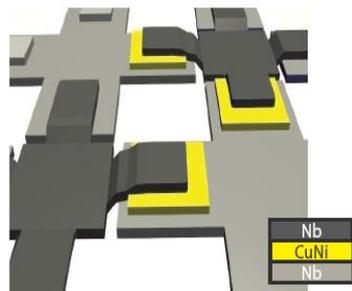
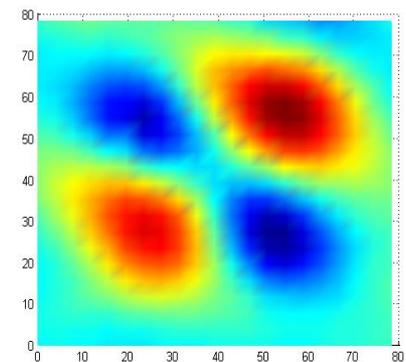


ГИБРИДНЫЕ ДЖОЗЕФСОНОВСКИЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И СПИНТРОНИКИ



В. В. Рязанов
ИФТТ РАН, Черноголовка



Развитие исследований гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик (SF-систем)

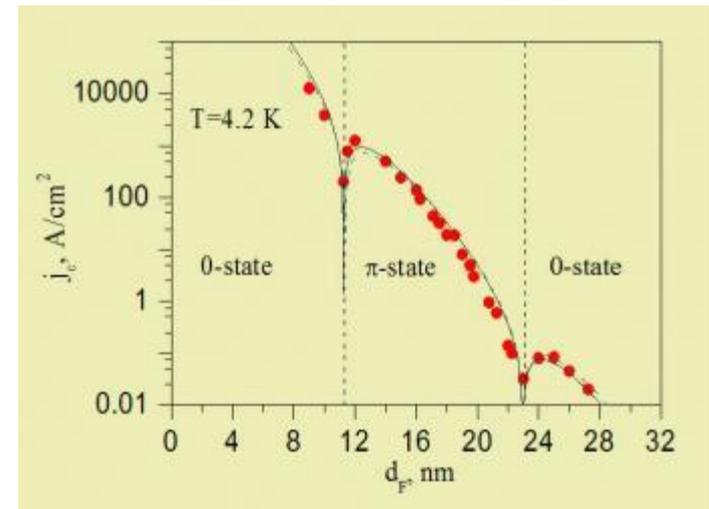
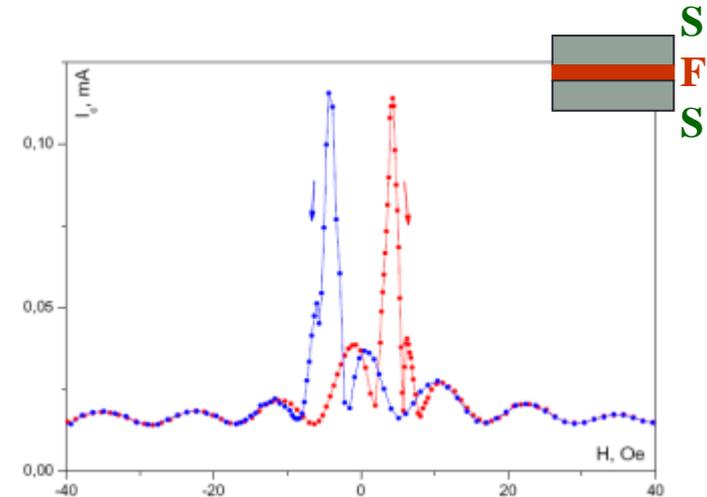
- Наблюдение сверхпроводящего тока через ферромагнитный барьер в джозефсоновском SFS-контакте (1999 г.)

- Наблюдение неоднородной «знакопеременной» сверхпроводимости вблизи FS- границы раздела, реализация джозефсоновского SFS π -контакта с инверсией сверхпроводящей разности фаз (2001 г.).

- Реализация «спиновых» FS - клапанов и переключателей.

- Наблюдение проявлений сверхпроводящей длиннодействующей спин-триплетной компоненты.

-Исследование спиновой инжекции в сверхпроводник и расщепления куперовских пар в SF- наноструктурах.



ПЛАН

- Направления развития исследований гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик (SF-систем)
- Перспективы и «узкие места» в развитии сверхпроводящей электроники
- Джозефсоновские SFS переходы для джозефсоновской магнитной памяти
- Инверторы сверхпроводящей фазы (π -контакты) в сверхпроводниковой цифровой и квантовой логике
- Использование спин-поляризованной инжекции в джозефсоновской магнитной памяти
- Неравновесные явления, связанные с квазичастичной инжекцией в сверхпроводник

Сверхпроводниковая (джозефсоновская) электроника

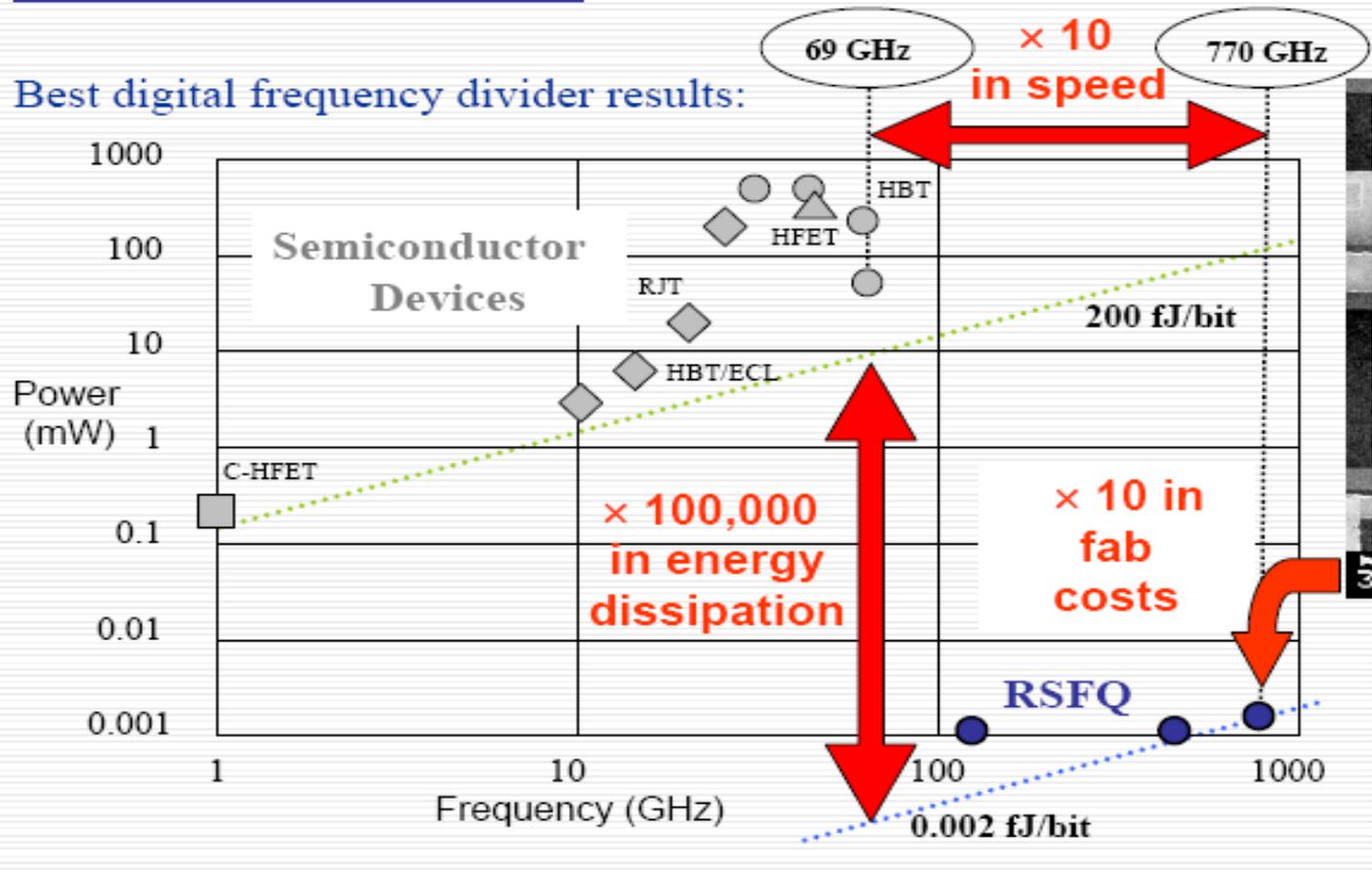
- Магнитометры с чувствительностью по магнитному полю $\sim 10^{-10}$ Гс
- Пиковольтметры с чувствительностью по напряжению $\sim 10^{-13}$ В
- Квантовые стандарты Вольта
- SQUID – усилители сверхмалых сигналов
- Аналого-цифровые преобразователи (приемники) и цифровые синтезаторы в L-полосе частот (~ 1 ГГц, дециметровые длины волн)
- Цифровая джозефсоновская логика, сверхбыстрые переключатели и роутеры (маршрутизаторы).
- Квантовые вычислительные системы на основе сверхпроводящих кубитов

Принципиальные недостатки джозефсоновской цифровой электроники

- Большие (микронные) размеры базовой ячейки.
- Отсутствие емкой памяти, совместимой с джозефсоновской структурой.

Преимущества джозефсоновской цифровой электроники

RSFQ vs. Semiconductors



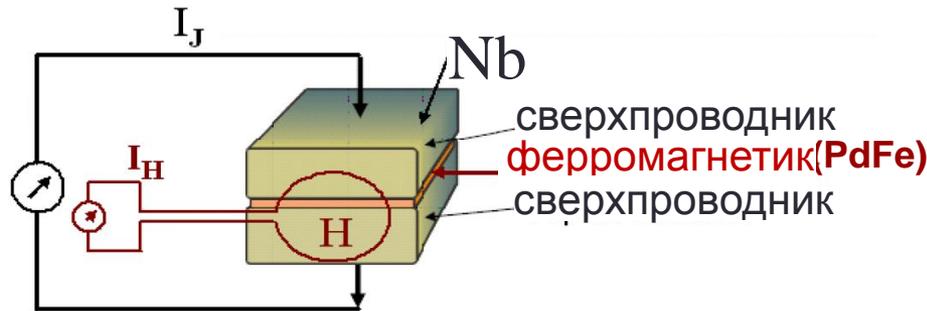
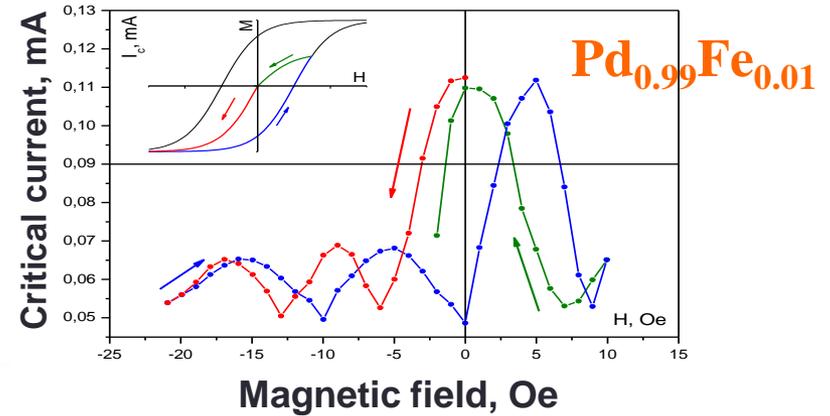
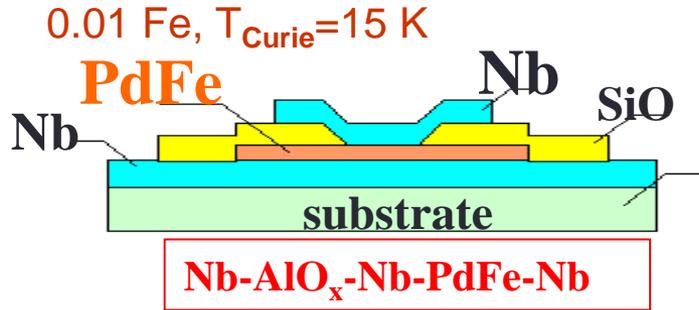
Быстродействие и энергоэффективность !!!

Отсутствие емкой джозефсоновской памяти

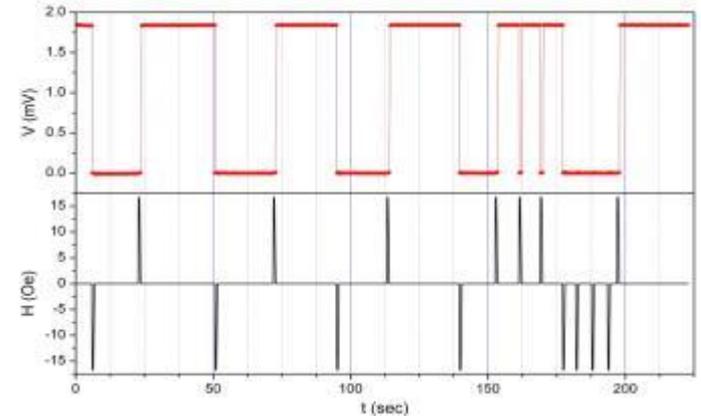
- Джозефсоновская память для *Random Access Memories* (RAM – память с произвольным доступом) существует, но она имеет низкую плотность, малую емкость, не является энергоэффективной.
 - Именно отсутствие эффективной памяти явилось основной причиной закрытия IBM проекта сверхпроводящего компьютера в 1983 г.
 - В настоящее время наибольшая емкость сверхпроводящей джозефсоновской памяти 16 кВ.
 - Успехи в развитии обычной магнитной RAM (MRAM) памяти мотивируют развивать джозефсоновские системы с дополнительными ферромагнитными слоями или блоками (Hidaka'1991, Inoue'1994, Oh, et al.'97, Held, et al.'2006).
 - Участники текущей американской программы С-3 (IARPA С3 Program) по реализации сверхпроводящего цифрового компьютера используют подходы, развитые в работах сотрудников ИФТТ РАН.

Джозефсоновские SFS переключатели

Магнито-гистерезисное поведение критического тока переходов Nb-PdFe-Nb со слабо-магнитным джозефсоновским барьером



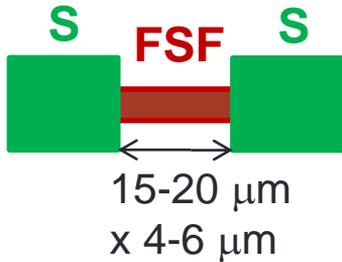
Джозефсоновские магнитные переключатели, управляемые импульсами слабого магнитного поля



V.R. et al, Phys. Procedia 36, 35 (2012)
Appl. Phys. Lett. 100, 222601 (2012)

$$f_{read} \sim V_c / \Phi_0 > 100\text{ GHz}$$

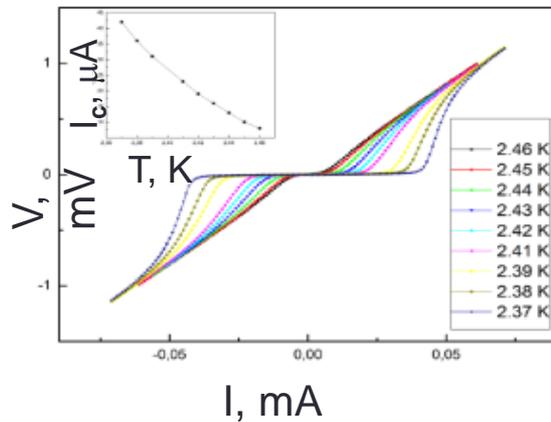
«Спиновый клапан», на основе FSF мостика (аналогичен GMR структуре)



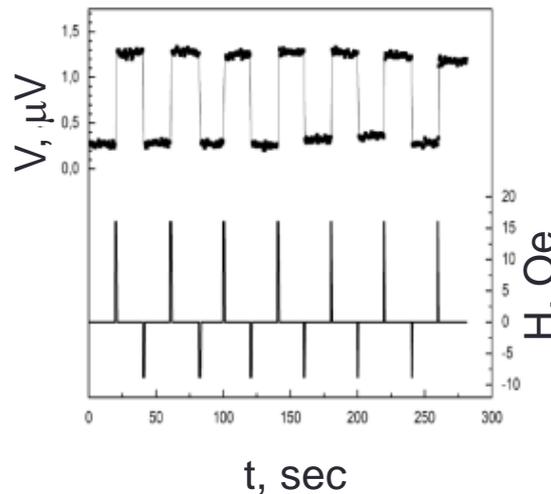
переход: **Nb** - **FSF мостик** - **Nb**



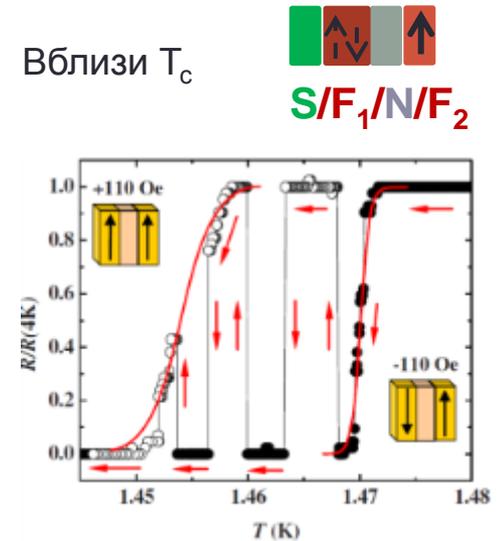
FSF мостик = $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}(15 \text{ nm}) - \text{Nb}(15 \text{ nm}) - \text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}(15 \text{ nm})$



V.V. Bol'ginov, et al,
To be published

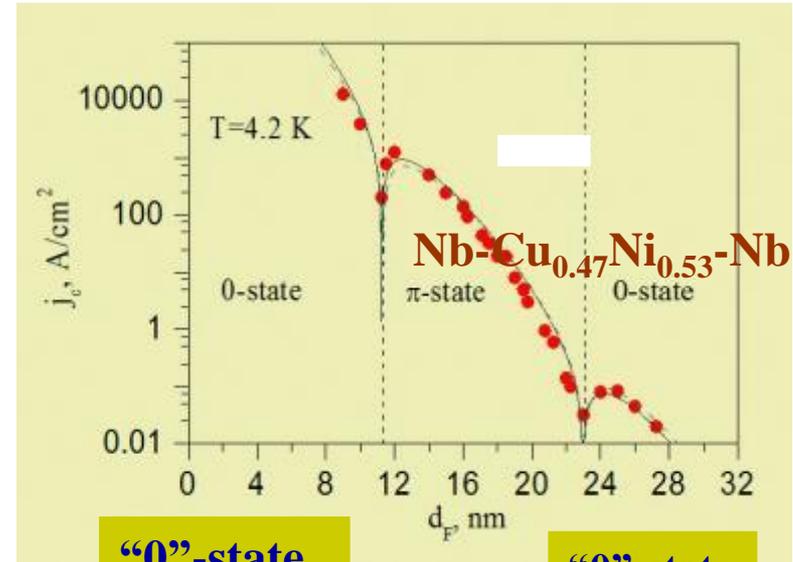
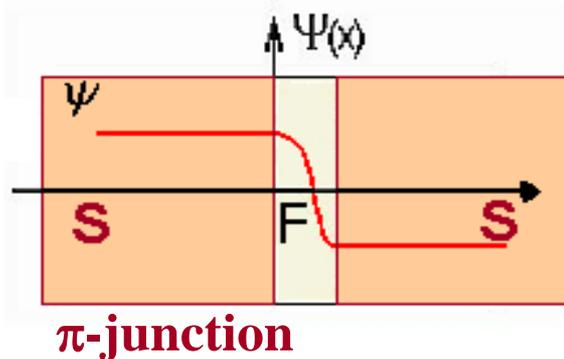
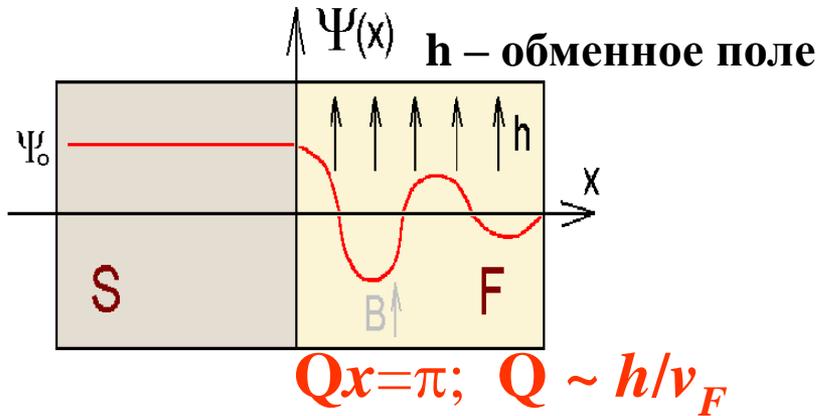


переключение между
двумя значениями
критического тока



P.V. Leksin, et al,
Appl. Phys. Lett. (2010)

Осциллирующая сверхпроводимость и π -контакт



“0”-state

$I = I_c \sin \varphi$

π -state

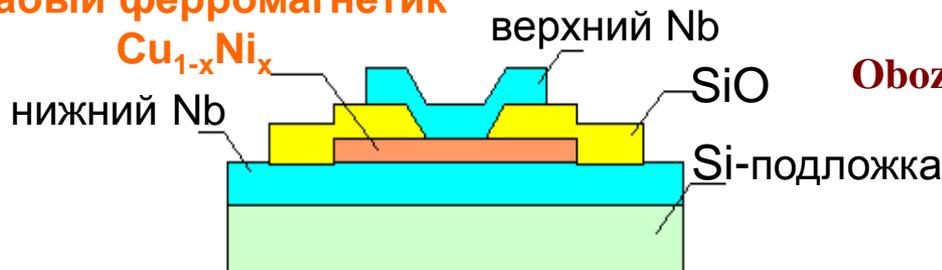
“0”-state

$I = I_c \sin \varphi$

$I = I_c \sin(\varphi + \pi) = -I_c \sin(\varphi)$

V.R., Oboznov, Rusanov et al, Phys. Rev. Lett. (2001)

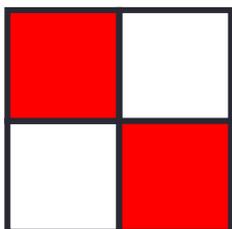
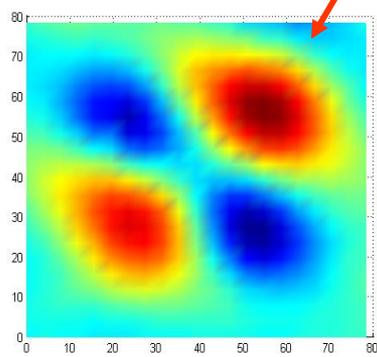
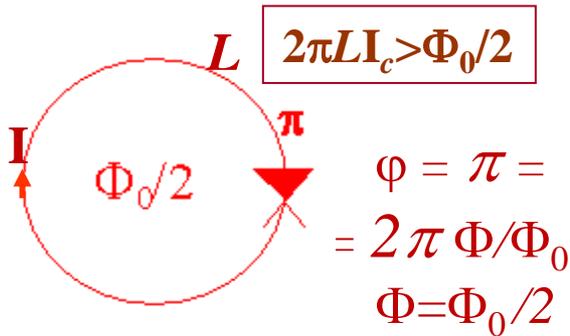
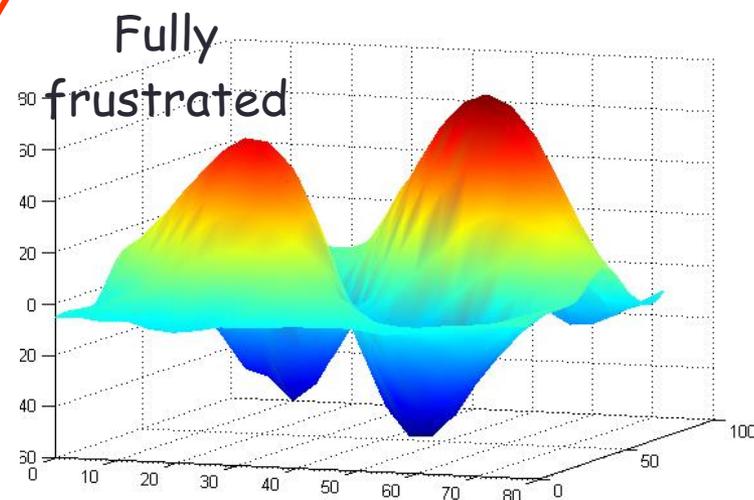
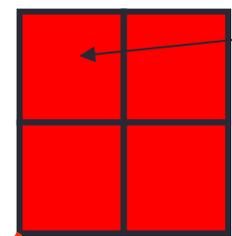
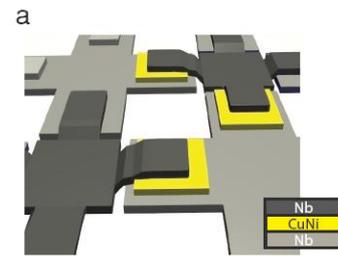
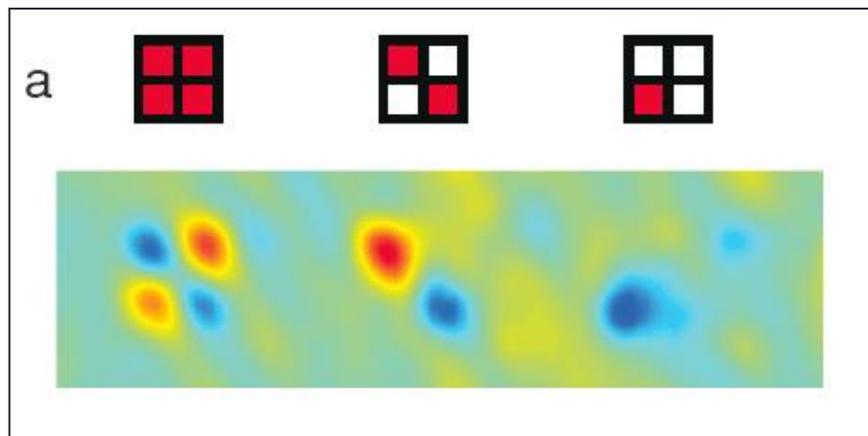
слабый ферромагнетик



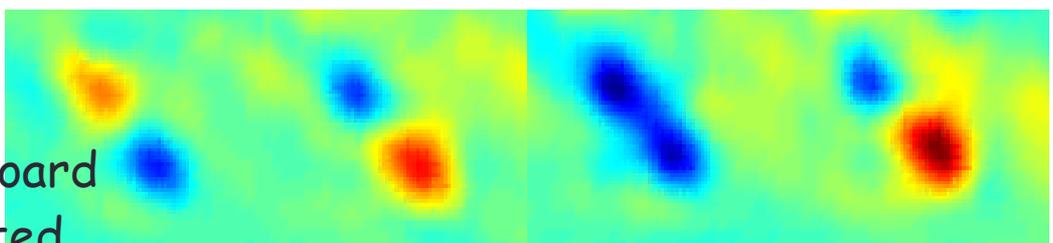
Oboznov, Bolginov, Feofanov, V.R., and Buzdin, Phys. Rev. Lett. (2006)

Визуализация спонтанного магнитного потока

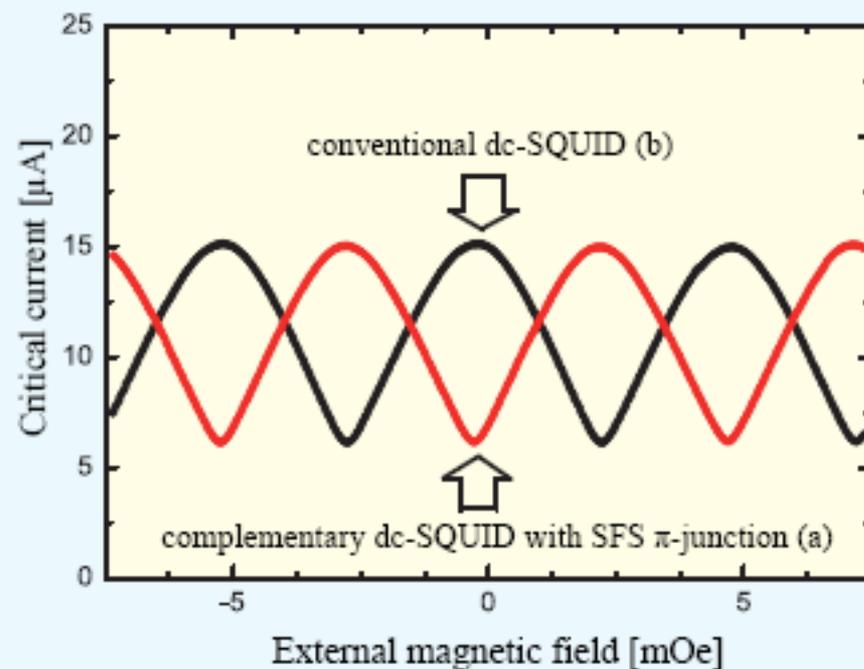
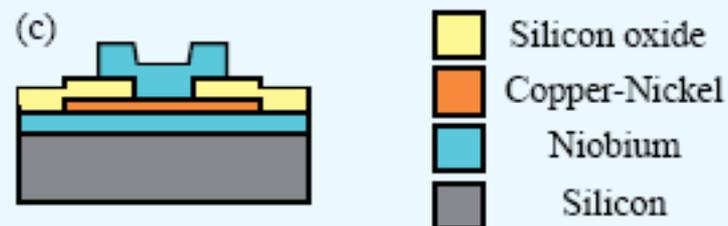
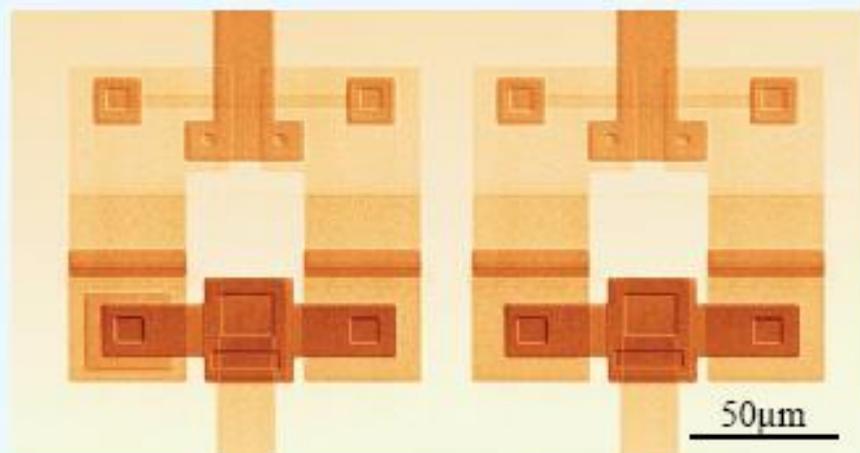
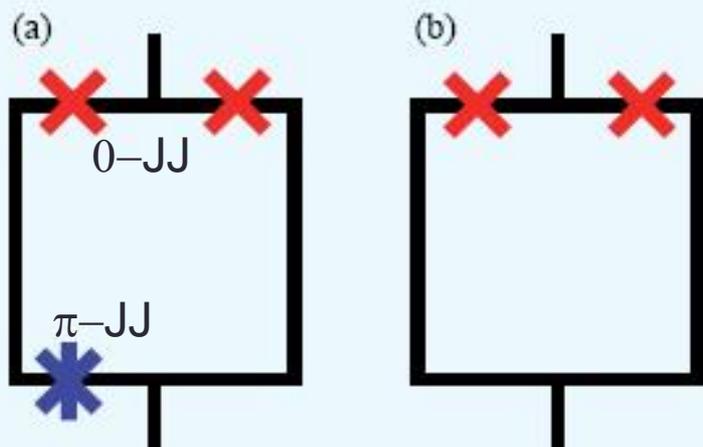
Frolov, Stoutimore, Crane, Van Harlingen, Oboznov, V.R. et al, Nature Physics 4, 32 (2008)



Checkerboard frustrated

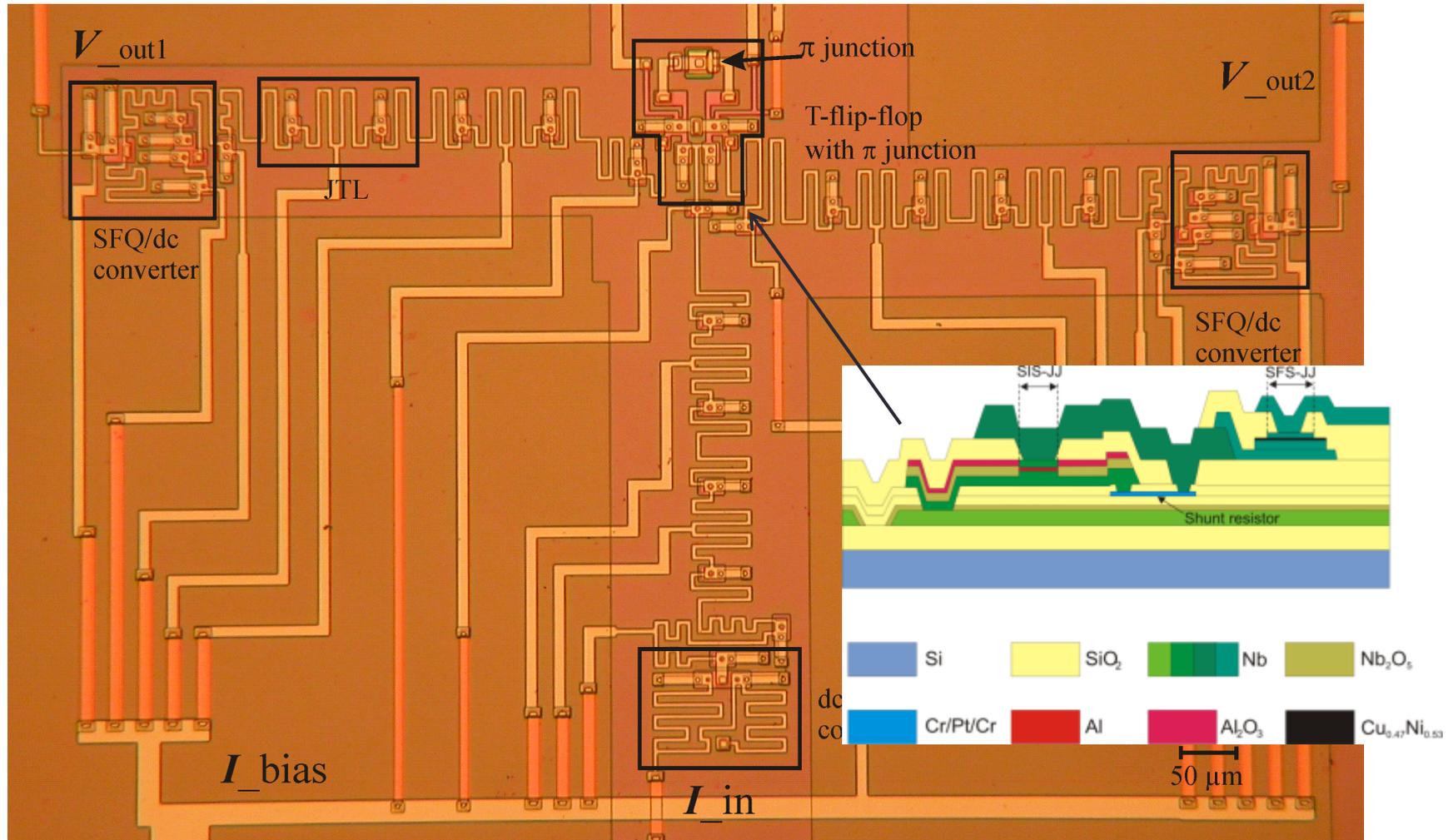


Демонстрация SFS инвертора фазы

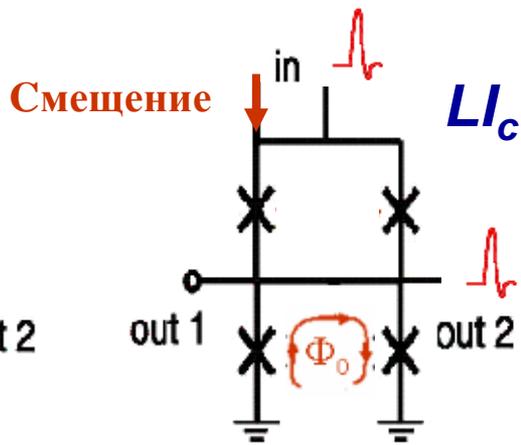
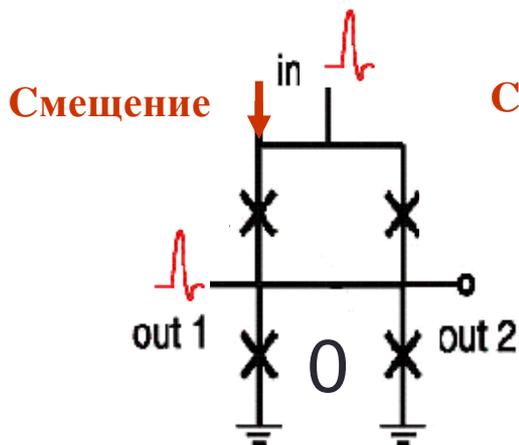


A. Feofanov et al, Nature Physics 6, 593 (2010).

Интегральная микросхема RSFQ-триггера, использующая инвертор фазы

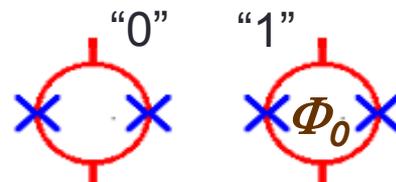


RSFQ- and π -SFQ –Toggle Flip-Flops (сверхпроводящие триггеры)



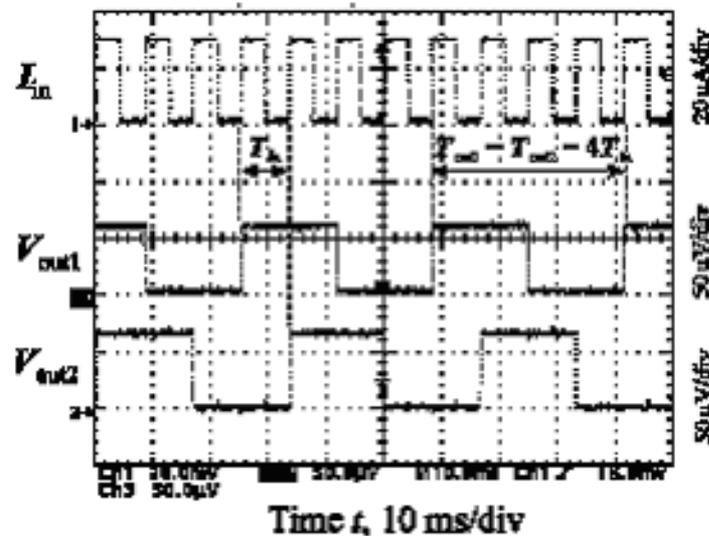
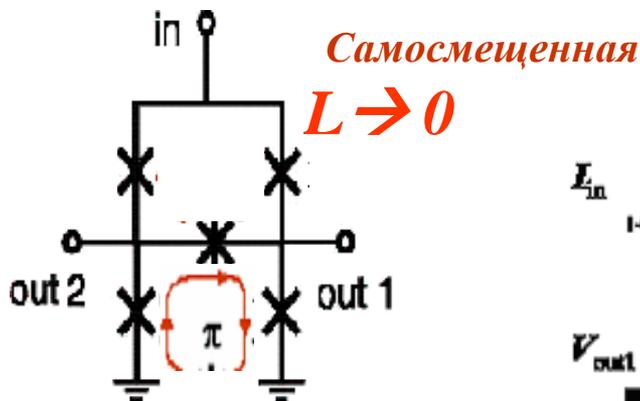
$LI_c > \Phi_0$ - большая ячейка

*RSFQ –Toggle
Flip-Flop*

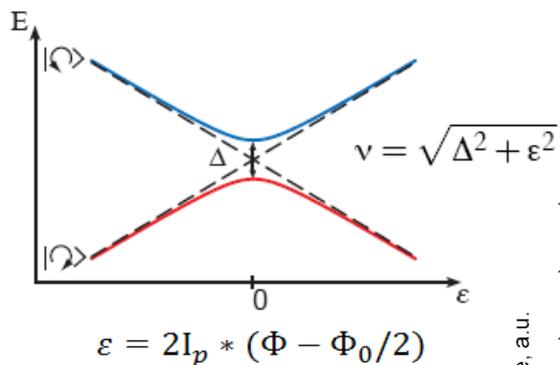
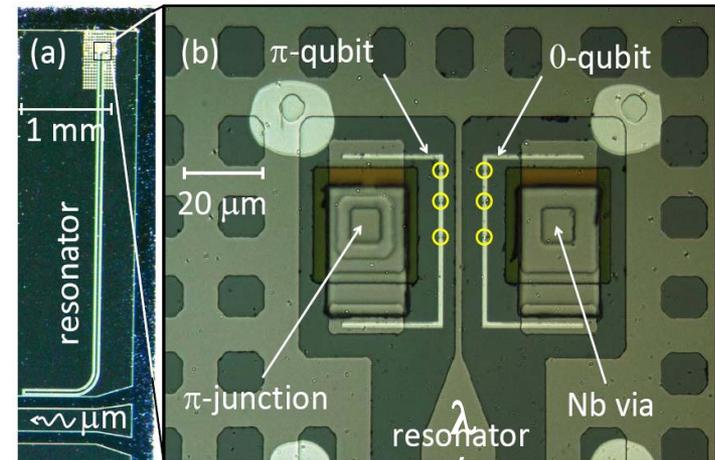
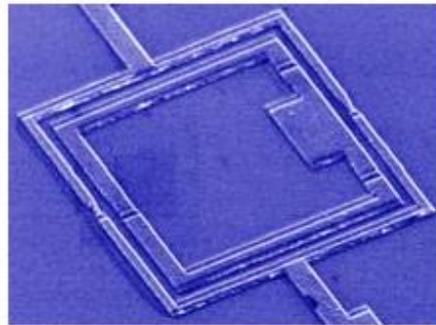
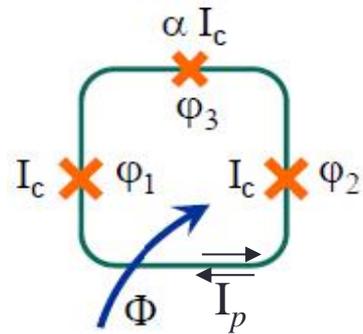


*in collaboration with
PTB, Braunschweig*

*π -SFQ –Toggle
Flip-Flop*

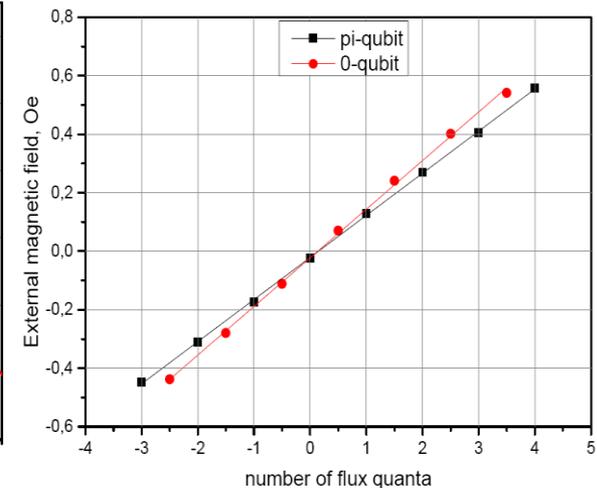
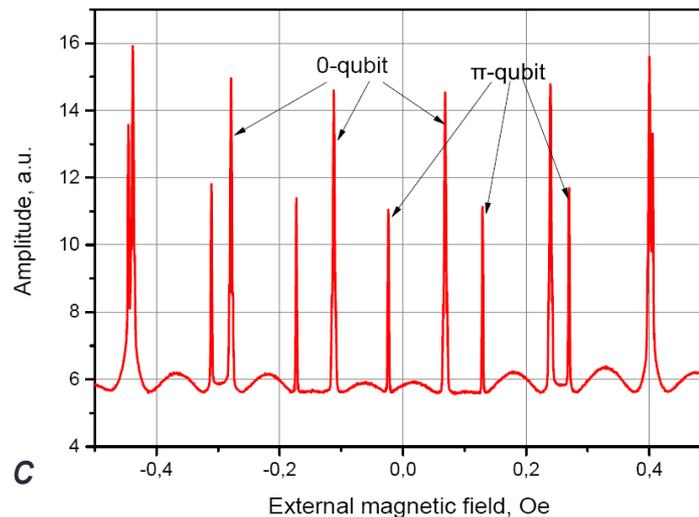


ПОТОВОКИЙ КУБИТ С SFS π -КОНТАКТОМ



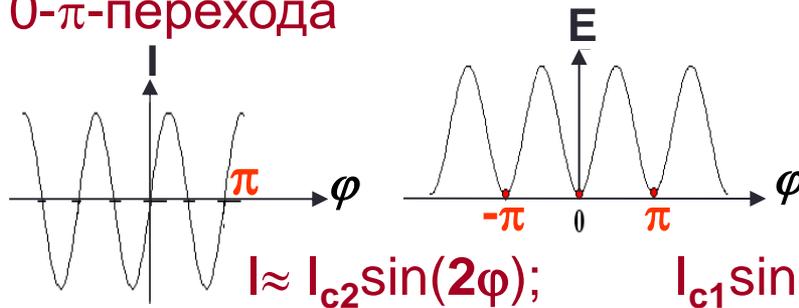
$$\Delta\omega_r = \pm \frac{\tilde{g}}{\omega_q - \omega_r}$$

 сдвиг частоты
 резонатора из-за связи с
 кубитом



π-периодическое джозефсоновское ток-фазовое соотношение

точка 0-π-перехода

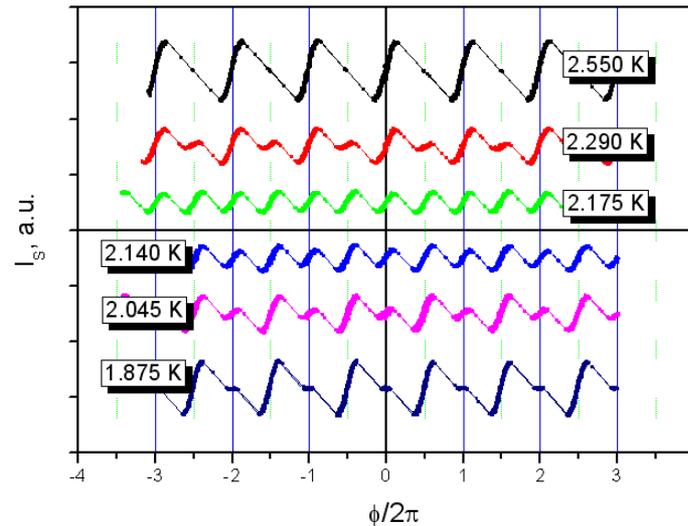
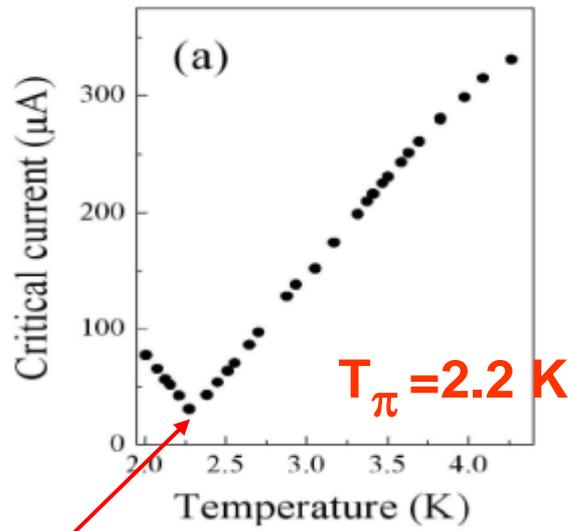


$$I = I_{c1} \sin \varphi + I_{c2} \sin(2\varphi) + \dots$$

π-periodical state

$$I \approx I_{c2} \sin(2\varphi); \quad I_{c1} \sin \varphi \rightarrow 0$$

Энергетические минимумы и при 0 и при π (разности фаз)



$$I = I_{c2} \sin(2\varphi); \quad I_{c1} = 0;$$

$\Phi_0 / 2$, i.e. $h/4e$ -periodicity

Высококчувствительные низкотемпературные ФМР эксперименты на микромасштабных ферромагнетиках

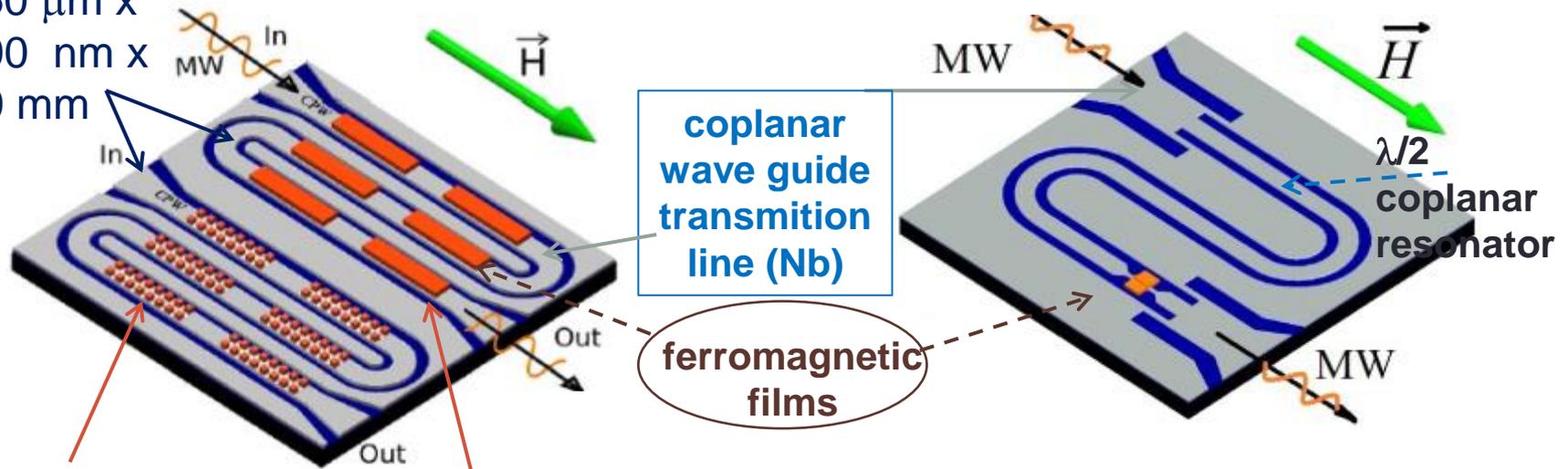
50-Ω-Nb

CPW

150 μm x

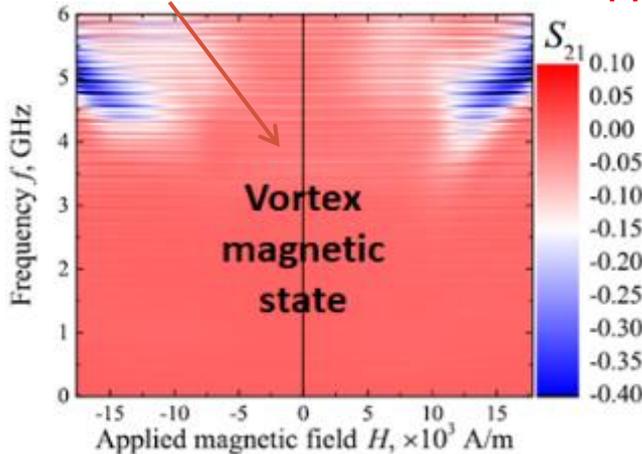
200 nm x

60 mm



5x5 μm²

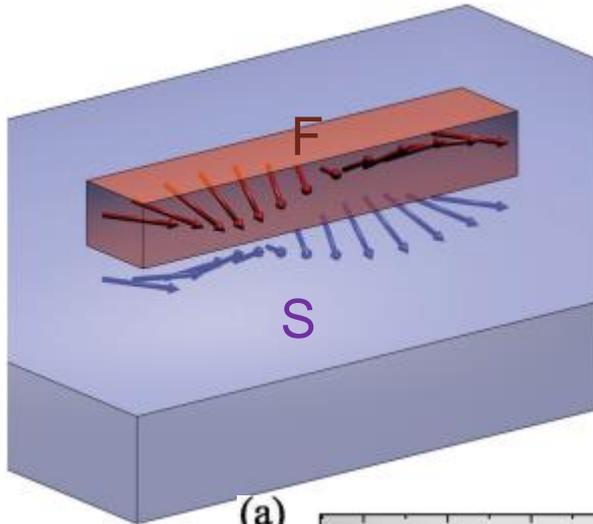
1100 x140 μm²



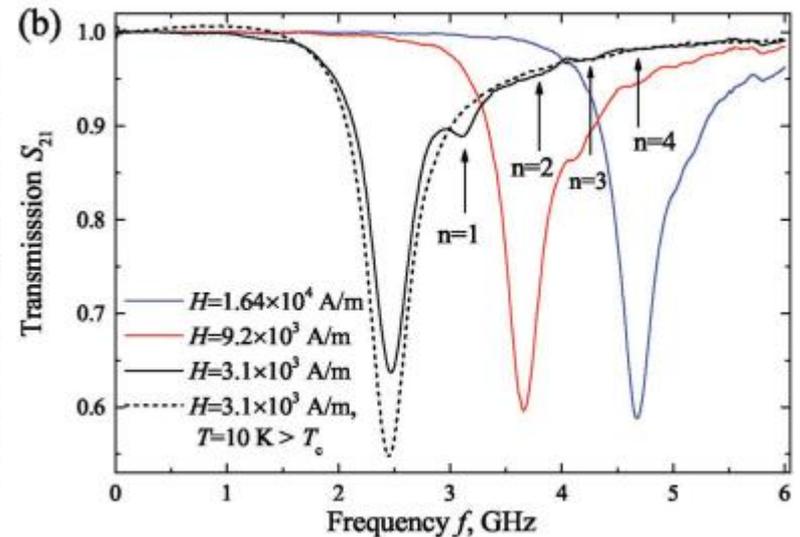
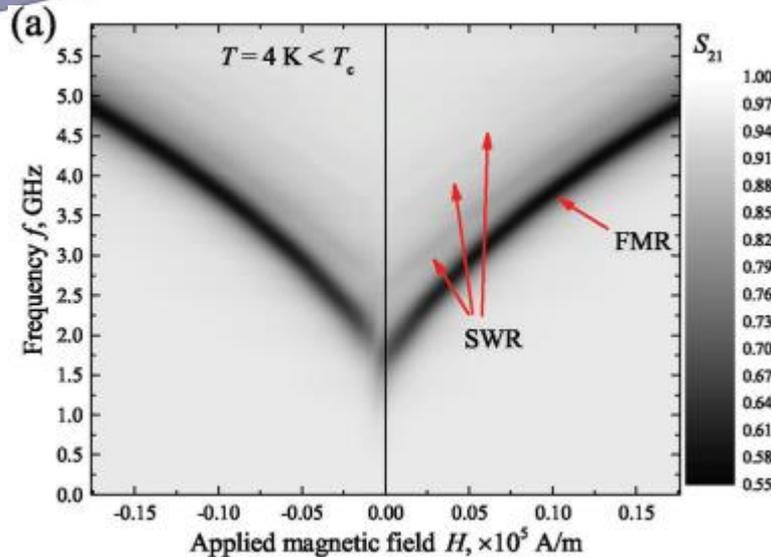
I.A. Golovchanskiy, V.V. Bolginov, N.N. Abramov et al,
Journal of Applied Physics 120, 163902 (2016).

I.A. Golovchanskiy, N. N. Abramov, V. S. Stolyarov et al,
Journal of Applied Physics 123, 173904 (2018).

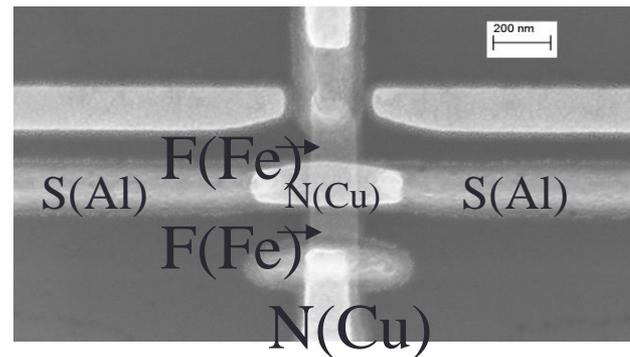
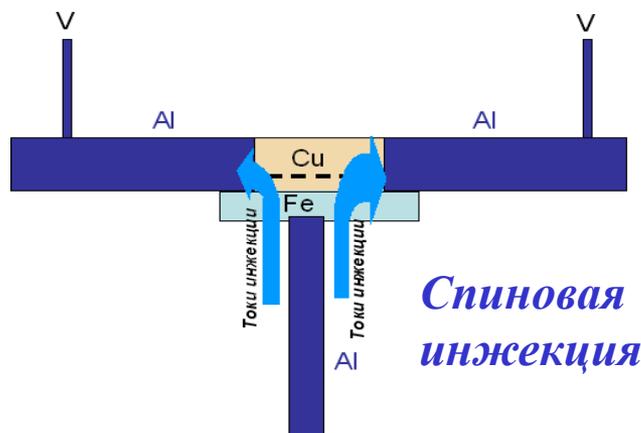
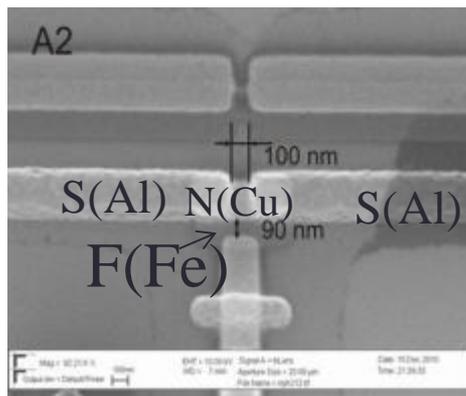
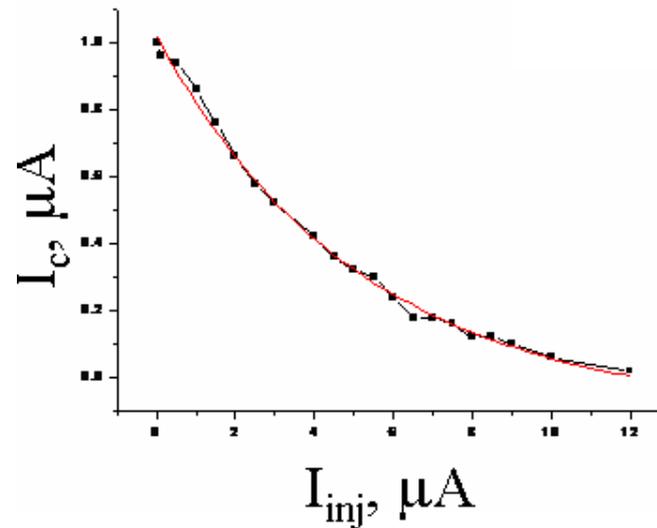
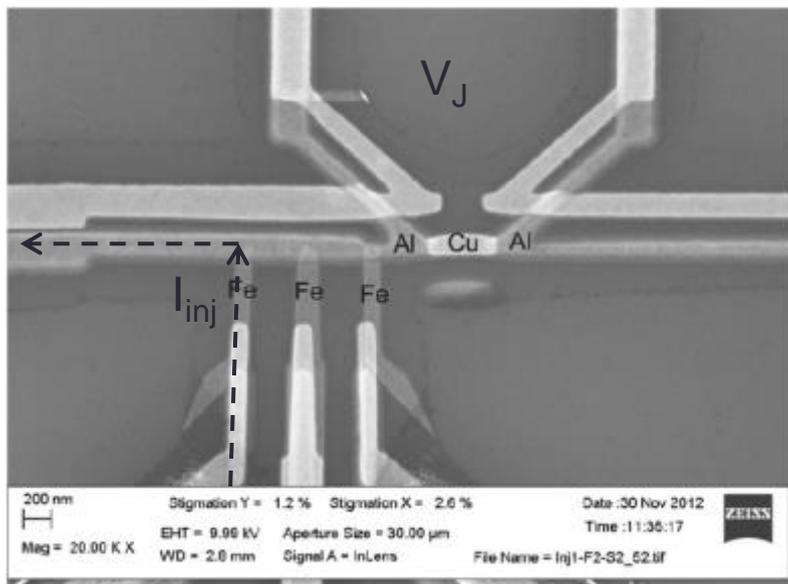
F-S гибридизация для применений в магнетике



Сверхпроводник индуцирует спиновый резонанс поверхностных магнитоэлектронных спиновых волн с необычным дисперсионным соотношением. Связано с взаимодействием спиновой волны с ее изображением, индуцированным сверхпроводящими (мейсснеровскими) токами.

$$f=f(k, H, F, d_F, \lambda_L, S, d_{S-F})$$


Спиновая инжекция в сверхпроводящие берега и джозефсоновский барьер – джозефсоновский триод



Заключение

- Гибридные S/F структуры обеспечивают новые эффекты на основе сосуществования сверхпроводимости и ферромагнетизма.
- Сверхпроводниковая RSFQ-электроника – самая быстрая и энергоэффективная цифровая электроника. Гибридные S/F структуры могут помочь решить ее главные проблемы: отсутствие эффективной памяти и большой размер базовой ячейки:
 - джозефсоновские SFS переходы – перспективные элементы памяти. Могут управляться импульсами поля и тока;
 - SFS π -переходы и π -SFQ-цепи с внутренним смещением могут помочь уменьшить размеры базовых RSFQ ячеек.
- SFS π -переходы перспективны для использования в сверхпроводящих кубитах.
- Эффекты S/F-гибридизации могут быть использованы для «подстройки» дисперсионных соотношений в магнонике.
- Спин-поляризованная инжекция эффективна для реализации джозефсоновских триодов.