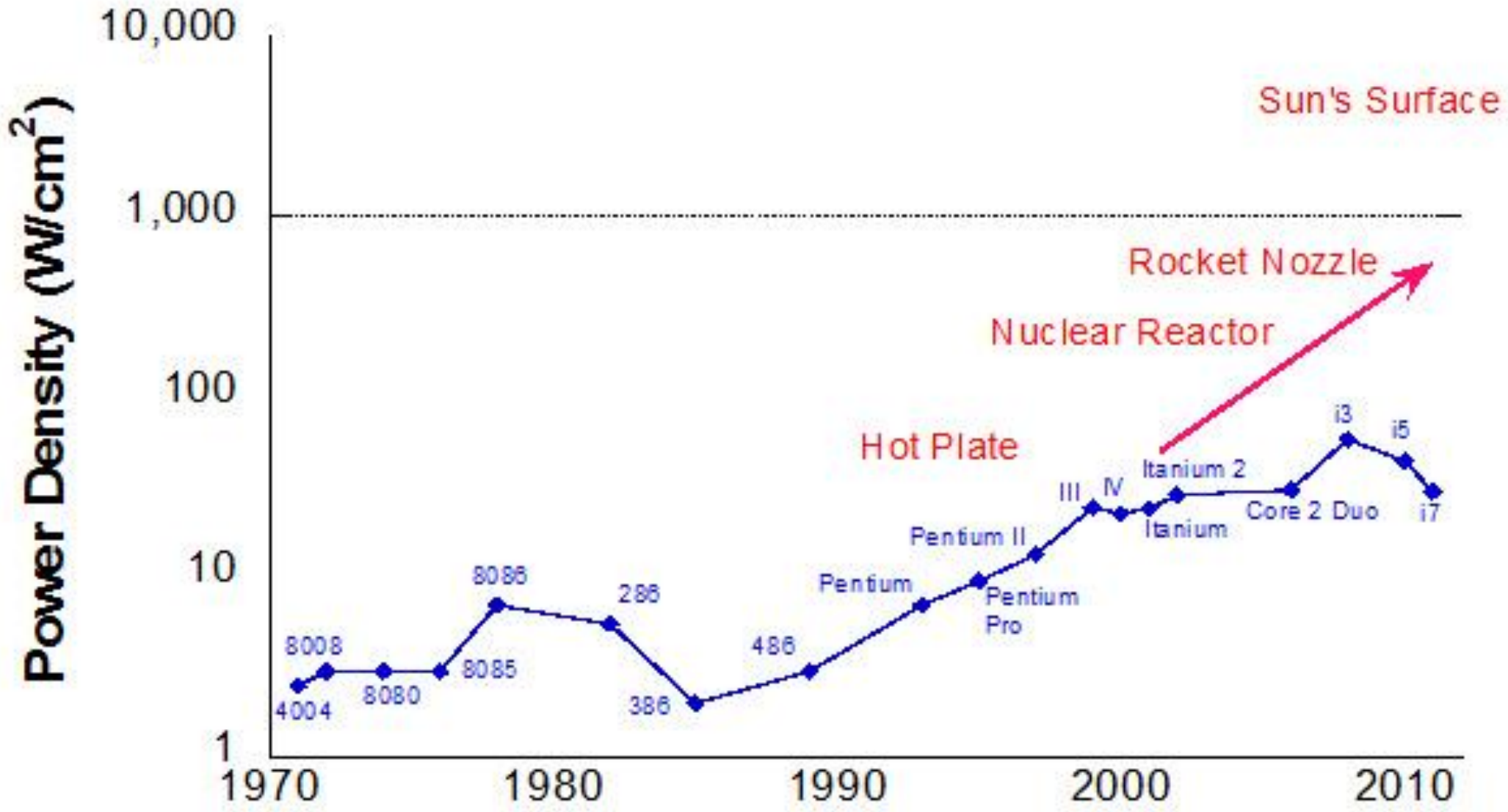
$$W \sim 10^{-4} \text{Вт}, \qquad E \sim 2.5 \times 10^{-14} \text{ Дж}$$

1) Если в данном такте переключились 10^6 транзисторов, то выделившаяся мощность будет порядка 100 Вт.

2) $\Delta I_{SD} \sim 100$ мкА, $\Delta t \sim 2.5 \times 10^{-10}$ с,

$$\Delta Q \sim 2.5 \times 10^{-14} \text{ Кл} \sim 1.5 \times 10^5\, e$$

Типичные рассеиваемые мощности



Дата-центр Facebook в Швеции

Площадь - 6 футбольных полей

Потребленная энергия за 2012 год: 678 миллионов кВт-часов

Мощности, потребляемые суперкомпьютерами

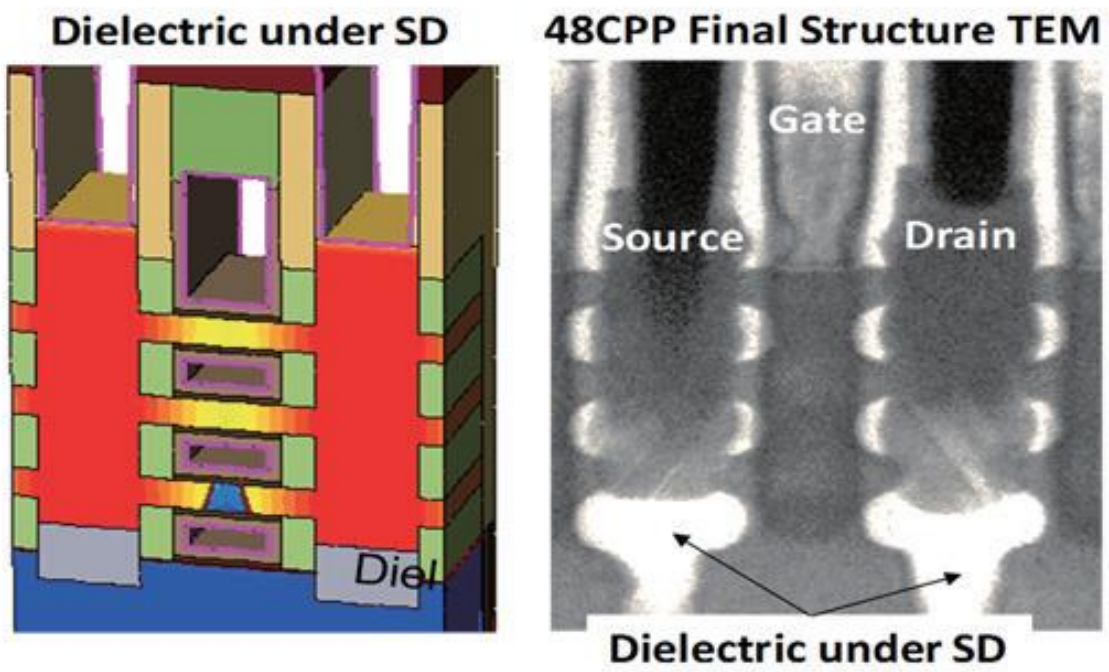
«K-Computer» (Япония)
12.7 МВт

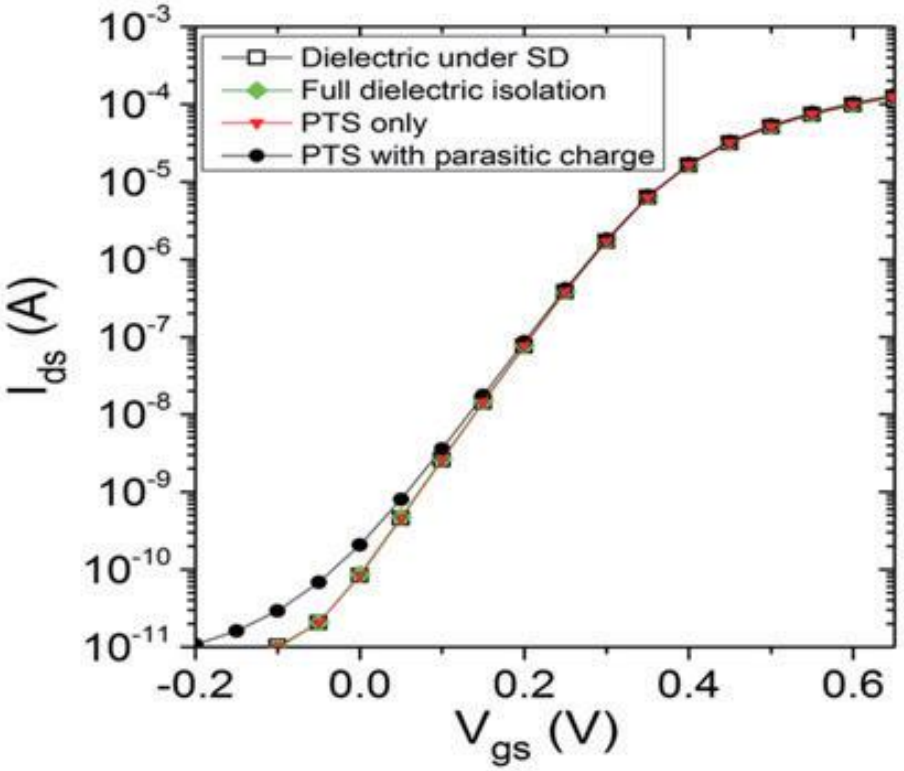
Саяно-Шушенская ГЭС (Россия) 6400 МВт

Куда двигаться дальше?

1) Продолжать!

Рубеж 5 нанометров взят : IBM, Globalfoundries и Samsung создали первый в мире транзистор по технологии 5-нм





2017 Symposium on VLSI Technology. Digest of Technical Papers. T17-5.

Что получим?

5-нанометровый технологический процесс позволяет уместить 30 миллиардов транзисторов на чипе площадью с человеческий ноготь, аналогичная по размеру микросхема, изготовленная по 7-нанометровому процессу, вмещает 20 миллиардов транзисторов.

”5-nm with sheet widths from15 nm to 45 nm….”

Но снова 100 мкА ток, 0.6 В напряжение!

2) Повернуться лицом к физике!

1961 год: Shannon-Neuman-Landauer:

minimum energy per bit

$E_{BITMIN} = k_B T \ln 2 \sim 4 \times 10^{-21}$ J (@ T = 300K

In practical CMOS: 10^5 - 10^6 E_{BITMIN}
or (1-10 μW per gate at 3 GHz)

Доказательства принципа Ландауэра

Изменение энтропии в системе

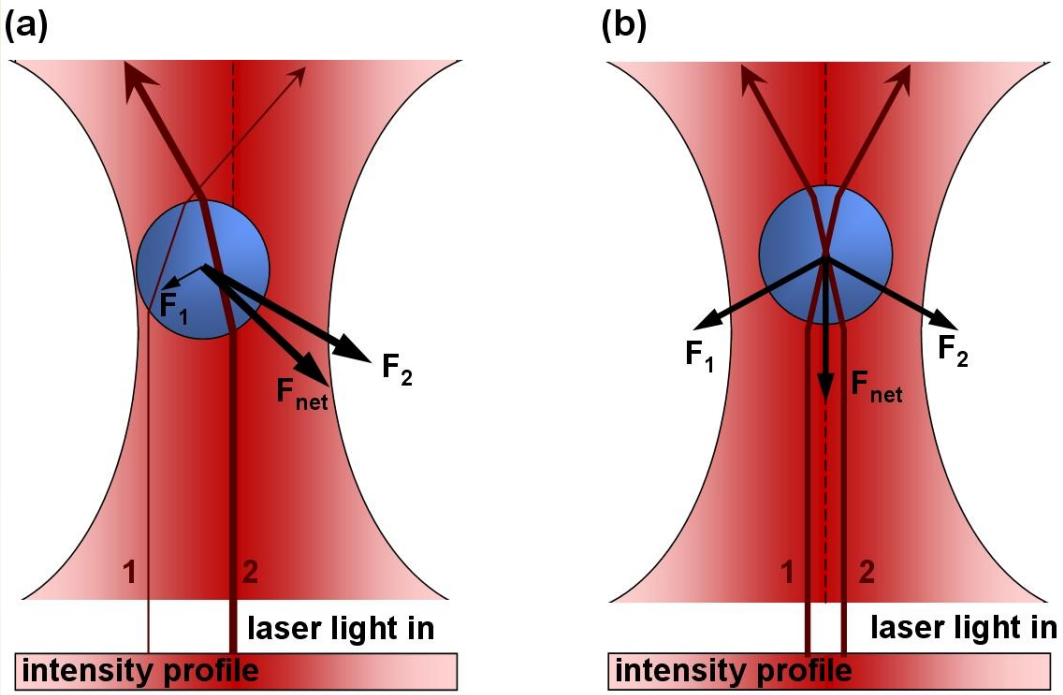
а б

Состояние (*а*) соответствует биту информации о частице в системе.
Переход к состоянию (*б*) приводит к потере этой информации.

В результате выполняется ***принцип Ландауэра*** (1961 г.) **–** ***стирание бита информации приводит к рассеянию энергии $k_B T \ln 2$ в окружающую среду с температурой T*.**

(Для необратимых процессов)

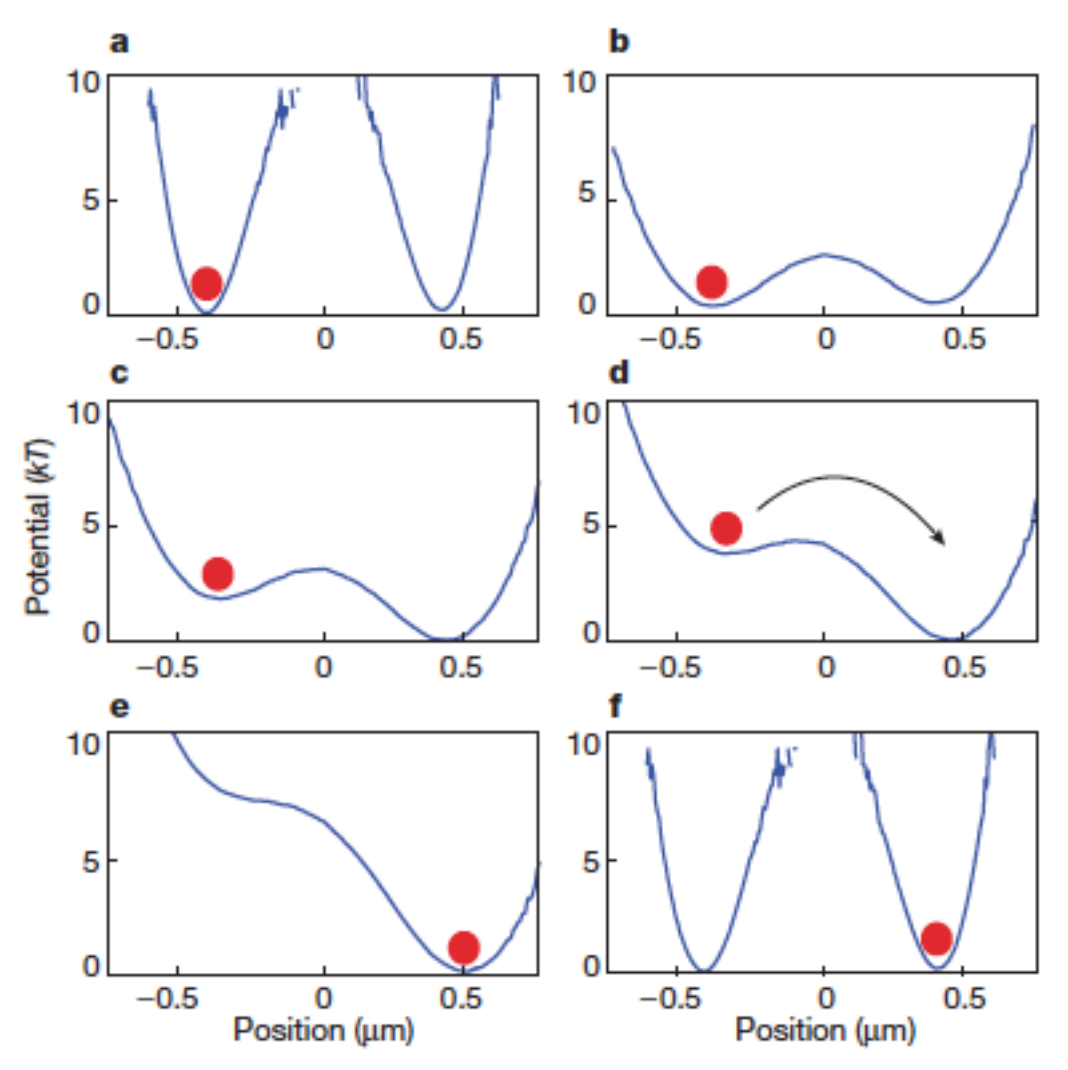
Лазерный пинцет



Объяснение на основе волновой оптики.

- Когда шар смещается от центра пучка, как на рисунке (a), наибольшее изменение импульса лучей с большей интенсивностью вызывает появление силы, направленной к центру ловушки.
- Когда шар расположен в центре пучка, как показано на рисунке (b), сила указывает в сторону сужения

Стеклянная бусина (2 мкм) в двойной оптической ловушке



A. Bérut, A. Arakelyan, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Dillenschneider, E. Lutz"Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics" - Nature 483, 187–189 (08 March 2012).

In classical circuits, the ultimately low power dissipation can be achieved in logically and physically reversible circuits

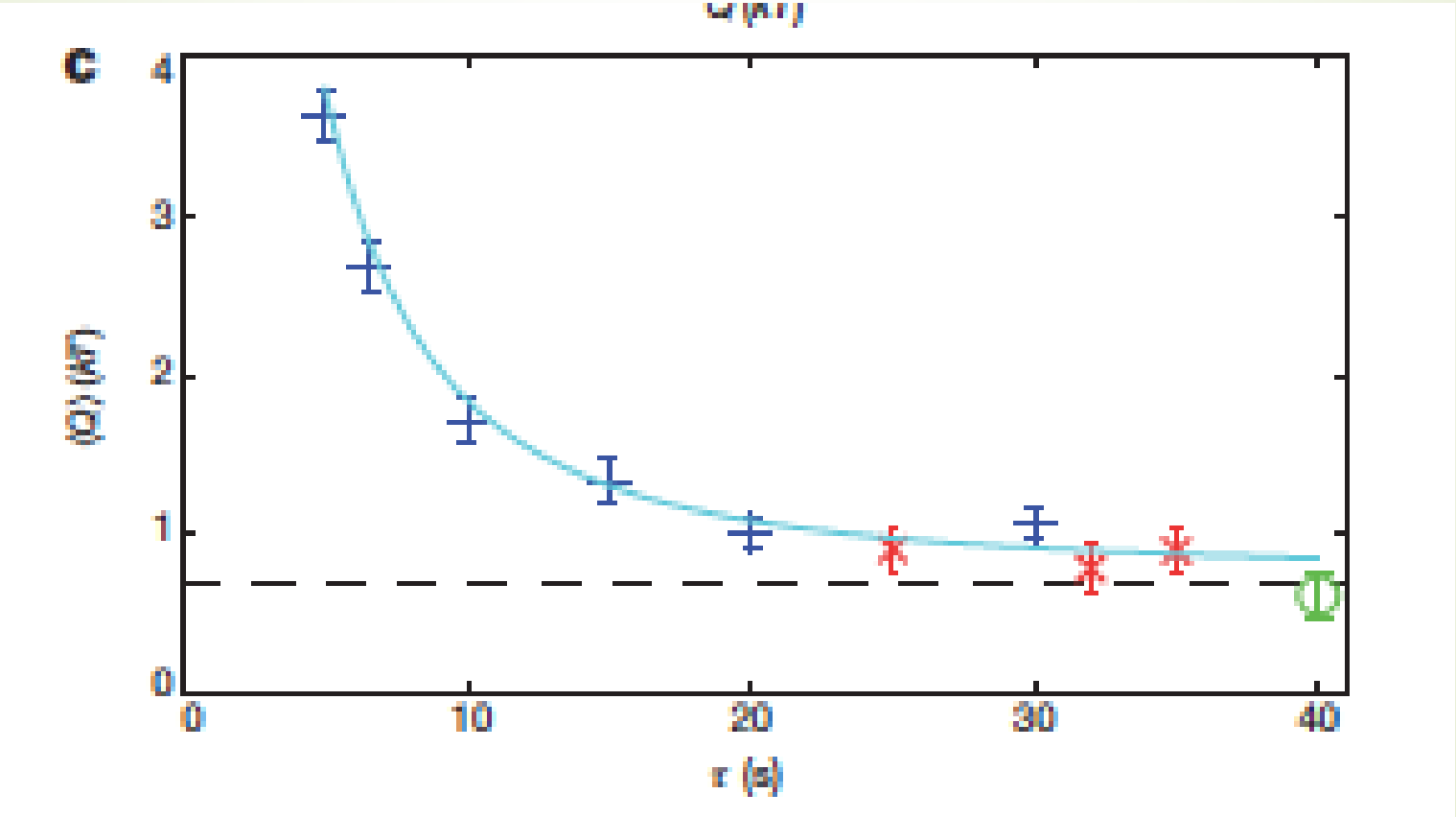
По вертикали показан энергетический потенциал в kT, по горизонтали – смещение шарика.

ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

The suspension is introduced in a disk-shaped cell (18 mm in diameter, 1 mm in depth), and a single bead is then trapped and moved away from the others. The position of the bead is tracked using a fast camera with a resolution of 108 nm per pixel, which after treatment gives the position with a precision greater than 10 nm. The trajectories of the bead are sampled at 502 Hz. The double-well potential is obtained by switching the laser at a rate of 10 kHz between two points separated by a distance $d_f = 1.45$ μm, which is kept fixed. The distance between the two minima of the double-well potential is 0.9 μm. The height of the barrier is modulated by varying the power of the laser from $I_L = 48$ mW (barrier height, $>8kT$) to $I_L = 15$ mW (barrier height, $2.2kT$). The external tilt is created by displacing the cell with respect to the laser with a piezoelectric motor, thus inducing a viscous flow. The viscous force is simply $F = -\gamma v$, where $\gamma = 1.89 \times 10^{-10}$ N s m^{-1} is the coefficient of friction and v is the velocity of the cell. In the erasure protocol, the

РЕЗУЛЬТАТ

$$Q = -\int_0^{\tau_{cycle}} dt\, F(t)\dot{x}(t) = \pm \int_0^{\tau} dt\, F_{max}(t/\tau)\dot{x}(t)$$



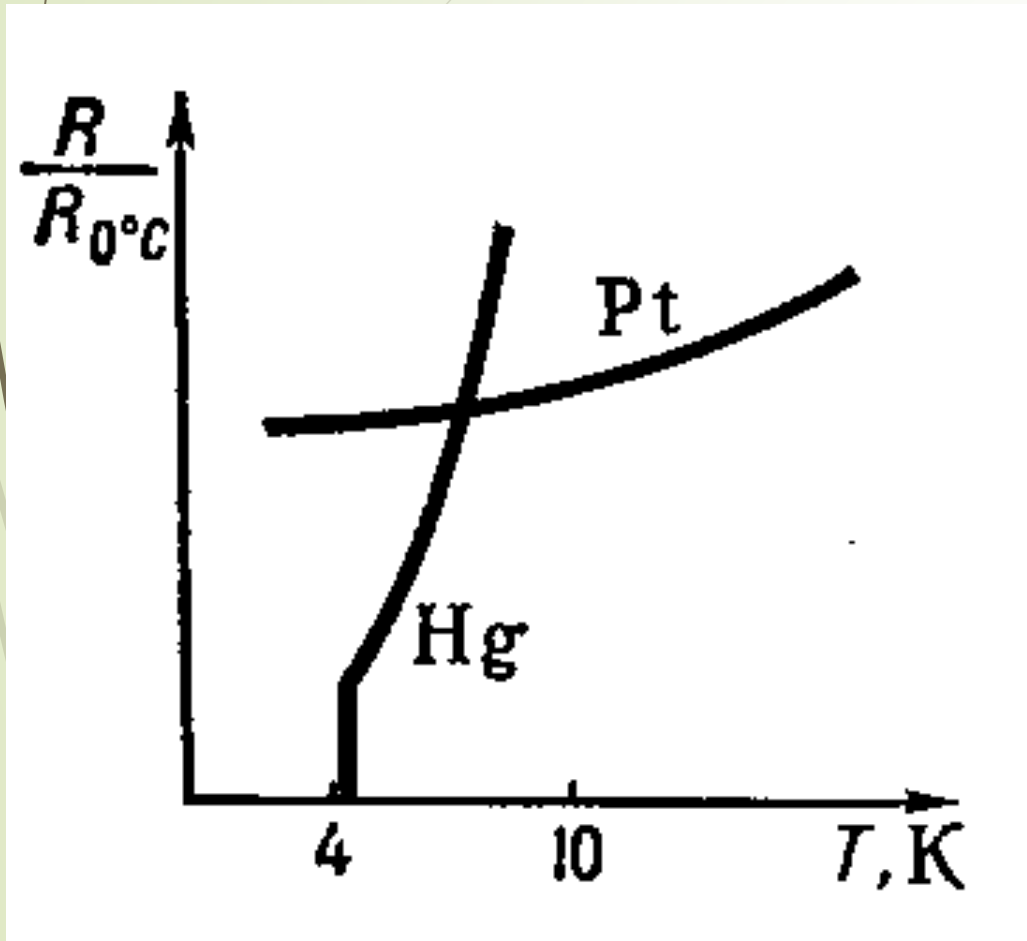
2) Понизить рабочую температуру!

$$E_{BITMIN} = k_B T \ln 2$$

Для уменьшения потерь действительно логично понизить температуру T процессора,

но полупроводники “вымерзают” при низких температурах.

Сверхпроводники?

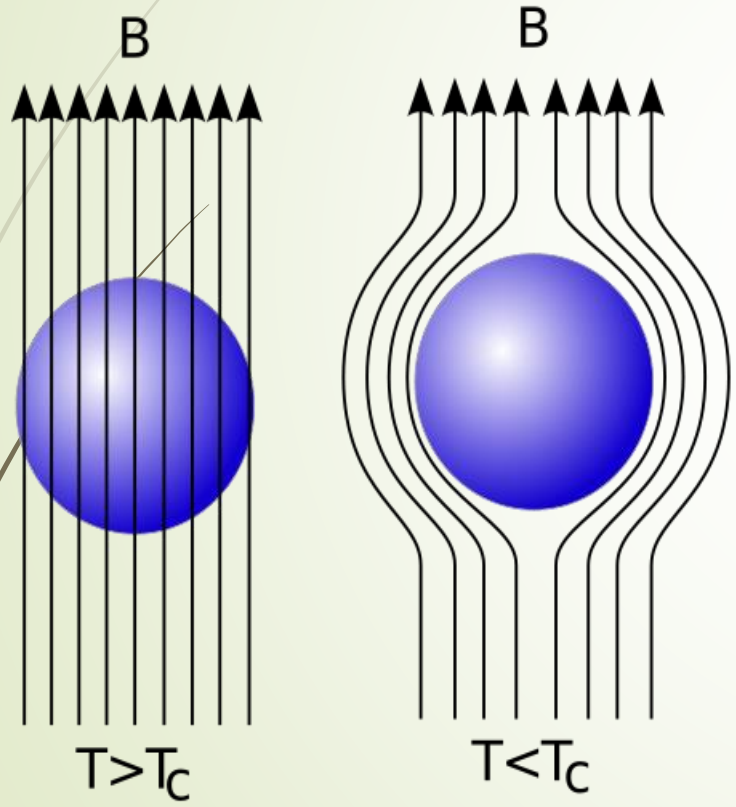


В 1911 году голландский физик Камерлинг-Оннес обнаружил, что при охлаждении ртути в жидком гелии её сопротивление сначала меняется постепенно, а затем при температуре 4,15 К резко падает до нуля.

Kamerlingh Onnes, H., "The Superconductivity of Mercury." *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden; Nos. 122 and 124, 1911.*

История исследования сверхпроводимости

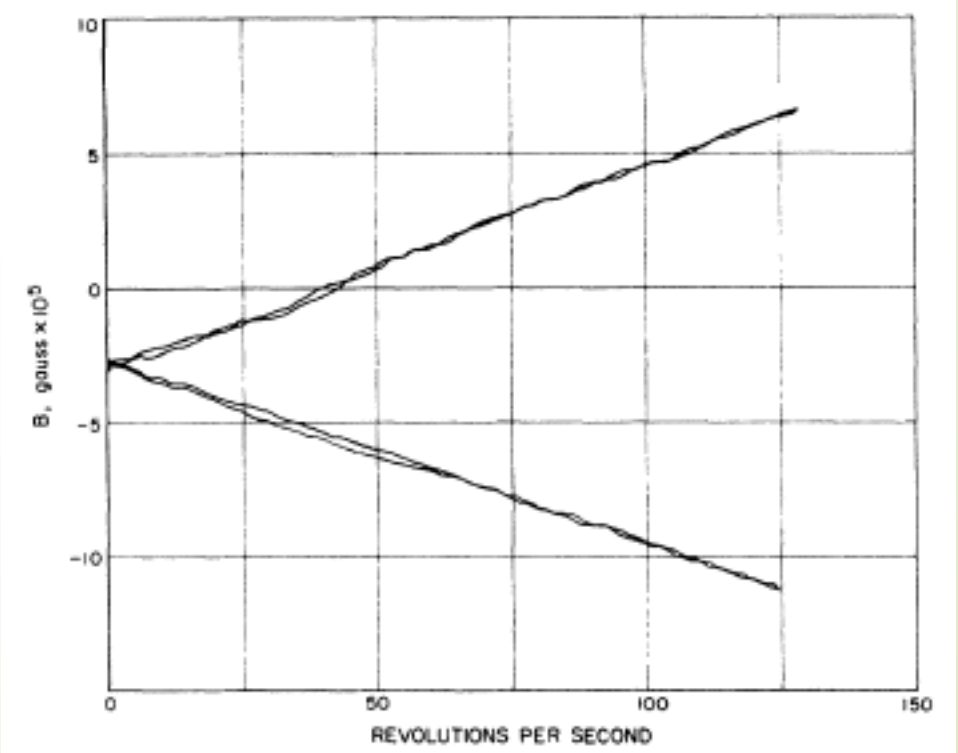
- **1933 год** — эффект Мейснера – Оксенфельда.



1950 год — предсказание эффекта Лондона

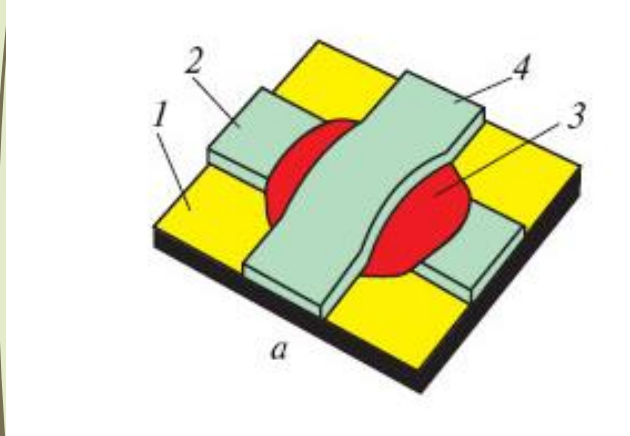
$$\vec{B}_L = (\frac{2m}{e})\vec{\omega} = 1.137 \times 10^{-11}\vec{\omega}\ \text{Тл}$$

1964 год — экспериментальное подтверждение



1956 год — создание микроскопической теории сверхпроводимости (БКШ),показавшей, что за явление отвечают электроны, связанные в пары взаимодействием с фононами решетки. В 1972 году работа отмечена нобелевской премией

Туннелирование между сверхпроводниками (1960 год)



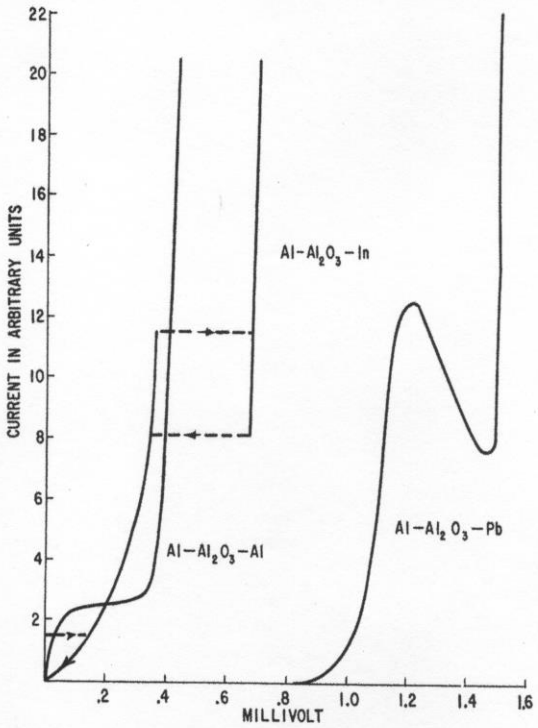


FIG. 2. Characteristic curves for tunneling between two superconductors, showing agreement with the analysis of Fig. 1. The curves Al-Al_2O_3-In and Al-Al_2O_3-Al are taken at $T \sim 1.1°K$, while the curve Al-Al_2O_3-Pb is at $T \sim 1.0°K$.

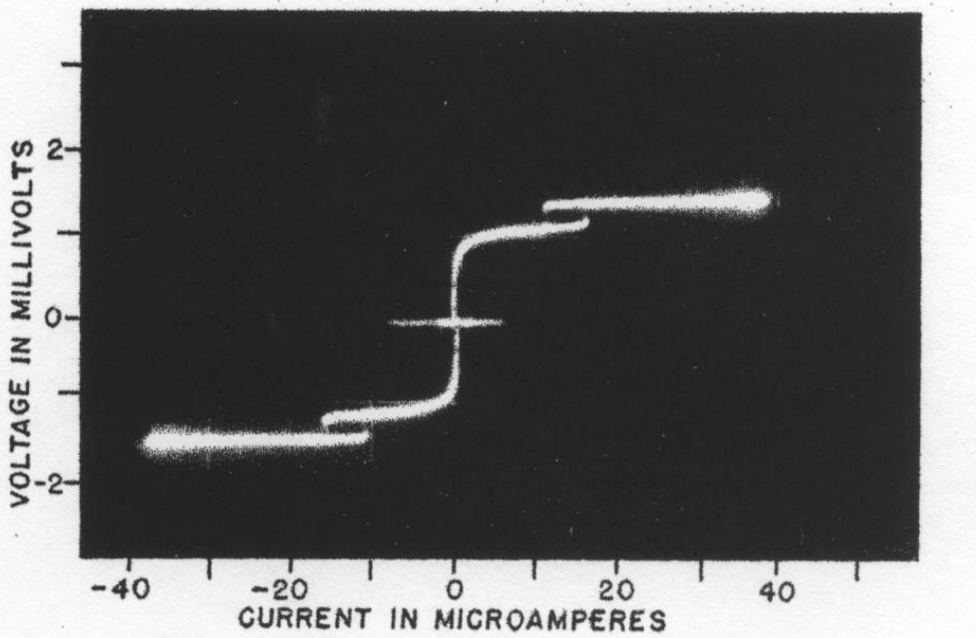


FIG. 1. Voltage vs tunneling current for an Al-Al_2O_3-Pb sandwich at 1°K.

I. Giaever. “Electron tunneling between two superconductors”, PRL, v. 5. 464 (1960).
J. Nicol, S. Shapiro, P.H. Smith. “Direct measurement of the superconducting energy gap”’,- PRL, v. 5, 461 (1960).

Открытие квантования магнитного потока (1961 год)

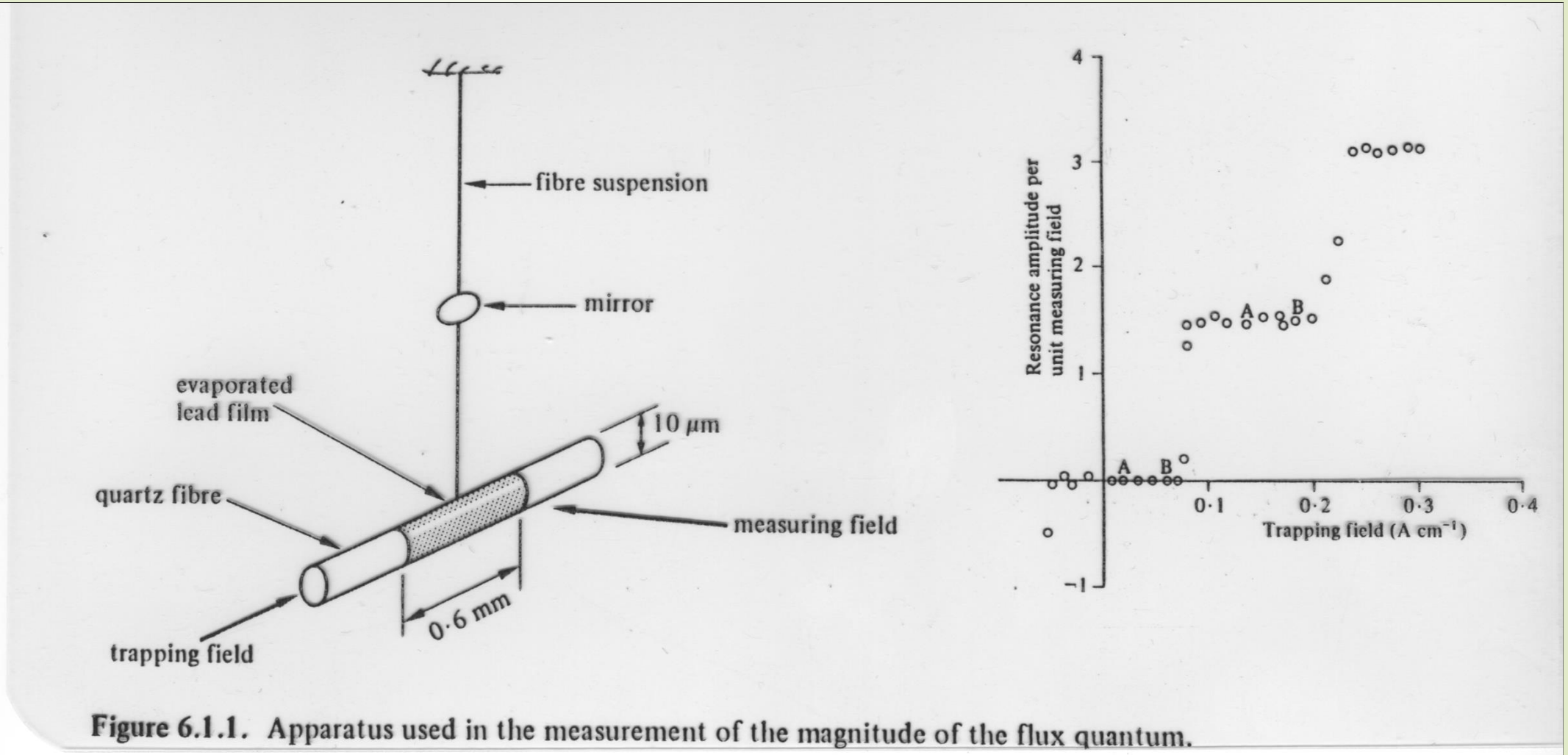
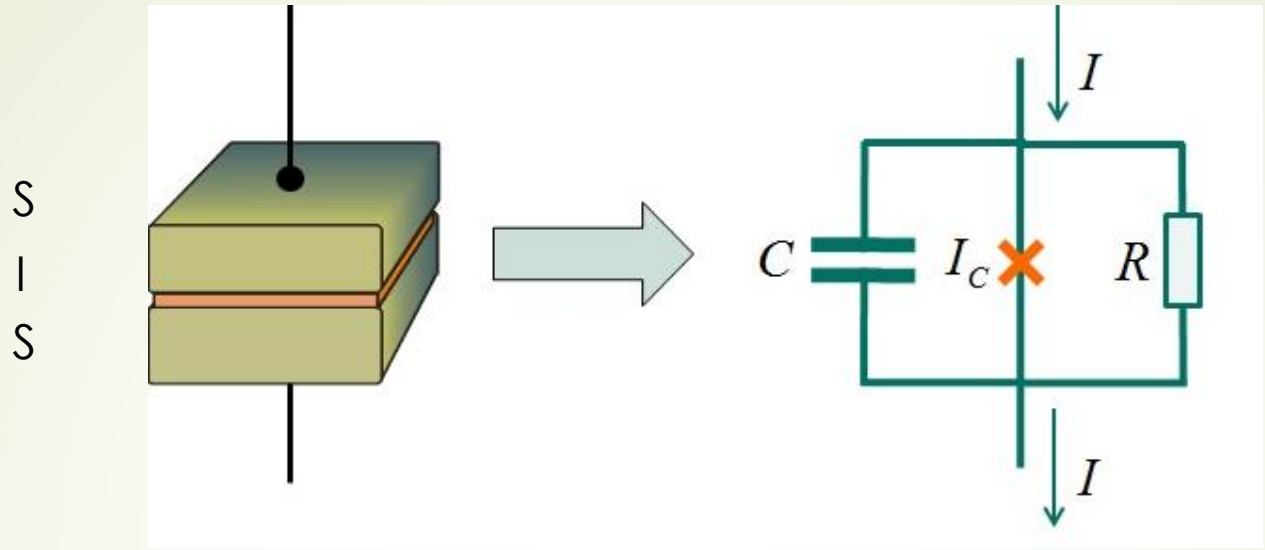


Figure 6.1.1. Apparatus used in the measurement of the magnitude of the flux quantum.

$$\Phi_0 = h/2e = 2.07\ 10^{-15}\ Вб$$

Deaver B. S. J r.,. Fairbank W. M. "Phys. Rev. Lett.", 1961, v. 7, p. 43

Открытие эффекта Джозефсона (1962 год)

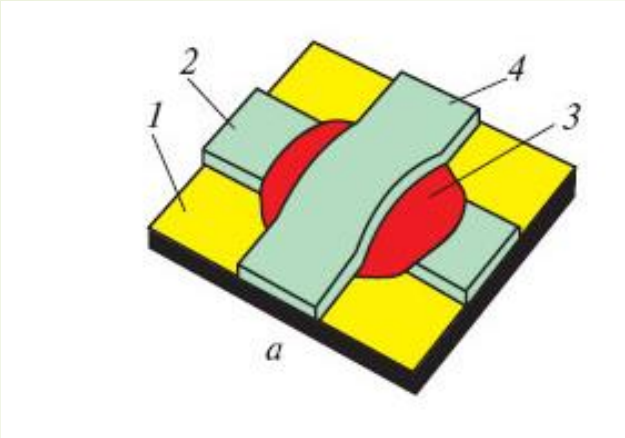


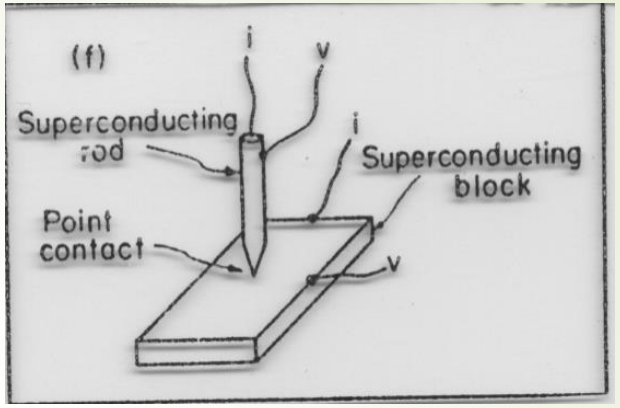
1) Объяснение существования бездиссипативного тока в таких структурах, обнаруженного, но не понятого I. Giaever(ом).
2) Предсказание высокочастотных осцилляций этого тока при наличии напряжения.

$$\omega_J = \frac{2e}{\hbar} V = \frac{2\pi}{\Phi_0} \mathrm{V} \qquad f_J \approx 0.5\ \text{ГГц/мкВ}$$

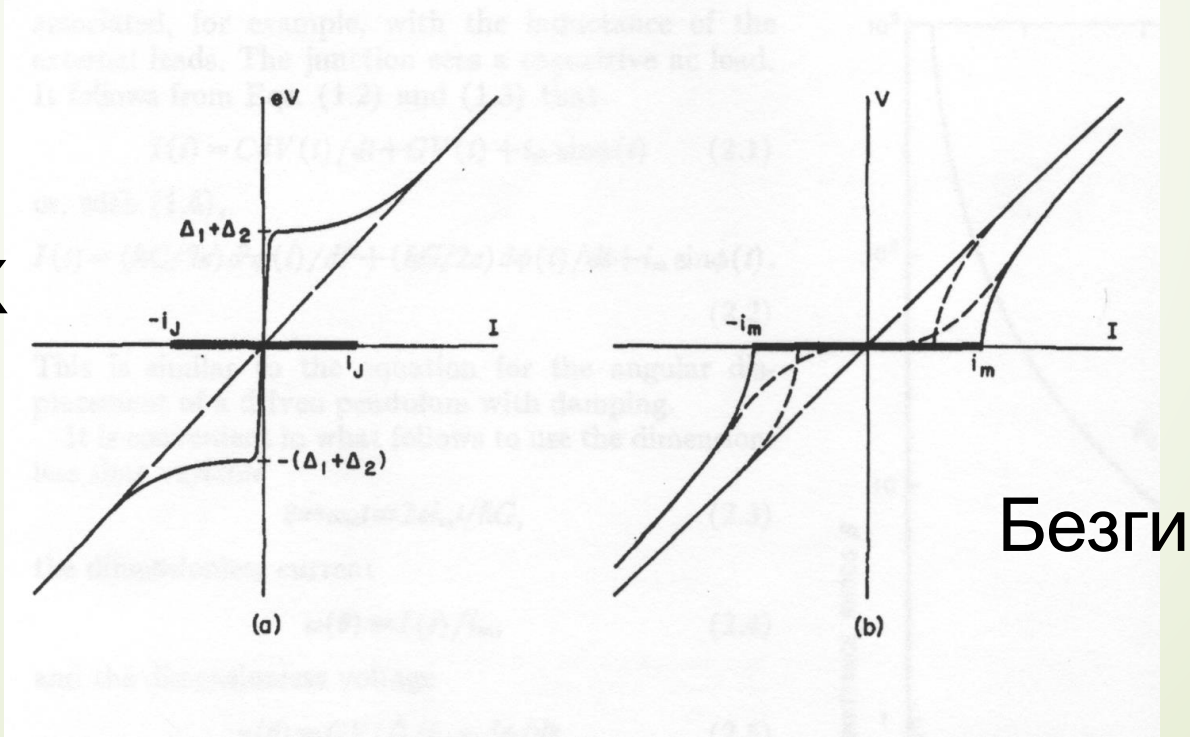
B. D. Josephson. “Possible new effects in superconducting tunneling”, - Phys. Lett, v. 1, No. 7, p. 251 (1962) [July, 1]

1968 год – Резистивная модель





Гистерезисная ВАХ



Безгистерезисная ВАХ

1962

1971 год – первые планарные джозефсоновские переходы с безгистерезистной ВАХ

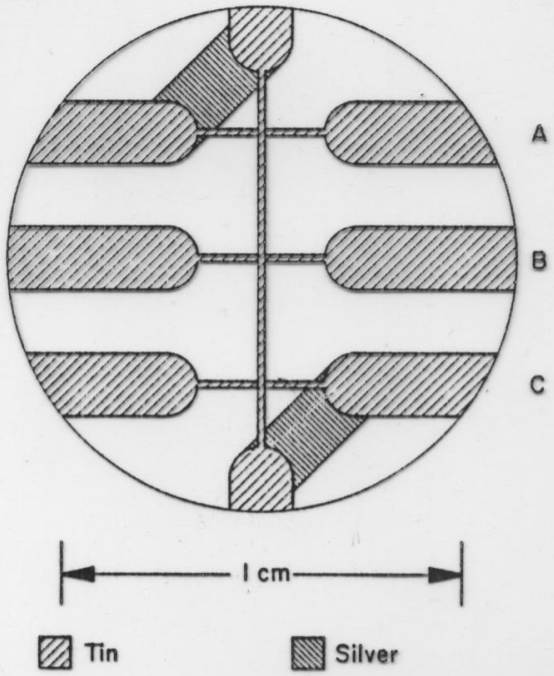


FIG. 3. One type of externally shunted Josephson junction used in our experiments. Two of the three *S-I-S* Josephson junctions formed at the intersections of the tin films are shunted with silver strips.

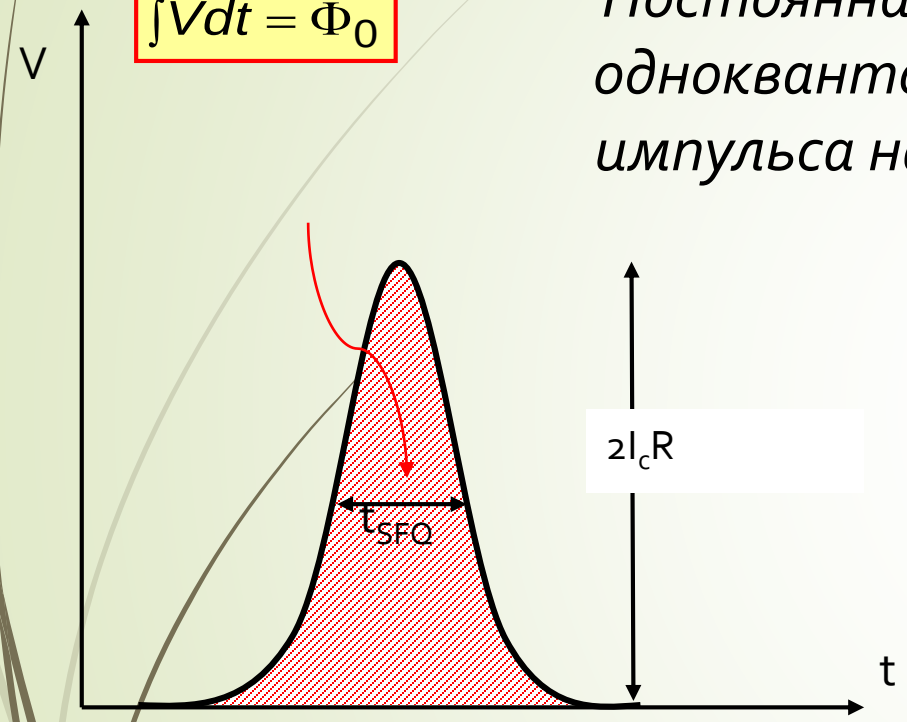
б)

Рис.1. Конструкция планарного джозефсоновского перехода (а) и его внешний вид (б). Площадь перехода 9×9 мкм^2

Импульсное переключение джозефсоновского перехода S-R-S

$\int V dt = \Phi_0$

Постоянная площадь одноквантового (SFQ) импульса напряжения



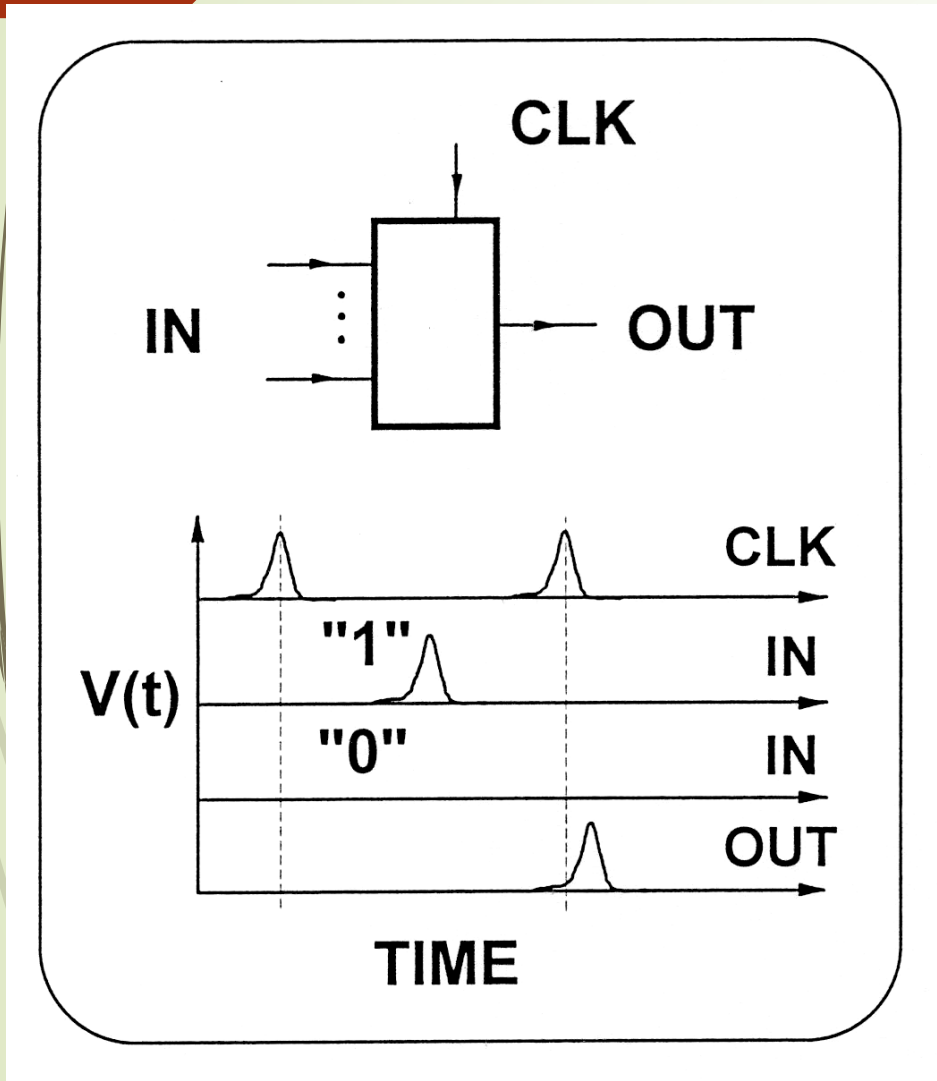
$$\tau_{SFQ} \approx 10^{-12}\ \text{с}$$

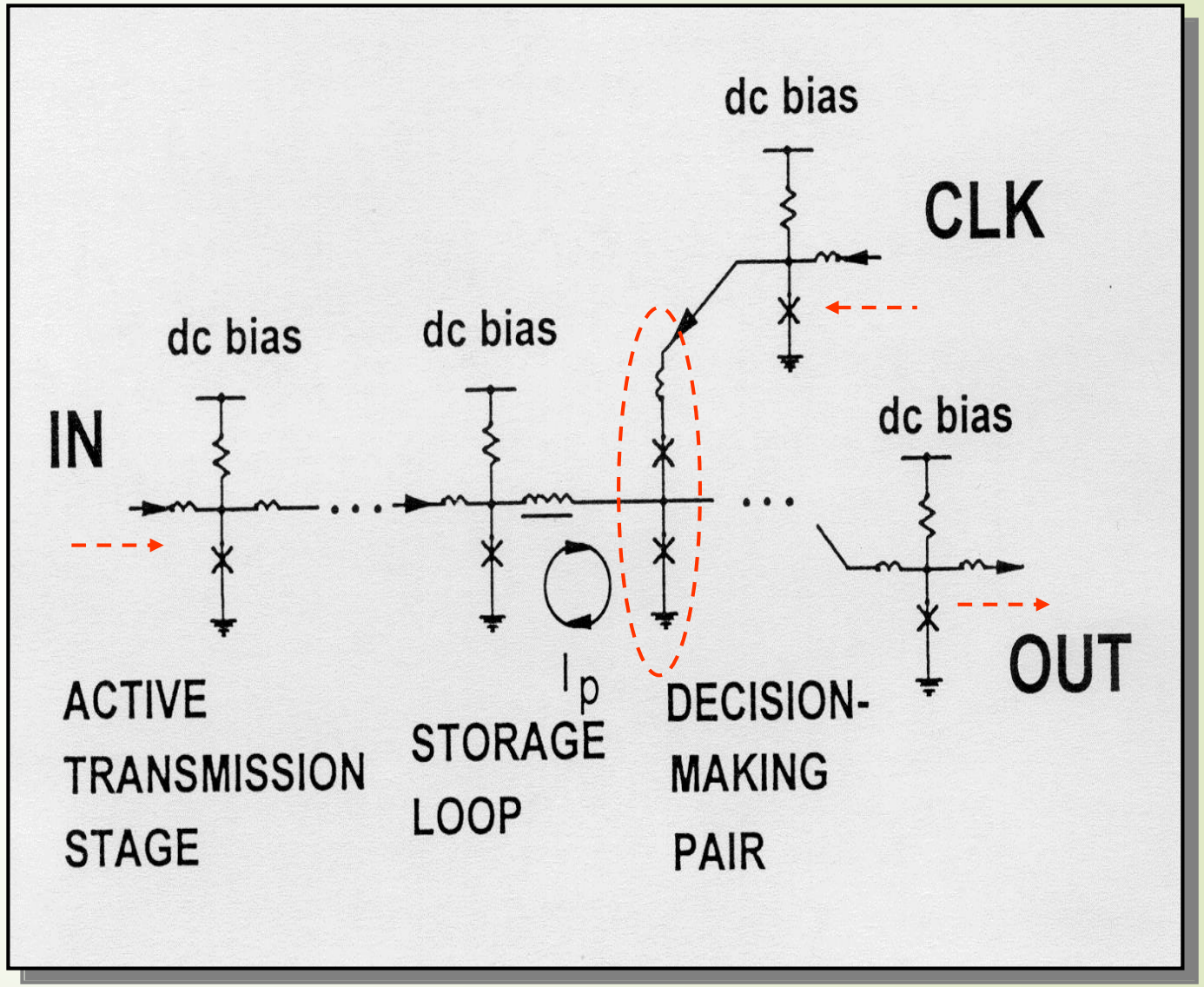
$V\ max \approx 2I_cR \approx 2\ мВ$

$\int V dt = \Phi_0 = h/2e = 2.07$ мВ·пс

Характерная энергия $2 \cdot 10^{-19}$ Дж или $5 \cdot 10^3 \cdot E_{bitmin}$ (T = 4 K)

RSFQ логика (1990 год)



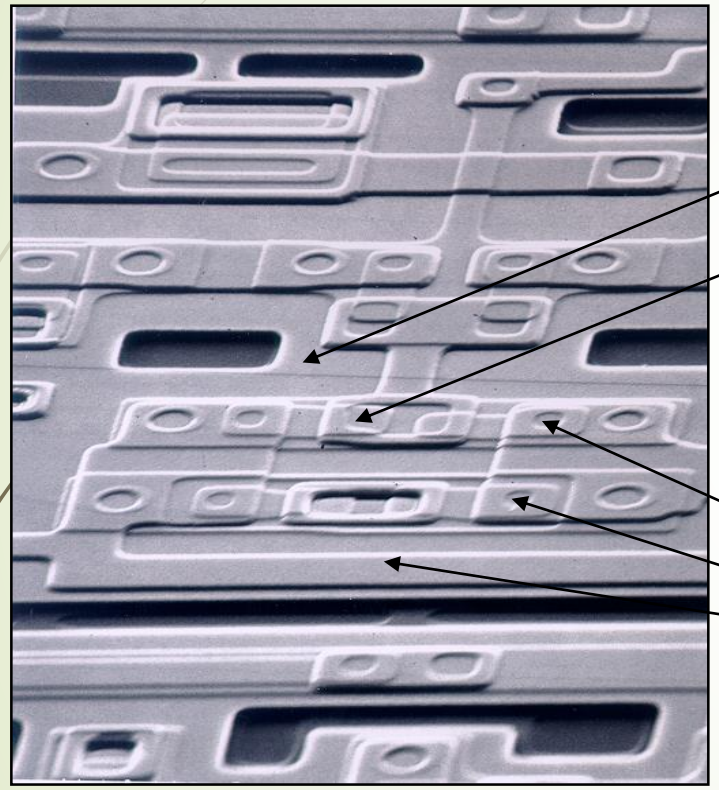


Краткие промежуточные выводы

- Ширина SFQ импульса: $t_{SFQ} \sim \Phi_0/2I_cR$, где $2I_cR$ – высота импульса
- Для Nb переходов предельное время $t_{SFQ} \rightarrow 0.4$ ps;
- Для сложных RSFQ цепей реальная рабочая частота $f_{clock} \sim 1/(10\ t_{SFQ})$
- Оценка для энергии, выделяемой при прохождении SFQ импульса ~ ¾ $\Phi_0 I_c \sim 0.2\times10^{-18}$ Дж
- Сверхпроводники дают уникальную возможность передавать пикосекундные волновые пакеты без искажения их формы, со скоростью близкой к скорости света (в отличие от полупроводников здесь нет RC-задержек «на перезарядку»)

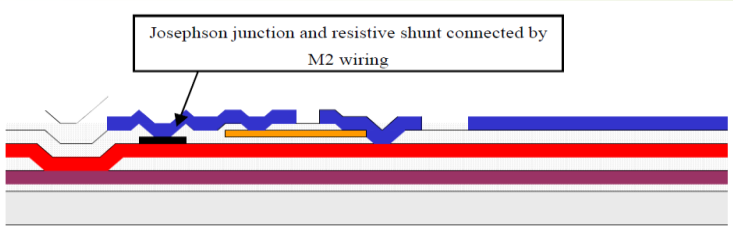
Максимальная рабочая частота для систем с очень высокой степенью интеграции (VLSI) ***~ 250 ГГц*** *при низкой потребляемой мощности!*

Проблемы: размеры и температура (4 K)



«Соединительная» индуктивность (~6 pH)

Шунт (~1 Ω)

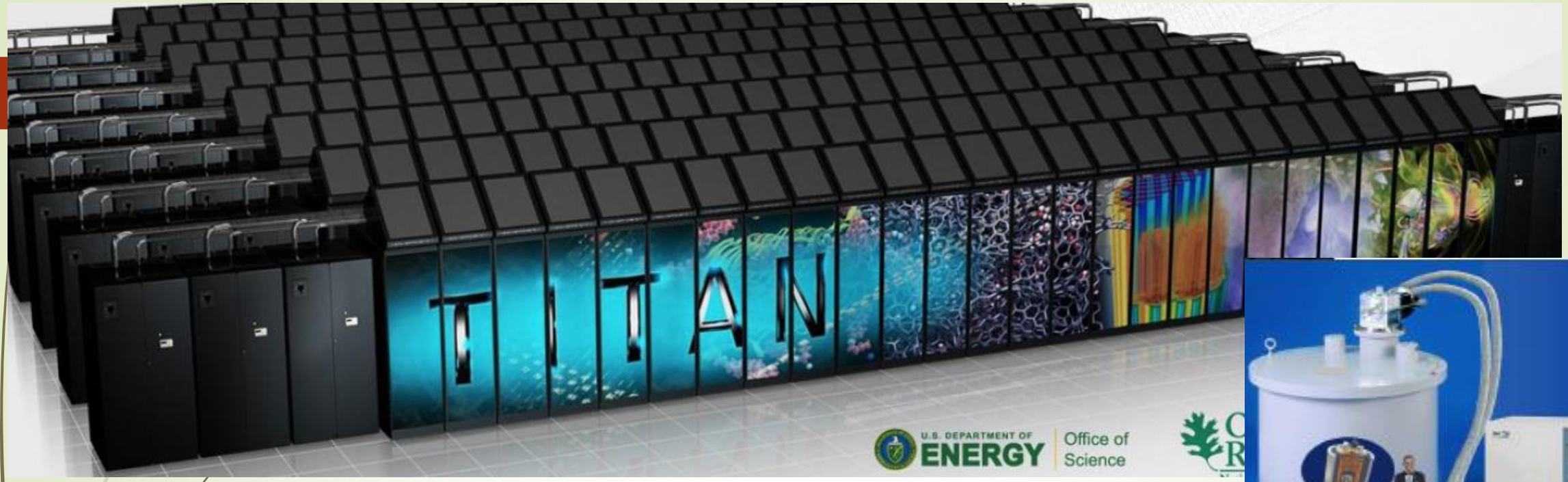


Джозефсоновские переходы

Индуктивность для «хранения» информации (~12 pH)

Типичный логический элемент

Вывод: размер логического элемента не сделать меньше нескольких мкм



	Supercomputer Titan at ORNL - #2 of Top500	Superconducting Supercomputer	
Performance	17.6 PFLOP/s (#2 in world*)	20 PFLOP/s	~1x
Memory	710 TB (0.04 B/FLOPS)	5 PB (0.25 B/FLOPS)	7x
Power	8,200 kW avg. (not included: cooling, storage memory)	80 kW total power (includes cooling)	0.01x
Space	4,350 ft² (404 m², not including cooling)	~200 ft² (includes cooling)	0.05x
Cooling	additional power, space and infrastructure required	All cooling shown	

#1 in Top500, 2012.11 (17.8 PFLOPS)

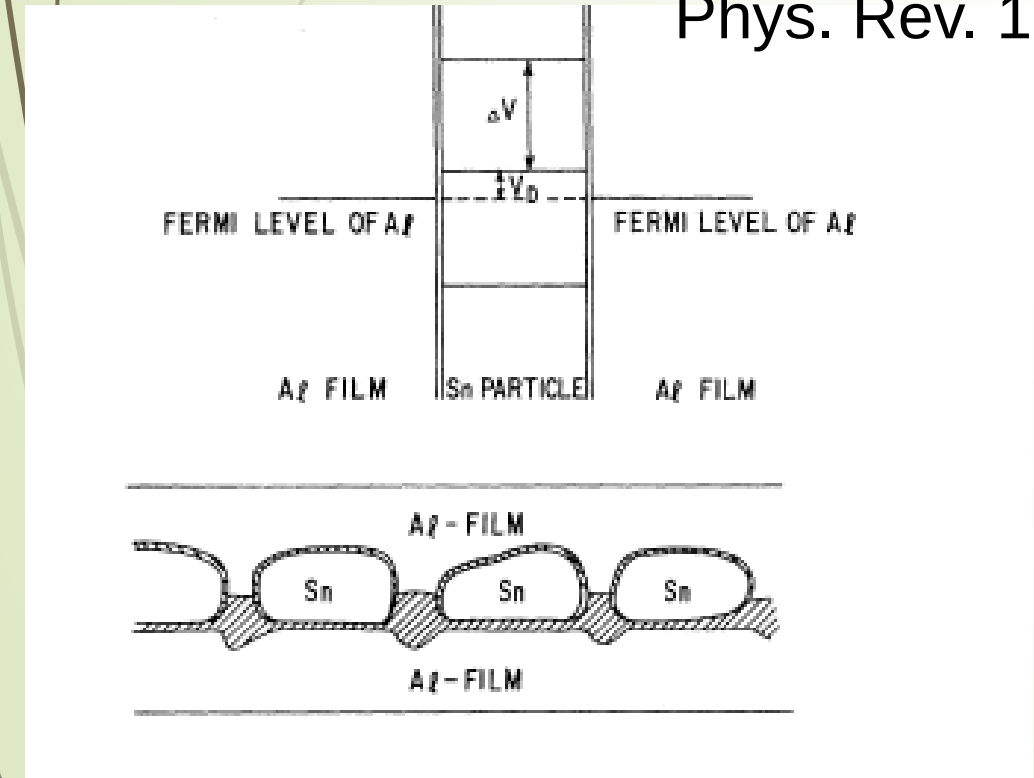
3) Только ли сверхпроводимость?

- Можно ли использовать «вредный» эффект туннелирования?

Снова немного истории

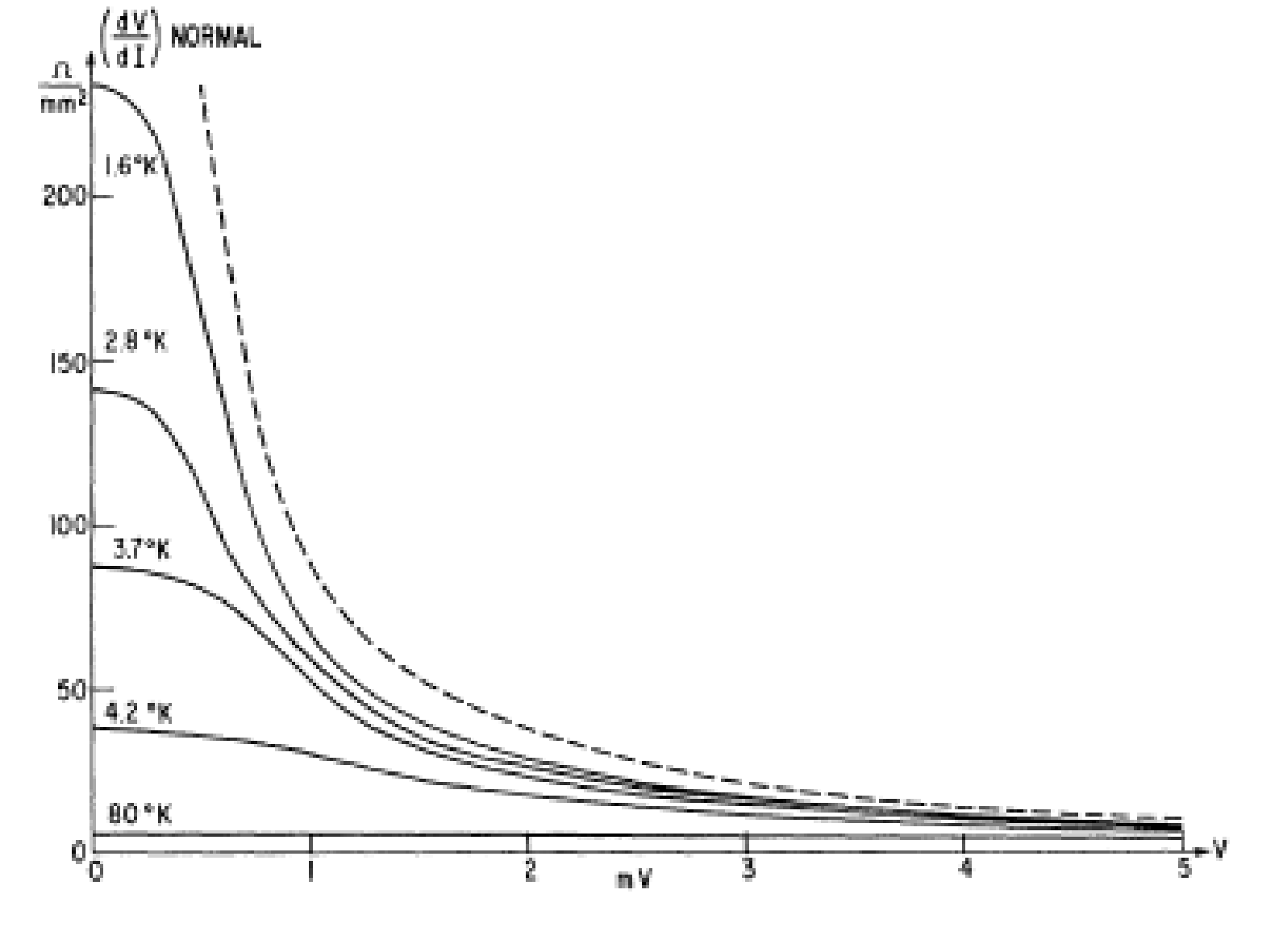
I. Giaever and H. R. Zeller

SUPERCONDUCTIVITY OF SMALL TIN PARTICLES MEASURED BY TUNNELING
Phys. Rev. 181, 789 – Publshed 10 May 1969



Ivar Giaever – нобелевский лауреат 1973 года за экспериментальное открытие туннельных эффектов в полупроводниках и сверхпроводниках (совместно с Leo Esaki и Brian Josephson)/

Странное поведение сопротивления структуры

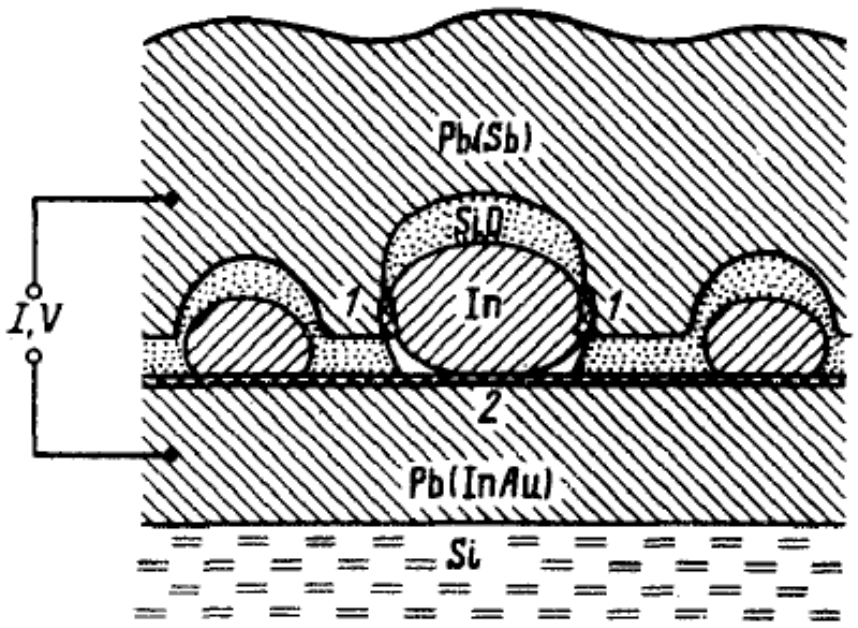


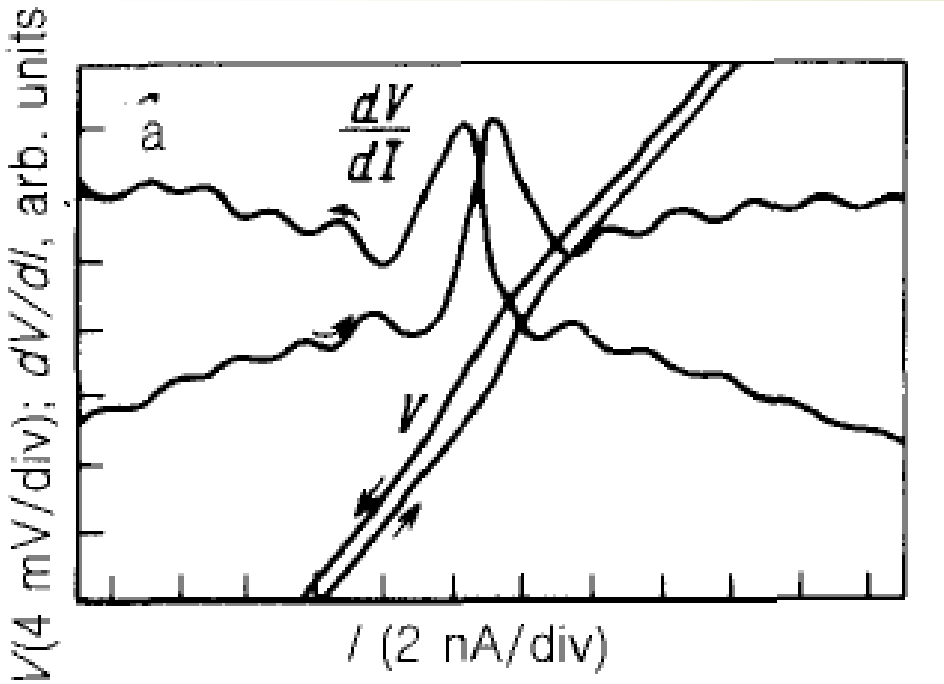
Direct experimental observation of discrete correlated single-electron tunneling

L. S. Kuz'min and K. K. Likharev
M. V. Lomonosov State University, Moscow

(Submitted 6 March 1987)
Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **45**, No. 8, 389–390 (25 April 1987)

Periodic oscillations observed on the current-voltage characteristics of granular tunnel junctions can be described well by a theory of a correlated tunneling of single electrons. This effect can be utilized to develop an ultrasensitive (subelectron) electrometry.



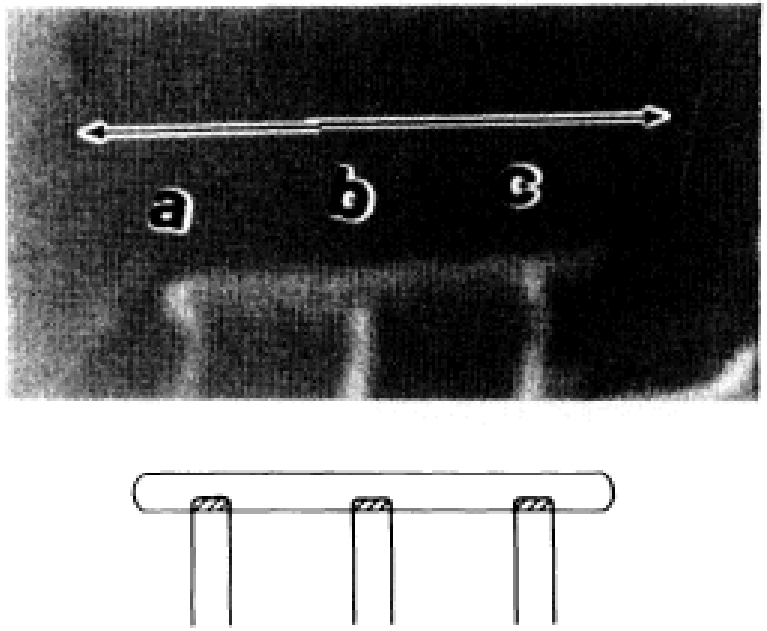


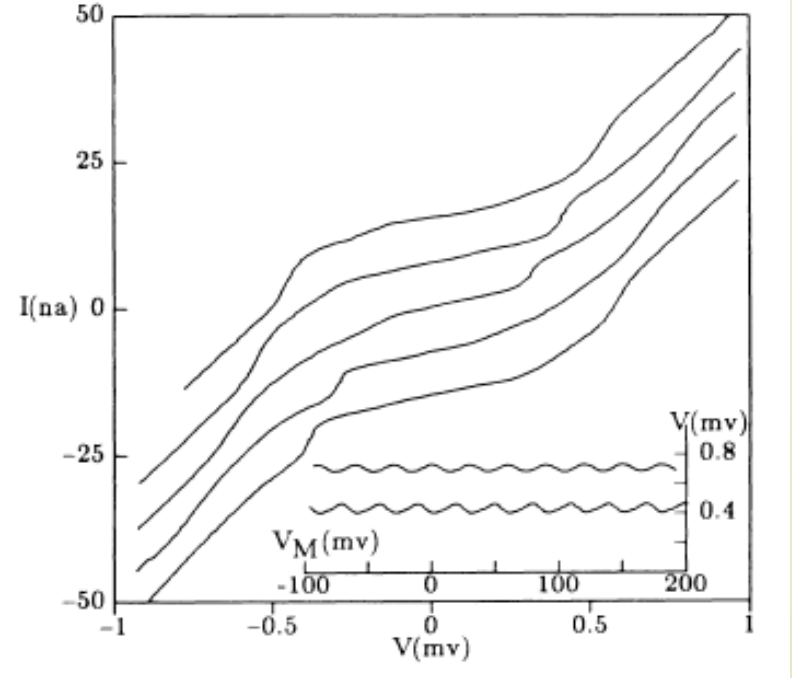
VOLUME 59, NUMBER 1 PHYSICAL REVIEW LETTERS 6 JULY 1987

Observation of Single-Electron Charging Effects in Small Tunnel Junctions

T. A. Fulton and G. J. Dolan
AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey 07974
(Received 6 March 1987)

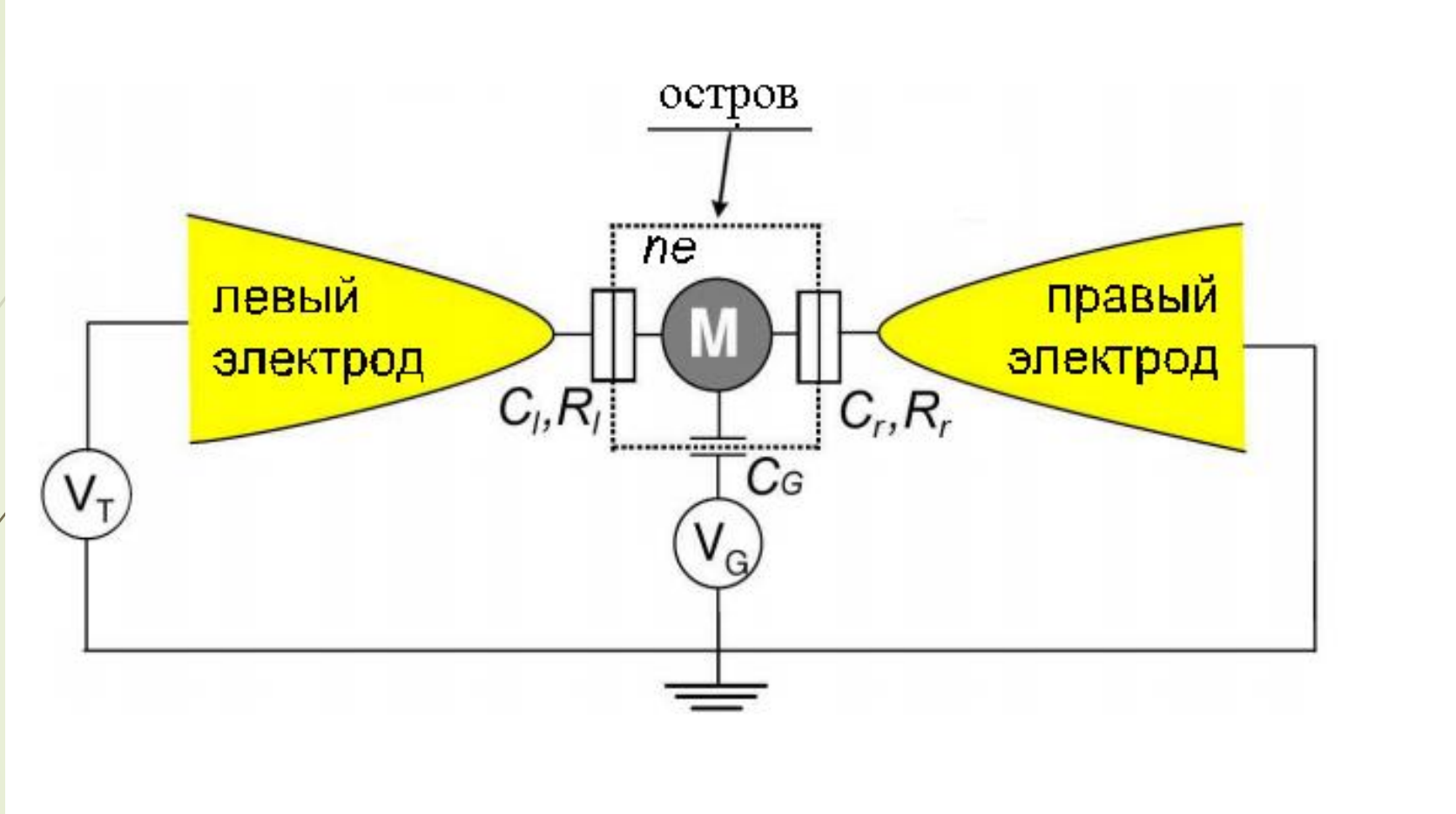
Unusual structure and large electric-field–induced oscillations have been observed in the current-voltage curves of small-area tunnel junctions arranged in a low-capacitance ($\lesssim 1$ fF) multiple-junction configuration. This behavior arises from the tunneling of individual electrons charging and discharging the capacitance. The observations are in accord with what would be expected from a simple model of the charging energies and voltage fluctuations of e/C associated with such effects.





Crys Lab

Одноэлектронный транзистор



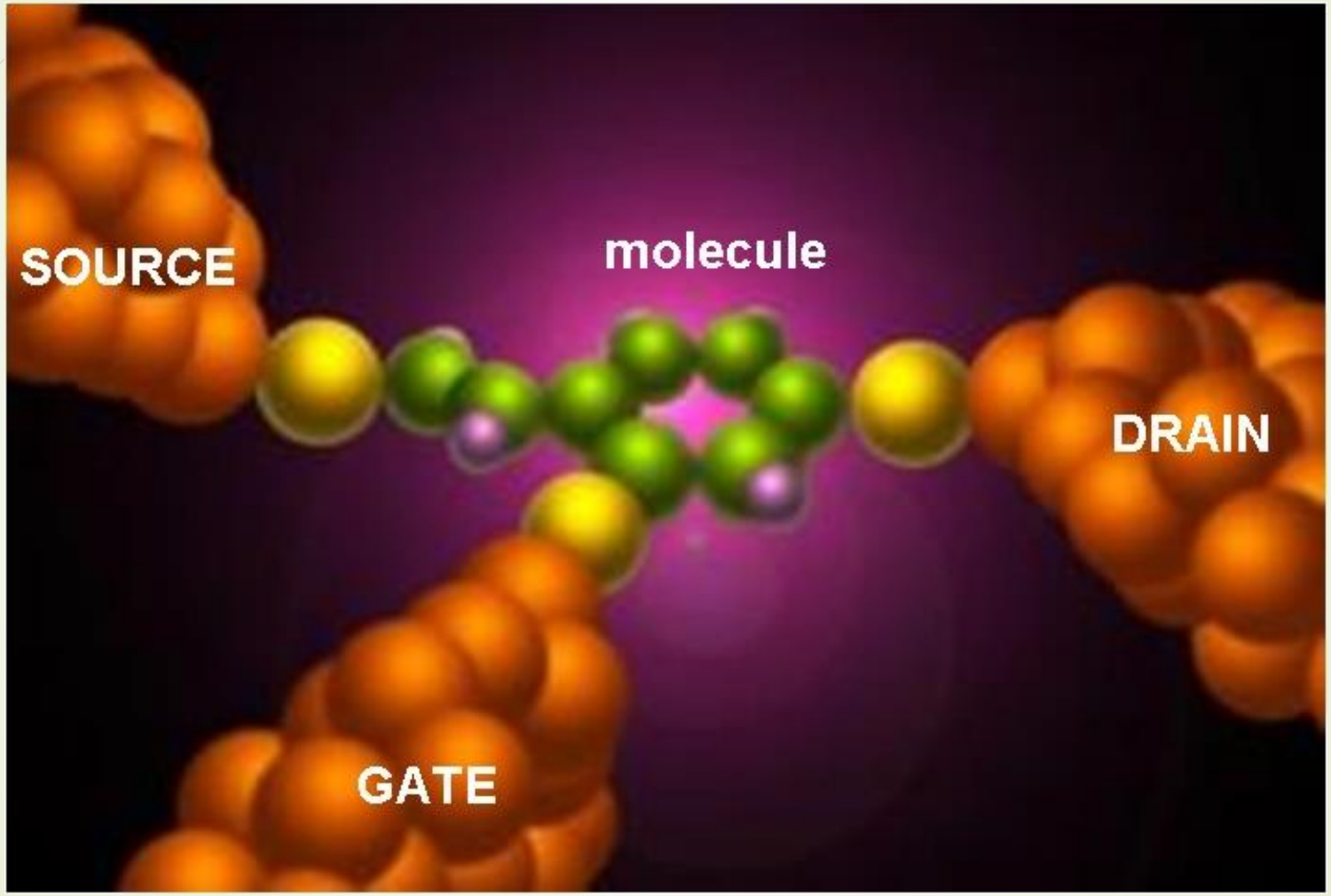
$$\frac{e^2}{2C} >> kT$$

$$R_T >> R_q = \frac{\hbar}{e^2} = 25.8\ \text{кОм}$$

T = 300 K C = 10^{-19} F => R = 1 nm

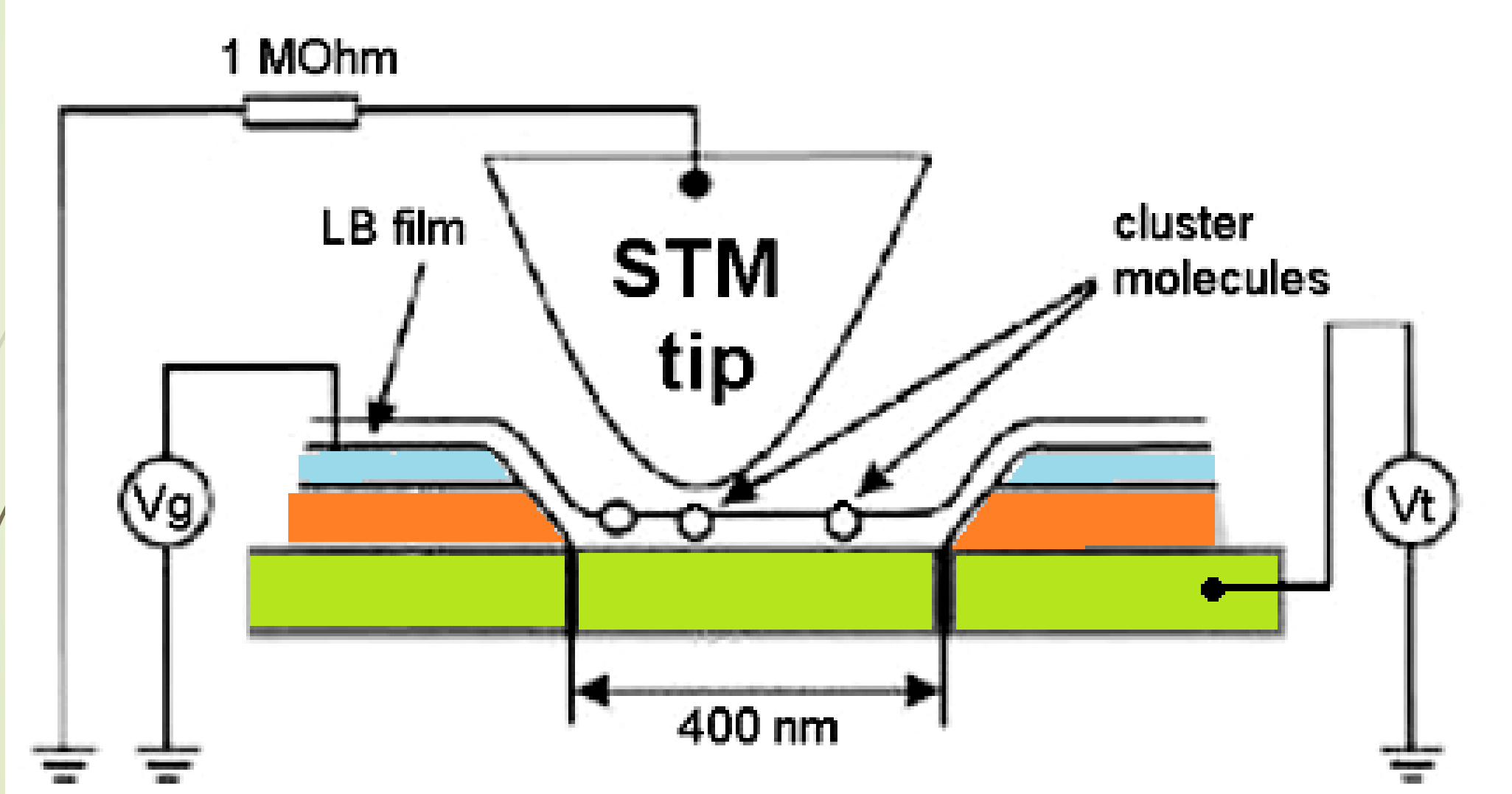
Как поднять рабочую температуру до 300 К?

“Остров” должен быть атомарного размера!



T = 300 К C = 10^{-19} F => R = 1 nm => молекула или атом!!!

Модель одноэлектронного одномолекулярного транзистора



Письма в ЖЭТФ, том 64, вып.7, стр.510 - 514 © 1996г. 10 октября

ОДНОЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ ОДИНОЧНОЙ КЛАСТЕРНОЙ МОЛЕКУЛЫ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Е.С.Солдатов[1)], В.В.Ханин, А.С.Трифонов, С.П.Губин, В.В.Колесов+, Д.Е.Преснов, С.А.Яковенко, Г.Б.Хомутов*

Физический факультет Московского государственного университета
119899 Москва, Россия

**Институт общей неорганической химии им. Н.С.Курнакова РАН*
117907 Москва, Россия

+Институт радиоэлектроники РАН
103907 Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 сентября 1996 г.

Cryo Lab

Вольт-амперная и сигнальная характеристики

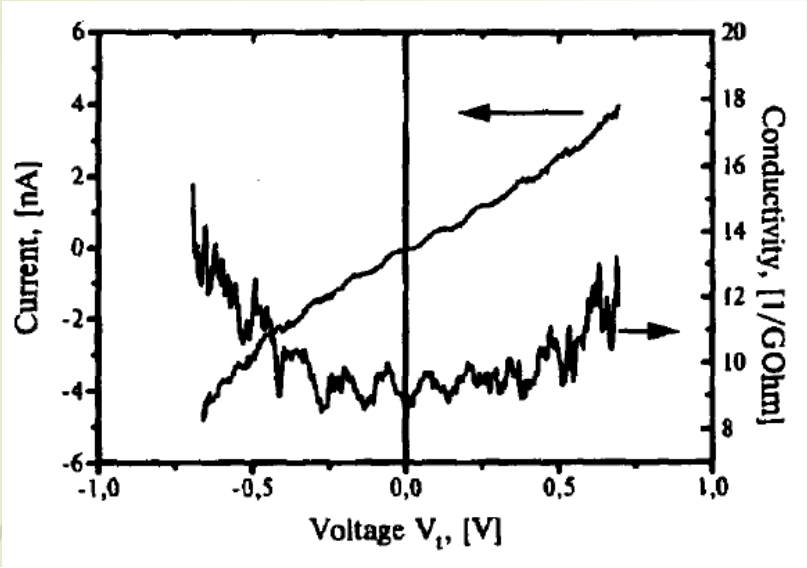


Рис.2. Вольт-амперная характеристика и зависимость проводимости от туннельного напряжения одноэлектронного молекулярного транзистора при фиксированном (нулевом) напряжении управления V_g

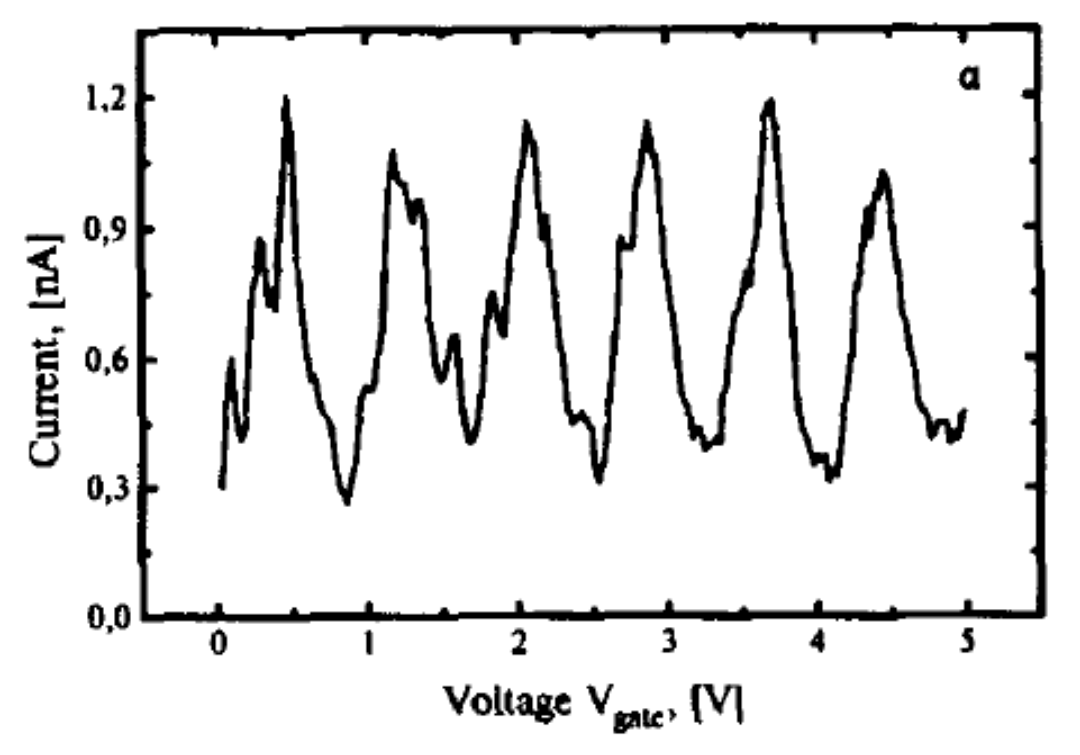
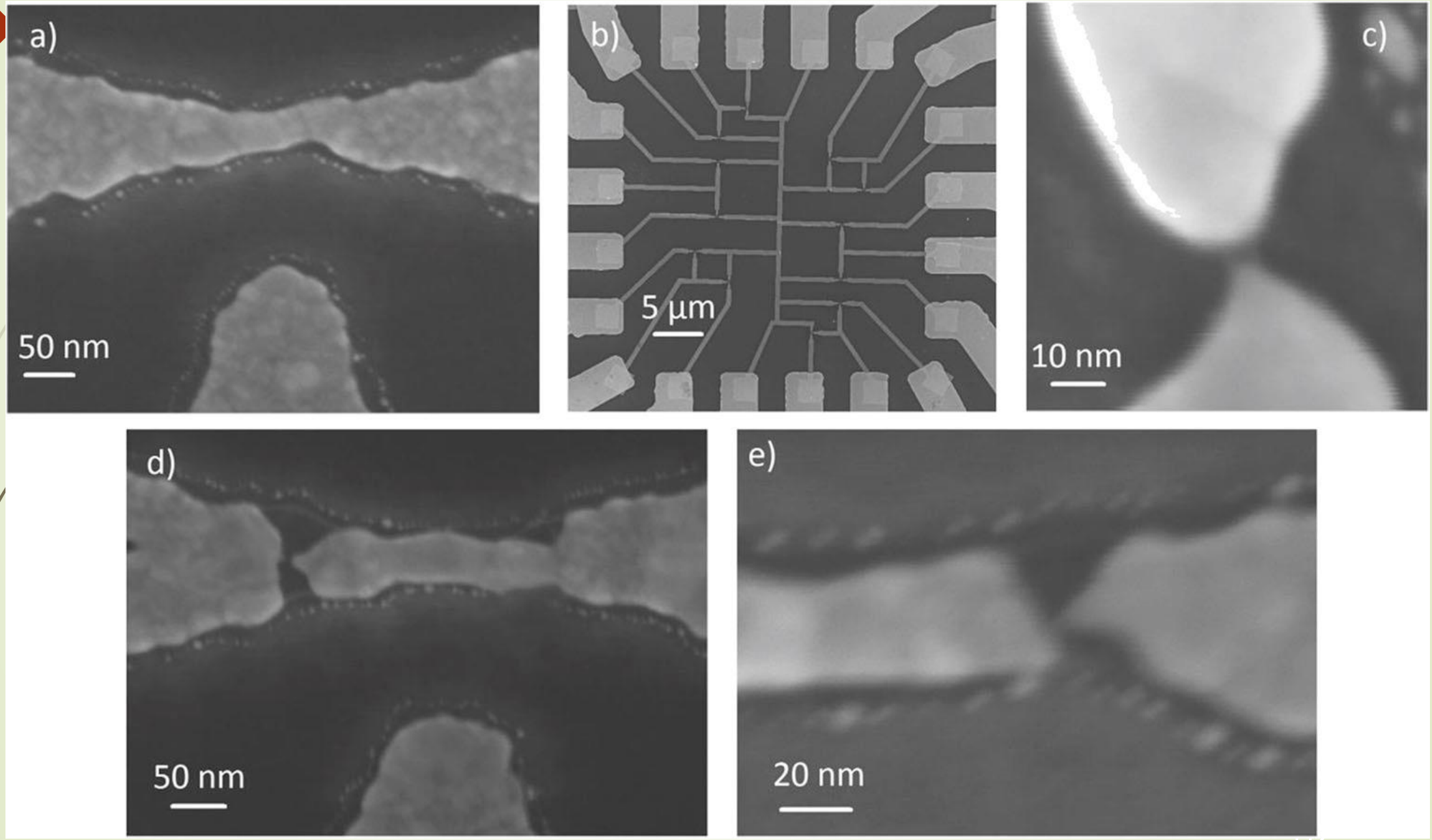
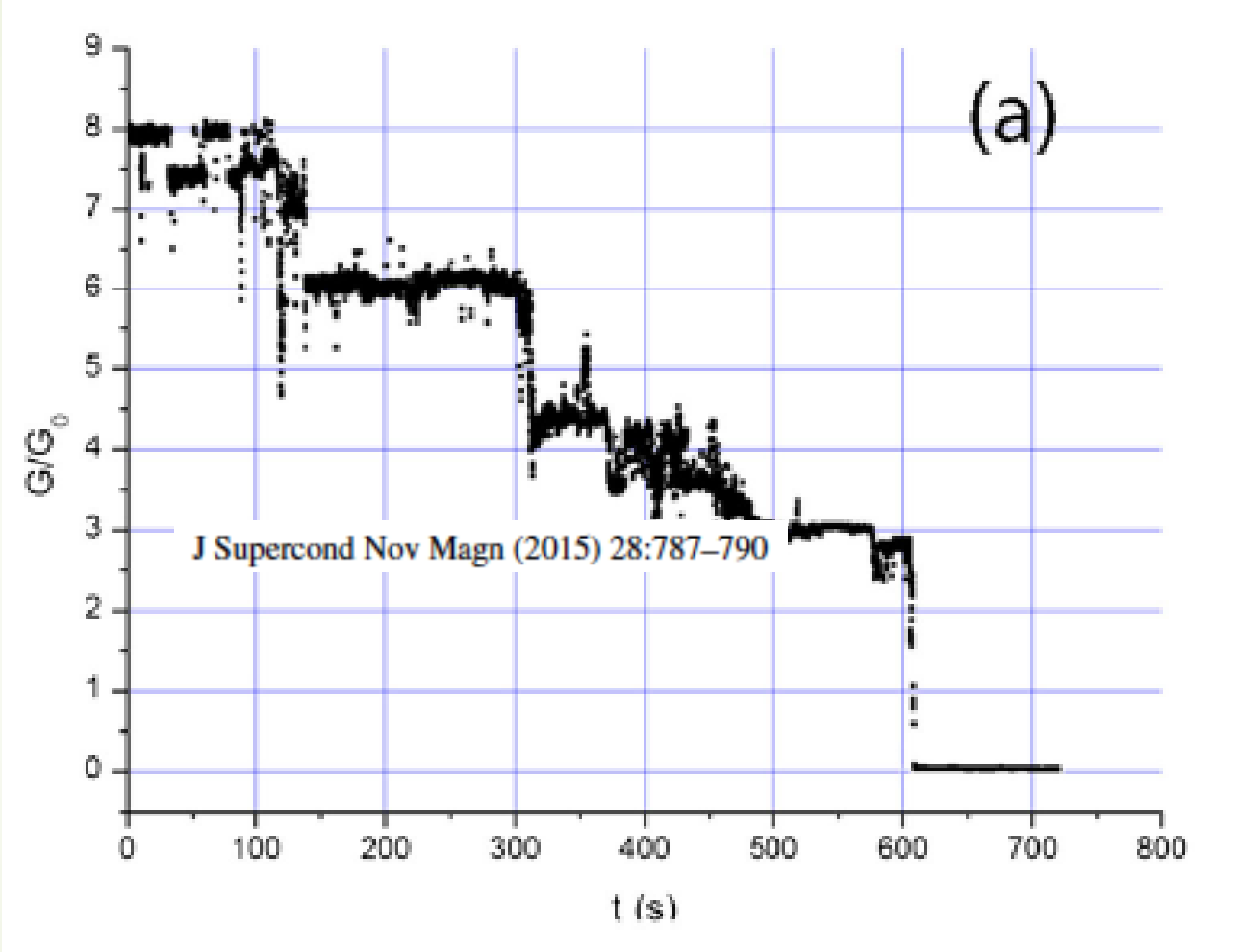


Рис.3. Сигнальные характеристики системы: при расположении иглы СТМ над кластером

ОТ СТМ К НАНОЗАЗОРУ



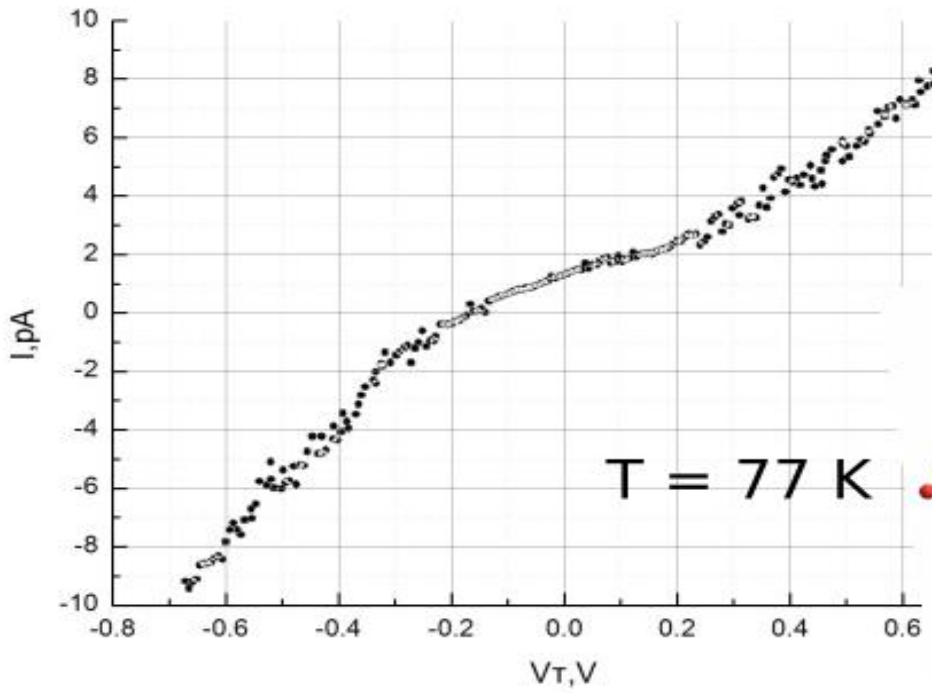
$$G_0 = \frac{e^2}{h}$$



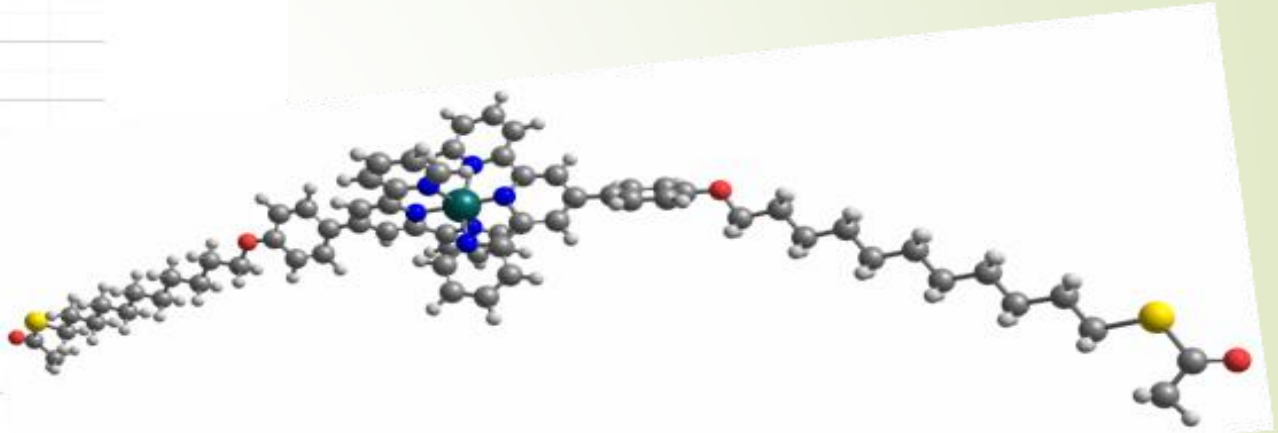
Проводимость нанопроволоки перед разрывом

S. Dagesyn, A. Stepanov, E. Soldatov, O. Snigirev. J. Supercond. Nov. Magn., (2015) 28: 787 -790.

Молекулярный одноатомный одноэлектронный транзистор при T = 77 K!



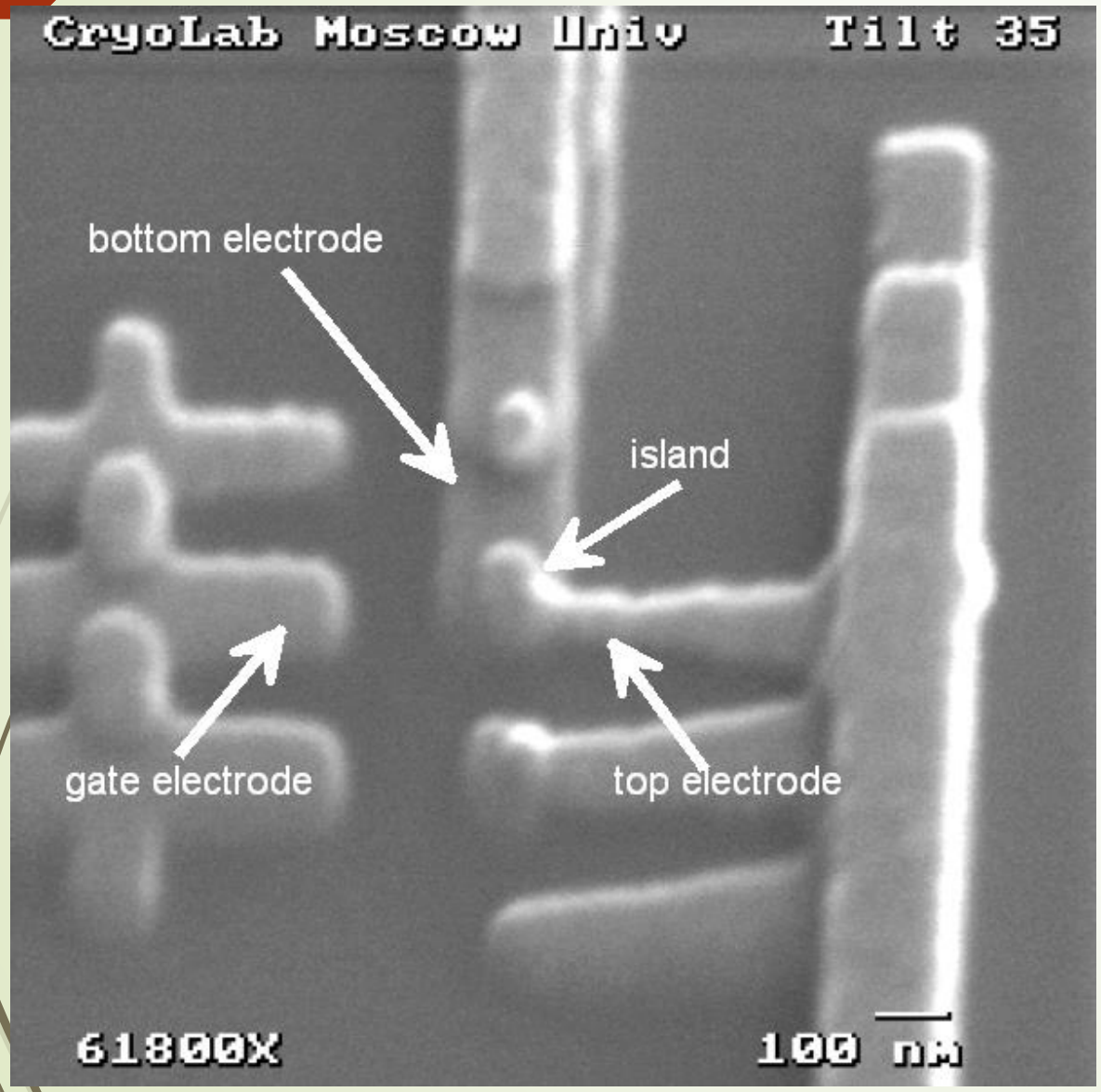
Размер молекулы
L ~ 5нм



Молекула аурофильного производного терперидина на основе родия

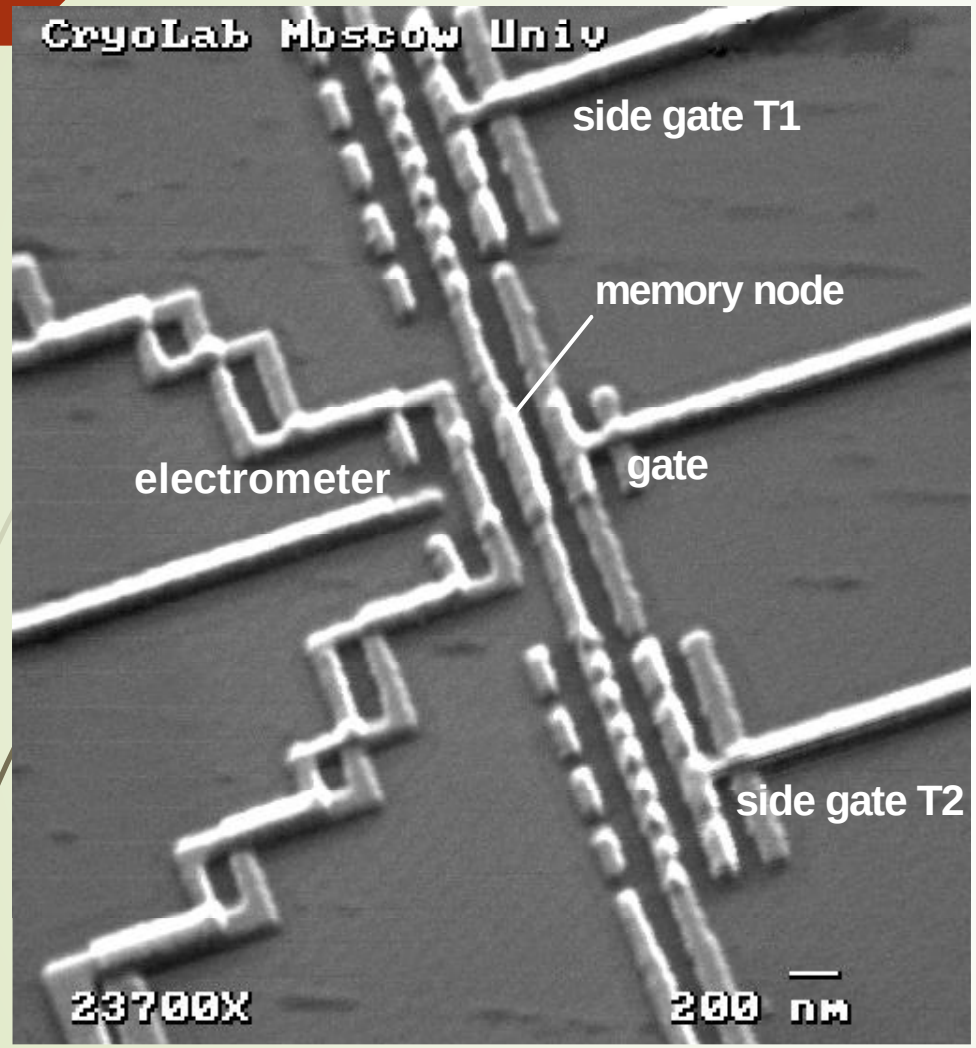
Паршинцев А.А., Шорохов В.В., Солдатов Е.С., Исследование возможности построения одноэлектронного транзистора на основе молекулы с одноатомным зарядовым центром, Известия РАН, 2017, 81 (1), 45-49.

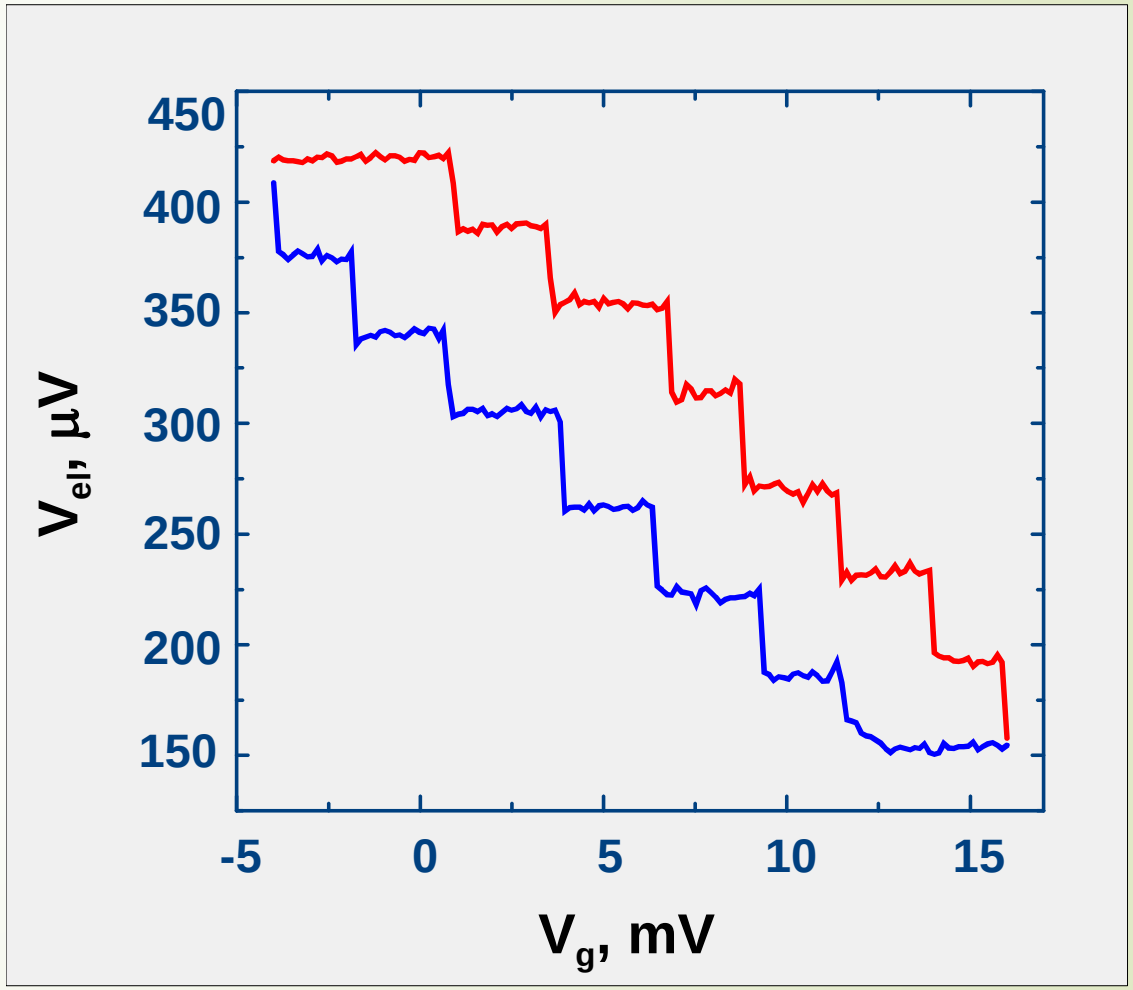
«Металлическая одноэлектроника» (1996 год)



$T_{раб}$ = 0.03 К

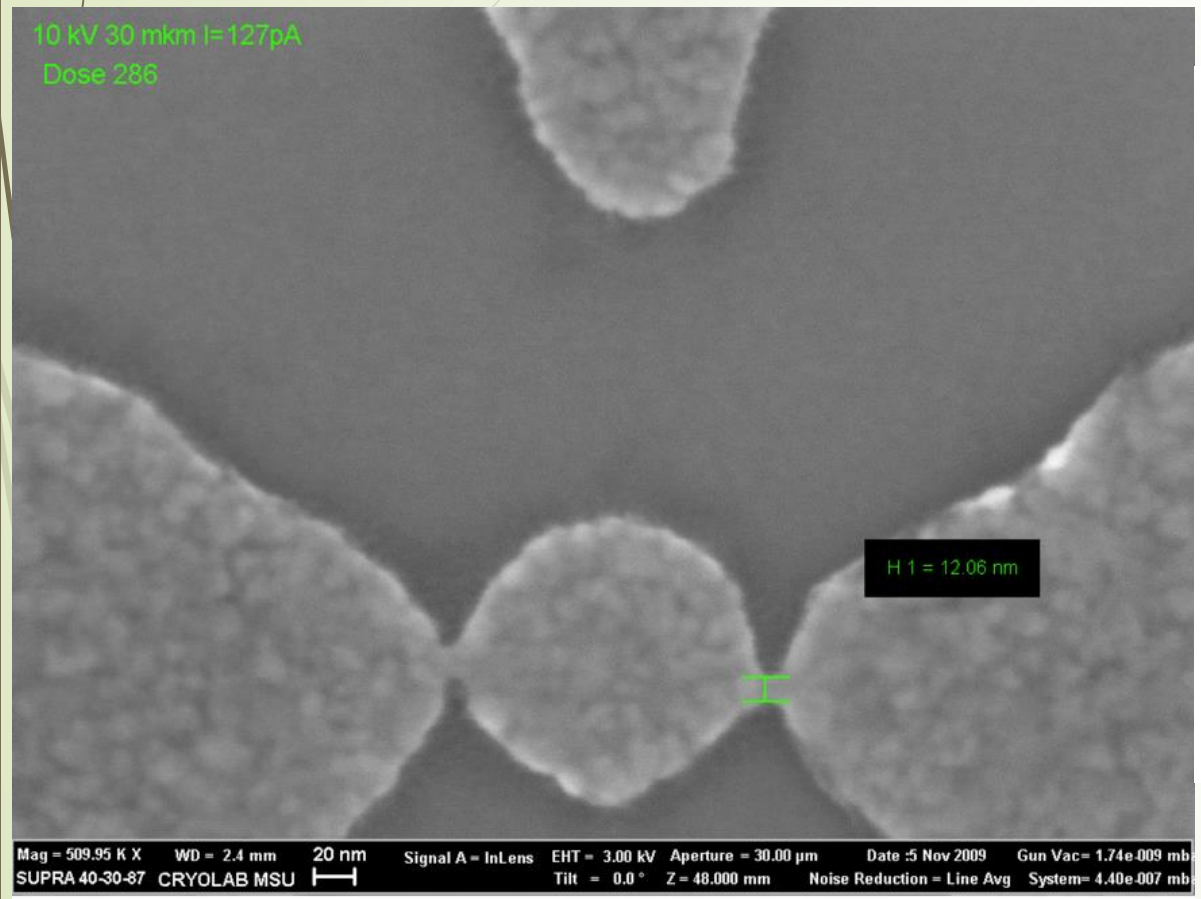
Одноэлектронная ячейка памяти с временем хранения состояния более 8 часов

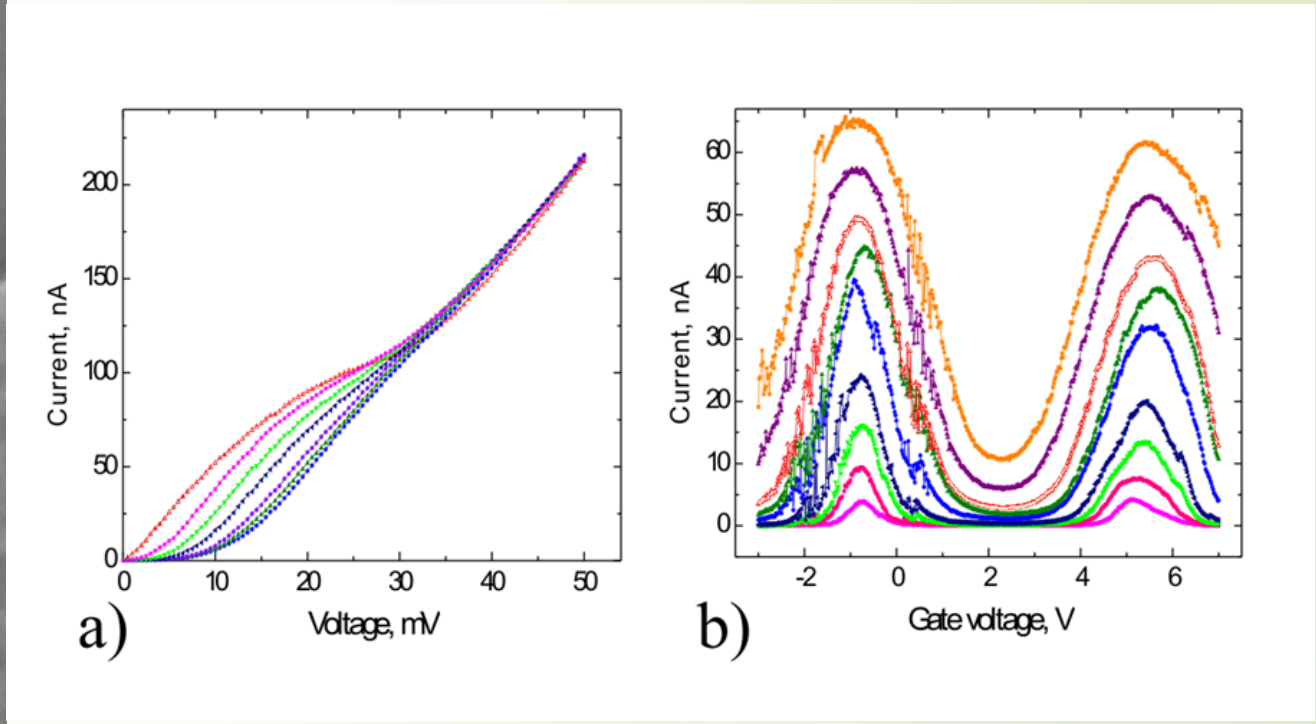




В. А. Крупенин, С. В. Лотхов, Д Е. Преснов. JETP, 111, 344 (1996)

Прототипы наноэлектронных транзисторов на основе кремния на изоляторе (2010 год)





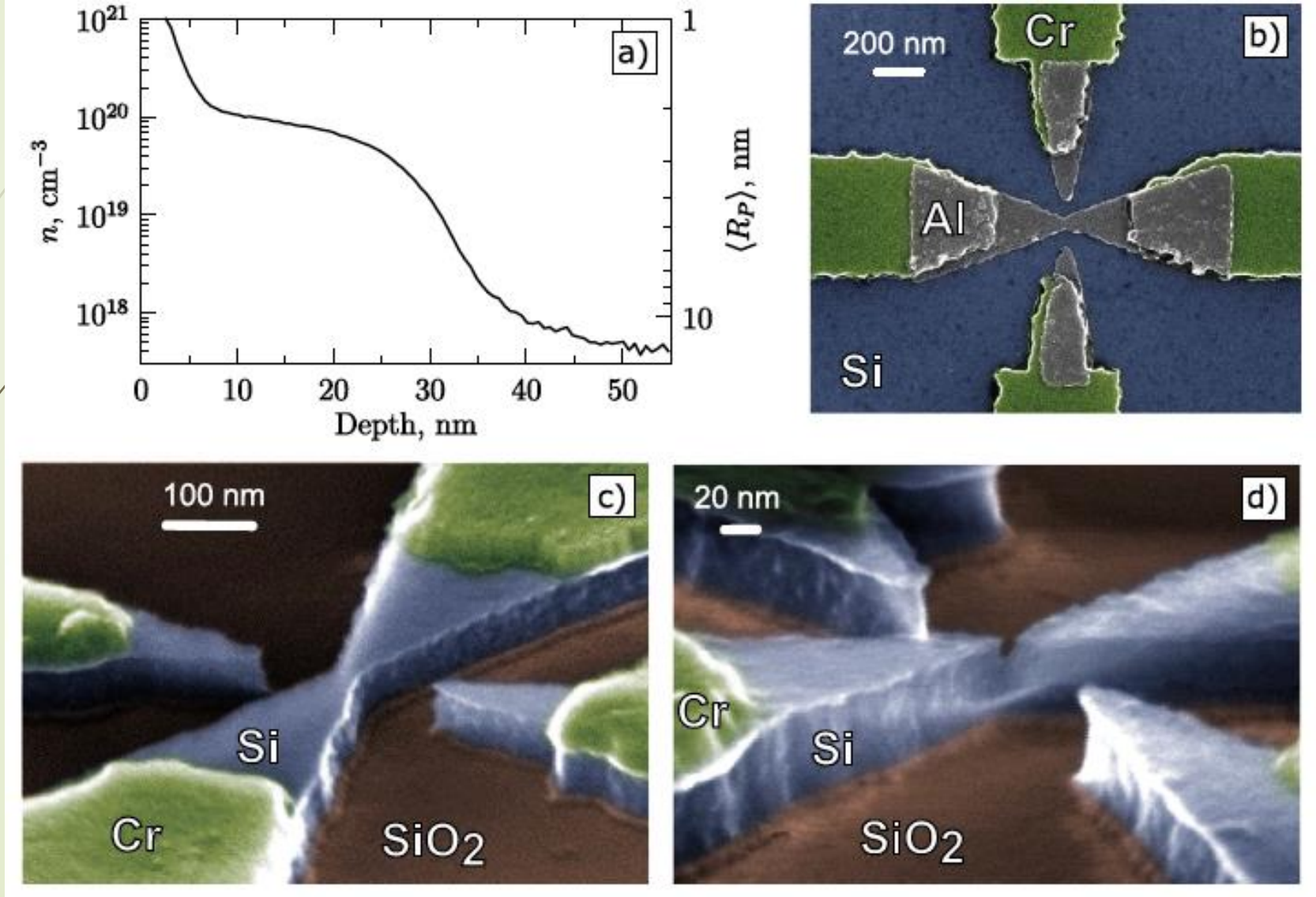
$T_{раб}$ = 4.2 К

Краткие промежуточные выводы

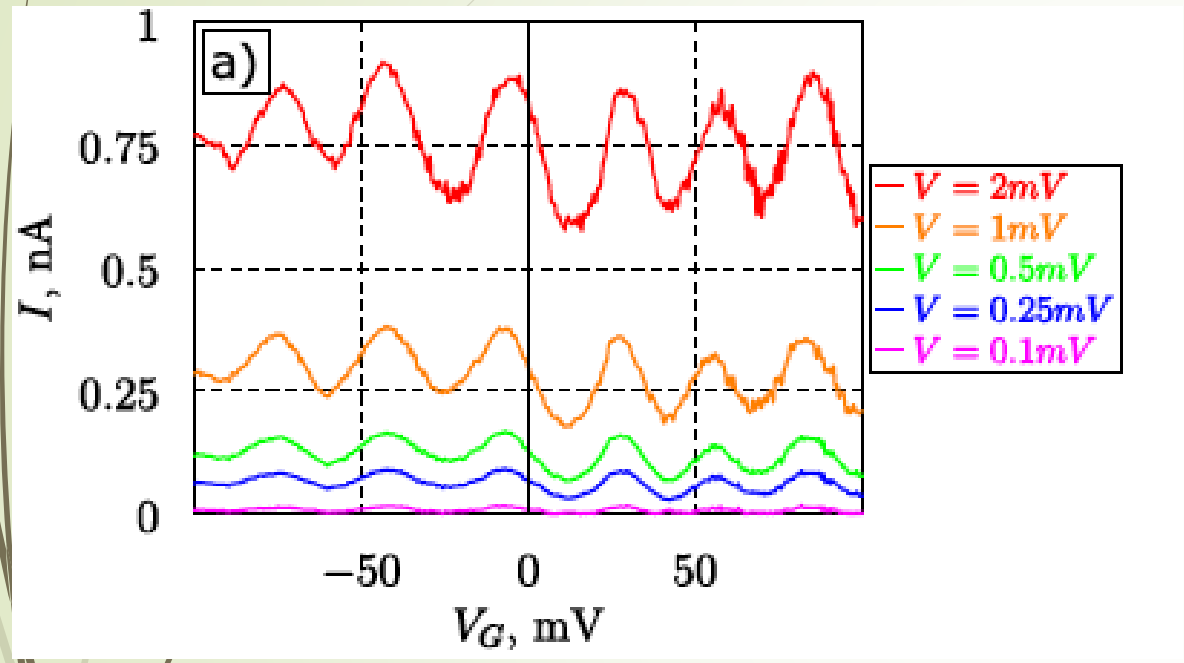
1) $\Delta I_{SD} \sim 50$ нА, $V \sim 10$ мВ, $\Delta t \sim 2.5 \times 10^{-10}\ c$ ($\Delta t_{int} \sim 5 \times 10^{-13}\ c$),
$W \sim 5 \times 10^{-10}$ Вт, $E \sim \mathbf{1.2 \times 10^{-19}}$ Дж

2) $\Delta I_{SD} \sim 50$ нА, $\Delta t \sim 2.5 \times 10^{-10}$ с,
$\mathbf{\Delta Q \sim 2.5 \times 10^{-17}}$ Кл $\sim \mathbf{10^{2}}\ \boldsymbol{e}!$

Можно ли сделать технологичный одноэлектронный транзистор с «островом» из одного атома?



Измерения



1) $\Delta I_{SD} \sim 1$ нА, $V \sim 2$ мВ,

2) $\Delta t \sim 2.5 \times 10^{-10}$ *с* ($\Delta t_{int} \sim 5 \times$

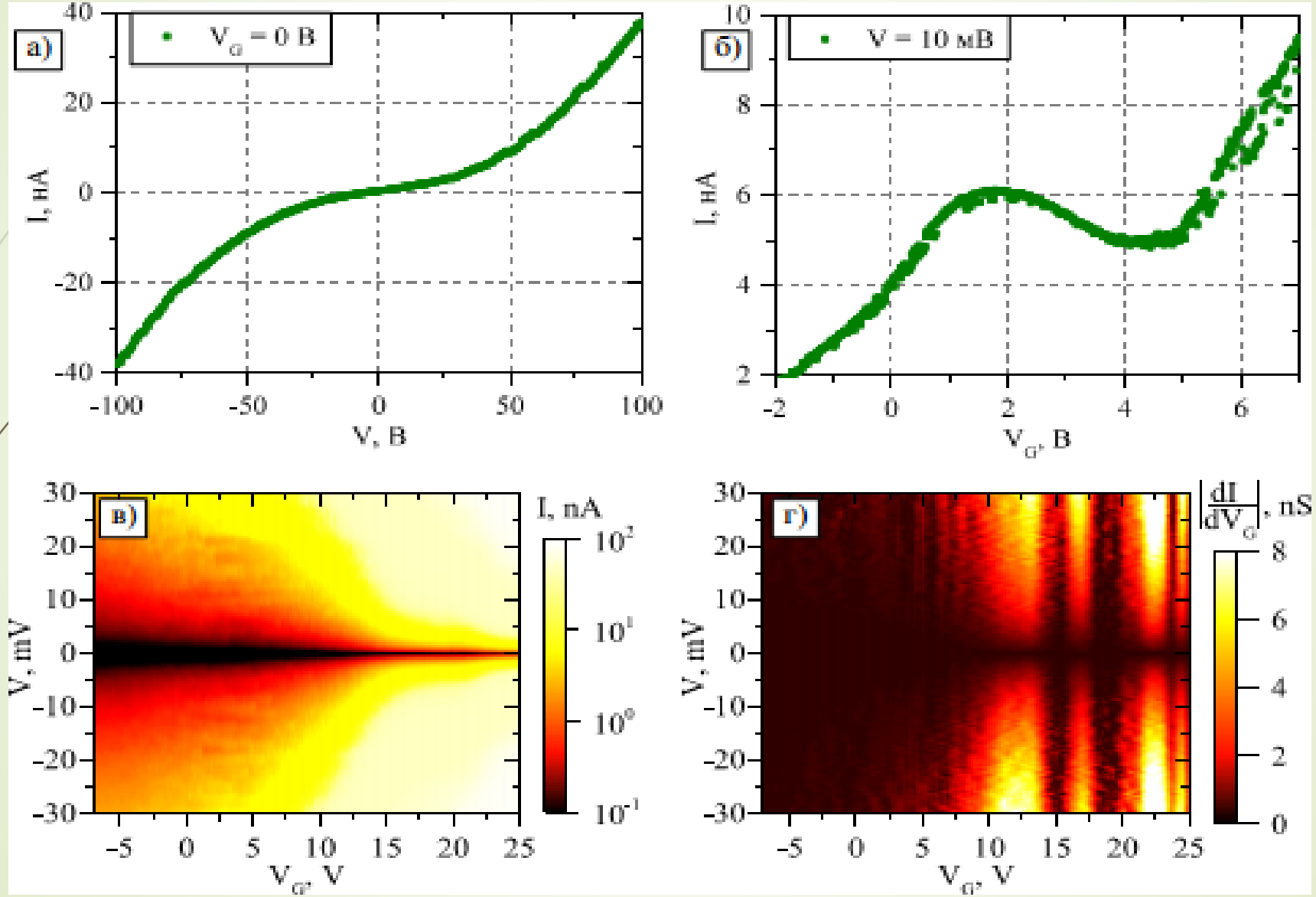
2) $\Delta I_{SD} \sim 50$ мкА,

$\Delta t \sim 2.5 \times 10^{-10}$ с,

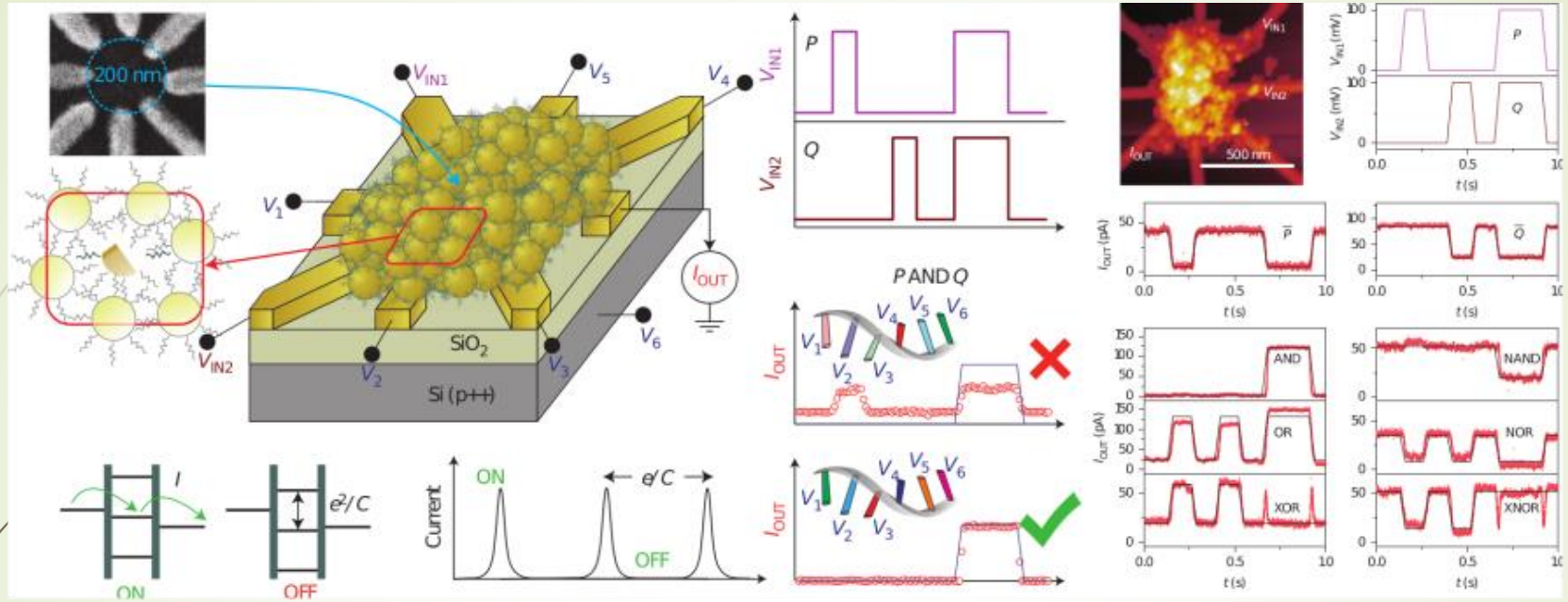
$\Delta Q \sim 2.5 \times 10^{-14}$ Кл $\sim 8 \times 10^4$ *e*,

T = 4.2 K

Триатомный транзистор при температуре 77 К

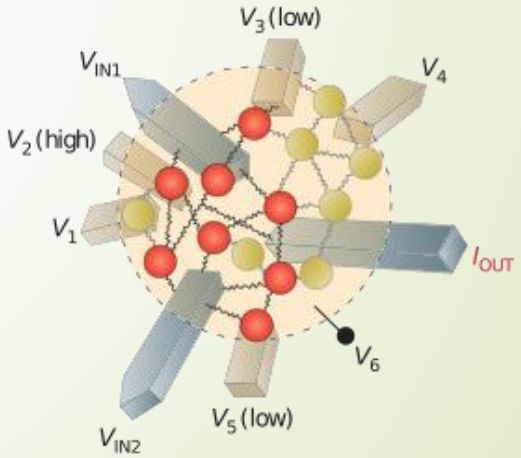


Одноэлектронный транзистор на системе неупорядоченных наночастиц



Система золотых наночастиц является совокупностью одноэлектронных транзисторов, которые в зависимости от состояний соседних частиц находятся либо в открытом, либо в закрытом состоянии.

На электроды V_{in1} и V_{in2} подается изменяемый во времени сигнал, на $V_1 - V_5$ статические потенциалы. С одного из электродов измеряется I_{out} — выходной ток-сигнал.

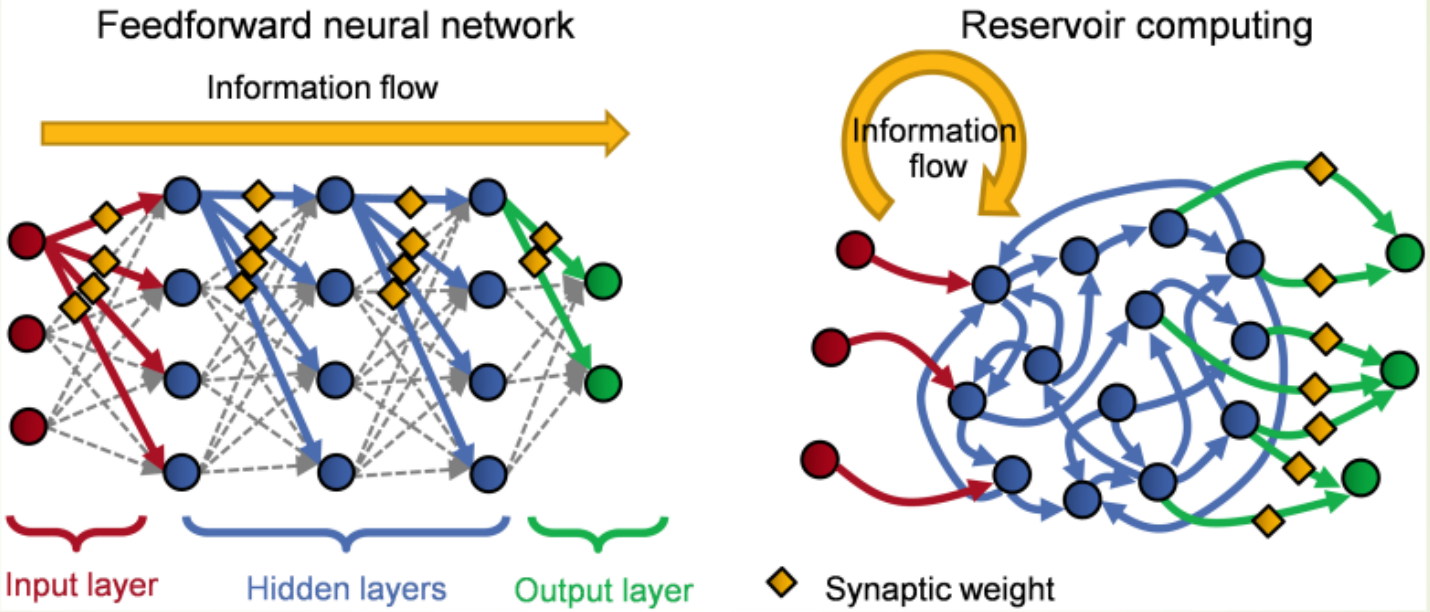


[1] S. K. Bose, C. P. Lawrence, Z. Liu et al, Evolution of a designless nanoparticle network into reconfigurable Boolean logic, Nature Nanotechnology, 2015, 207.

[2] J. Han, Naturally random, Nature Nanotechnology, 2015, 10, 1011–1012.

Cryo Lab

Резервуарные нейронные сети



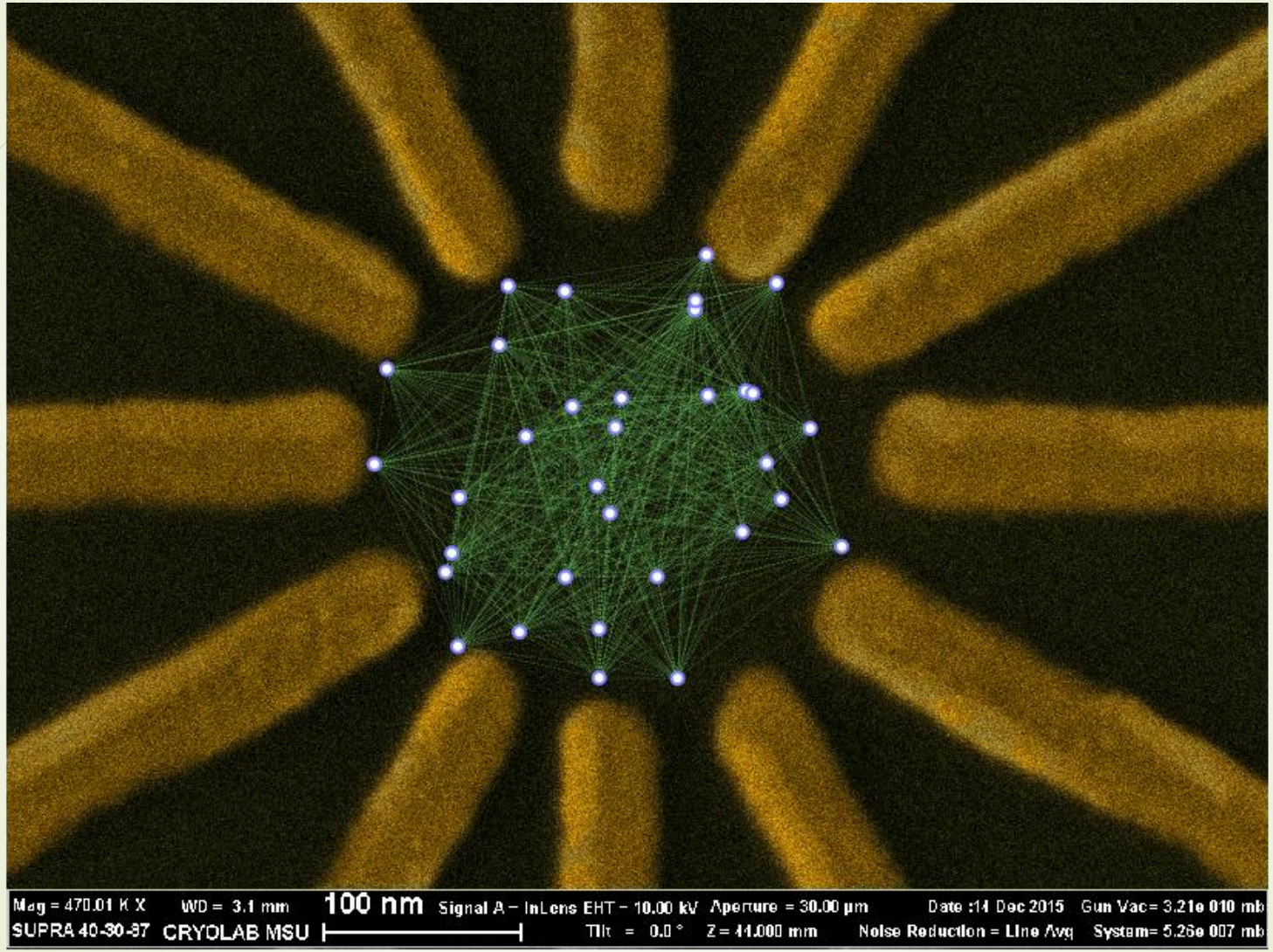
Требования к резервуарным вычисления:

- Входные сигналы должны преобразовываться существенно нелинейным образом.
- Резервуар должен обладать затухающей памятью, чтобы перемешивать сигналы, полученные в разные моменты времени.
- Пространство состояний резервуарной сети должно содержать множество неустойчивых точек (бифуркационных точек).

Одноэлектронная сеть на примесных атомах — идеальные кандидат для построения резервуарной сети.

[1] S. Abel, J. Fompeyrine, Neuromorphic devices & systems, IBM Research.
[2] F.-Q.Xie, M.N.Kavalenka, M.Röger et al, Distributed recurrent neural forward models with synaptic adaptation and CPG-based control for complex behaviors of walking robots, Front. Neurorobot., 2015, 9 (10), 530–538.

Резервуарная вычислительная сеть на примесных атомах



Наличие дискретного энергетического спектра электронов и правил отбора при туннелировании приводит к возникновению множества устойчивых состояний в многопараметрическом пространстве, N_{states} 10^{100}.

Диаметр круга
$D \sim 200nm$

Ширина электродов
$W \sim 50nm$

Расстояние между электродами
$L \sim 15 \div 25nm$

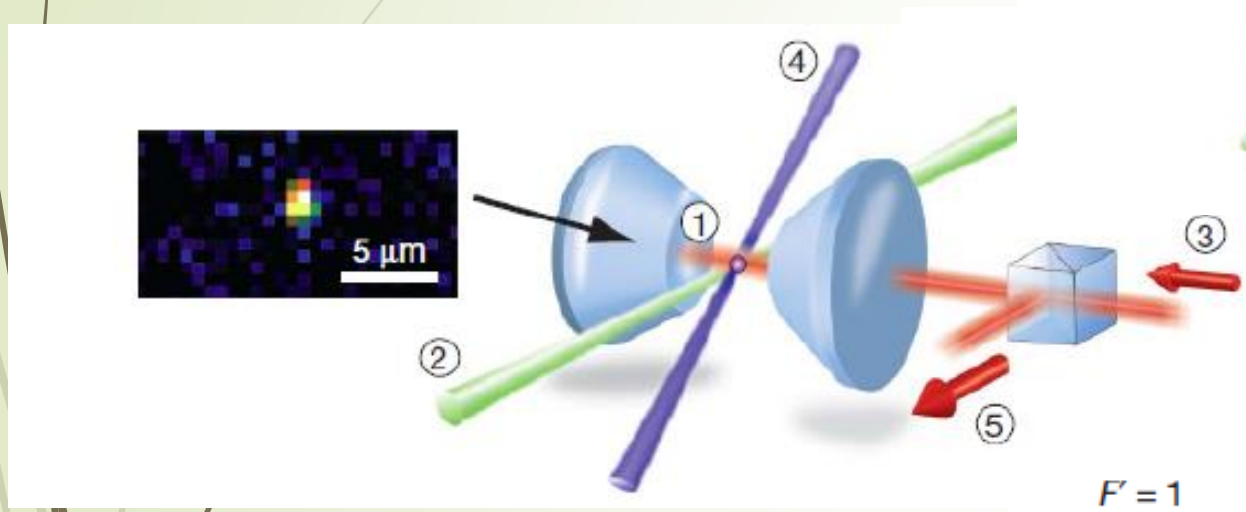
Неглубоких примесных атомов
$N_{sh} \sim 500$

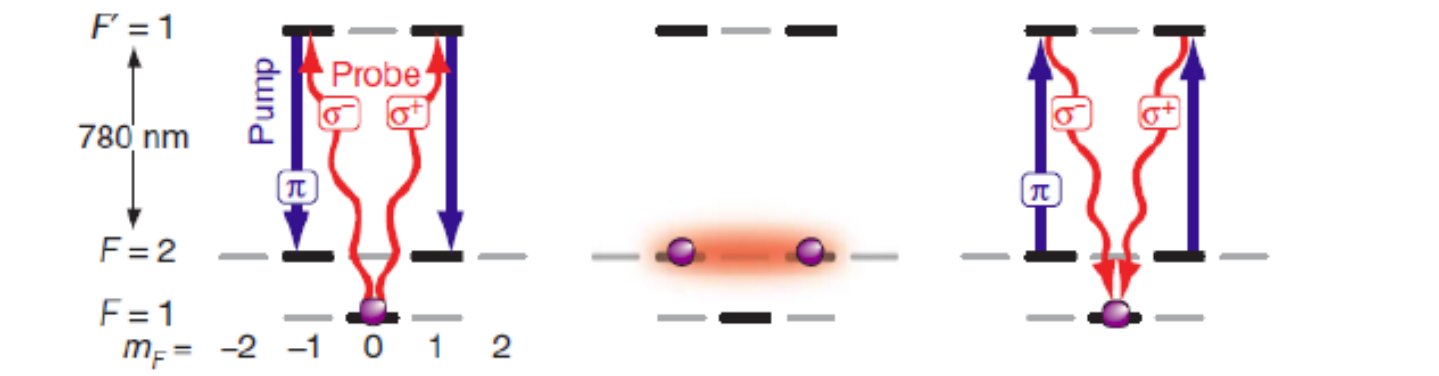
Глубоких примесных атомов
$N_{deep} \sim 3000$

4) Квантовые вычисления?

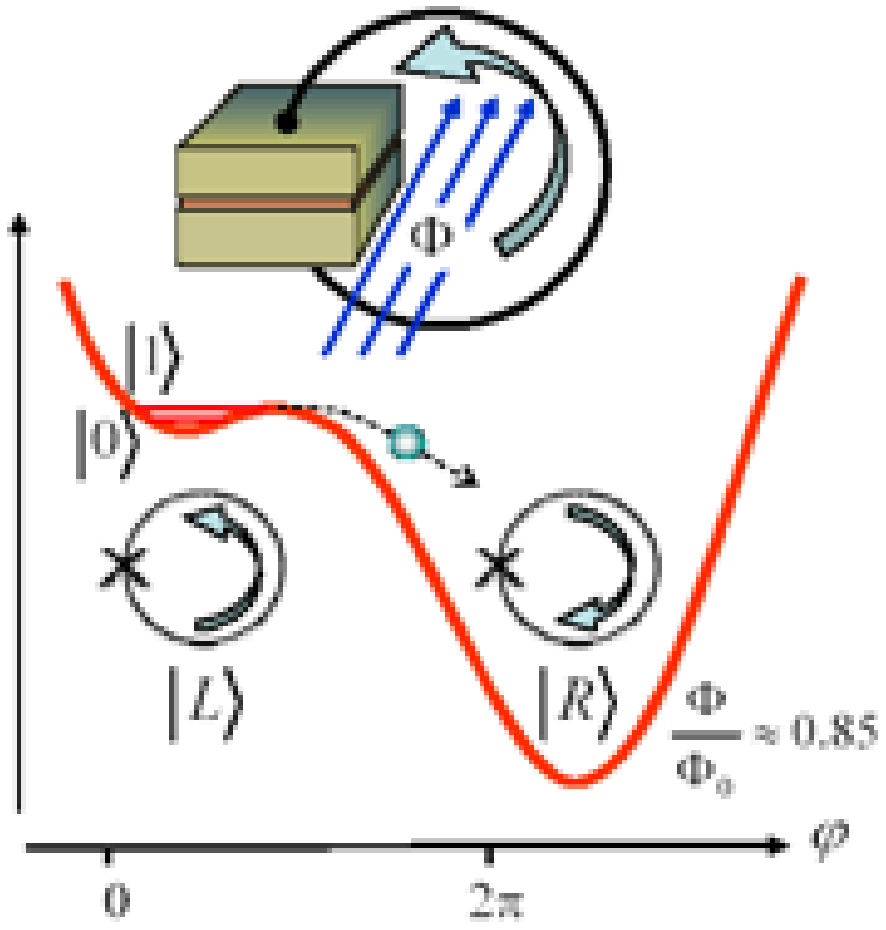
Начало положили два основных открытия, за которые их авторы удостоились Нобелевской премии. В 1918 году **Макс Планк** открыл *квант*, а **Альберт Эйнштейн** в 1921 году *фотон*. Идея создания квантового компьютера зародилась в 1980 году, когда было доказана истинность квантовой теории. А идеи начали воплощаться в практику только в 1998 году. Массовые, и при этом достаточно результативные работы, проводятся только в последние 10 лет.

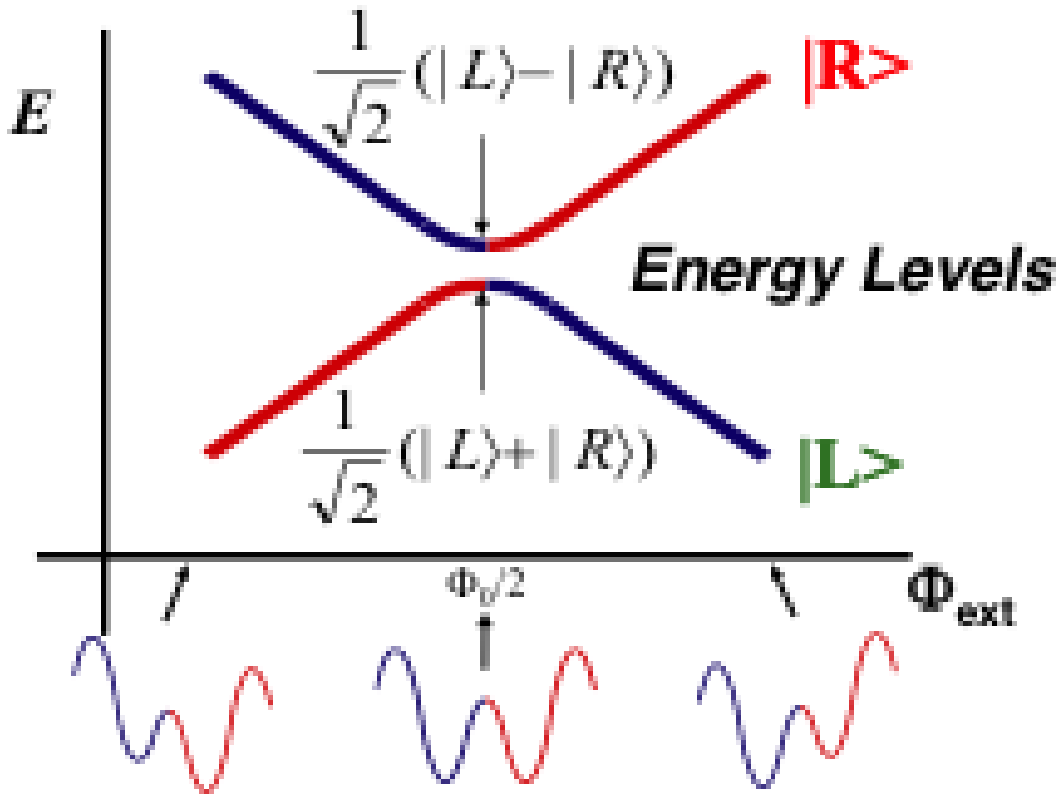
Манипуляции с атомными системами. Квантовая память на основе атома в резонаторе



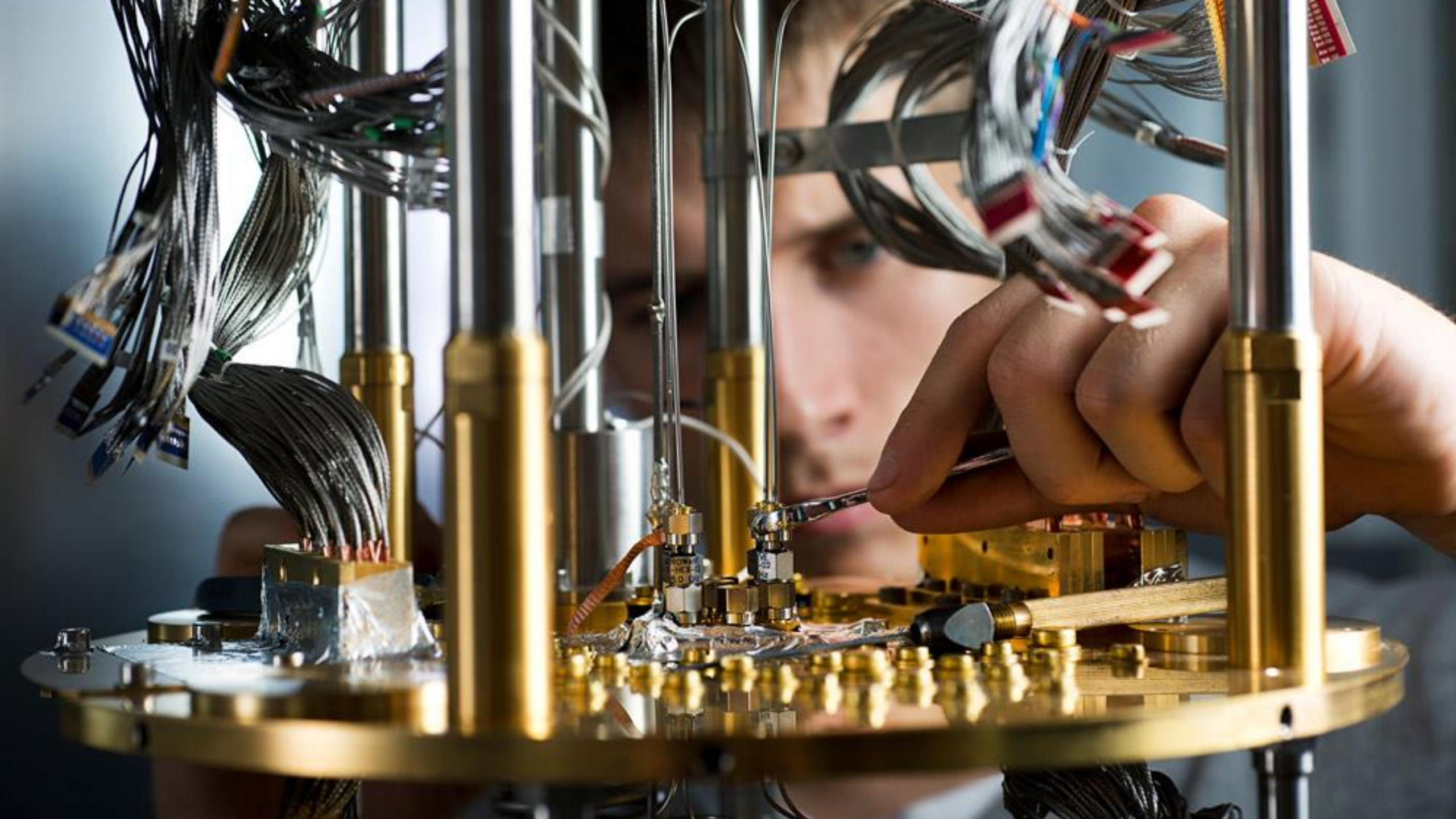


Квантовые биты - кубиты

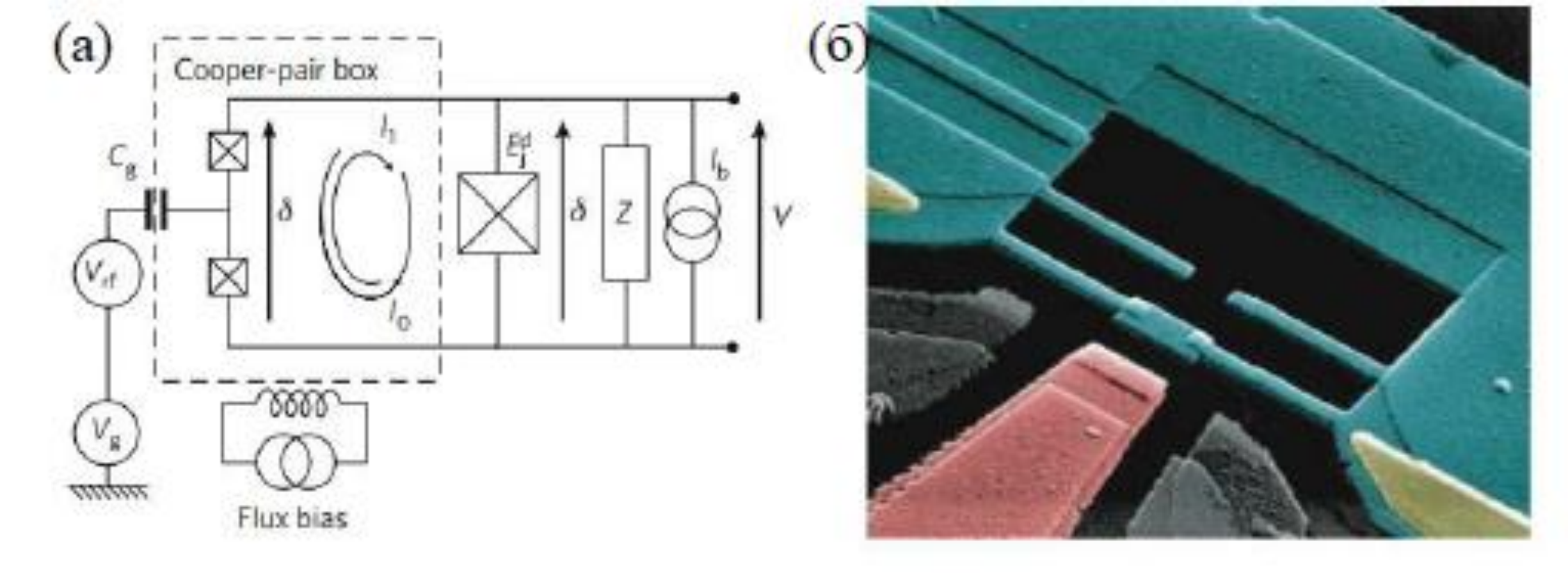




$$\varphi = 2\pi\Phi/\Phi_0$$



Квантрониум кубит

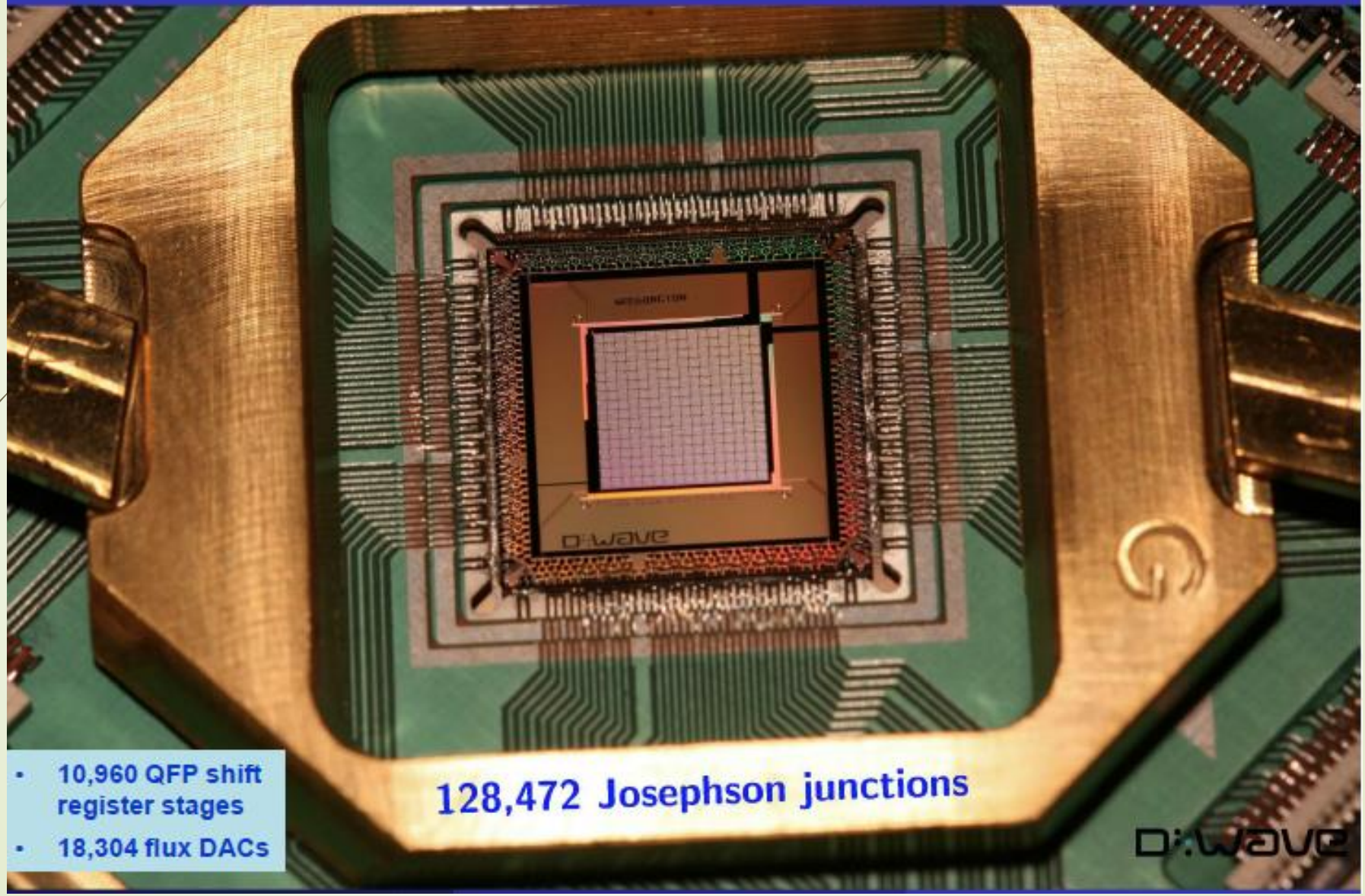


D-WAVE квантовый компьютер

A Unique Processor Environment

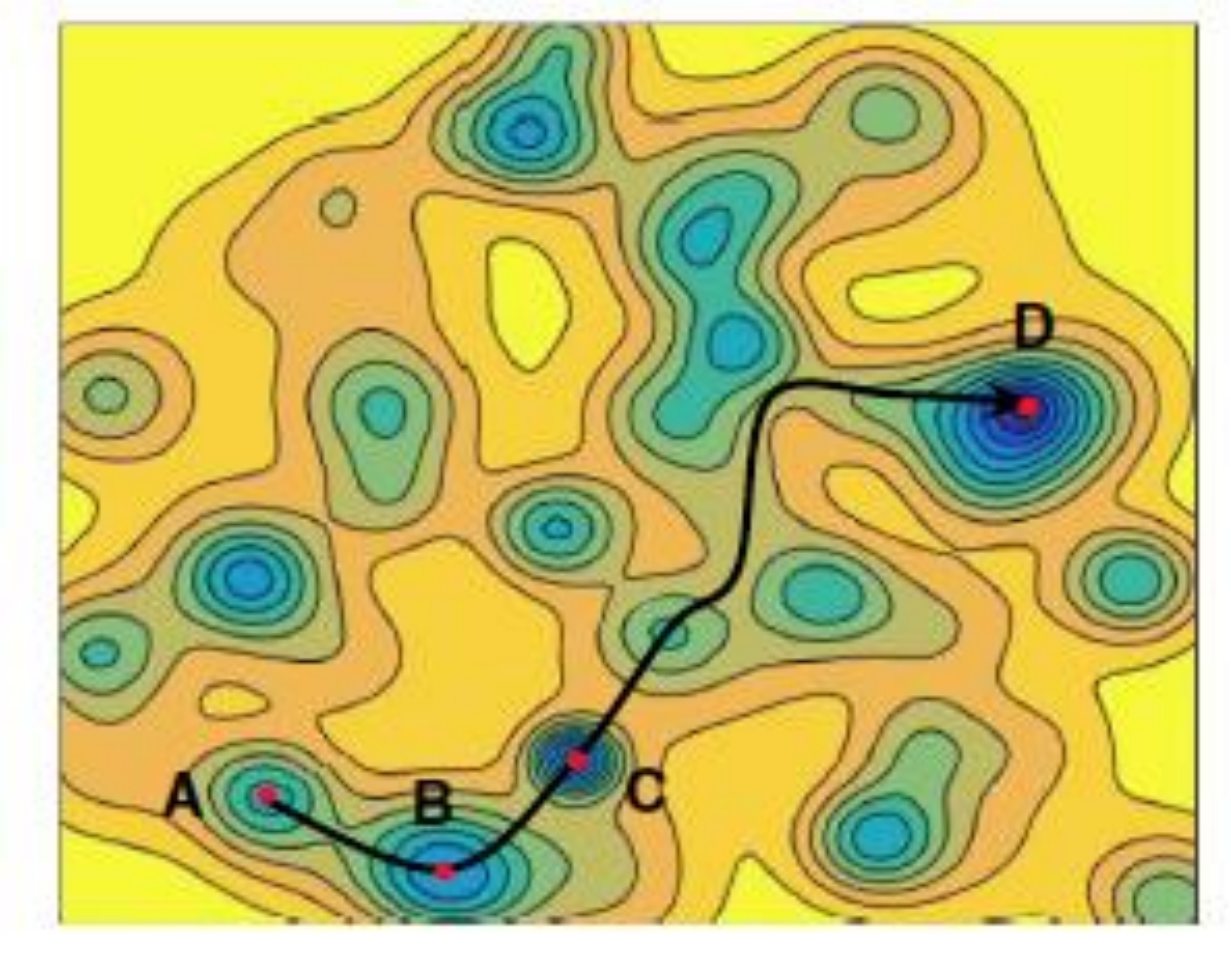
- Shielded to 50,000× less than Earth's magnetic field
- In a high vacuum: pressure is 10 billion times lower than atmospheric pressure
- 200 I/O and control lines from room temperature to the chip
- The system consumes less than 25 kW of power
- Power demand won't increase with successive processor generations

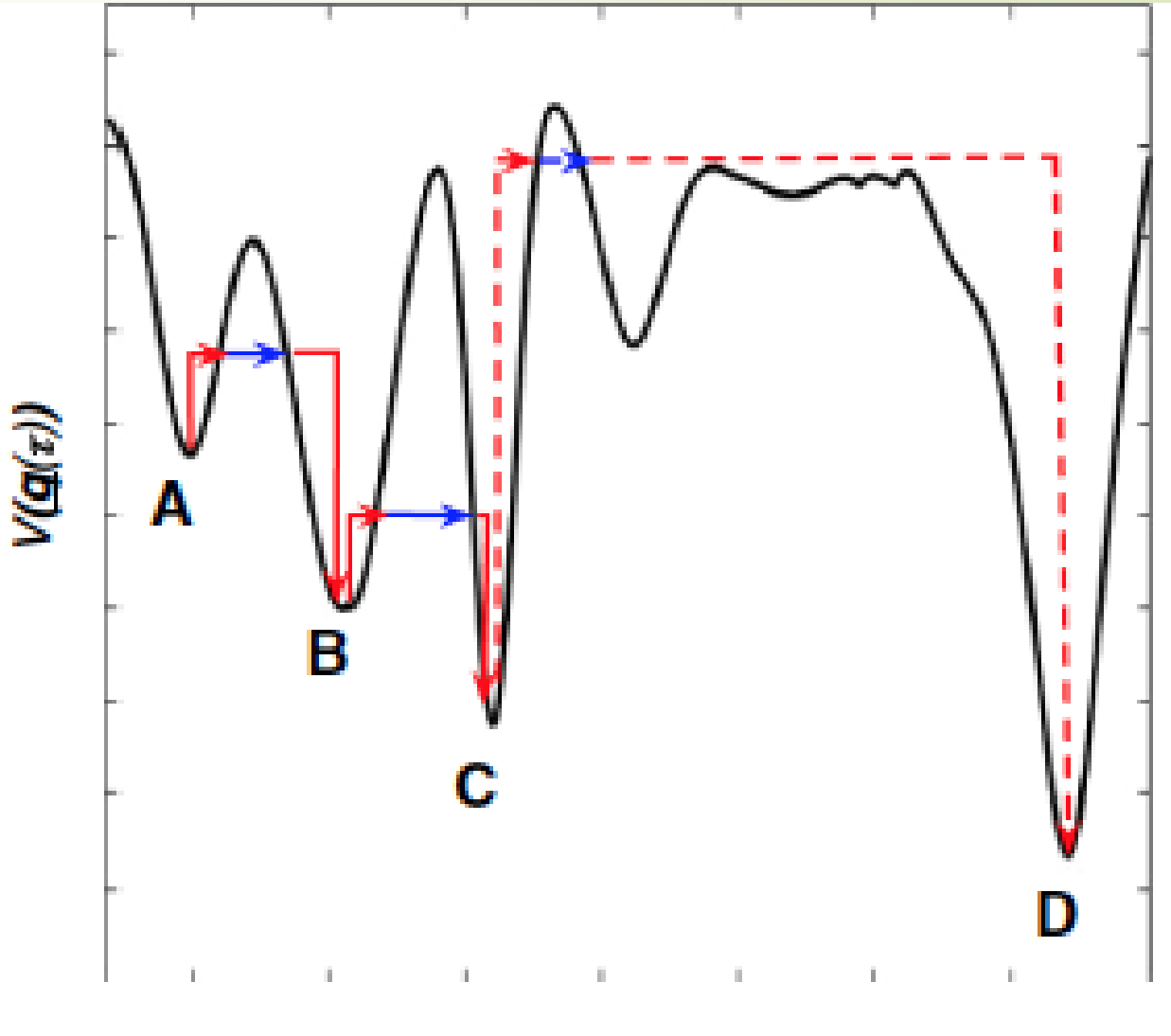
1000Q Quantum Annealing Processor



- 10,960 QFP shift register stages
- 18,304 flux DACs

ПРИНЦИП РАБОТЫ КВАНТОВОГО СИМУЛЯТОРА





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Благодарю своих коллег Владимира Крупенина, Евгения Солдатова, Владислава Шорохова, Николая Кленова, Артема Трифонова, Дениса Преснова, Саркиса Дагесяна, Ивана Сапкова, Олега Муханова за предоставление материалов и обсуждение содержания лекции, моих аспирантов Дмитрия Хрыкина и Александра Ржевского за оформление презентации.