

**Принципиально новые виды
электроники, использующие квантовые
принципы**

**Валерий Владимирович
Рязанов**

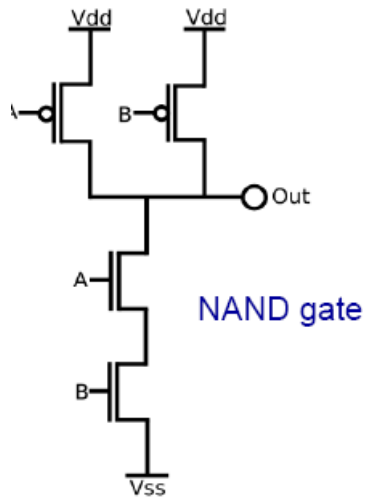
проф., д.ф.-м.н.

**Зав. Лабораторией
сверхпроводниковой
наноэлектроники МФТИ**

**Руководитель Образовательной программы ЛФИ
«Квантовые наноструктуры, материала и устройства»**

Современная полупроводниковая электроника и закон Мура

CMOS LOGIC

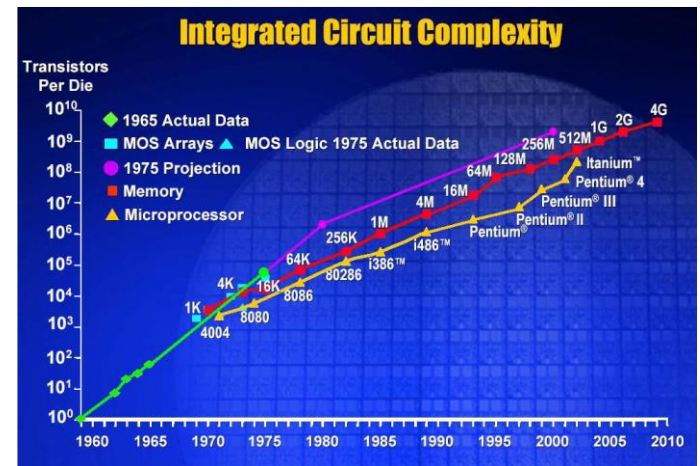
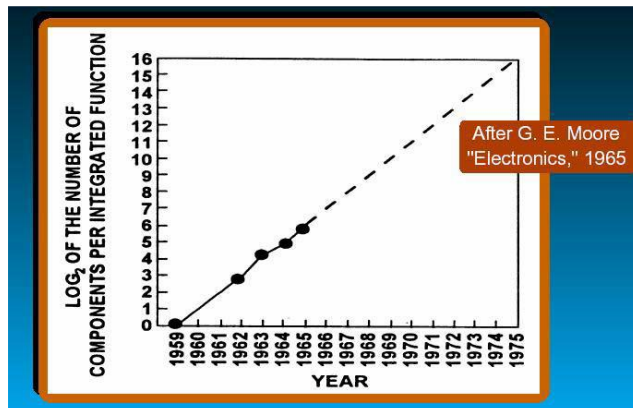


Полевые транзисторы с каналами разной проводимости

>0.01 мкм

CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) логика основана на классических принципах. Дальнейшая интеграция затруднительна: реальное число «работающих» электронов в полупроводниковой наноструктуре резко уменьшается, резко возрастает тепловыделение, начинают проявляться **квантовые эффекты**.

Полупроводниковая электроника идет по пути развития параллельных вычислений, разработки многоядерных архитектур.



Закон Гордона Мура: Интеграция (плотность размещения) элементов в вычислительных устройствах **удваивается каждые два года**.

Проблемы полупроводниковой электроники

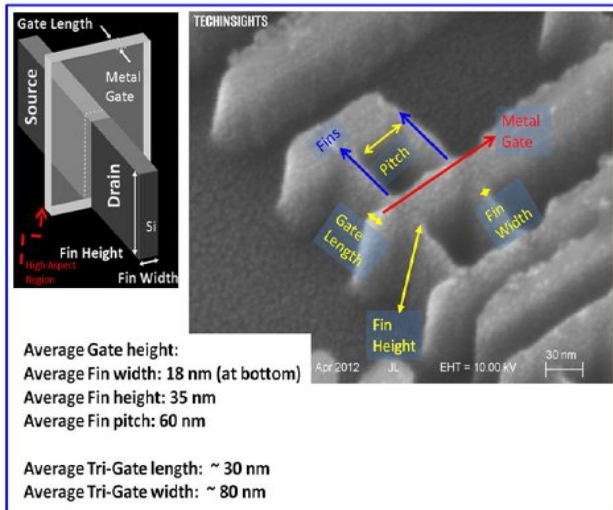
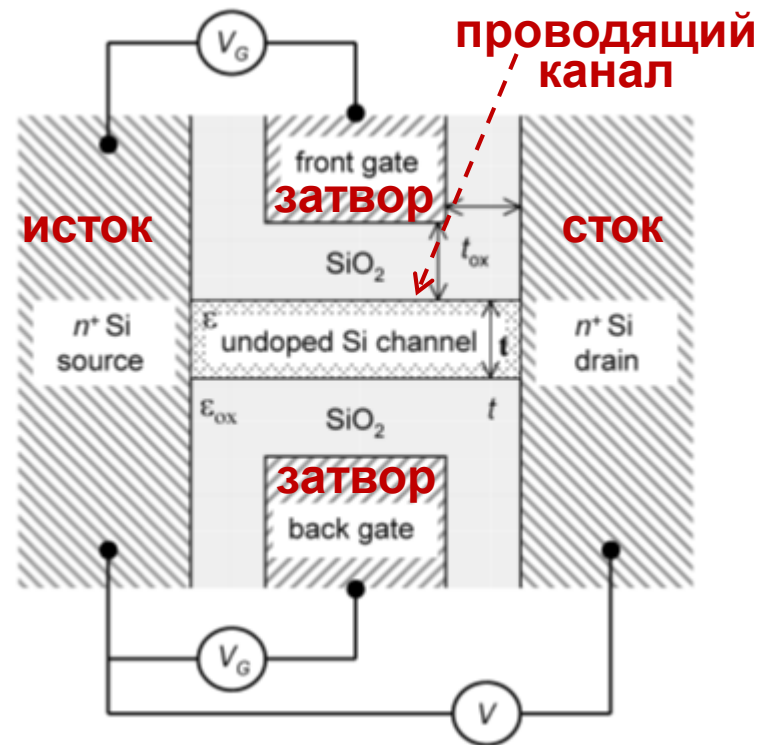
Размеры, интеграция

Размеры: Показано, что предельный размер **MOSFET** транзистора **~ 0.01 мкм**. Одна из причин: **невозможность точного контроля поперечного квантования в канале** с учетом неоднородности его ширины.

+ существенное удорожание технологий!

Использование графена и CNTs для уменьшения размеров каналов?

CMOS элементы базируются на MOSFET транзисторах

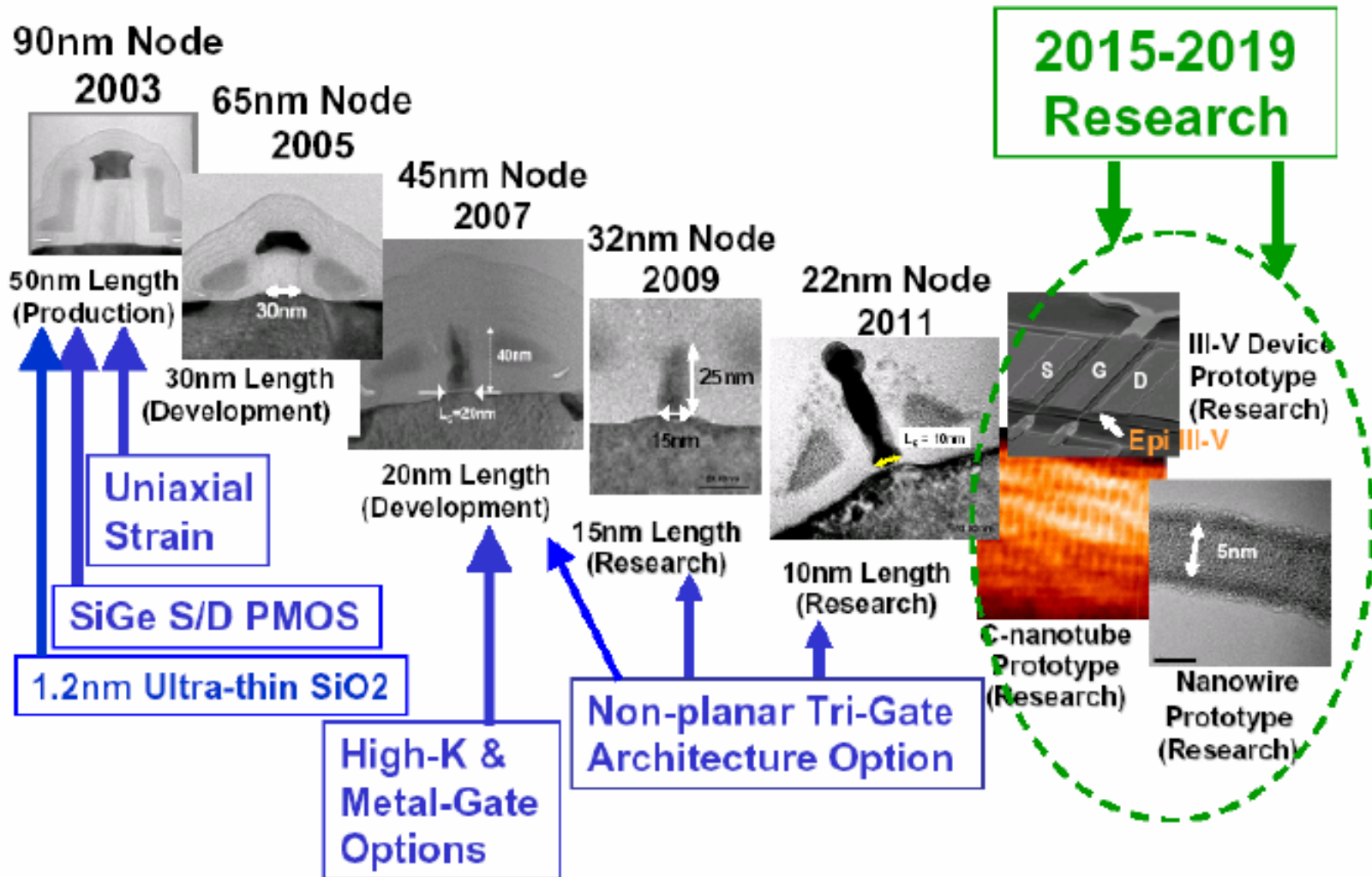


Транзистор Intel 22nm

Есть «техпроцессы» на 14 и 7 нм, но реальные размеры MOS-транзисторов близки к 20 нм

NO SIMPLE SCALING ANY LONGER

Transistor Scaling and Research Roadmap



Проблемы полупроводниковой электроники

Электропотребление и тепловыделение

$P_0 = C_0 V^2 f_c$ - выделяемая мощность на транзисторе

C_0 определяется возрастающей **емкостью** подводов;

Напряжение V увеличивается с уменьшением размеров.

f_c - **тактовая частота** (скорость переключений) возрастает

Supercomputers: K-Computer (Japan)

Max $f_c \sim 10-20$ ГГц



**1-ГГц-вый микропроцессор выделяет
~ 50 Вт на см² чипа.**

**5 самых мощных суперкомпьютера
потребляют по 20-30 мегаватт
электроэнергии**

**Суммарная потребляемая мощность 500
самых больших суперкомпьютеров
составляет ~ 0.5 ГВт !**

supercomputer: K-computer (Japan):
10.51 petaflop/s, 12.7 MW

мощность 1 блока АЭС ~ 1.5 ГВт !



Дата-центры

Data Centers: Facebook Data Center

Luleå, Sweden



Размещен в Швеции за полярным кругом !

Потребляемая мощность ~ 0.12 ГВт

Размещен около гидроэлектростанции, производящей 9% шведской электрогенерации (~4.23 ГВт)

- 2014 completion target
- Cost: ~760 M\$
- Nearby Lule River generates 9% of Sweden's electricity (~4.23 GW)
- Average annual temperature: 1.3 °C

	Specification
Performance*	27-51 PFLOP/s
Memory*	21-27 PB RAM 1900-6800 PB disk
Power	64 MW avg* (120 T)
Space	290,000 m ² (27,000 T)
Cooling*	~1.07 PUE

* Estimated

Хранение облачных данных и т.д.

Data Centers:

- Cloud computing
- Banking
- Shopping
- Social Networks
- Search Engines....

Lulea data center:
120MW
(max power)

Предельная и реальная энергии на одно переключение, т.е. на один бит (0→1)

Минимальная энергия на бит:

Shannon-Neuman-Landauer minimum energy:

$$E_{\text{BITMIN}} = k_B T \ln 2 \sim 4 \times 10^{-21} \text{ Дж} \quad (T = 300 \text{ К})$$

В практических CMOS: $10^5 - 10^6 E_{\text{BITMIN}}$

или (1-10 мкВт на транзистор при $f_c \sim 3 \text{ ГГц}$)

Современный CMOS процессор $\sim 10^8$ транзисторов,
работающих с тактовой частотой $\sim 3 \text{ ГГц}$: 0.1-1 kW

Intel Core i7 Processor (Nehalem),
263 mm², 731 миллионов транзисторов

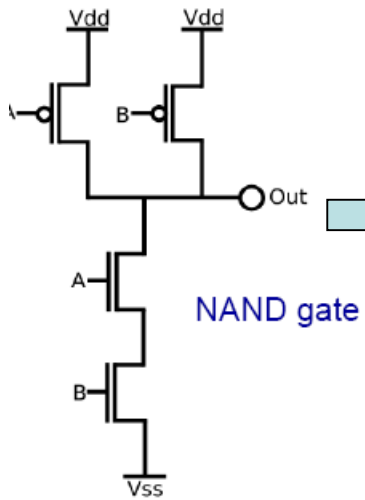
Современный data centers: $\sim 10-100 \text{ MW}$

Supercomputer:

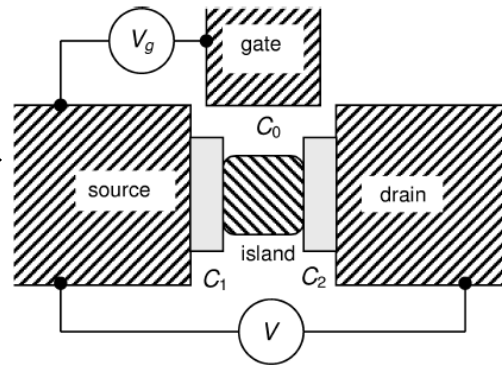
K-Computer (Japan), 12.7 MW

Что придет на смену полупроводниковой электронике?

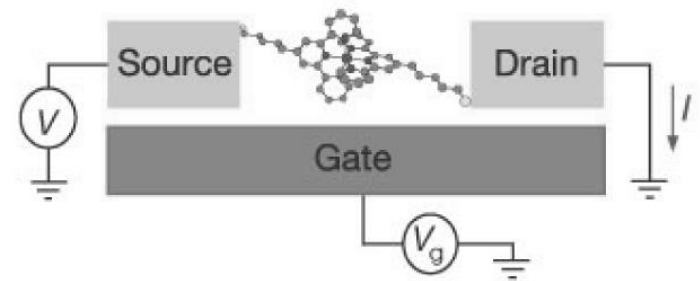
CMOS LOGIC



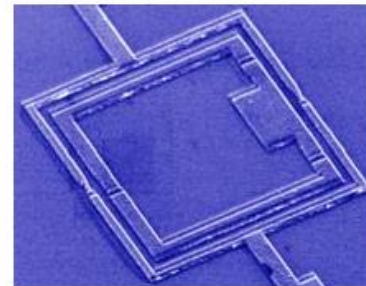
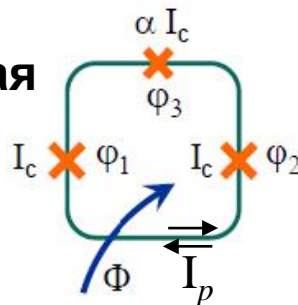
SET
одноэлектронный транзистор



Молекулярная электроника



Сверхпроводниковая электроника



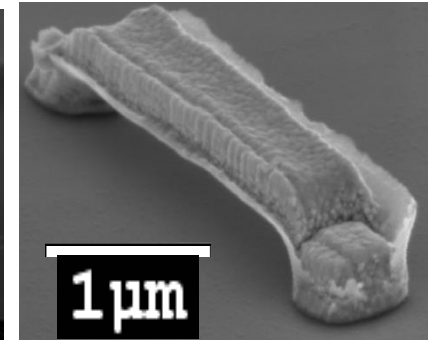
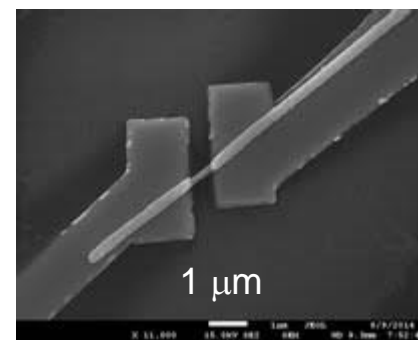
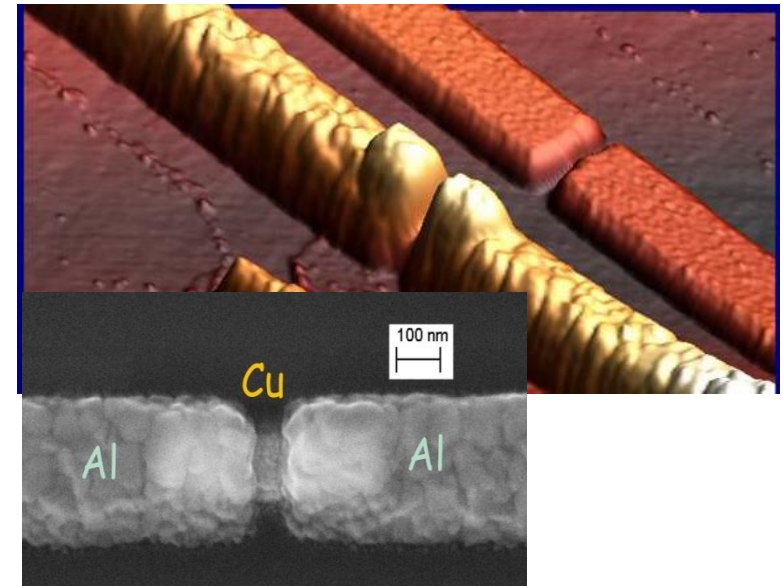
... ???

Принципиально новые виды электроники, использующие квантовые принципы

В основу *новой электроники*, которая должна прийти на смену существующей полупроводниковой электронике, должны быть положены новые квантовые принципы и эффекты, проявляемые *металлическими, сверхпроводниковыми, органическими, магнитными и другими субмикронными структурами*

- Полупроводниковые нано-гетероструктуры
- Сверхпроводниковая криоэлектроника
- Оптоэлектроника и нанофотоника
- Одноэлектроника
- Низкоразмерные углеродные структуры (*графен, трубки, фуллерены*), *Топологические изоляторы*
- Спинтроника
- Элементы для квантовых вычислений и телекоммуникаций

Нанотехнология



- Различные методы осаждения тонких слоев
- Фотолитография
- Электронная литография

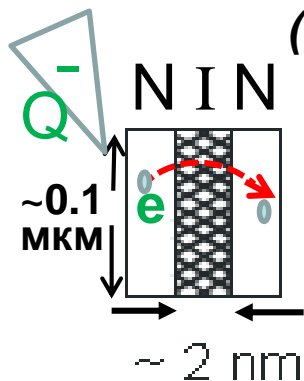
- Фокусированный ионный источник
- Химическое наноструктурирование
- Плазмохимическое травление

ОДНОЭЛЕКТРОНИКА

Single-electron transistor

Кулоновская блокада в субмикронном туннельном переходе

Гейт
наводит
заряд



Субмикронный туннельный переход метал-диэлектрик-метал (NIN) с достаточно малой емкостью $C \sim S \rightarrow 0$ имеет высокую (одноэлектронную) кулоновскую энергию: $E_c = e^2/(2C)$.

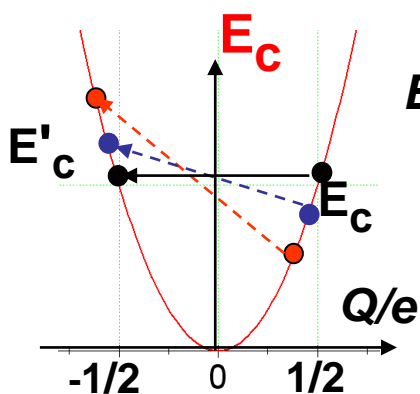
Через наведенный заряд Q энергия такого конденсатора:

$$E_c = Q^2/(2C)$$

Разряд такого конденсатора не выгоден для $0 < Q < |e|/2$:

Энергия после тунnelирования одного электрона

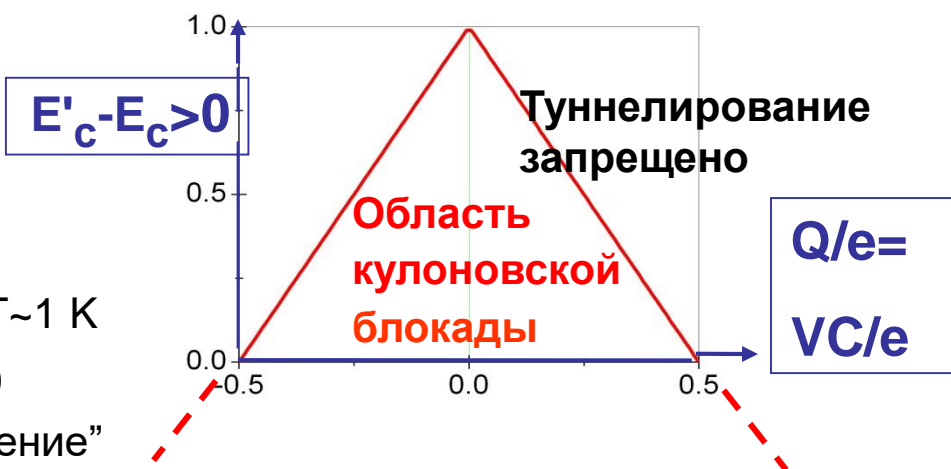
$E'_c = (Q - |e|)^2/(2C)$ становится больше для $0 < Q < |e|/2$!



Возникает “кулоновская блокада” тунnelирования для V :

$$0 < V < |e|/(2C)$$

$$(V = Q/C)$$



Ограничения на T и R :

$E_c > kT$ (тепловые флуктуации), $C < 10^{-15}$ F, $T \sim 1$ K

$1/R_T + 1/R_e < 1/R_Q$ (квантовые флуктуации)

$R_Q = h/(4e^2) \sim 6$ k Ω - “квантовое сопротивление”

Одноэлектронный бокс на основе NIN перехода

нормальный металл-изолятор-нормальный металл

$$Q_0 = C_g V_g - \text{“внешний наведенный заряд”}$$

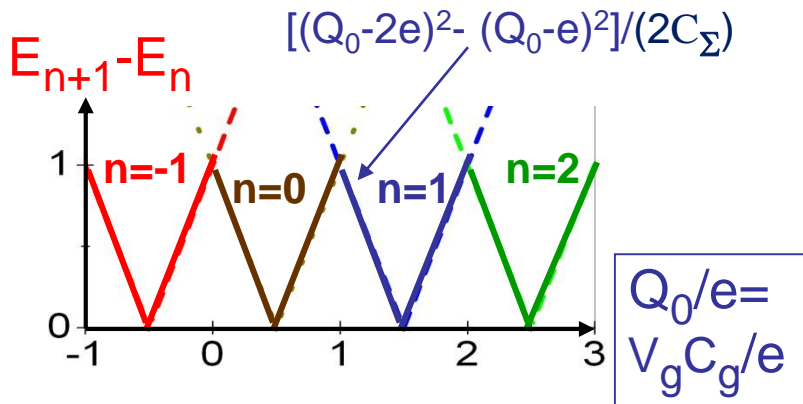
ne – заряд на островке (n электронов)

При $E_C = Q^2 / (2C) \gg k_B T$!!!

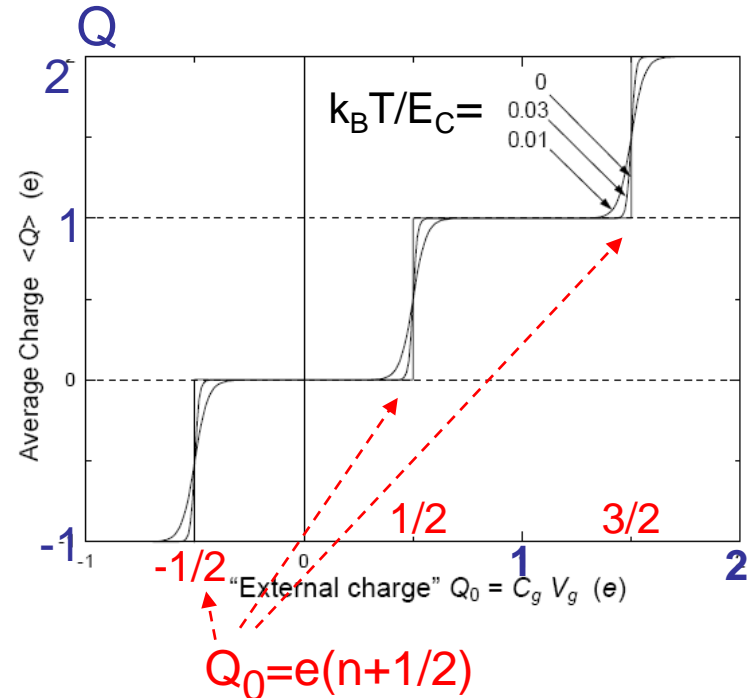
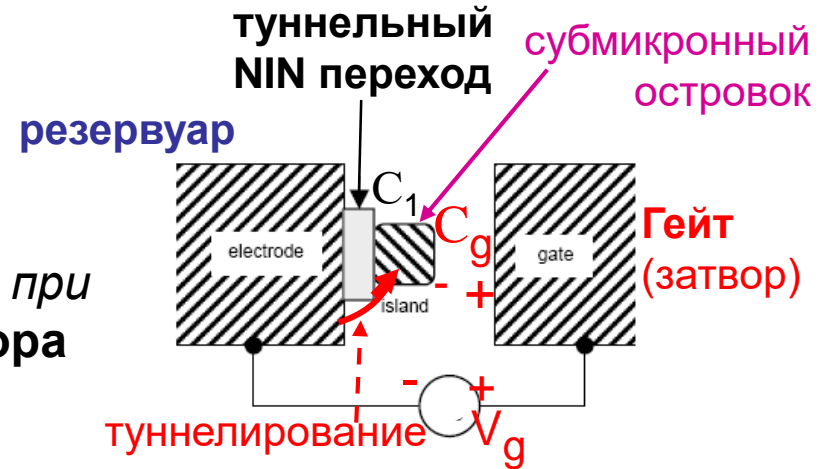
Поштучный перенос электронов при непрерывном изменении V_g затвора

энергия одноэлектронного бокса:

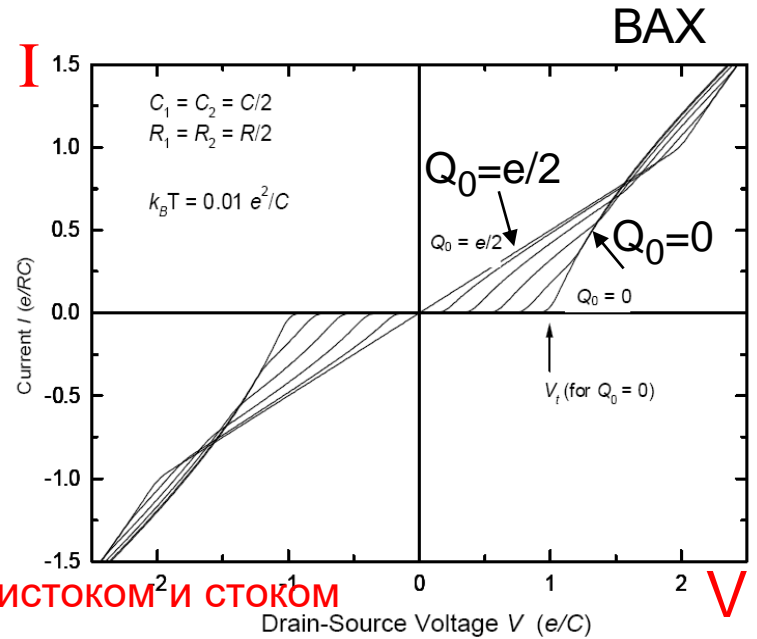
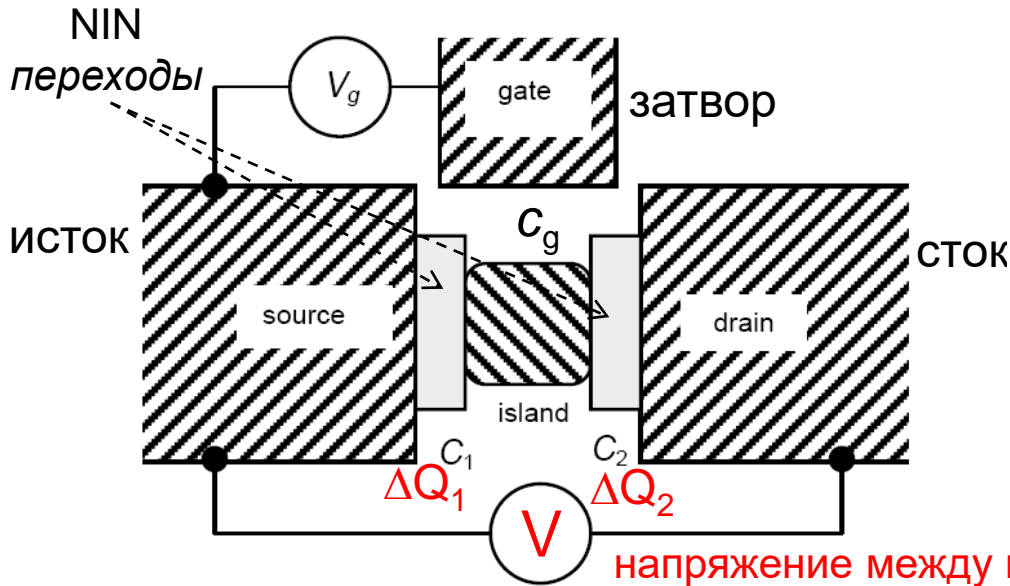
$$E_n = (C_g V_g - ne)^2 / (2C_\Sigma), \text{ где } C_\Sigma = C_g + C_1$$



n -число электронов на островке



Одноэлектронный транзистор Single-electron transistor (SET)



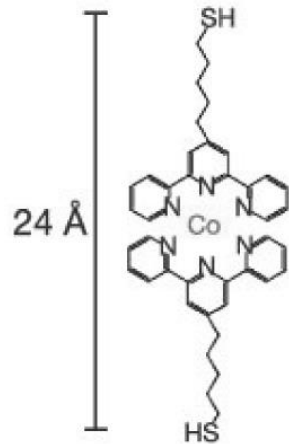
Энергия SET = энергия бокса - энергия источника напряжения V .

$$E = \underbrace{(C_g V_g - ne)^2 / (2C_\Sigma)}_{\text{энергия бокса}} - \underbrace{eV(C_1 \Delta n_1 + C_2 \Delta n_2) / C_\Sigma}_{\text{энергия источника}}$$

$(n = \Delta n_1 - \Delta n_2)$
 n -число
 электронов на
 острове

$C_\Sigma = C_g + C_1 + C_2$ — полная емкость островка

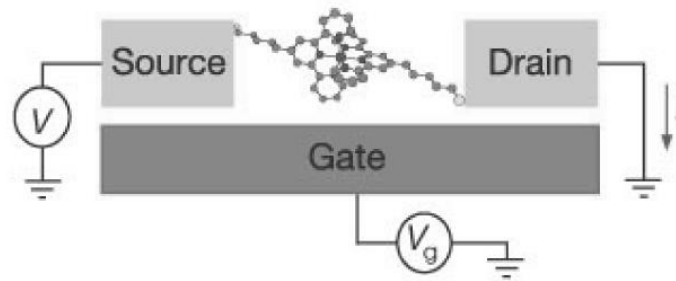
Молекулярный одноэлектронный транзистор



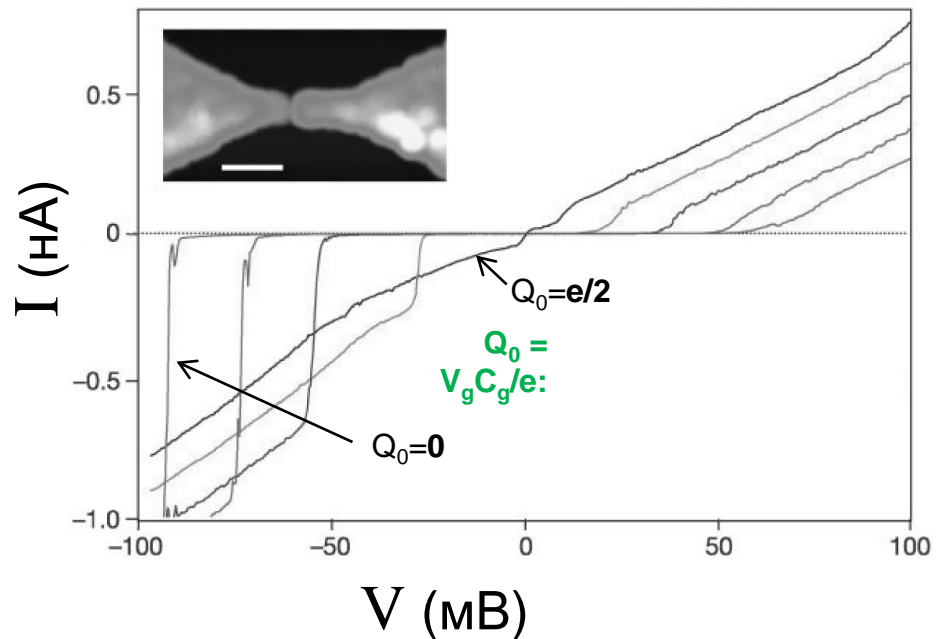
Органическая молекула закреплена между истоком и стоком

SET отклик при комнатной температуре, т.к. очень маленькая C

(a)



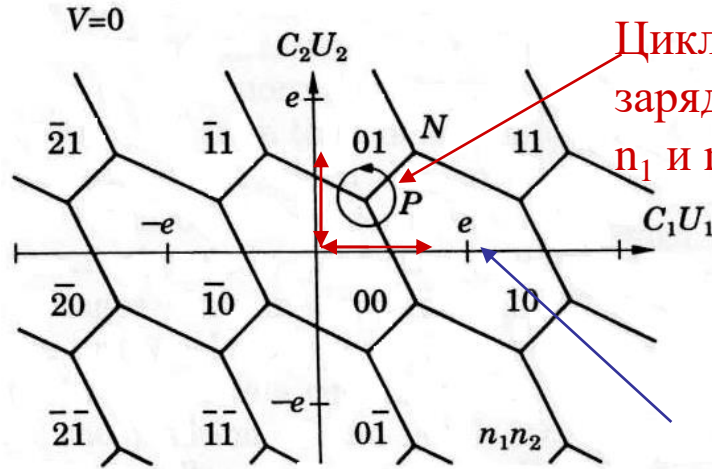
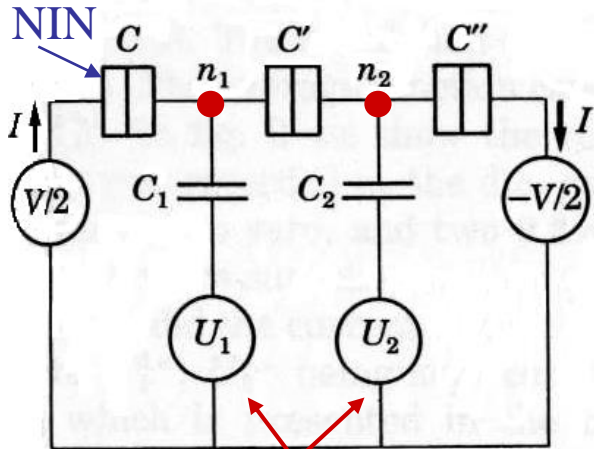
Работает при комнатной температуре за счет малой емкости



J. Park et al., Nature 417 (2002) 722-725.

Одноэлектронный “насос” – стандарт тока

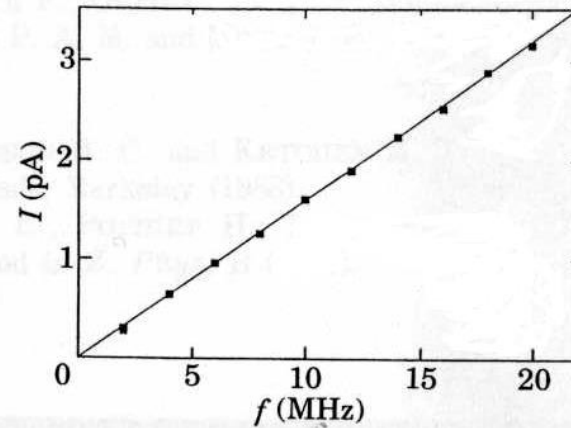
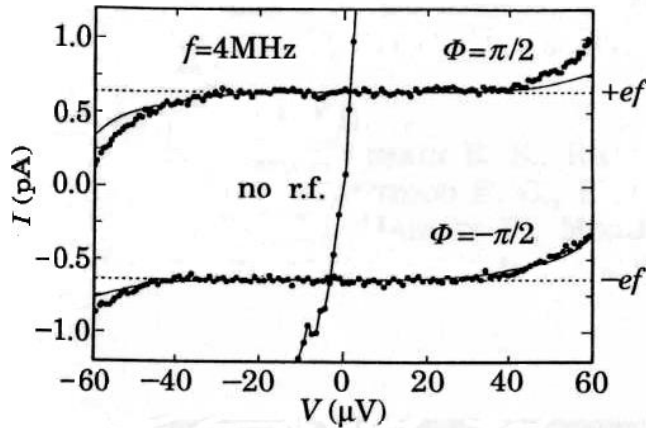
Pothier, Lafarge, Urbina, Esteve, Devoret (1992)



Циклическое изменение зарядовых состояний n_1 и n_2

$$I = ef$$

Сдвинутые по фазе два ВЧ напряжения U_1 и U_2



**СПИНТРОНИКА:
носителем информации
является НЕ заряд, а
магнитный момент (спин)
электрона**

Расщепление энергетических зон в ферромагнетике и зеемановское расщепление магнитным полем

Ферромагнетик с обменным полем

(обменной энергией) $h = E_{ex}$

или

нормальный металл во внешнем магнитном поле H (с энергией $h = \mu_B H$):

зеемановское расщепление магнитным полем H

Спиновая поляризация – наличие

нескомпенсированного суммарного спина

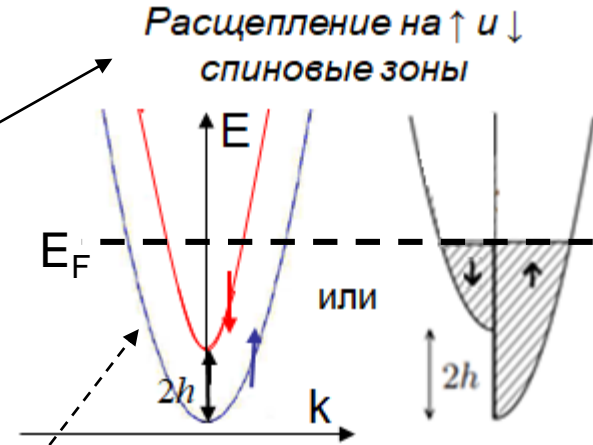
$$P = (N_{\downarrow} - N_{\uparrow}) / (N_{\downarrow} + N_{\uparrow}) * 100\%, \text{ где} \\ N_{\downarrow, \uparrow} - \text{число (плотность) электронов} \\ \text{с соответствующим спином}$$

(10.1)

преимущество спинов нижней зоны:

мажорити (majority) зона,
мажорити носители

Магнитные полуметаллы, когда
заполнена только одна спиновая зона
(вторая – выше уровня Ферми)

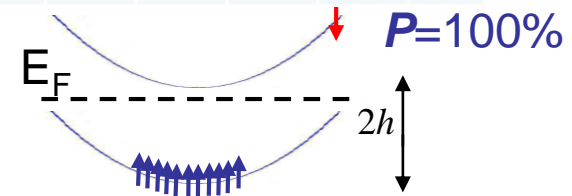


Расщепление на \uparrow и \downarrow
спиновые зоны

$h = E_{ex}$ или $h = \mu_B H$, где
 H – внешнее магнитное поле

Ферро-магнетик	Fe	Co	Ni	Gd	Ho	Er
P Поляризация (%)	44	37	32	13	7	5

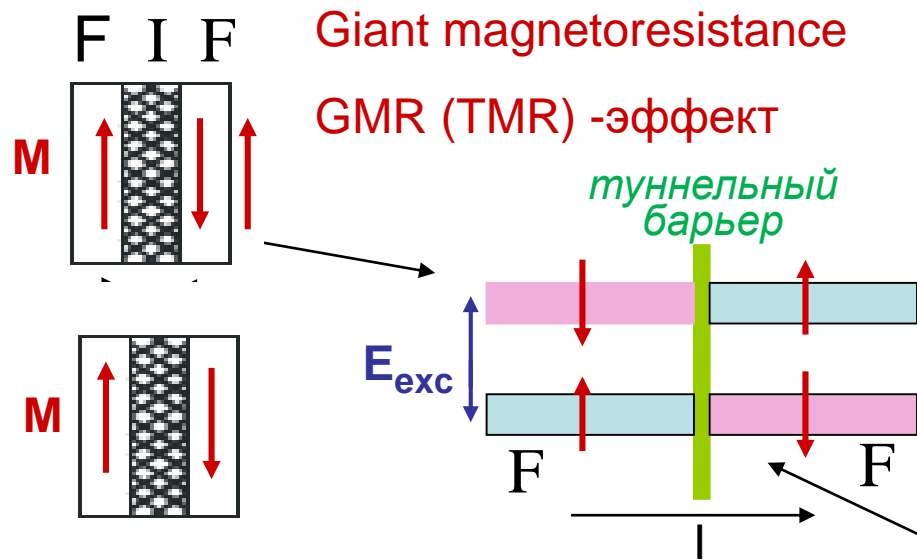
сплавы Гейслера



Пример: сплавы Гейслера (Heusler alloys):
 Ni_2MnX ($X = Al, Ga, In, Sn, Sb$), Co_2MnZ ($Z = Si, Ge$)

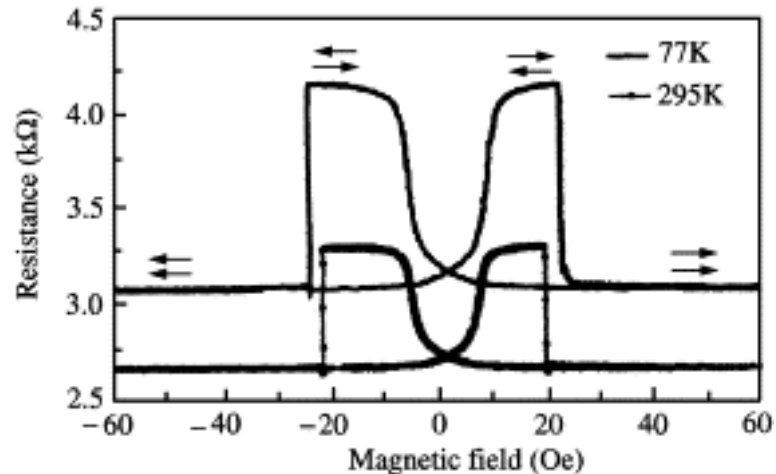
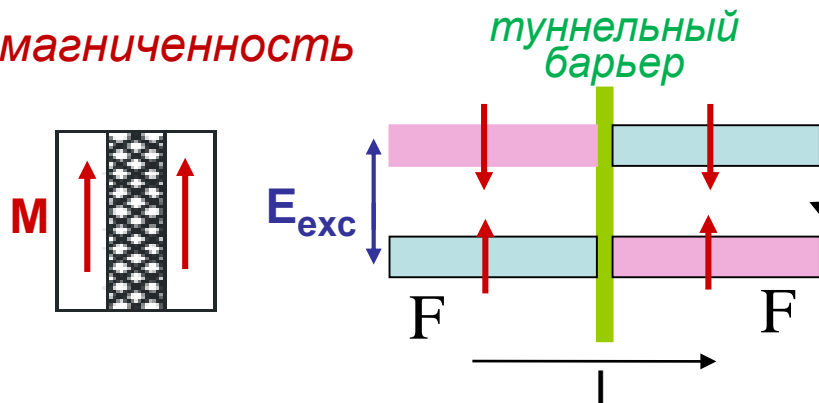
Эффект гигантского магнетосопротивления в туннельных FIF контактах (спиновое явление)

Магнитный туннельный переход



При $M \uparrow \downarrow$ -spin-flip рассеяние

M-намагниченность

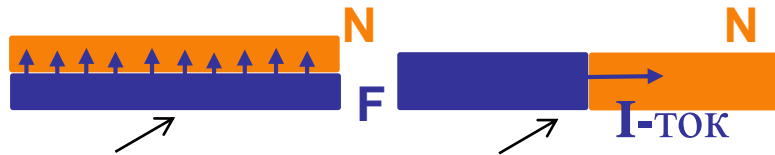


Co/Al₂O₃/Ni₈₀Fe₂₀

Для прохождения тока со спином \uparrow через тун барьер при встречных намагниченностях **M** необходим переворот спина – большое сопротивление! -spin-flip рассеяние

Для прохождения тока со спином \uparrow через тун барьер при параллельных **M** не нужен переворот спина – низкое сопротивление!

Другие механизмы возникновения спиновой поляризации в нормальных (немагнитных) металлах



1. Диффузия или инжекция из ферромагнетика (F) в N

Инжекция за счет спин-поляризованного тока из «обменно-расщепленного» однодоменного ферромагнетика

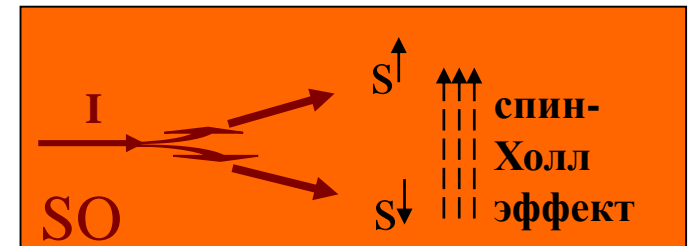
2. Спин-орбитальное взаимодействие (SO)

В классическом рассмотрении – это: *взаимодействие магнитного поля от «тока» движущегося электрона с собственным магнитным моментом*

SO - в объемных материалах с большим атомным номером Z , а также в тонких пленках за счет нарушения симметрии (не «центрально-симметричных» структурах)

$$P = (I_{\uparrow} - I_{\downarrow}) / (I_{\uparrow} + I_{\downarrow})$$

токи электронов с разными спинами: «spin-up» - I_{\uparrow} и «spin-down» - I_{\downarrow} .



SO двигает электроны с разным спином (в токе) в разные стороны. Возникает:

поляризация и спин-Холл эффект

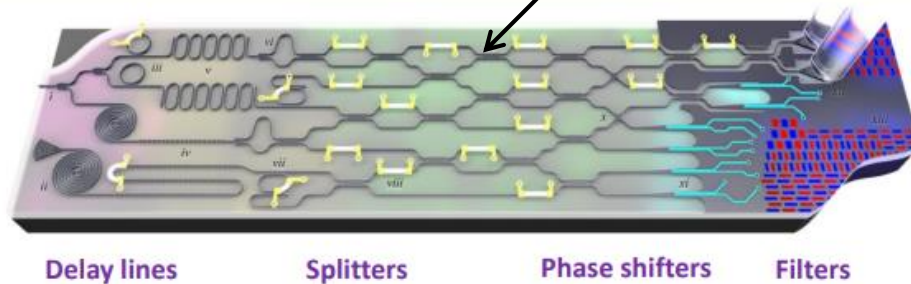
**ИНТЕГРАЛЬНЫЕ (ON-CHIP)
ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ для
ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ и
НАНОФОТОНИКИ,
в том числе для однофотонной
«электроники», в которой
носитель информации - фотон
(квант света)**

On-chip элементы интегральных оптических схем

on-chip световоды

Logical elements:

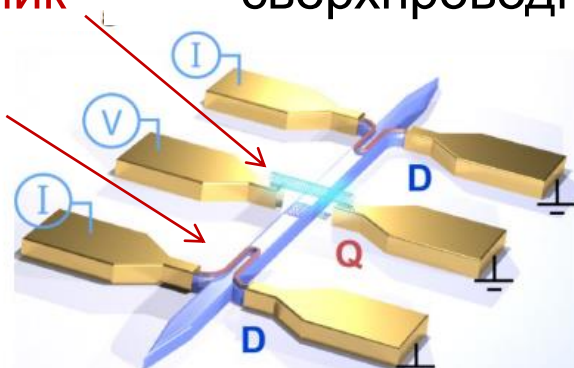
- ✓ Low optical losses
- ✓ Waveguide compatible
- ✓ Small bend radius
- ✓ High temperature stability



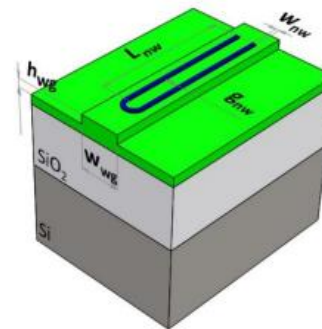
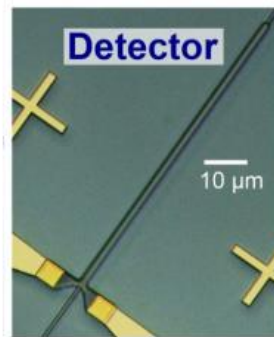
ИСТОЧНИК

сверхпроводниковый однофотонный детектор

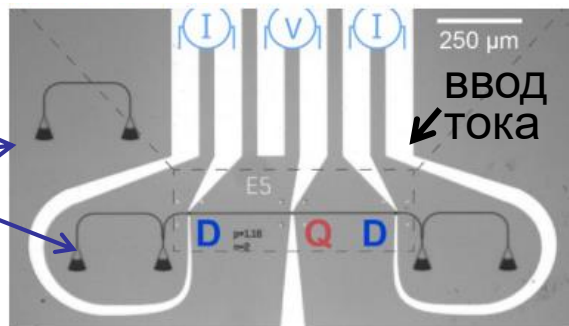
детектор



схема

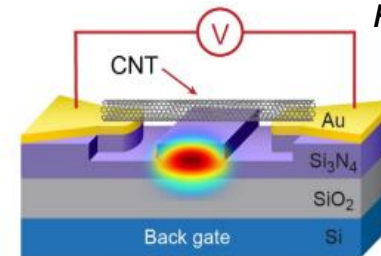
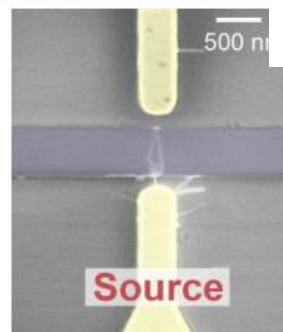


микротография чипа



ВВОД СВЕТА

Однофотонный источник на основе CNT (углеродной нанотрубки)

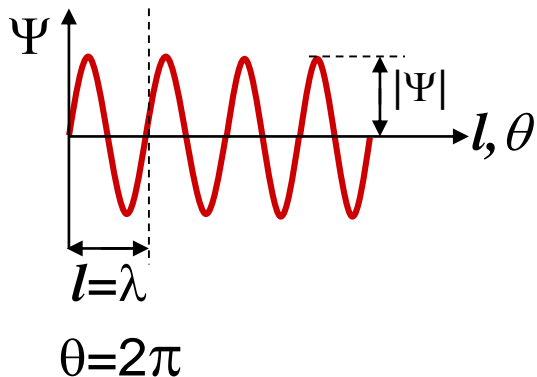


**СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ
ЦИФРОВАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА
(Быстрая одноквантовая
логика)**

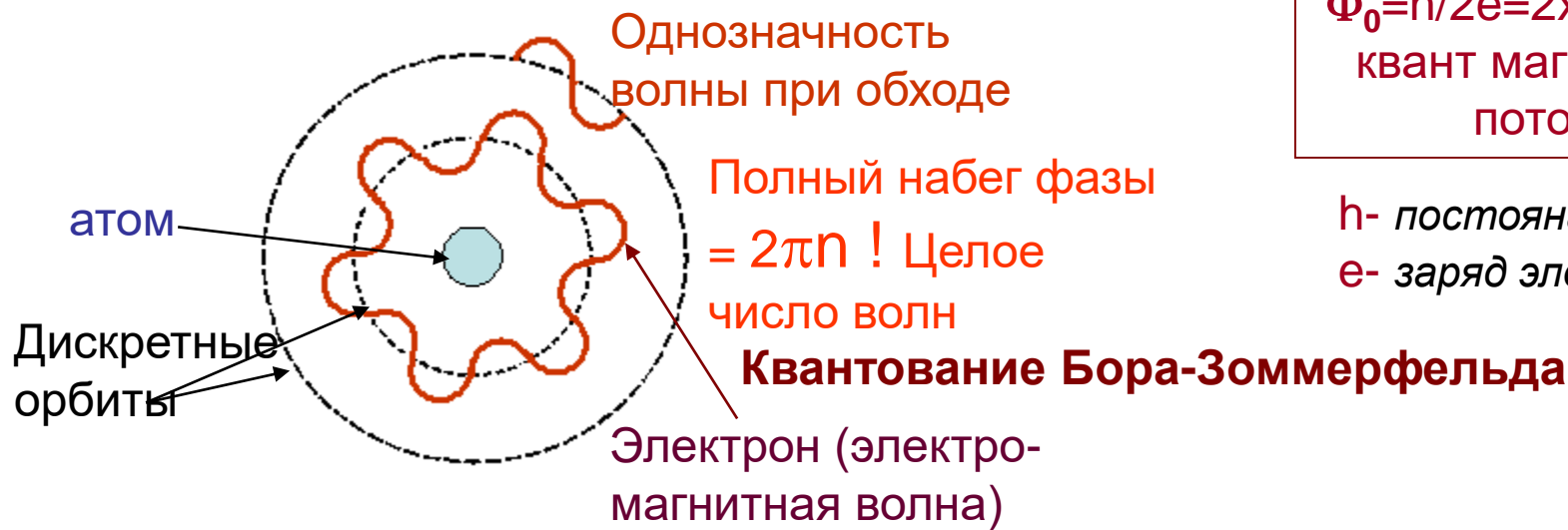
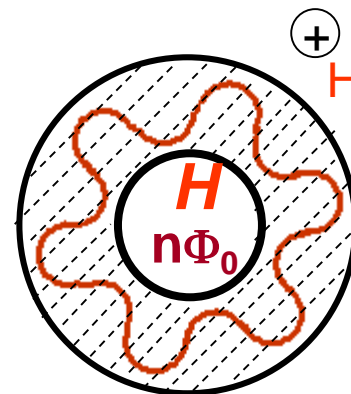
**Rapid single flux quantum
electronics
RSFQ-electronics**

Квантование в сверхпроводящем кольце

Сверхпроводимость – все электроны описываются единым квантовым состоянием, единой волной: $\Psi = |\Psi| \exp(i\theta) \sim (\Psi = |\Psi| \sin \theta)$



$\Psi = |\Psi| \exp(i\theta)$ -
в комплексной форме,
 i – мнимая единица

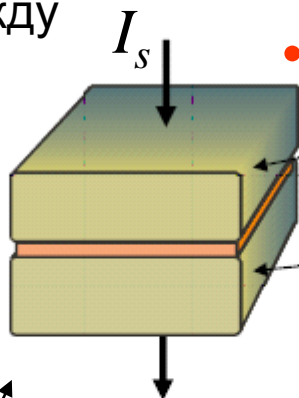
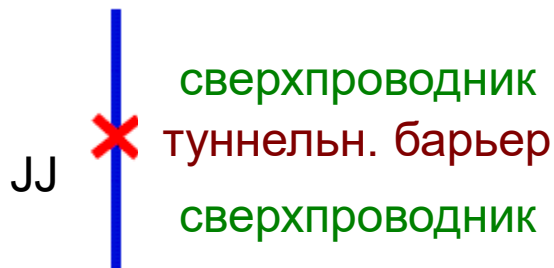


$\Phi_0 = h/2e = 2 \times 10^{-15}$ Вб-
квант магнитного
потока

h - постоянная Планка,
 e - заряд электрона

Джозефсоновский переход и сверхпроводящий квантовый интерферометр (dc-SQUID)

JJ – Josephson junction – туннельный переход между сверхпроводниками



- $I_s(\varphi) = I_c \sin \varphi$; $I < I_c$;
- $2eV = \hbar\omega = \hbar d\varphi/dt$; $I > I_c$;

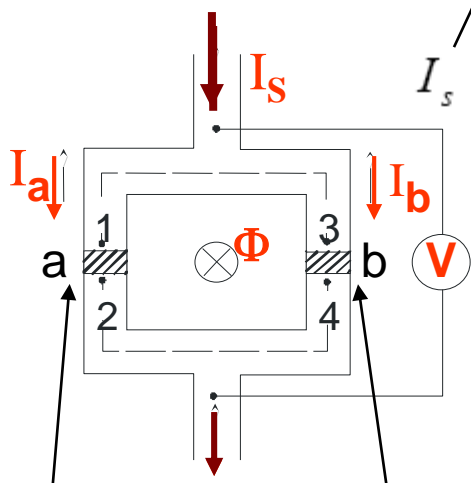
$$\Psi_1 = |\Psi_1| \exp(i\theta_1)$$

$$\Psi_2 = |\Psi_2| \exp(i\theta_2)$$

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

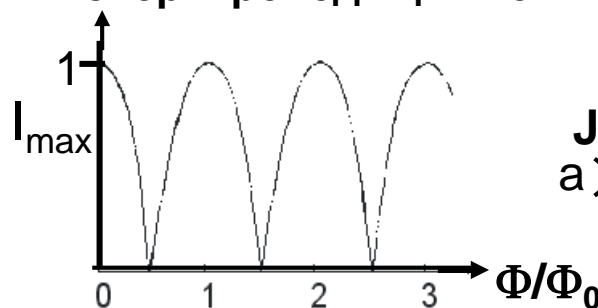
сверхпров. разность фаз: $\varphi = \theta_1 - \theta_2$
 I_c - максимальный сверхпроводящий ток

$$I_s = I_c \sin \varphi$$



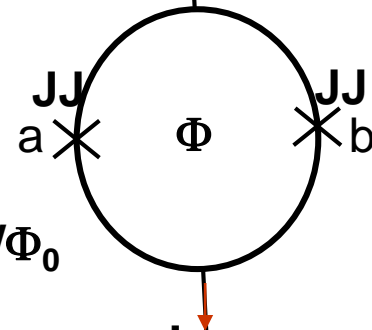
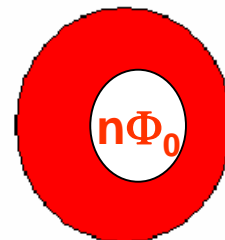
SQUID – аналог интерференции света на двойной щели

JJ=X – слабые звенья для входа магнитного потока

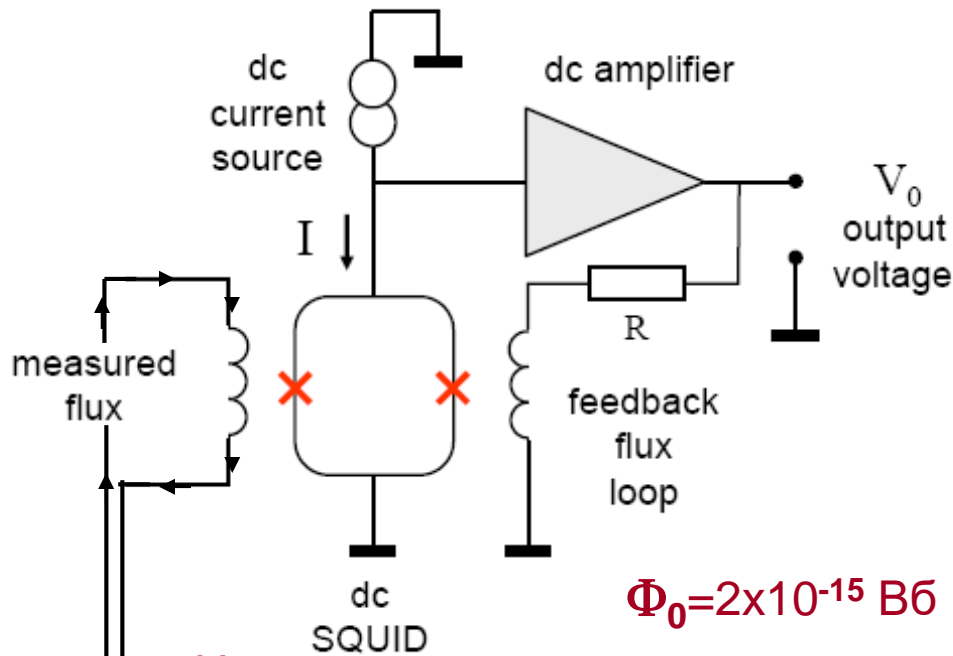


Максимальный сверхток I_{\max} :

$$I_{\max} = 2I_c |\cos(\pi\Phi/\Phi_0)|$$



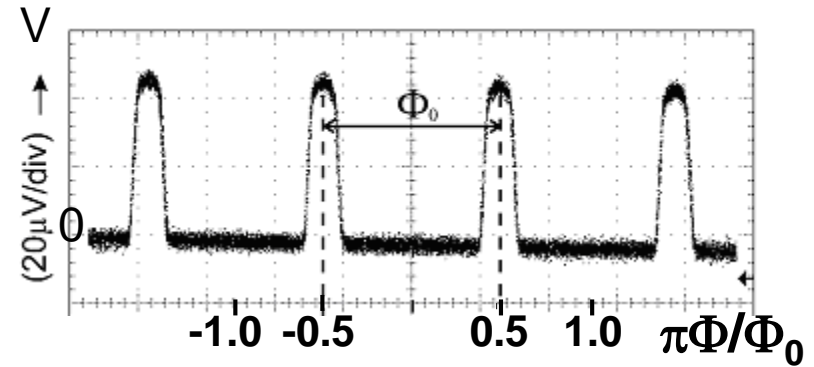
Чувствительный SQUID-магнетометр



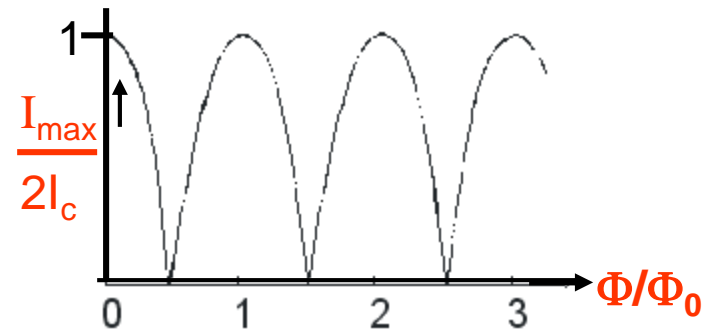
Чувствительность с обратной связью лучше чем $10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$

образец

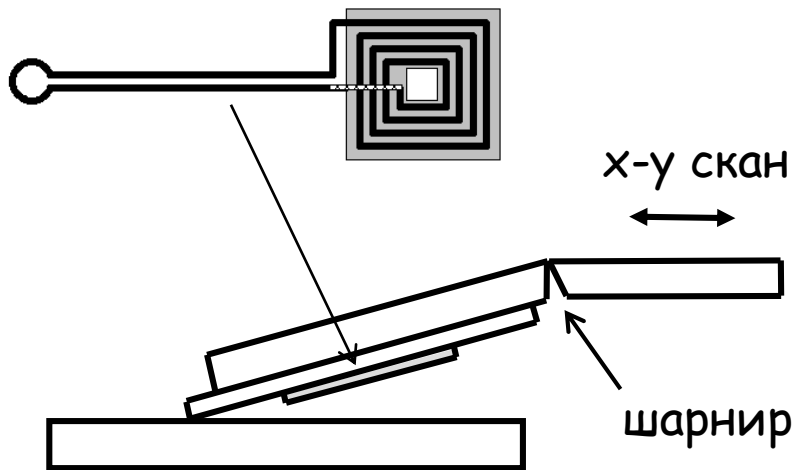
SQUID-магнетометр способен разрешать магнитное поле с чувствительностью $\sim 10^{-10} \text{ Гс}$



Характеристика магнитный поток-напряжение для $I \leq I_c$



Сканирующая SQUID-микроскопия

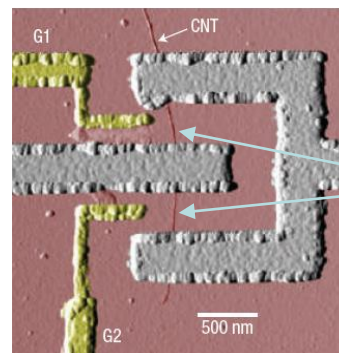
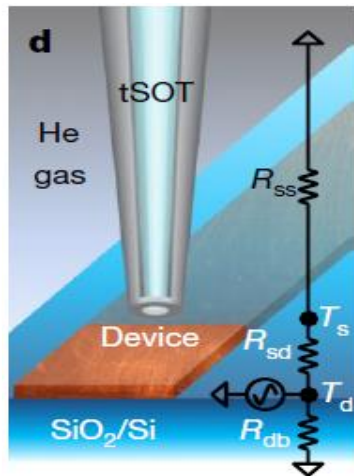
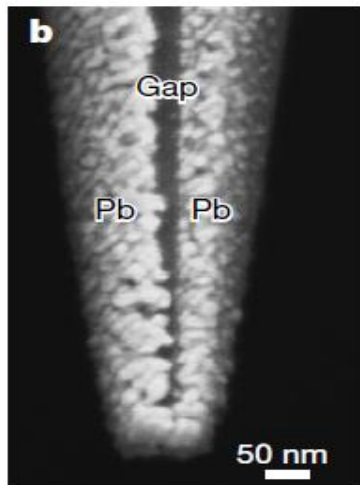


Пространственное разрешение ~ 10 мкм

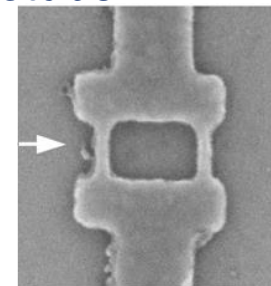
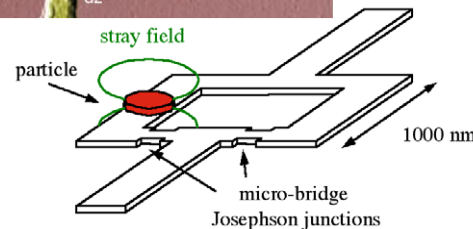


Разрешение по магнитному потоку $\sim 10^{-6} \Phi_0$

E. Zeldov et al: SQUID on tip



W. Wernsdorfer et al: SQUID using a carbon nanotube



Магнетометрия в медицине

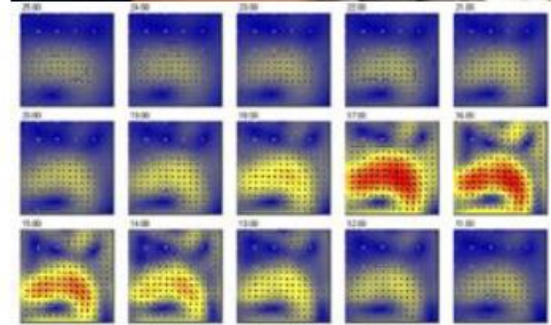
магнитокардиография



магнитоэнцефалография



1 SQUID:
€ 0.5 – 1 K
1 channel:
€ 2 K



Сверхпроводящая (джозефсоновская) электроника

-Магнитометры с чувствительностью по магнитному полю $\sim 10^{-10}$ Гс

- Пиковольтметры с чувствительностью по напряжению $\sim 10^{-13}$ В

- Квантовые стандарты Вольта

- SQUID – усилители сверхмалых сигналов

-Аналого-цифровые преобразователи (приемники) и цифровые синтезаторы в L-полосе частот (~ 1 ГГц, дециметровые длины волн)

- Цифровая джозефсоновская логика, сверхбыстрые переключатели и роутеры (маршрутизаторы).

- Квантовая логика, сверхпроводящие кубиты

mIn. Euro

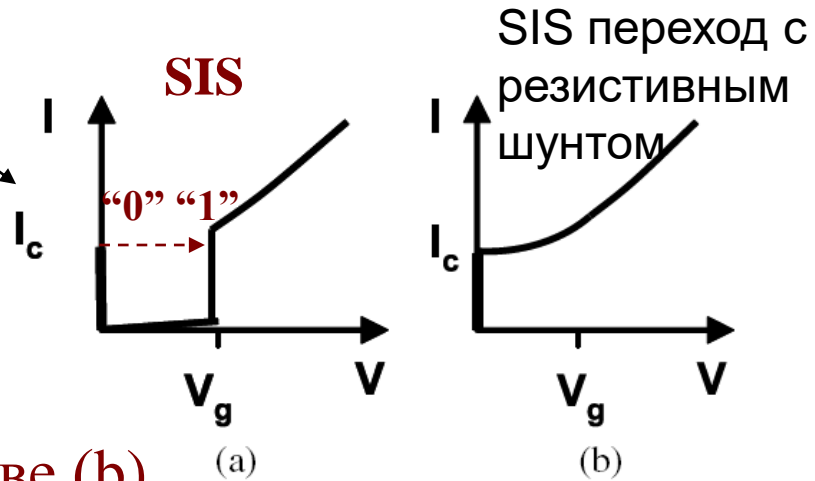
Отрасль	2004	2007	2010	2013
Научно-исследовательское оборудование (НИО)	600	660	835	955
Магнито-резонансная томография (МРТ)	2950	3300	3410	3525
Всего НИО и МРТ	3550	3960	4245	4480
Новые СП-устройства	35	65	150	410
СП-электроника	65	60	125	210
Всего новых приложений	100	125	275	620
Всего	3650	4085	4520	5100
НТСП	3610	4025	4350	4600
ВТСП	40	60	170	500

Сверхпроводящая цифровая электроника

До 1985 г. – переключатели

Проект IBM до 1983 г. на основе (a)

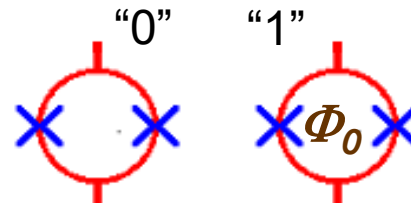
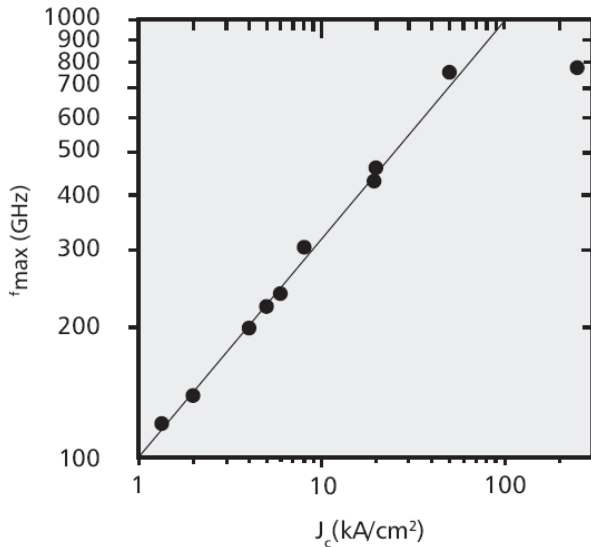
S-сверхпроводник



С 1985: RSFQ –logic на основе (b)

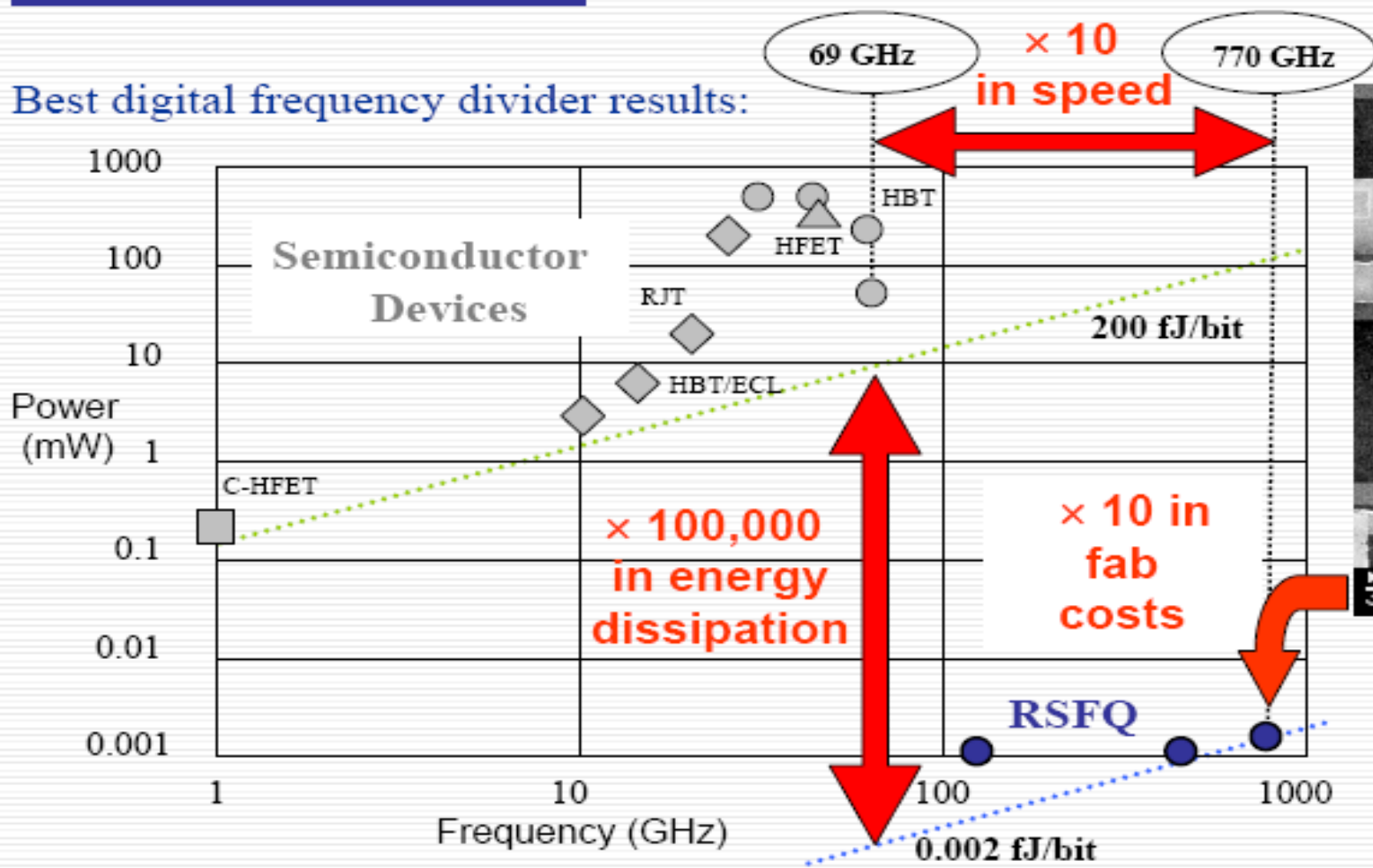
RSFQ-логика: Rapid Single Flux Quantum logic (Быстрая одноквантовая логика)

Она основана на хранении и перемещении квантов магнитного потока Φ_0 ($2 \cdot 10^{-15}$ Вб)



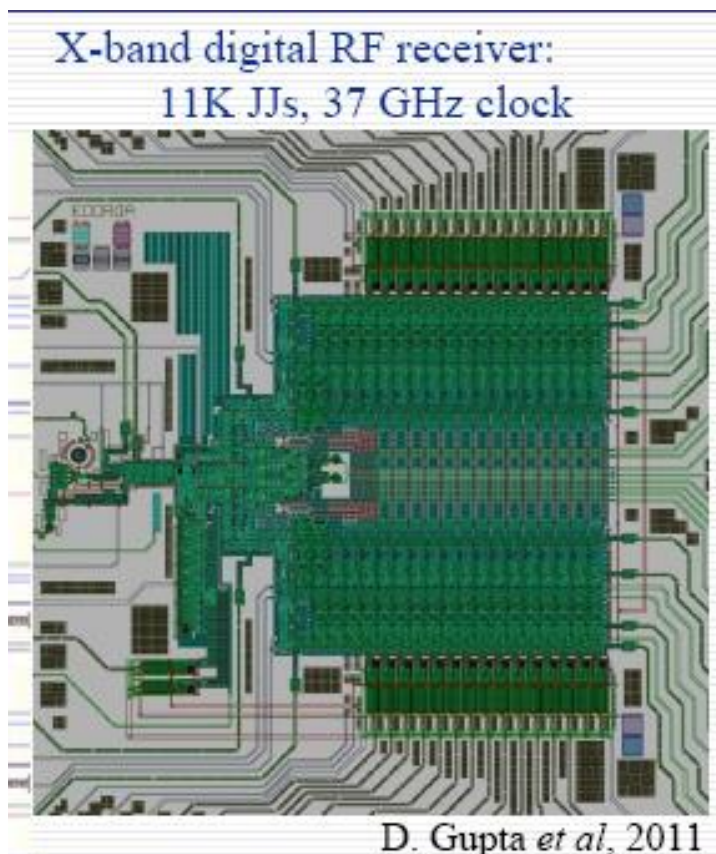
RSFQ vs. Semiconductors

Best digital frequency divider results:

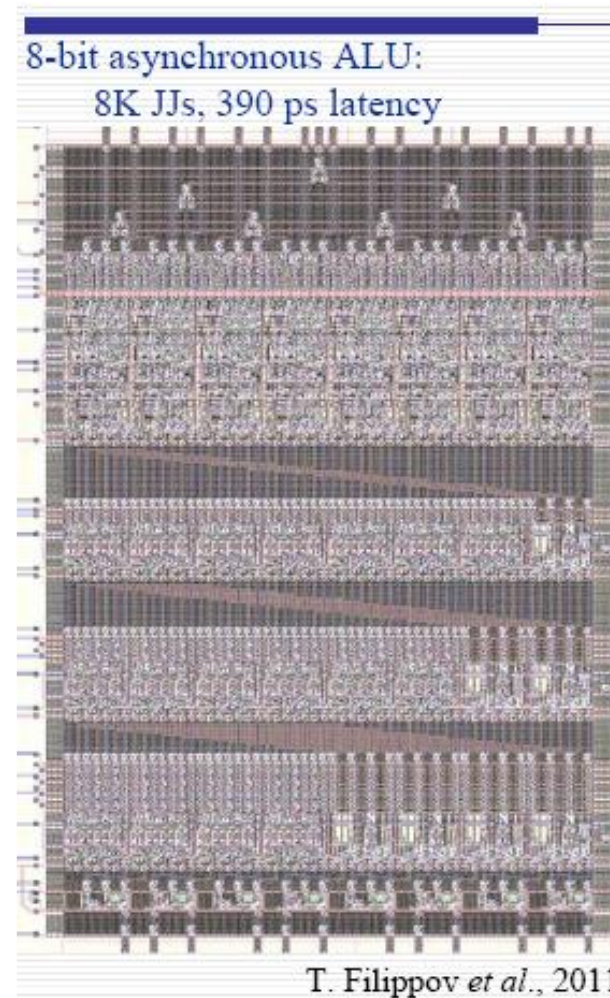


Существующие применения

АЦП и цифровые приемники для
“оцифровывания” слабых сигналов до
100 ГГц;



Логические устройства
Arithmetic and Logic Unit (ALU)



Цифровой СВЧ-приемник



Преимущества и недостатки RSFQ электроники

Преимущества

- Использует обычные микро-, нанотехнологии, совместима со CMOS схемами.
- Чрезвычайно высокое быстродействие: от 10 до сотен ГГц.
- Низкое тепловыделение: в 100 000 раз меньше чем в CMOS схемах ($< 10^{-19}$ Дж) на одно переключение ($E_{\text{БИТМИН}} = k_B T \ln 2 \sim 4 \times 10^{-21}$ Дж).
- Имеет собственные on-chip генераторы тактовой частоты (DC-RSFQ конверторы).
- Обеспечивает передачу пикосекундных импульсов на большие длины без искажений.

Недостатки

- Требуется криогенного охлаждения. В настоящее время используются рефрижераторы замкнутого цикла и on-chip (микро-) охладители (без использования криогенных жидкостей).
- Низкие температуры не только недостаток, но и преимущество: низкие тепловые флуктуации.
- Большие (микронные) размеры базовой ячейки.
 - Отсутствие емкой, совместимой с RSFQ (джозефсоновской) памяти.

Проблемы сосуществования сверхпроводимости и ферромагнетизма Джозефсоновские SFS переходы



-Наблюдение неоднородной (“знакопеременной”) сверхпроводимости вблизи границы раздела сверхпроводник/ферромагнетик (SF-границы); реализация джозефсоновского SFS контакта с инверсией разности фаз.

-Предсказание и реализация FS-спиновых переключателей и спиновых клапанов.

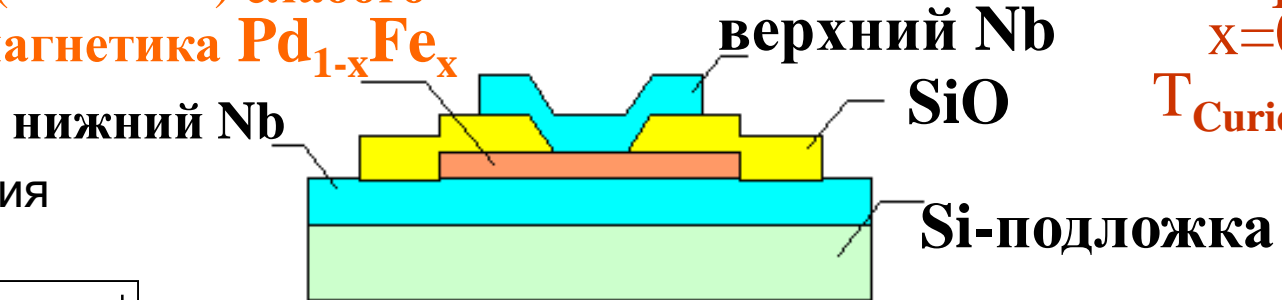
-Эксперименты со спиновой инжекцией в сверхпроводник, кросс-андреевское отражение, расщепление электронов (спинов) куперовской пары в мезоскопических F-S-F структурах

Магнито-гистерезисное поведение крит тока в SFS контакте

Магнитная джозефсоновская память с быстрым считыванием

Слой (10-20 nm) слабого ферромагнетика $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$

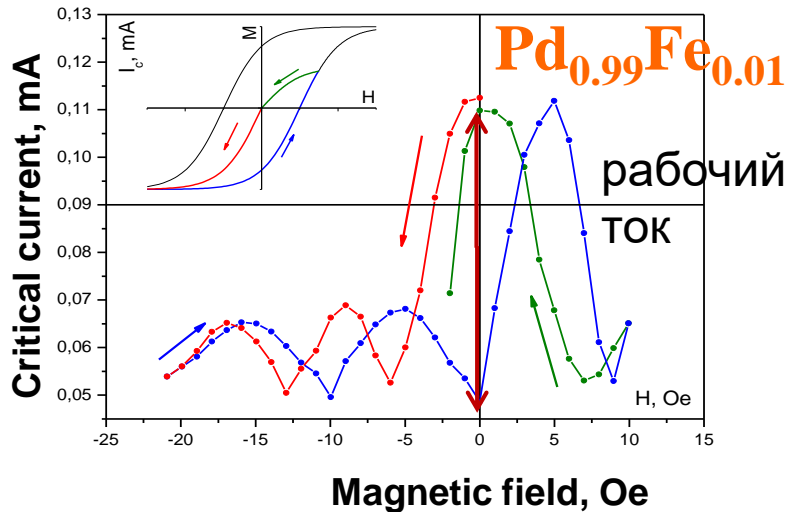
$\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$
 $x=0.01$,
 $T_{\text{Curie}}=15 \text{ K}$



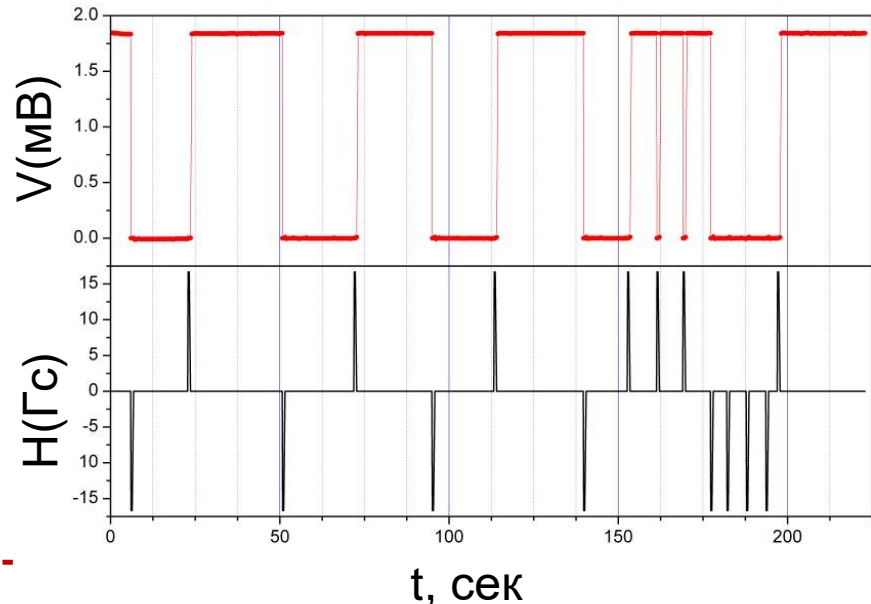
За счет квантования на площади JJ

$$I_{\text{max}} = I_c \left| \frac{\sin(\pi\Phi / \Phi_0)}{\pi\Phi / \Phi_0} \right|$$

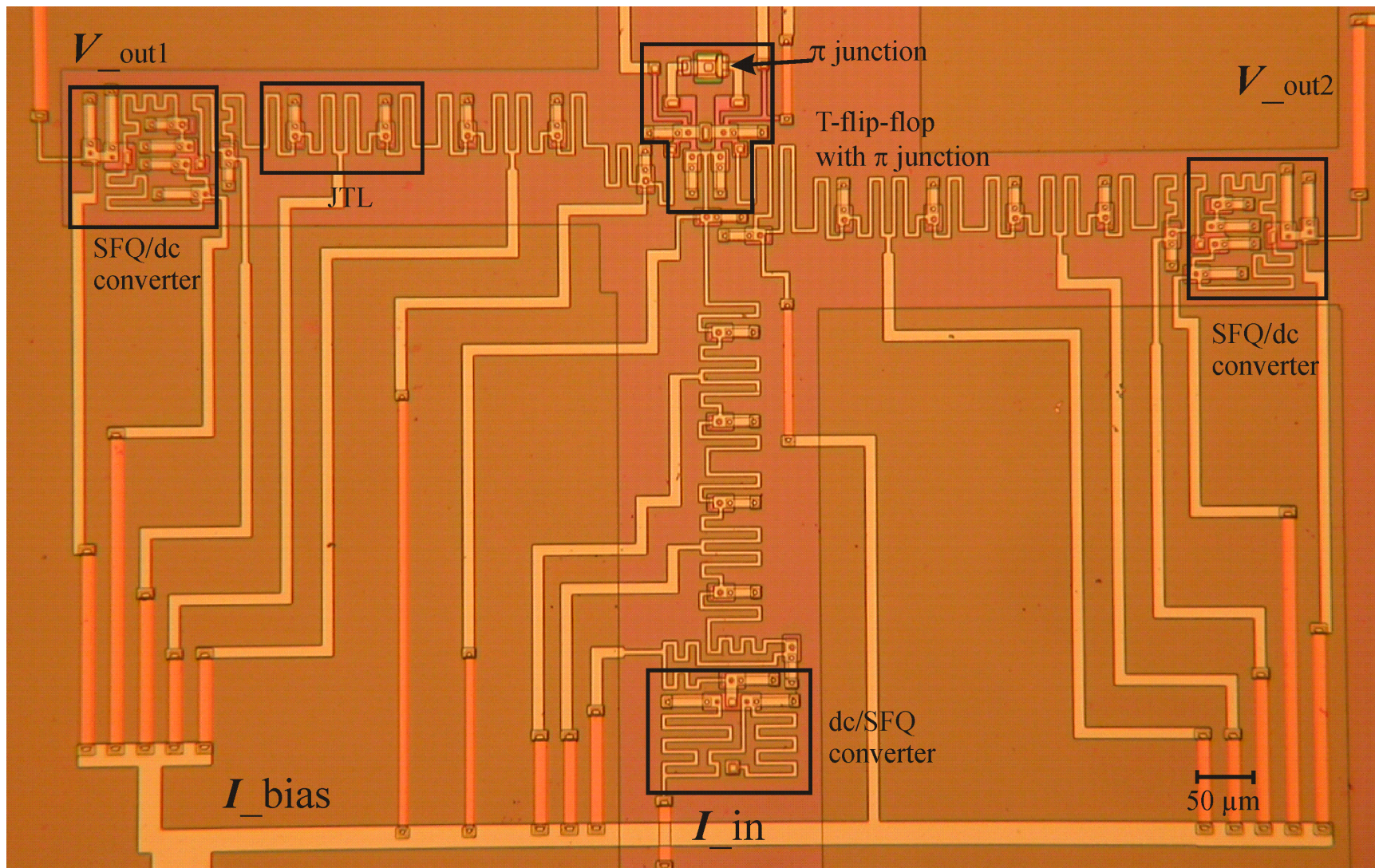
Не разрушающаяся, переключающаяся слабыми импульсами H магнитная память



Очень слабый и магнито-мягкий ферромагнетик !



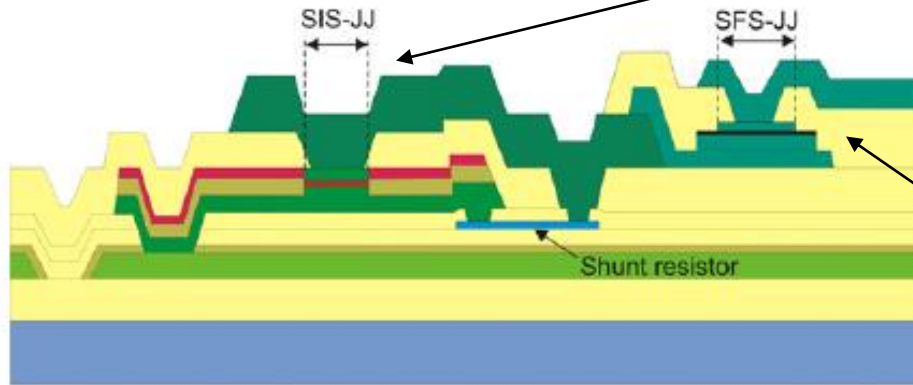
Интегральная микросхема RSFQ-триггера



Фрагмент RSFQ-схемы с туннельным и SFS-переходами

Оптическая литография и магнетронное осаждение слоев
Измерения при $T=4,2$ К

Совмещенная Nb/AlO_x/Nb - Nb/CuNi/Nb технология



$Nb-AlO_x-Nb$: 4×4 μm^2 ;
 $j_c = 100$ A/cm²

$I_c \approx 20$ μA

$Nb-CuNi-Nb$: 8×8 μm^2 ;
 $j_c = 500$ A/cm²

$I_c \approx 300$ μA



ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ для кубитов

- Тонкопленочная нанотехнология (~ 0.1 мкм)
- Сверхнизкие температуры (< 20 мК)
- СВЧ техника (5-10 ГГц)

