

Развитие сверхпроводниковой электроники в НИИЯФ МГУ

М.Ю.Куприянов

Лаборатория криоэлектроники

Основатель **Лаборатории**
Криоэлектроники **(ЛКЭ).**
Основоположник научной школы
в области слаботочной
сверхпроводимости,
Ведущий научный сотрудник
НИИЯФ МГУ,
доктор физ.-мат. наук
Константин Константинович
Лихарев

Distinguished Professor of Physics, Stony Brook University,
USA

<http://rsfq1.physics.sunysb.edu/~likharev/personal/index.html>



ЛКЭ была создана в начале 1988 года на базе отраслевой лаборатории и научных групп, работавших под руководством д.ф.-м.н. К.К. Лихарева на физическом факультете МГУ (32 сотрудника) и в отделе микроэлектроники НИИЯФ МГУ (9 сотрудников).

С 1991 года лабораторией криоэлектроники руководит профессор Снигирев Олег Васильевич.

В 1999 году на базе группы, работающей в ОМЭ НИИЯФ МГУ, была создана лаборатория физики наноструктур, которую возглавил профессор Куприянов Михаил Юрьевич.



**Основные научные направления развития
сверхпроводниковой электроники в НИИЯФ МГУ
сконцентрированы на**

**теоретических и экспериментальных исследованиях
процессов в металлических наноструктурах и
устройствах на их основе манипулирующих
одинокими электронами
(одноэлектроника)
или одиночными квантами магнитного потока
(джозефсоника).**

Одноэлектронный транзистор

Государственная Дума Федерального Собрания
Российской Федерации
(2004-2007гг.)

Межфракционное депутатское объединение "НАУКА И ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ"

103265, г. Москва,
Георгиевский пер.д.2. к.639

тел.(095)292-59-60, т./ф.292-36-85
E-mail: alferov@duma.gov.ru

"12" октября 2004г.
Исх. № 6/н

Зав.лаб.НИИЯФ МГУ,
профессору Куприянову М. Ю.

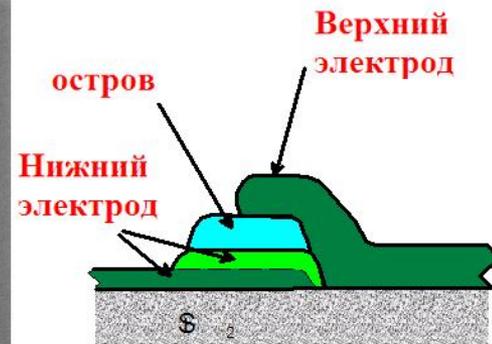
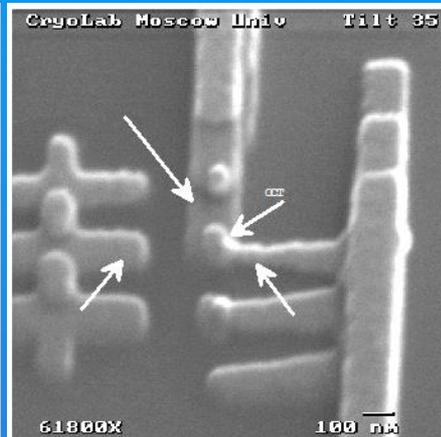
Глубокоуважаемый Михаил Юрьевич!

Приглашаю Вас принять участие в совещании по вопросу "Нанотехнологии - проблема развития и подготовка кадров", важнейшему элементу развития экономики и безопасности Российского государства, которое будет проходить 26 октября с.г. с 15.00 до 18.00 в зале 830 нового здания Государственной Думы, вход со стороны Георгиевского переулка, 8 этаж, начало регистрации в 14.30.

С уважением,
Председатель МДО
"Наука и высокие технологии"

Ж.И. Алферов

исп. Бабкин В.И. тел/ф.292-36-85



Зарядовый шум

$$\delta Q = (8 \pm 2) \times 10^{-6} e / \sqrt{\text{Hz}} @ 10 \text{ Hz} \quad \varepsilon = 30h$$

Это устройство успешно используется как сверхчувствительный электрометр для исследования распределения электрических полей, потенциалов и зарядов в самых разнообразных мезоскопических наноструктурах.

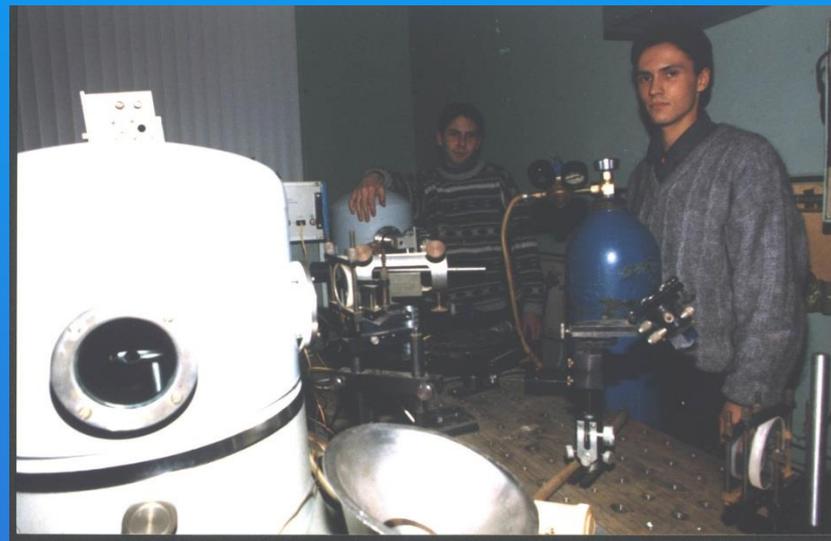
V.A. Krupenin, D.E. Presnov, A.B. Zorin and J. Niemeyer, *J. Low Temp. Phys.*, 118 (5/6), 287 (2000).

Проведенные в НИИЯФ МГУ теоретические работы по исследованию процессов в джозефсоновских структурах всегда занимали лидирующие позиции в мире и внесли существенный вклад в понимание физики процессов в этих устройствах.



Схематическое изображение ВТСП джозефсоновских переходов

В SSmS переходах было впервые показано, что перенос нормальной компоненты тока через такие структуры осуществляется посредством резонансного туннелирования через конечное число имеющихся в Sm прослойке локализованных состояний (ЛС). Была разработана методика оценки концентрации ЛС. Построенная микроскопическая теория убедительно продемонстрировала, что взаимодействие двух резонансных процессов – туннелирование через ЛС и туннелирование в андреевские связанные состояния в электродах приводят к подавлению резонансных каналов транспорта сверхтока в таких структурах.



Лазерная напылительная установка для нанесения ВТСП пленок

Технология джозефсоновских контактов на основе ВТСП

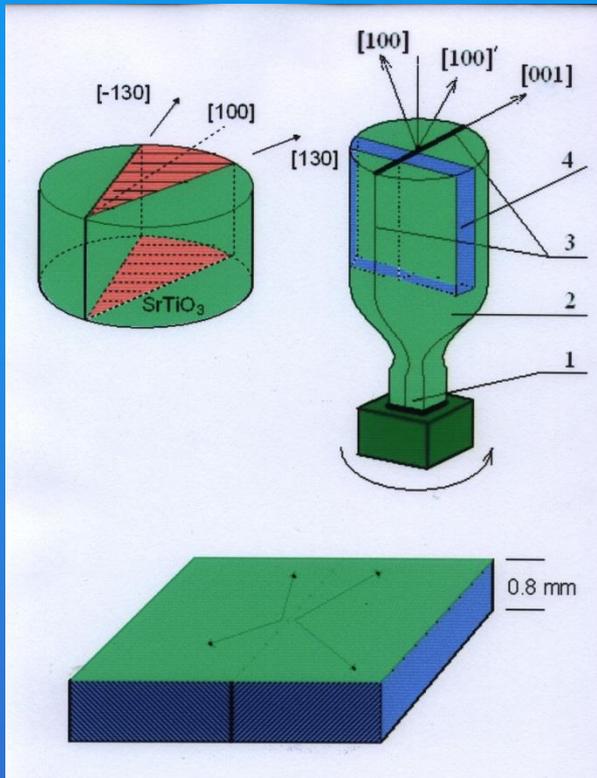
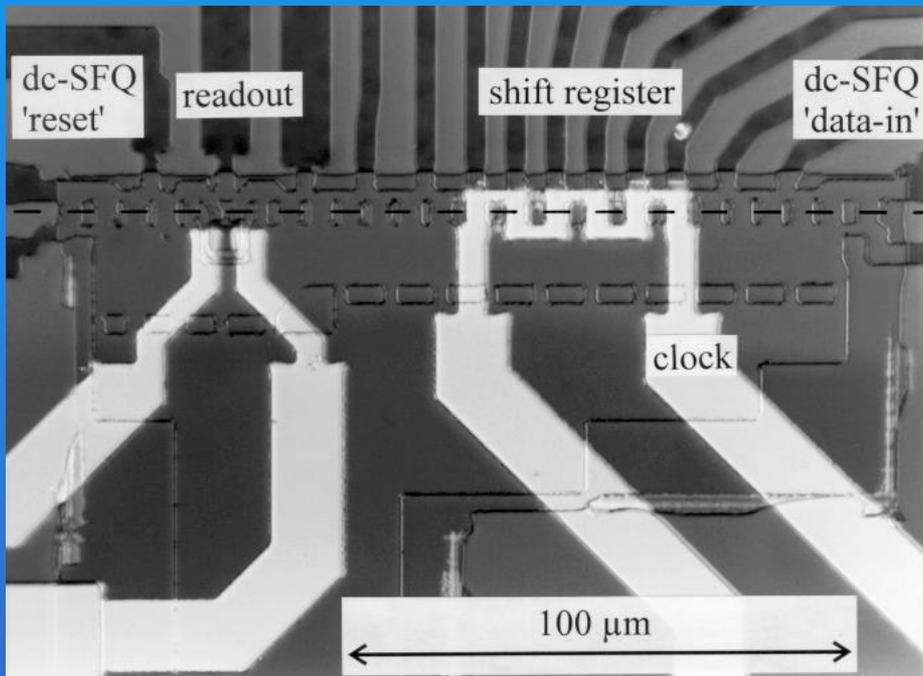


Схема получения обычных и ростовых бикристаллических подложек

Получение бикристаллических подложек методом выращивания из подвижной зоны плавления позволило получить джозефсоновские переходы с рекордными значениями характеристического напряжения $I_c R_n$ равного 190 -260 мкВ для угла разориентации 24° и 90 – 120 мкВ для угла разориентации 37° при плотности критического тока 2×10^4 А/см². Для сравнения, джозефсоновские переходы, полученные на обычных бикристаллических подложках, имеют значения $I_c R_n$ равные 50 -60 мкВ для 37° разориентации.

SQUID микроскоп

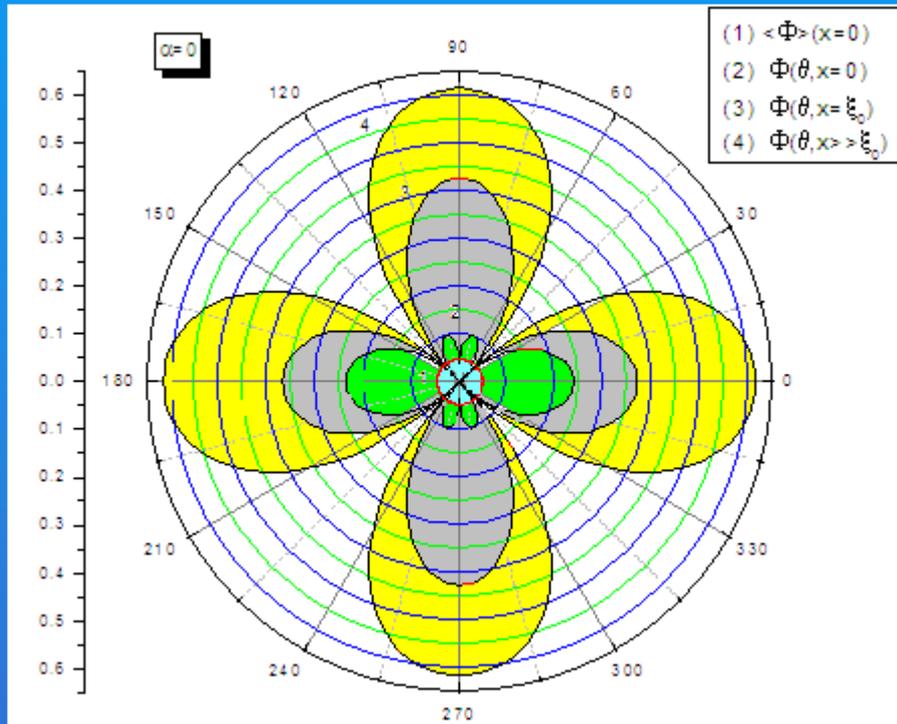
На базе бикристаллических подложек были спроектированы и протестированы ключевые элементы БОК на ВТСП джозефсоновских переходах – балансный компаратор и регистр сдвига. По количеству активных джозефсоновских элементов регистр сдвига является самой большой микросхемой, выполненной из ВТСП материалов.



B.Oelse, B.Ruck, E.Sodtke, A.F.Kirichenko, M.Yu.Kupriyanov, W.Pruseit A 3 bit single-flux-quantum shift register based on high-Tc bicrystal Josephson junctions operating at 50 K. Appl.Phys.Lett. v.70, p.658-660, (1997).

Фотография регистра сдвига на ВТСП джозефсоновских переходах
Пунктирная линия – место локализации шва бикристаллической
подложки.

Аномальный эффект близости - подавление анизотропных сверхпроводящих корреляций и генерировании изотропного бесщелевого сверхпроводящего состояния.



Golubov A. A., Kupriyanov M. Y.
Anomalous proximity effect in d-wave superconductors // Письма ЖЭТФ. — 1998. — Vol. 67, no. 7. — P. 478–483.

Golubov A. A., Kupriyanov M. Y.
Surface electron scattering in d-wave superconductor // Письма в ЖЭТФ. — 1999. — Vol. 69, no. 3. — P. 242–246.

Изменение симметрии сверхпроводящего состояния по мере приближения к диффузной границе ВТСП материала при угле α между нормалью к границе и кристаллографическим направлением «а» равном нулю. Желтым цветом обозначено состояние с *d*-симметрией, существующее в глубине сверхпроводника. Зеленый цвет показывает симметрию того же состояния на диффузной границе, а голубой – бесщелевое *s*-состояние, возникшее вблизи границы - *аномальный эффект близости*.

Вывод - назад в НТС

Элементная база НТС сверхпроводниковой электроники

1. Туннельные SNIS структуры NbAl-AlO_x-Nb

Микроскопическая теория – 1995 *Proximity effect in superconductor-insulator-superconductor Josephson tunnel-junctions - theory and experiment / A. A. Golubov, E. P. Houwman, J. G. Gijsbertsen, V. M. Krasnov, J. Flokstra, H. Rogalla, and M. Yu. Kupriyanov. // Phys. Rev. B. , 1995, Vol. 51, P. 1073–1089.*

2. Двухбарьерные SINIS структуры

Микроскопическая теория – 1988 *Куприянов М. Ю., Лукичев В. Ф. Влияние прозрачности границ на критический ток грязных ss's структур // ЖЭТФ—1988, Т. 94, С. 139–149.*

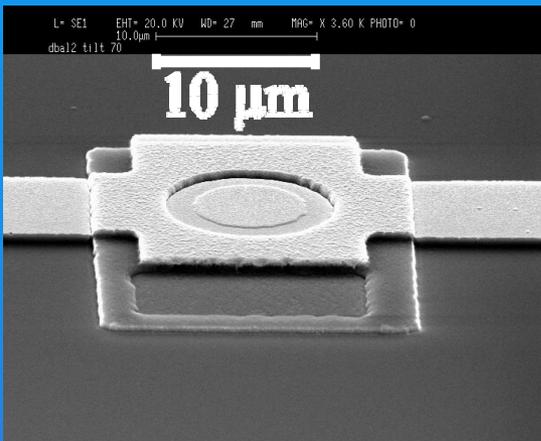
3. Структуры Nb- α Si-Nb

Микроскопическая теория – 1988 *Гудков А. Л., Куприянов М. Ю., Лихарев К. К. Свойства джозефсоновских переходов с прослойкой из аморфного кремния // ЖЭТФ, 1988, Т. 94, С. 319–332.*

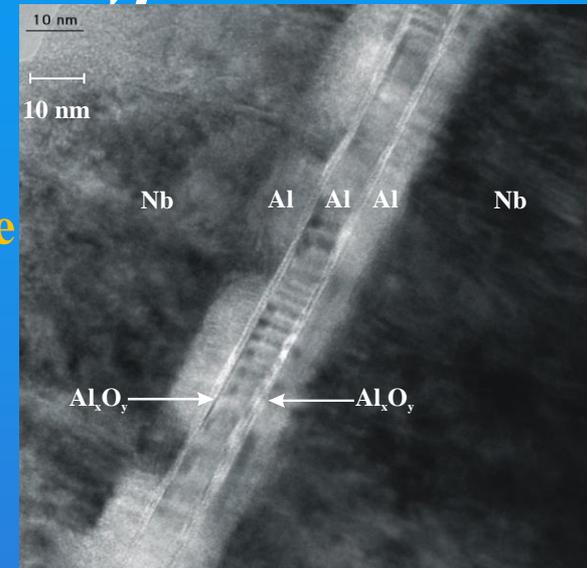
4. SFS контакты

Микроскопическая теория – 1991 *Буздин А. И., Куприянов М. Ю. Джозефсоновский контакт с ферромагнитной прослойкой // Письма в ЖЭТФ, 1991, Т. 53, С. 308–312.*

Теория двухбарьерных туннельных джозефсоновских структур

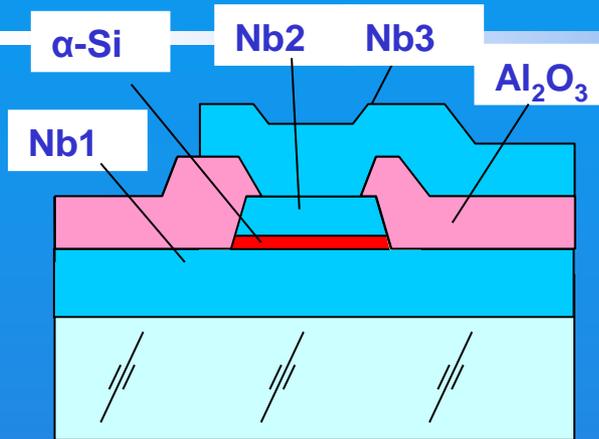


Вид сверху и поперечное сечение перехода, полученное методами туннельной микроскопии.

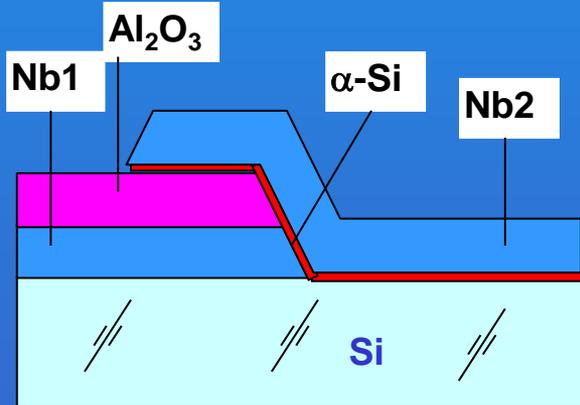
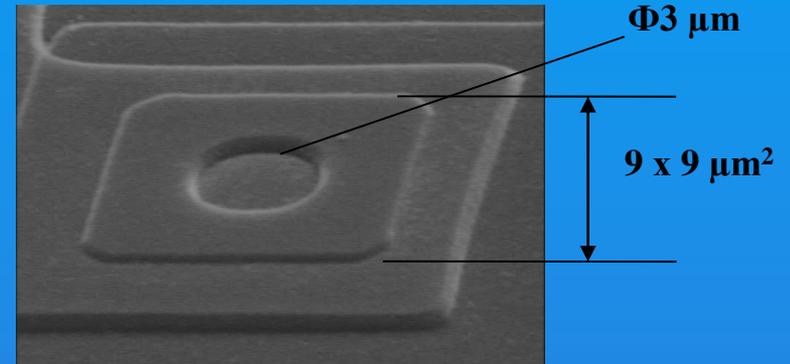
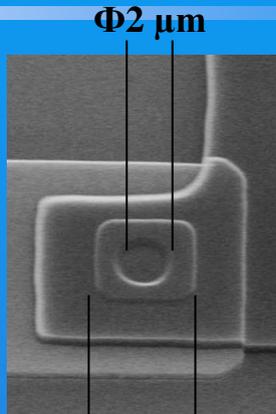


Двухбарьерные структуры типа NbAl/AlO_x/Al/AlO_x/Nb могут быть изготовлены при незначительной модификации имеющихся технологических маршрутов стандартной и хорошо развитой технологии туннельных переходов. Работы по становлению технологии изготовления устройств на двухбарьерных переходах велись под руководством сотрудников МГУ в рамках европейских проектов сразу в нескольких научных центрах Германии, Голландии, Швеции и в ИРЭ РАН. Они увенчались убедительной демонстрацией работоспособности устройств, содержащих более 70000 активных джозефсоновских элементов на чипе. Тем самым, был фактически осуществлен прорыв на существенно более высокой уровень интеграции сверхпроводниковых микросхем.

Структуры Nb- α Si-Nb



SNS sandwich structure

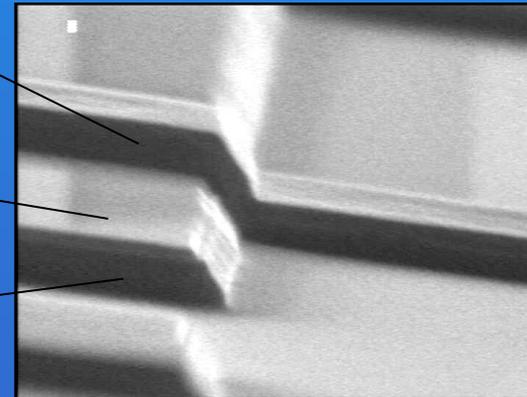


SNS edge junction,
resonant Josephson junction with direct
conductivity

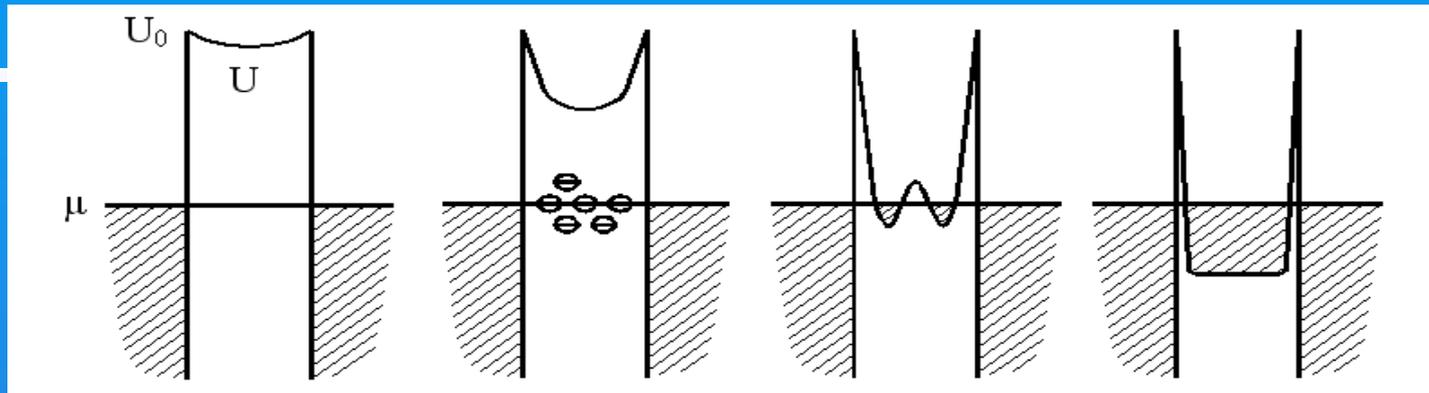
$\text{Nb}^{\text{II}}/\alpha\text{-Si}$

Al_2O_3

Nb^{I}



Структуры Nb- α Si-Nb



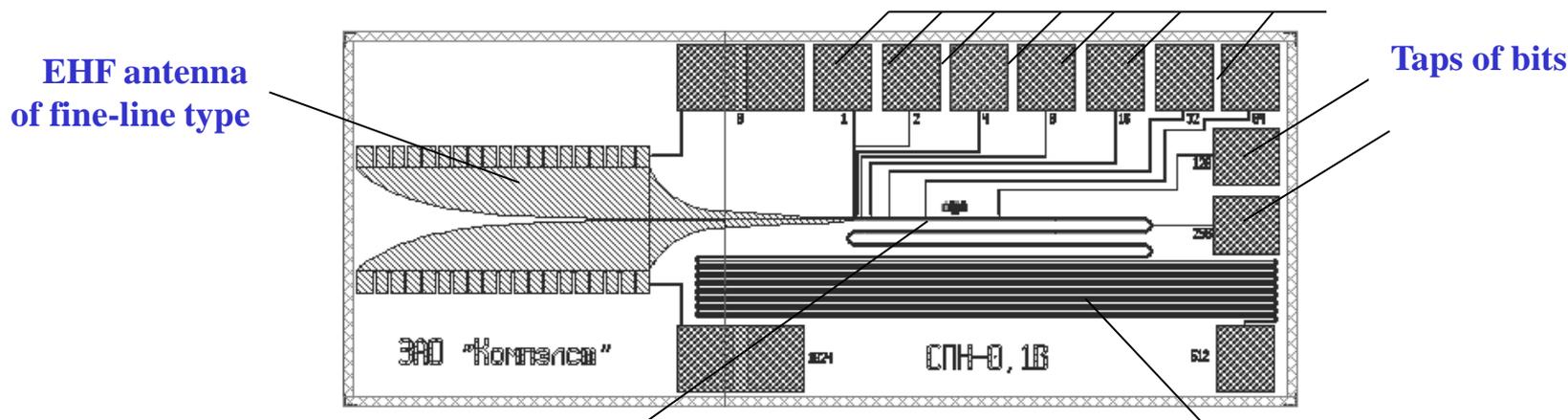
Изменение структуры туннельного барьера из полупроводника с ростом концентрации примесных атомов (Nb, W).

Гудков А. Л., Куприянов М. Ю., Самусь А. Н. Свойства планарных джозефсоновских переходов Nb/ α -Si/Nb с различной степенью легирования α -Si-прослойки // ЖЭТФ, 2012, Т 141, С. 939–952.

При изменении степени легирования α -Si-прослойки свойства джозефсоновских переходов полностью меняются. Изменяется механизм транспорта тока и изменяется форма вольт-амперной характеристики таких переходов. В случае полностью вырожденной α -Si-прослойки были получены джозефсоновские переходы с непосредственной проводимостью SNS-типа. В случае меньшей степени легирования α -Si-прослойки были получены джозефсоновские переходы, в которых наблюдался резонансный механизм транспорта тока через примесные центры. Продемонстрировано изменение высокочастотных свойств таких переходов. Проведенные исследования показали, что эти переходы наиболее близки к джозефсоновским переходам SINIS-типа.

Superconducting IC for the standard of alternating voltage synthesizer (НИИФП, ЗАО КОМПЭЛСТ)

General view of IC design of alternating voltage synthesizer on the basis $N = 1024$ JJs array. SNS type Josephson junctions included in superconducting slot-hole line. The sizes of a crystal are $15 \times 6 \text{ mm}^2$.



SNS JJs array. The sizes of junctions are $9 \times 9 \mu\text{m}^2$ ($3 \times 3 \mu\text{m}^2$) $N = 4 \times 256 = 1024$

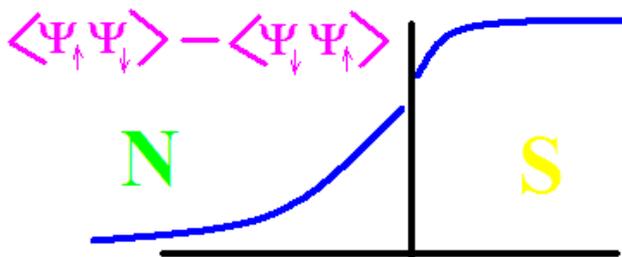
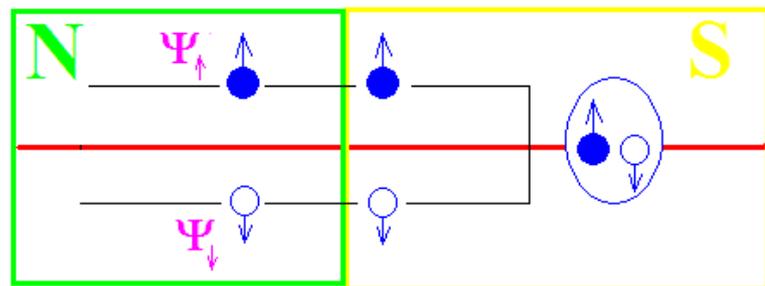
Short-circuited long line of EHF load. $L = 15 \text{ cm}$.

Electric parameters of SCIC

Critical current of SNS junction	I_c	4 - 8 mA
Working frequency.	f_{rf}	65 - 75 GHz
Quantum current steps amplitude.	I_1	2 - 4 mA
Number of bits.	n	11
Synthesized voltage on junction.	V_1	$\pm 150 \mu\text{V}$
The total synthesized voltage.	V	$\pm 150 \text{ mV}$
Frequency of synthesized voltage.	f	0,001 - 20 Гц

Сверхпроводниковая спинтроника

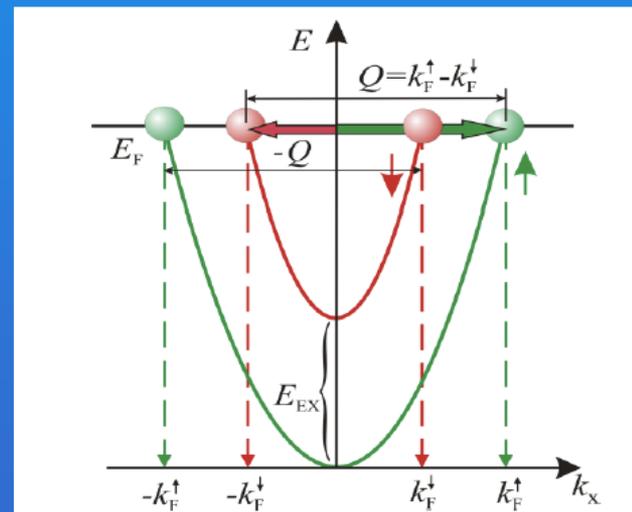
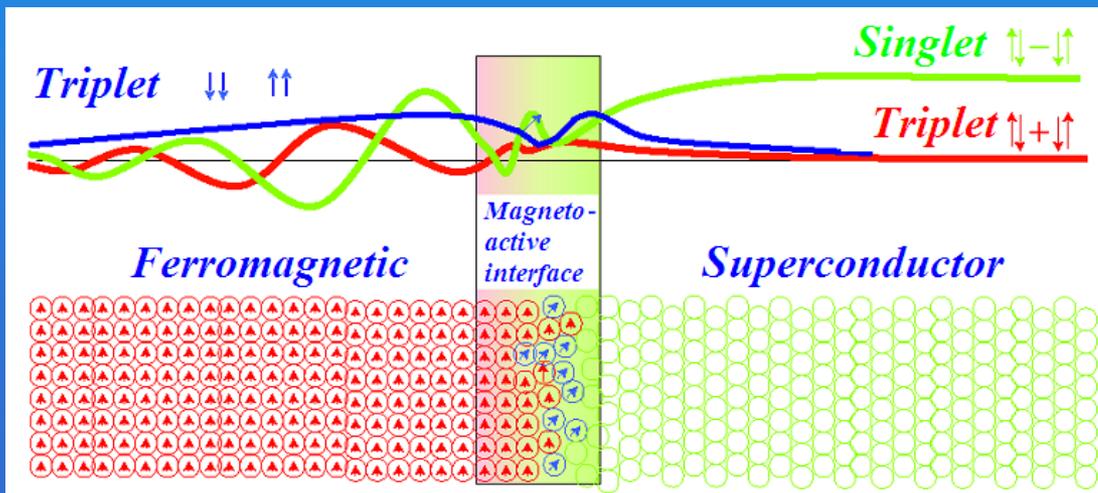
Эффект близости



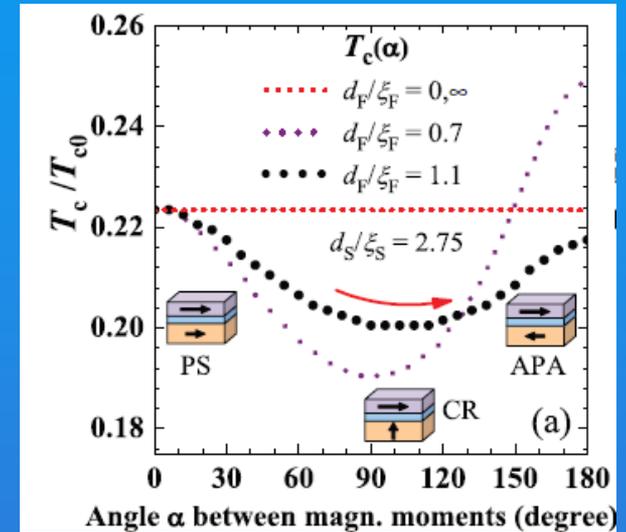
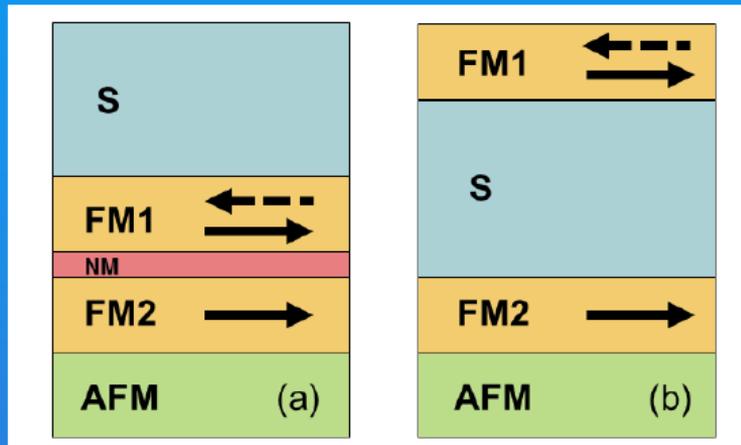
$$\xi_N = \sqrt{D_N / 2\pi T_c}$$

$$\xi_F = \sqrt{D_F / 2\pi T_c}$$

$$\xi_H = \sqrt{D_F / 2H}$$



Управление критической температурой



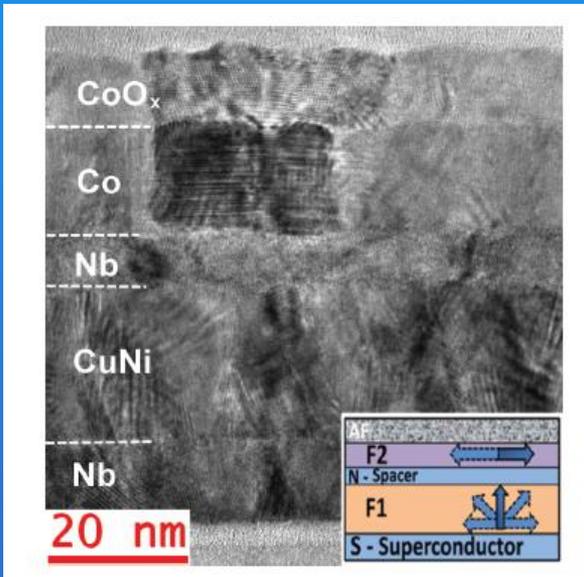
Fominov Y. V., Golubov A. A., Kupriyanov M. Y. Triplet proximity effect in FSF trilayers // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2003. — Vol. 77, no. 9. — P. 609–614.

Ya V. Fominov, A. A. Golubov, T. Yu Karminskaya, M. Yu Kupriyanov, R. G. Deminov, and L. R. Tagirov. Superconducting triplet spin valve. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 91(6):329–333, 2010.

SFF spin valves for control of the critical temperature of S film.

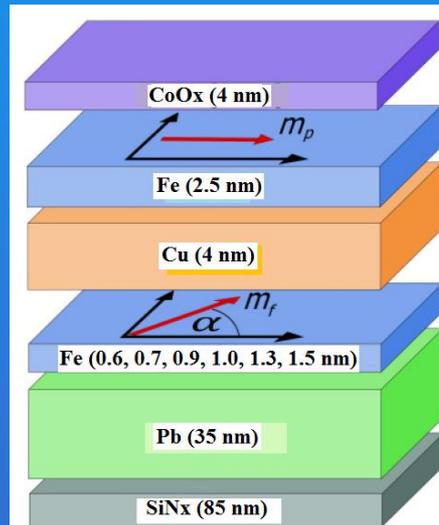
V. I. Zdravkov et al,
Phys. Rev. B
87, 144507 (2013)

$$\Delta T_C - 10 \text{ mK}$$



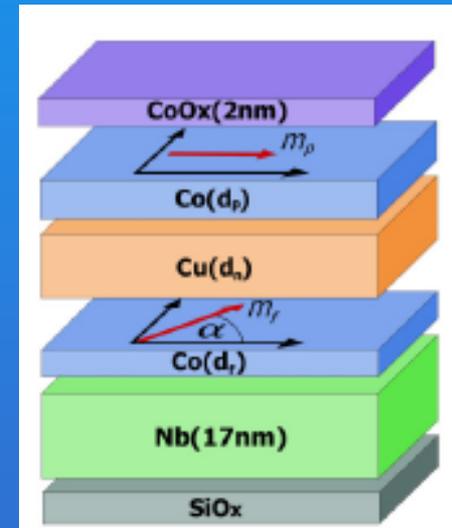
P.V. Leksin et al,
Phys. Rev. Let.
109, 057005 (2012)

$$\Delta T_C - 50 \text{ mK}$$



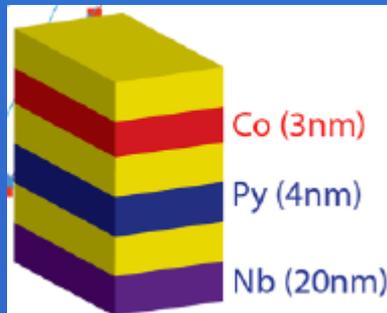
A.A. Jara et al.,
Phys. Rev. B
89, 184502 (2014)

$$\Delta T_C - 20 \text{ mK}$$



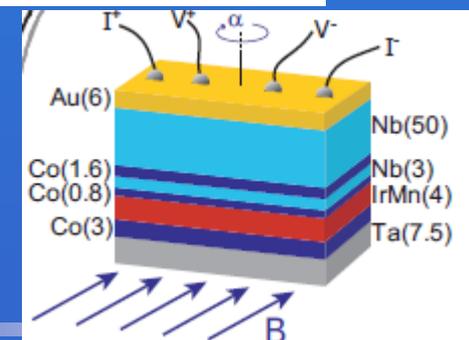
X. L. Wang et al.,
Phys. Rev. B
89, 184508 (2014)

$$\Delta T_C - 120 \text{ mK}$$

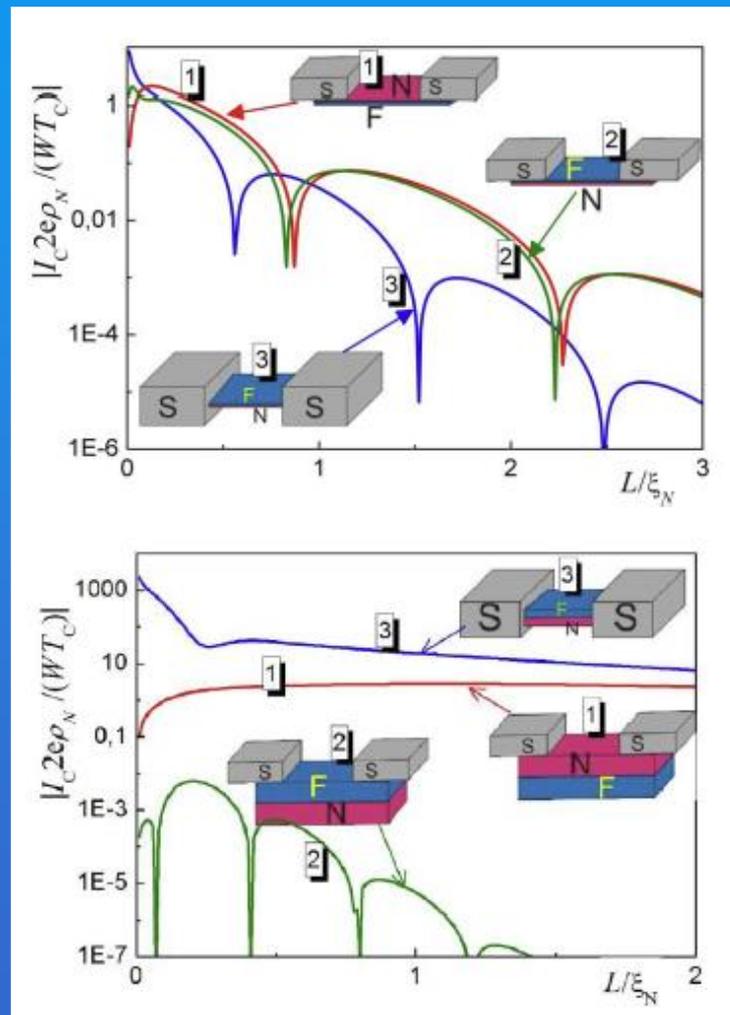
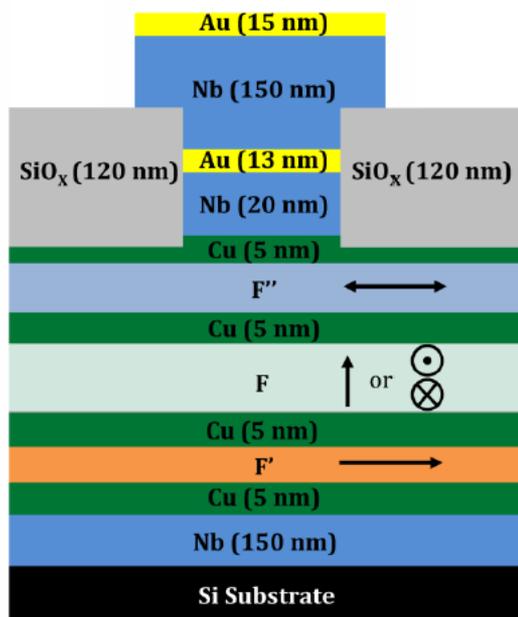
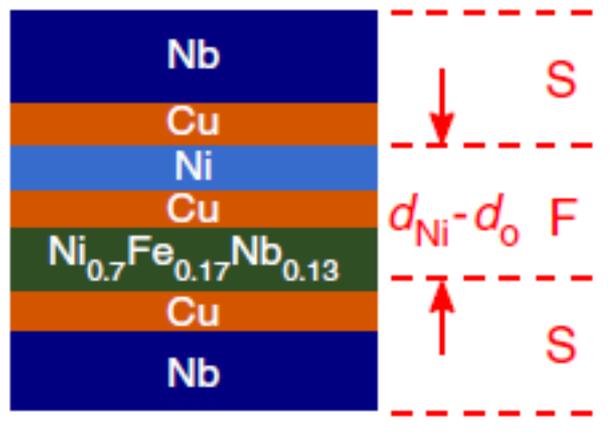


M.C. Floxtra et al.,
cond. mat. arXiv
1404.2950 (2014)

$$\Delta T_C - 10 \text{ mK}$$



Управление критическим током джозефсоновских структур



Основные трудности в практическом использовании

1. **Большие значения обменной энергии**
2. **Много границ – маленький критический ток и характерные частоты**
3. **Медленные времена перемагничивания ферромагнетиков**

**Над решением этих проблем мы
работаем в настоящее время
ориентируясь на
возможные практические
применения
сверхпроводниковых вентилей!**

1. Большие значения обменной энергии -

использование искусственных ферромагнетиков – многослойных FNFN...NF и SFSSF...SF структур тонкими N, F и S слоями

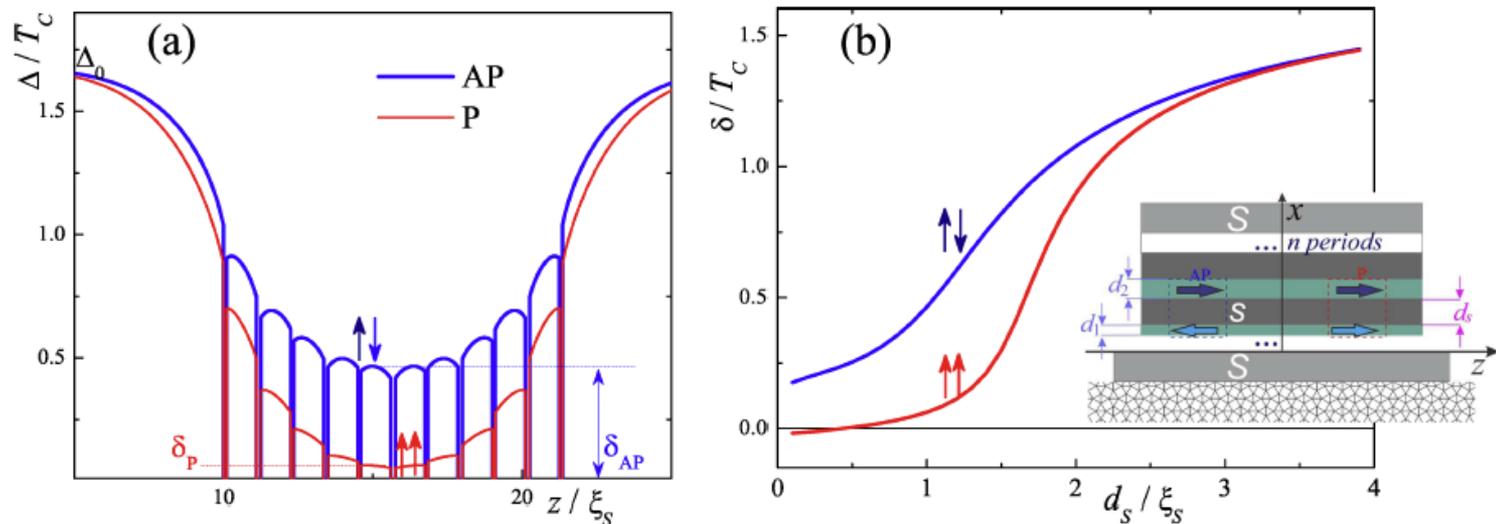
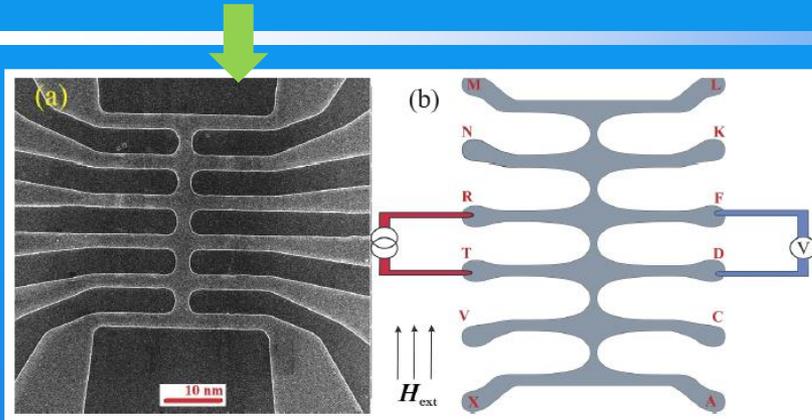


Figure 2: (a) The depth profile of the superconducting pair potential amplitude of the S/[F₁/s/F₂/s]_S/F₁/S structure in the P and AP cases. (b) The amplitudes of the superconducting pair potential in the middle of the weak link for the same situations. Inset – schematic representation of the considered stack structure.

Сверхпроводниковые нейронные сети

Синапсы таких устройств – управляемые индуктивности



Нейроны –
модифицированные
интерферометры

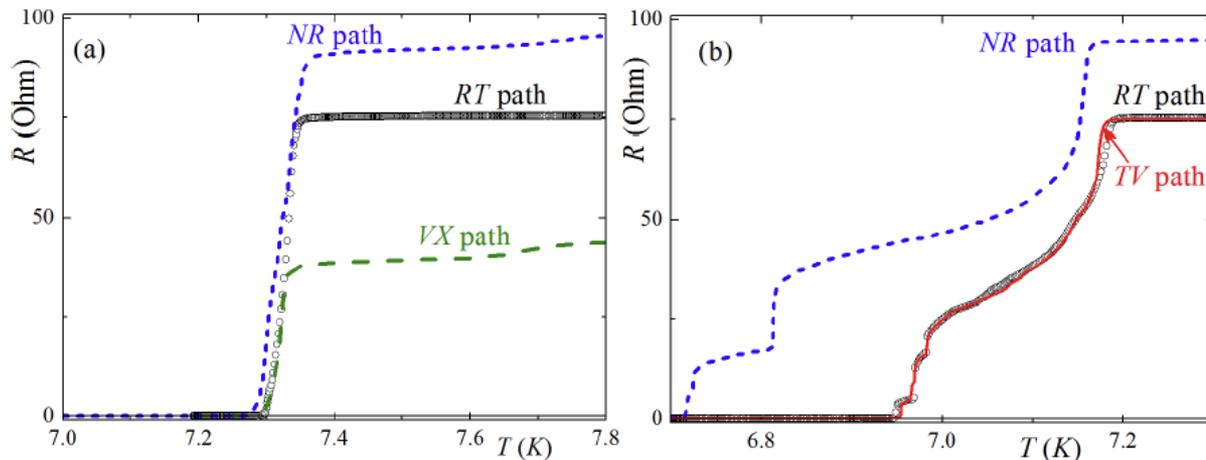
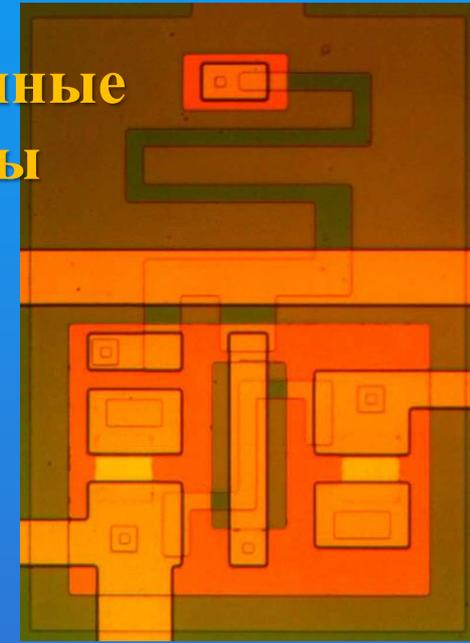
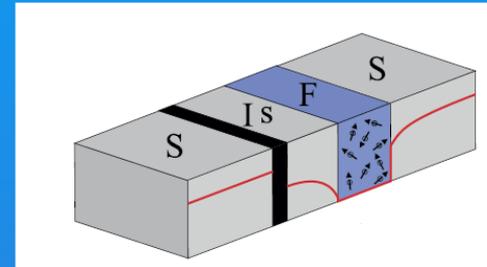
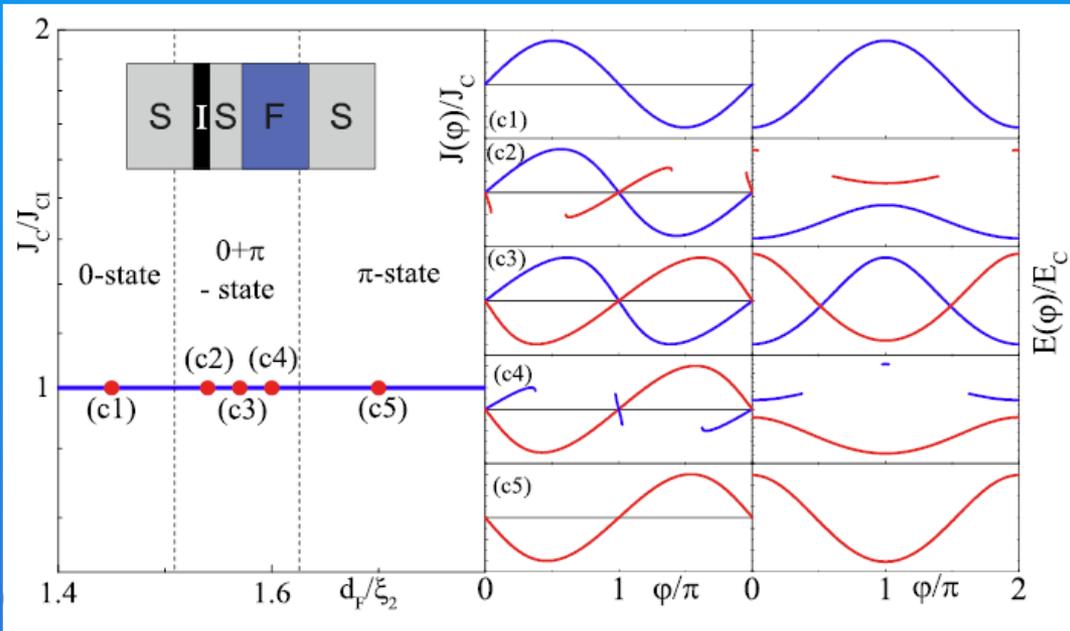


Figure 5: Resistance as a function of the temperature (a) without an initial magnetization of the sample, at a current $I = 20 \mu\text{A}$, and (b) after remagnetization in the longitudinal direction, at a current $I = 1 \text{ mA}$. Each contact in the “centipede-like” structure was marked with a letter. Therefore, each measurement was denoted by a pair of letters (“RT”, “TV”, etc.).

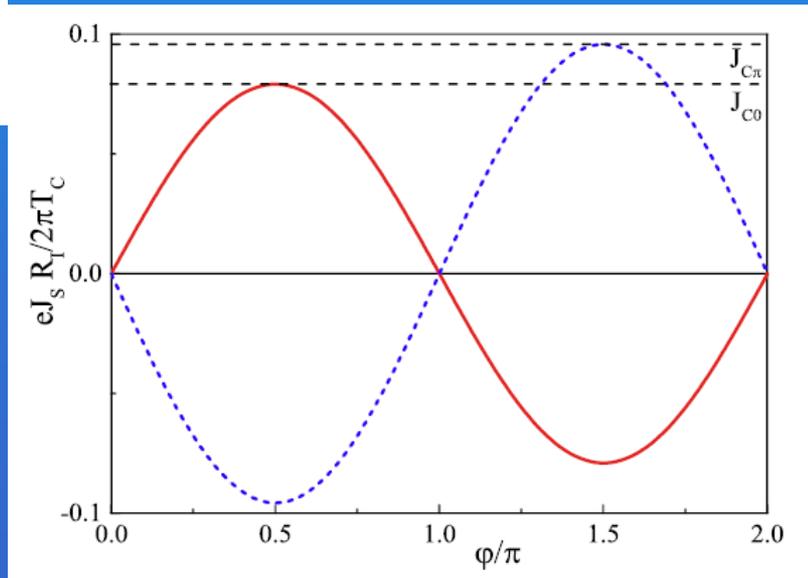
A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, and M. V. Tereshonok, “Adiabatic superconducting cells for ultra-low-power artificial neural networks,” *Beilstein journal of nanotechnology*, vol. 7, pp. 1397–1403, 2016.

S. Bakurskiy, M. Kupriyanov, N. V. Klenov, I. Soloviev, A. Schegolev, R. Morari, Y. Khaydukov, and A. Sidorenko. Controlling the proximity in a co/nb multilayer: the properties of electronic transport. *Beilstein journal of nanotechnology*, 11:1336–1345, 2020.

2. Много границ – маленький критический ток и характерные частоты



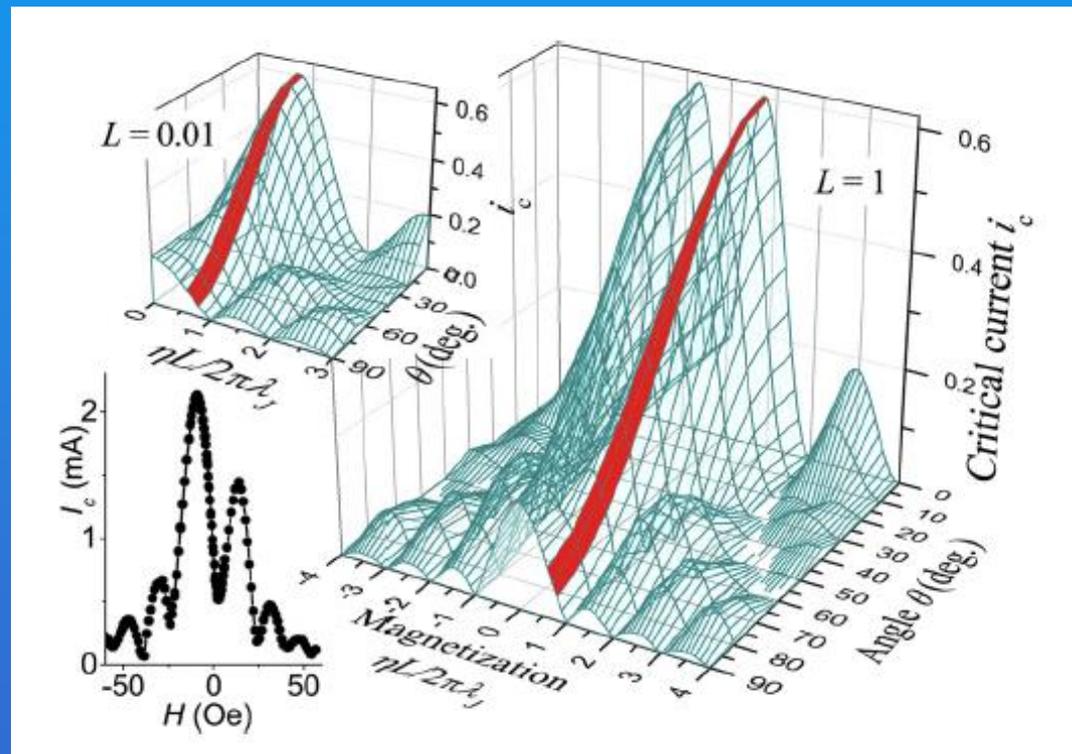
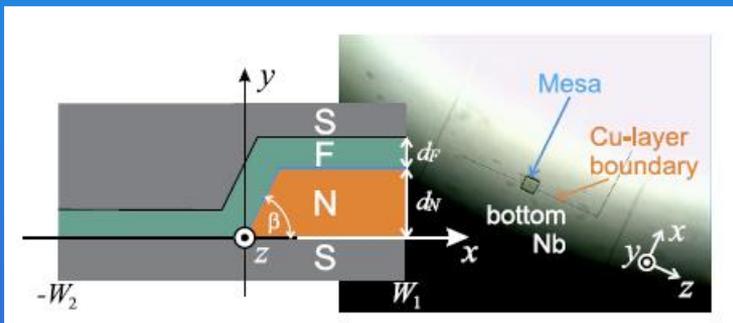
S. V. Bakurskiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, N. G. Pugach, M. Yu Kupriyanov, and A. A. Golubov. Protected 0- π states in sisfs junctions for josephson memory and logic. *Applied Physics Letters*, 113(8):082602–1–082602–5, 2018.



3. Медленные времена перемагничивания ферромагнетиков

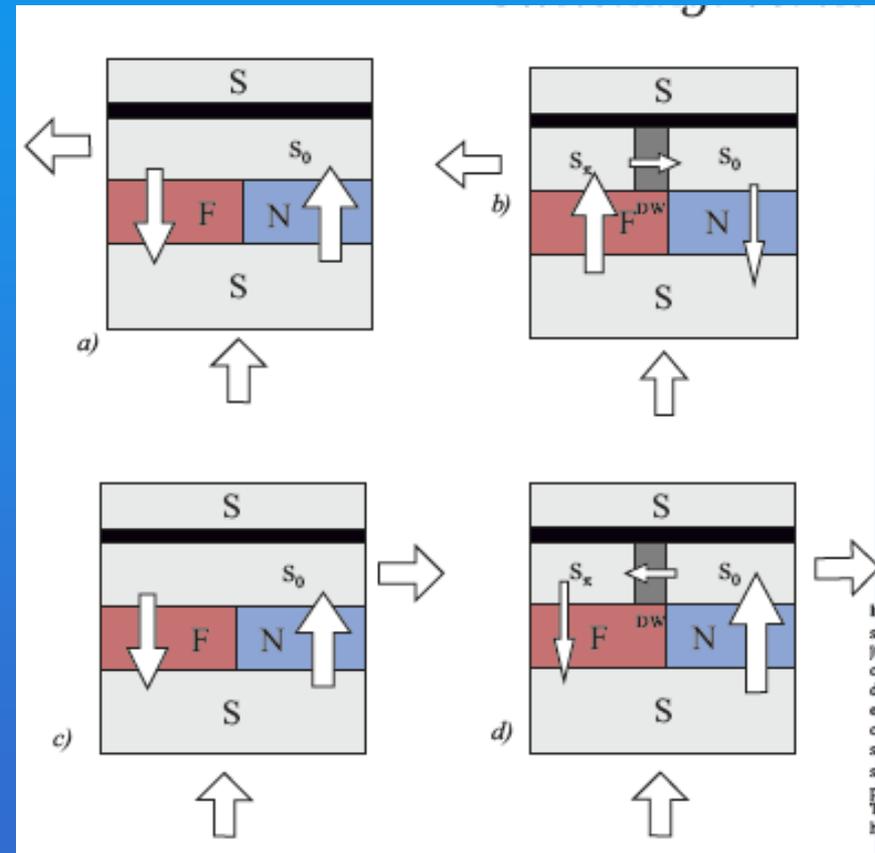
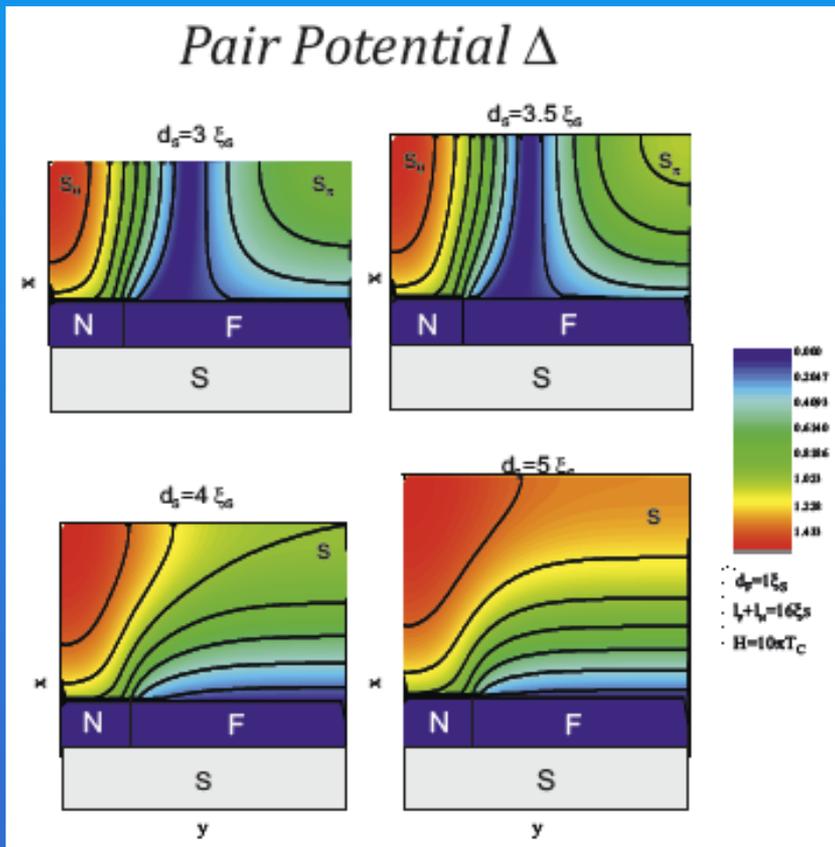
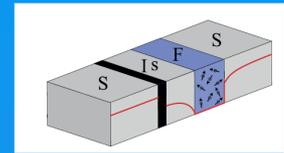
- надо исключить перемагничивание при работе устройств

rotary valve



I. I. Soloviev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, V. V. Bol'ginov, V. V. Ryazanov, M. Yu Kupriyanov, and A. A. Golubov. Josephson magnetic rotary valve. *Applied Physics Letters*, 105(24):242601, 2014.

Superconducting phase domains for memory applications



S. V. Bakurskiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, M. Yu Kupriyanov, and A. A. Golubov. Superconducting phase domains for memory applications. *Applied Physics Letters*, 108(4):042602–1–042602–5, 2016.

Что осталось «за бортом» из-за ограничений по времени?

1. – Структуры легированный кремний на изоляторе – устройства для исследования свойств больших биологических молекул; оноэлектроника на одиночных атомах и их кластерах.
2. Теория процессов в сверхпроводниковых болометрах.
3. Влияние границ на свойства сверхпроводников с р-типом симметрии потенциала спаривания.
4. Устройства приема сигналов на базе би-СКВИДов.
5. Методы расчета индуктивностей и взаимных индуктивностей многослойных и многосвязанных структур – необходимый этап проектирования сверхпроводниковых устройств

Над чем работаем сейчас!

1. **Сверхпроводниковые нейроны, синапсы, нейронные сети.**
2. **Цифровые сверхпроводниковые устройства на новой элементной базе – носители информации - фазовые кинки вместо квантов магнитного потока.**
3. **Разработка устройств для неразрушающего считывания и записи информации в сверхпроводниковые кубиты.**
4. **Джозефсоновские контакты с топологическими изоляторами и нанопроводами сложного фазового состава в области слабой связи.**
5. **Совершенствование методов экстракции параметров из спроектированных микросхем сверхпроводниковых устройств.**

Проведенный цикл работ отмечен

2005 год - М.Ю.Куприянов, Снигирев О.В. Премия имени М.В. Ломоносова I степени за цикл работ "Микроскопическая теория джозефсоновских контактов и ее реализация в сверхпроводниковой нанотехнологии и научном приборостроении".

2015 год - Кленов Н.В., Соловьев И.И., Бакурский С.В. Премия Правительства Москвы молодым ученым за цикл работ «Разработка энергоэффективной сверхпроводниковой и полупроводниковой элементной базы для систем детектирования сигнала, приема и обработки информации».
Бакурский С.В. Award for the best young researchers presentation at EUCAS 2015 in section «Electronics» from The European Society for Applied Superconductivity

2020 год - Соловьев И.И., Персональная стипендия им. Ж.И. Алферова для молодых ученых в области физики и нанотехнологий

2020 год - Соловьев И.И., Премия имени И.И. Шувалова II степени за докторскую диссертацию «Сверхпроводящие квантовые интерферометры для устройств приема сигнала и обработки информации»

Спасибо за внимание

Источники финансирования до 2023 года

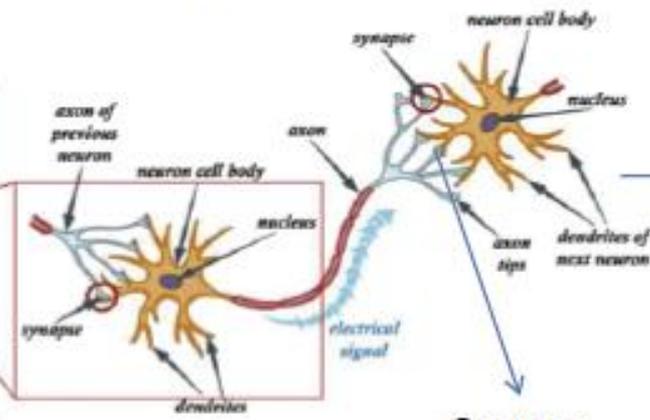
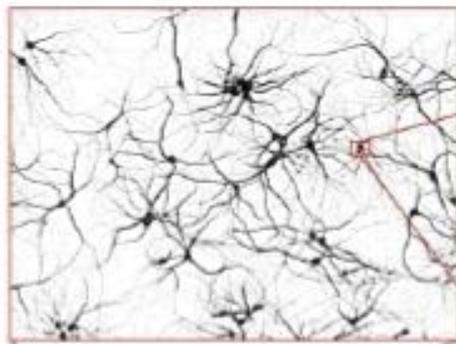
Госбюджетная тема Исследование процессов в наноструктурах и устройствах на их основе, (1 января 2012 - 31 декабря 2023),
Руководитель: Куприянов М.Ю.

Грант РФФ Физические и инженерные основы вычислителей на фон Неймановской архитектуры на базе сверхпроводниковой спинтроники, (20 мая 2020 - 31 декабря 2023) Руководитель: Соловьев И.И.

Грант РФФ Пост-кремниевая сверхпроводниковая электроника на базе наноразмерных джозефсоновских контактов для систем обработки больших объемов данных, (20 мая 2020 - 31 декабря 2022),
Руководитель: Куприянов М.Ю.

Госбюджетное финансирование по разделу «квантовые технологии» в рамках Школы "Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина", (1 января 2021 - 31 декабря 2023)

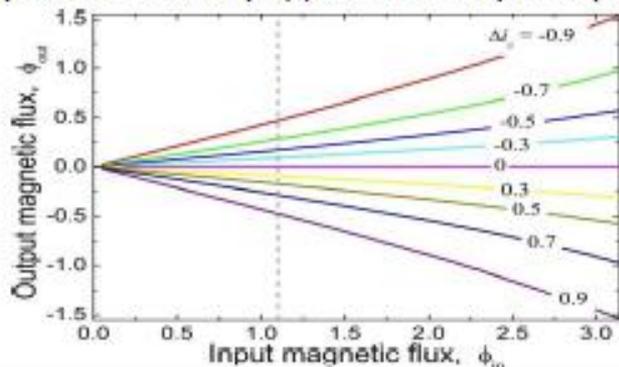
Нейронные сети



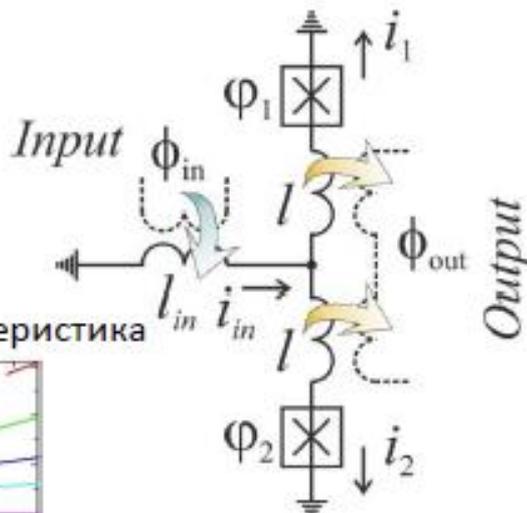
humans don't need features

Copyright © 2014 Victor Lashin

Настраиваемая передаточная характеристика



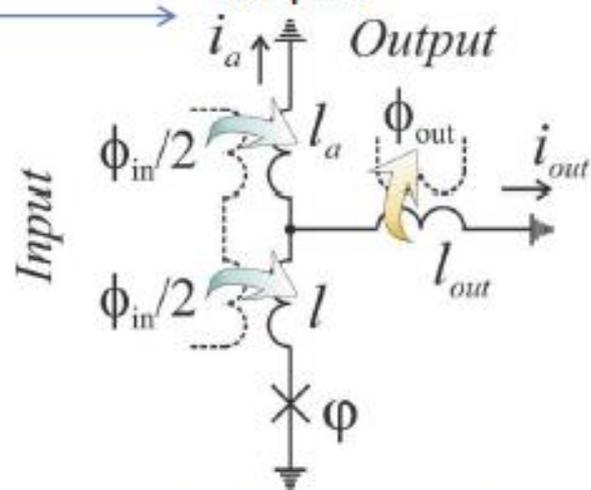
Синапс



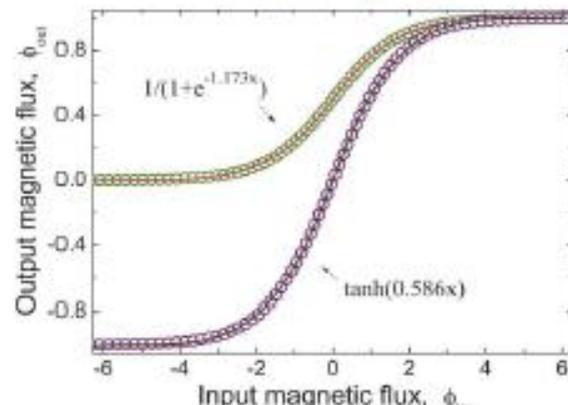
$$E_{op} \sim 10^{-20} \text{ Дж}$$

$$\tau \sim 10^{-9} \text{ с}$$

Нейрон



Нелинейная функция активации



Схемы полуквантовой логики на фазовых кинках

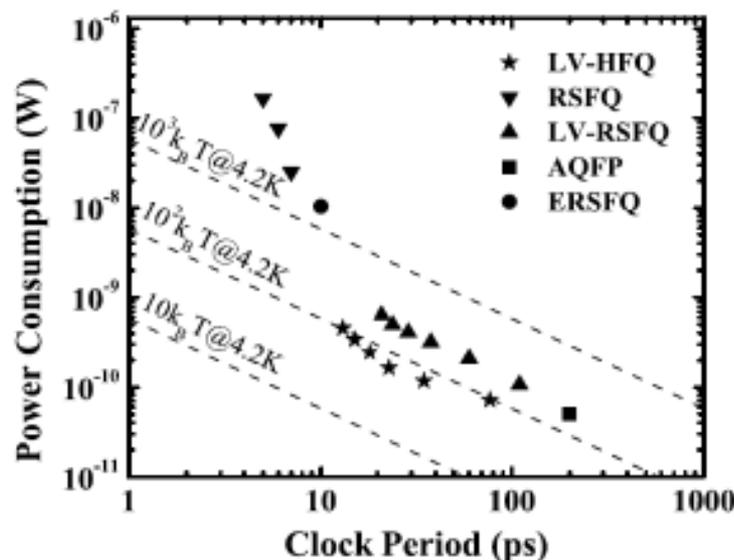
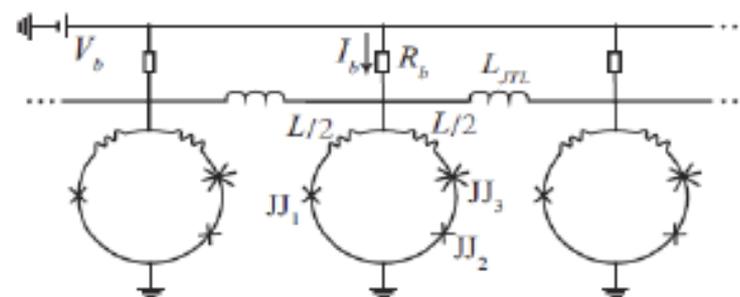
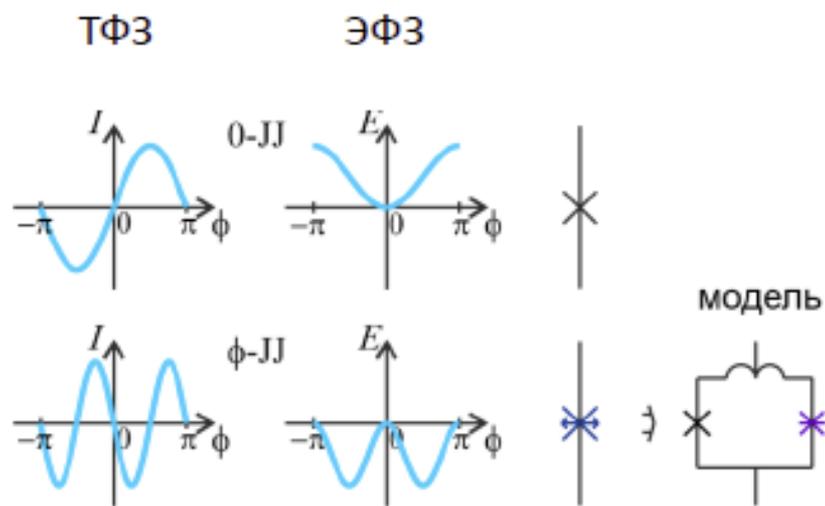
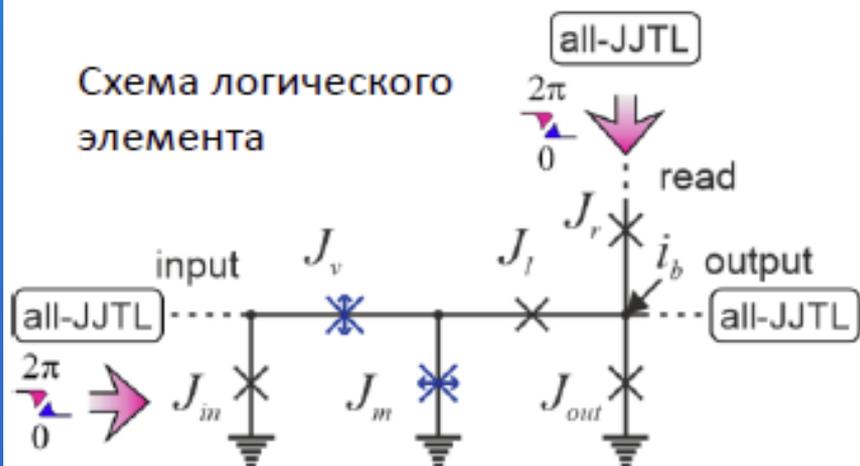


Схема логического элемента



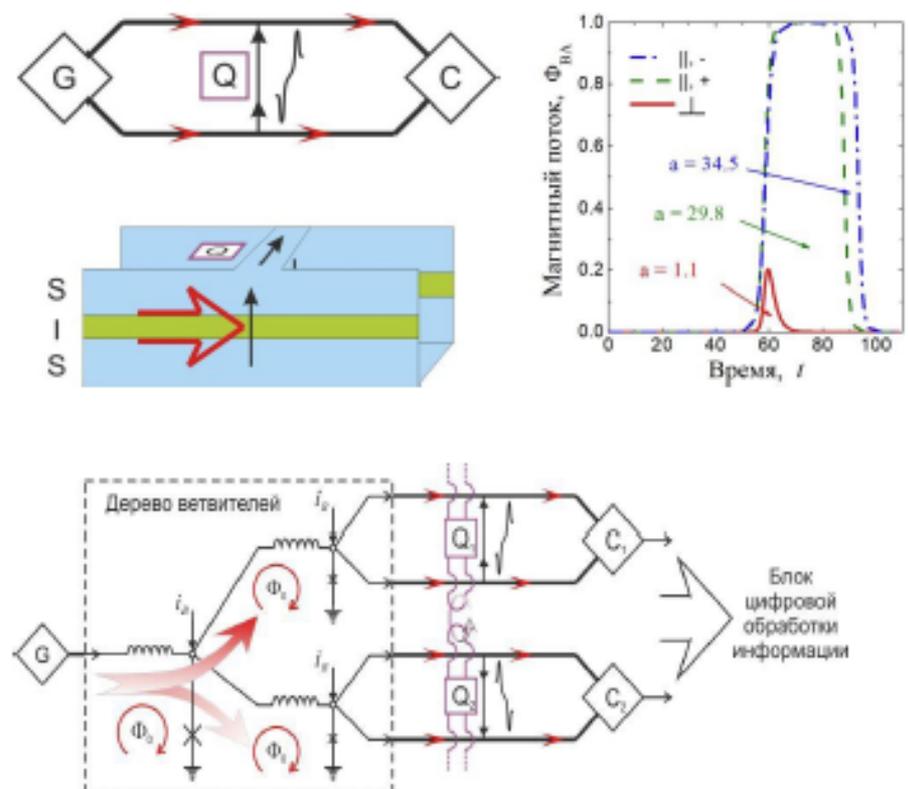
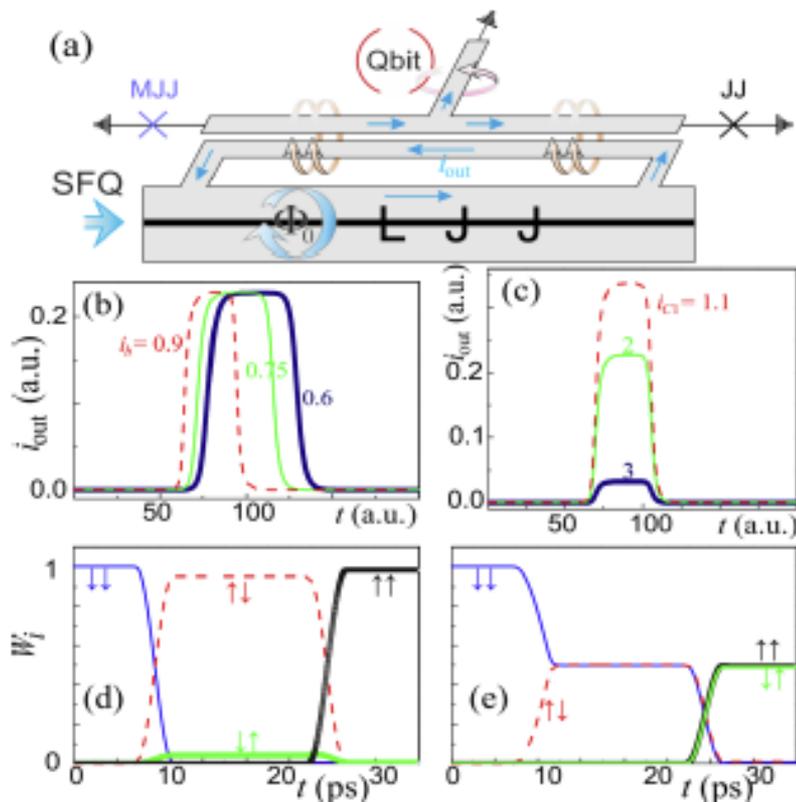
Схемы полуквантовой логики показывают лучшую энергоэффективность из всех существующих сверхпроводниковых логик

Цифровое управление кубитами

➤ Предложены цифровые схемы задания и считывания состояний кубитов, работающие при криогенных температурах

✓ Время операций уменьшено на 2 порядка

✓ Цифровое считывание
✓ Малое обратное влияние



Блок цифровой обработки информации

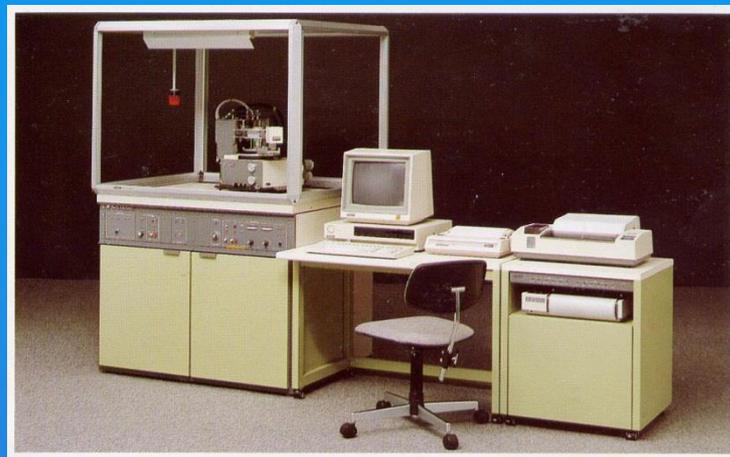
В работах по развитию теории джозефсоновских структур и проектированию устройств на их основе принимали участие

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| 1. Куприянов Михаил Юрьевич, | гл.н.с., зав. Лабораторией |
| 2. Бакурский Сергей Викторович | с.н.с. |
| 3. Гончаров Денис Викторович | м.н.с. |
| 4. Девятов Игорь Альфатович | в.н.с. |
| 5. Карминская Татьяна Юрьевна | н.с. |
| 6. Кидиярова-Шевченко Анна Юрьевна | н.с. |
| 7. Кириченко Александр Феликсович | н.с. |
| 8. Кленов Николай Викторович | с.н. |
| 9. Лихарев Константин Константинович | в.н.с. |
| 10. Платов Константин Юрьевич | н.с. |
| 11. Пугач Наталья Григорьевна | в.н.с. |
| 12. Соловьев Игорь Игоревич | в.н.с. |
| 13. Филиппов Тимур Владимирович | с. н.с |
| 14. Хапаев Михаил Михайлович | с.н.с. |

Начало работ в области сверхпроводниковой электроники в НИИЯФ МГУ совпало с открытием ВТСП и получением мощной финансовой поддержки через Госпрограмму ВТСП



*Сканирующий электронный микроскоп
электронная литография разрешение 10 нм.*



дифрактометр RIGAKU



*Установка реактивно-ионного травления
Alcatel RDE-300*



*Высоко-вакуумные системы
Leibold-Heraus L – 560, Z-400*

Одноэлектроника

Работы в этом направлении велись под руководством с.н.с. физического факультета МГУ Крупенина Владимира Александровича, Солдатова Евгения Сергеевича и с.н.с. НИИЯФ МГУ Зорина Александра Борисовича

В состав группы входят

Преснов Денис Викторович –

к.ф.-м.н., м.н.с., НИИЯФ МГУ

Трифонов Артем Сергеевич

к.ф.-м.н., м.н.с., НИИЯФ МГУ

Прохорова Ирина Григорьевна

м.н.с., Физфак МГУ

Лопатина Елена Евгеньевна

инженер, Физфак МГУ

Рогалья Виктор Анатольевич

механик, Физфак МГУ

Трифонов Артем Сергеевич

к.ф.-м.н., с.н.с., НИИЯФ МГУ

Суятин Дмитрий Борисович

программист НИИЯФ МГУ

Ханин Владимир Викторович

н.с. Физфак МГУ

Шорохов Владислав Владимирович

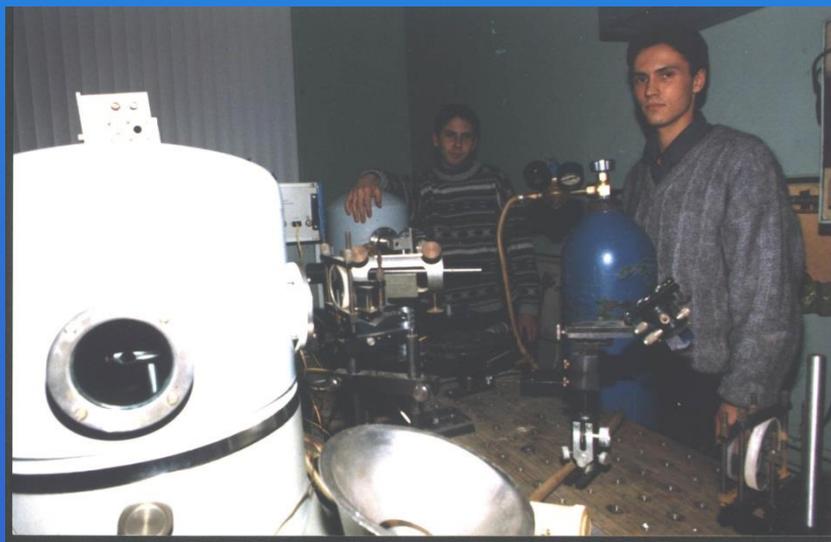
доцент Физфак МГУ

- *предложены, изготовлены и исследованы оригинальные наноразмерные структуры – прототипы будущих цифровых и аналоговых устройств квантовой электроники;*
- *разработаны и реализованы оригинальные методы изготовления и исследования наноструктур широкого класса.*

Эффект Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках и устройства на основе ВТСП контактов

Ковалев Александр Сергеевич
Образцов Александр Николаевич
Селезнев Борис Вадимович
Поляков Сергей Николаевич
Калабухов Алексей Борисович
Снигирев Олег Васильевич
Маресов Александр Григорьевич
Прохорова Ирина Григорьевна
Лопатина Елена Евгеньевна

г.н.с. НИИЯФ МГУ
с.н.с. НИИЯФ МГУ
н.с. НИИЯФ МГУ
с.н.с. НИИЯФ МГУ
м.н.с. НИИЯФ МГУ
г.н.с. Физ.фак МГУ
н.с. Физ.фак МГУ
м.н.с., Физфак МГУ
инженер, Физфак МГУ



Лазерная напылительная установка для нанесения ВТСП пленок