

Управление кинетической индуктивностью гибридных сверхпроводниковых структур с помощью спин-триггерного эффекта

С.В. Бакурский, В.И. Ружицкий, А.А. Неило,
Н.В. Кленов, И.И. Соловьев, М.Ю. Куприянов

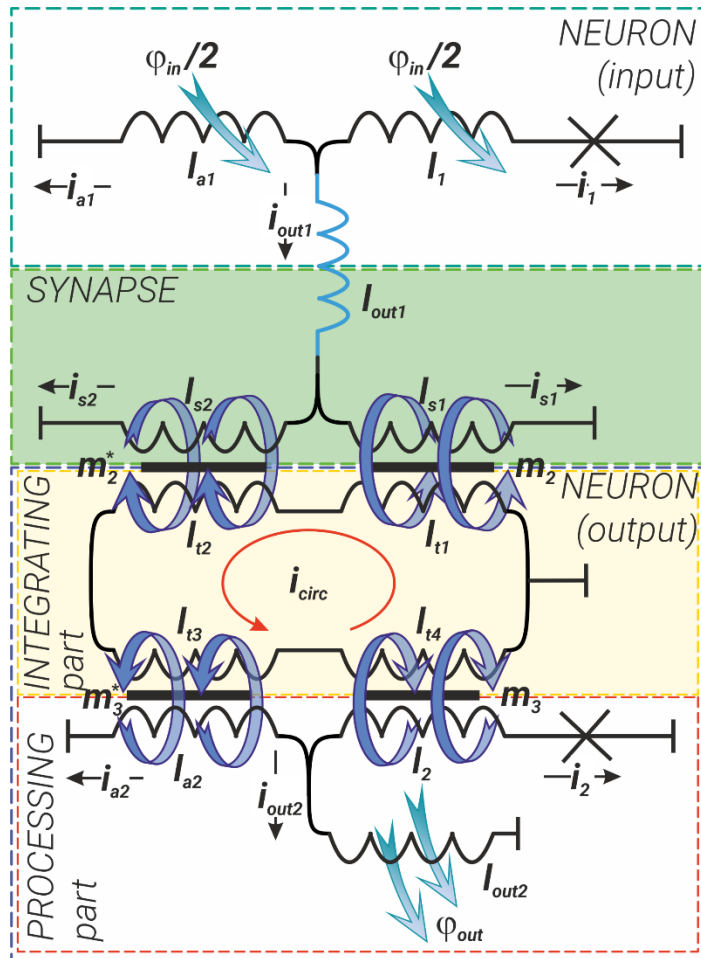
Лаборатория физики наноструктур, ОМЭ



Мотивация

Разработка эффективных нейросетей

Перестройка весовых коэффициентов синаптических соединений требует управляемых линейных элементов.



Управление цифровой электроникой

Изменение индуктивности позволяет значительно изменить растекание токов по цифровым схемам и переключить режимы.

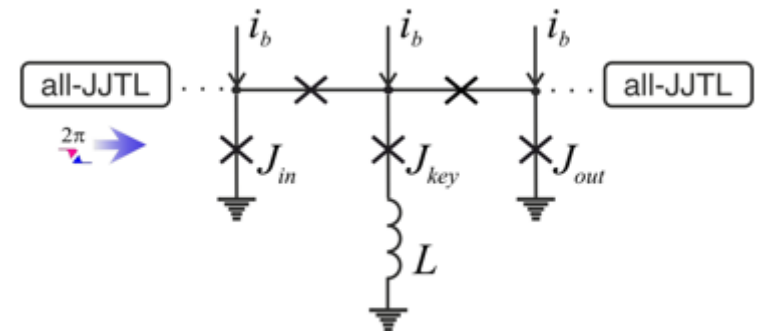


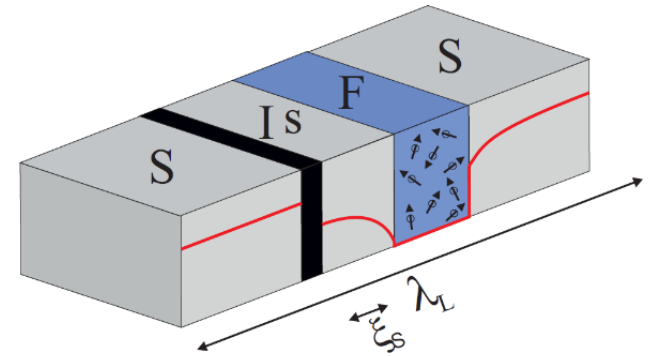
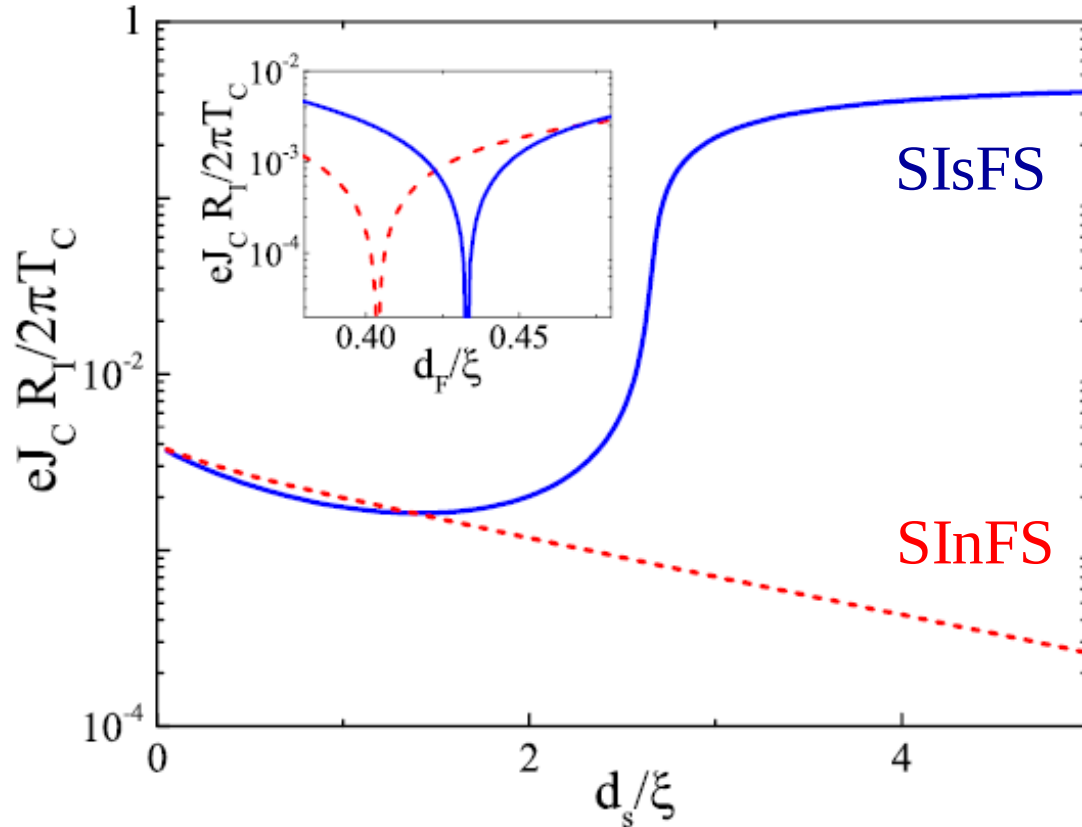
Рис. 1. Ключ между двумя all-JJTL.

Однако, нелинейность индуктивности приводит к нарушению прохождения флаксонов по JTL.

Нужен перестраиваемый линейный элемент.

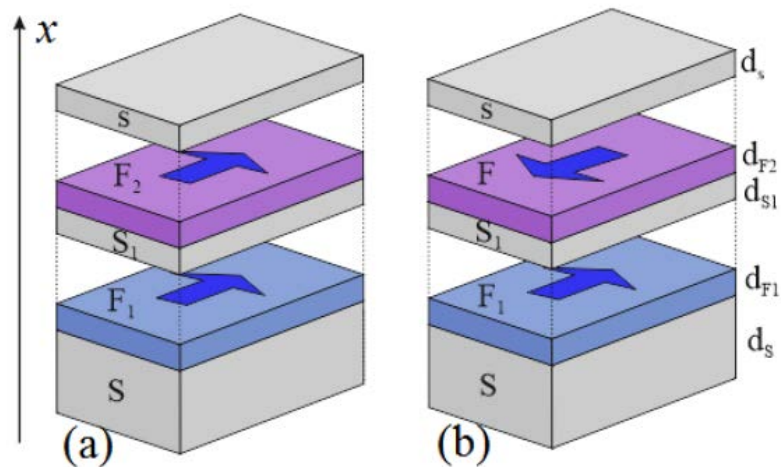
Сверхпроводящий спин-триггерный эффект

Тонкие s-слои имеют критическую толщину d_{sC}



Происходит переход s-слоя в собственное сверхпроводящее состояние с резким ростом количества куперовских пар

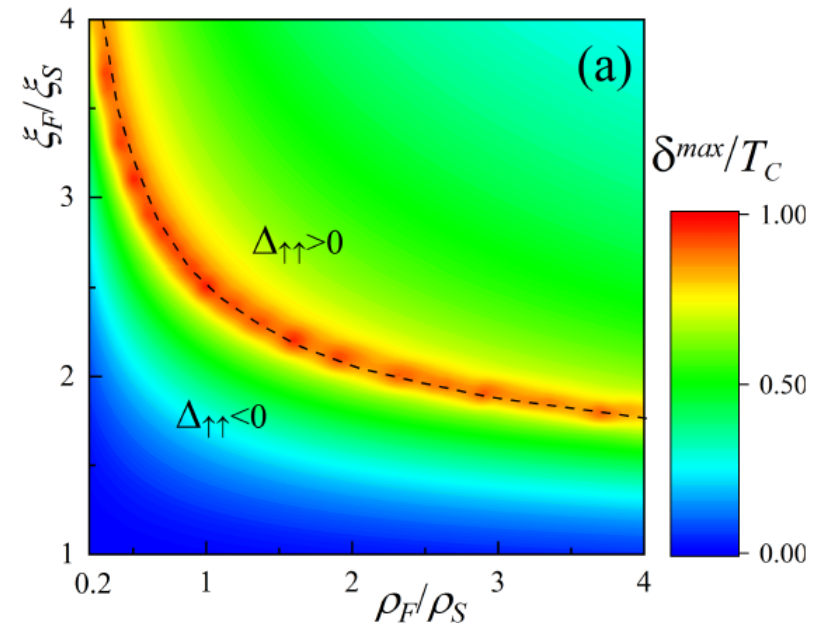
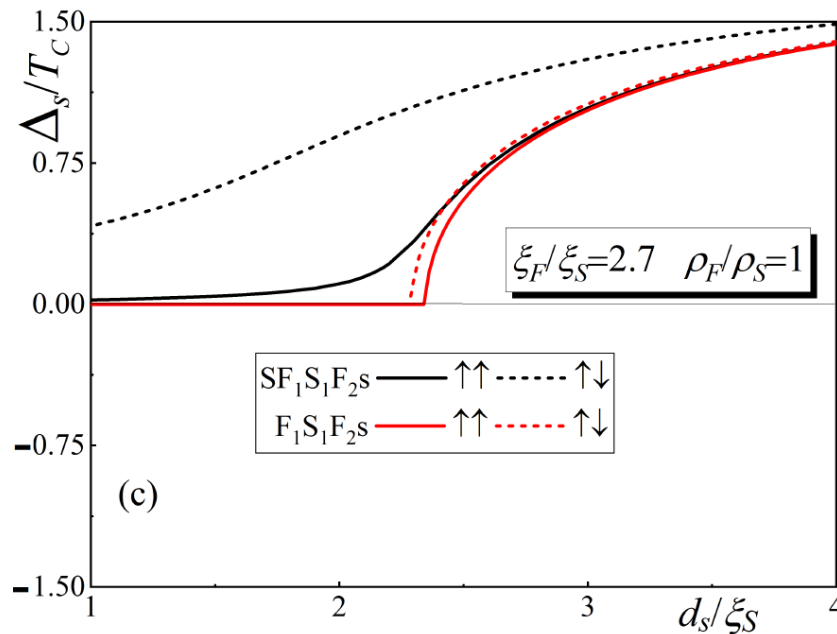
Сверхпроводящий спин-триггерный эффект



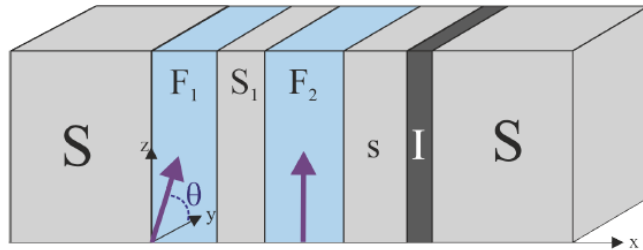
Добавили в структуру
спиновый FsF вентиль

Слабый эффект от вентиля переключает
s-слой между нормальным
и сверхпроводниковым состоянием

Сила эффекта:

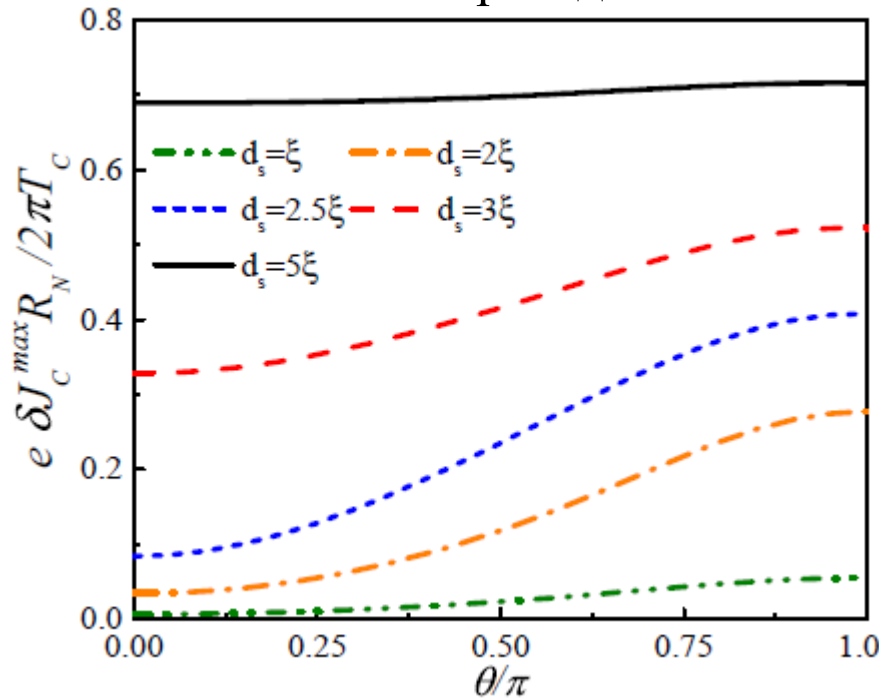


Джозефсоновский спин триггерный эффект



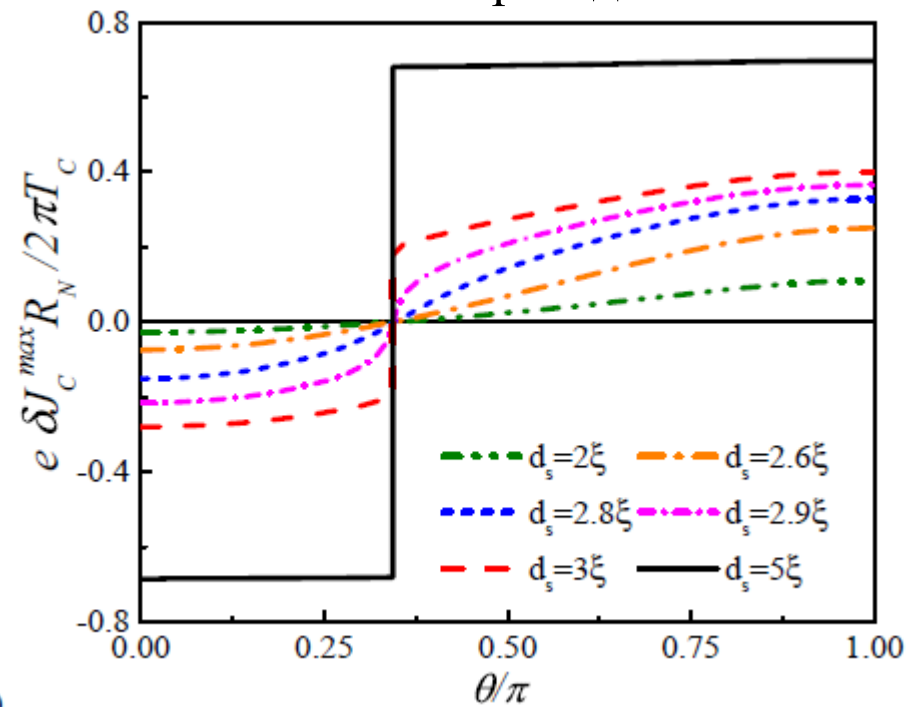
$$\frac{eJ_c R_N}{2\pi T_c} = \frac{T}{T_c} \sum_{\omega > 0} \frac{\Delta_0 f \cos(\chi)}{\sqrt{(\omega^2 + \Delta_0^2)}},$$

Без 0- π перехода

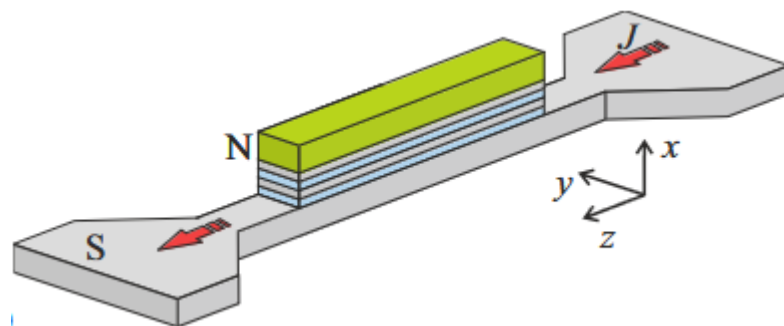


b)

С 0- π переходом



Управляемая кин. индуктивность



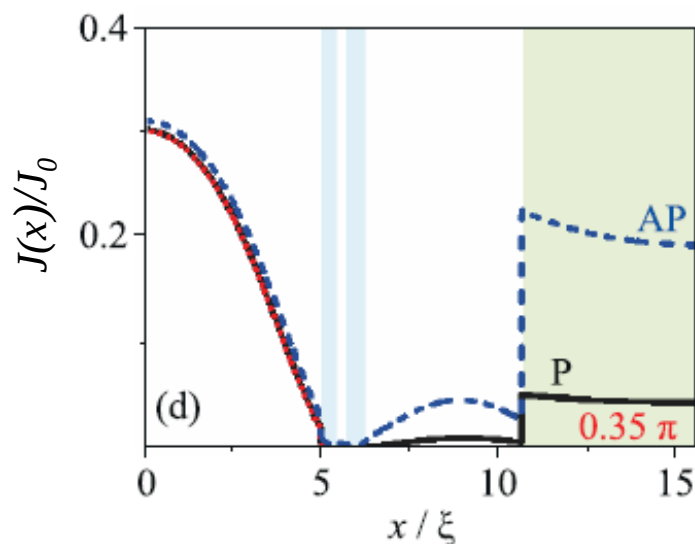
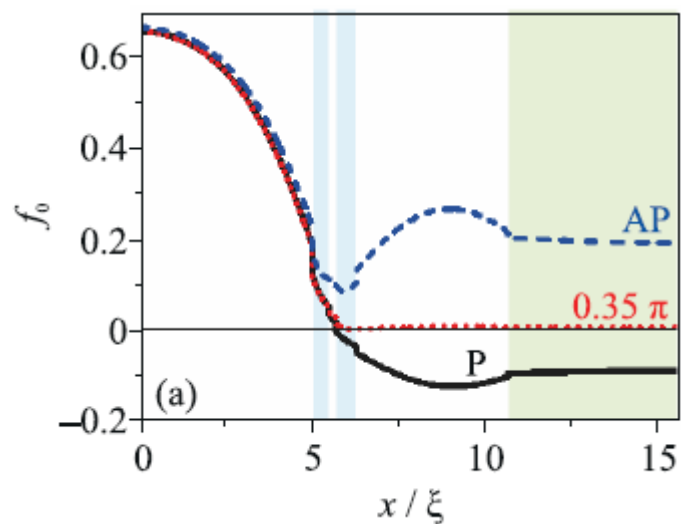
В качестве сверхпроводника возьмем материал с большим удельным сопротивлением

$$L_K \approx \mu_0 \frac{l}{W} \left[\int_0^d \lambda(x)^{-2} dx \right]^{-1} \quad \lambda(x)^{-2} = \frac{16\pi T^2}{\rho} \sum_{\omega > 0} \text{Re}(F(x)^2)$$

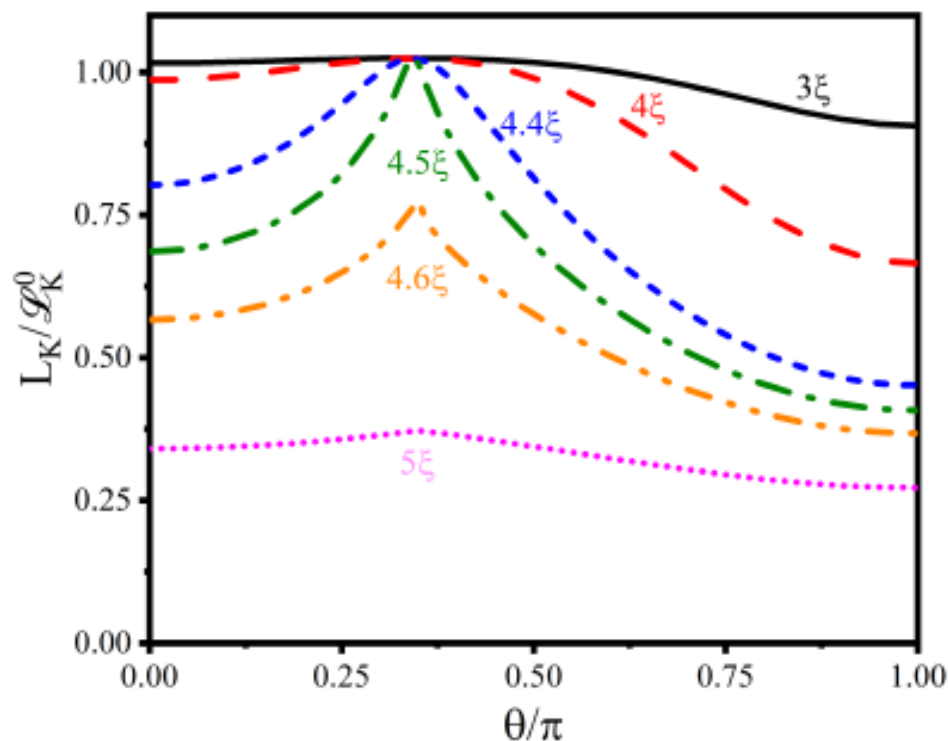
Подберем материалы так, чтобы длина когерентности N слоя была большой

$$\xi_N \gg \xi_S$$

Значительная часть тока потечет по низкоомному слою



Управляемая кин. индуктивность



Пик в 0- π переходе

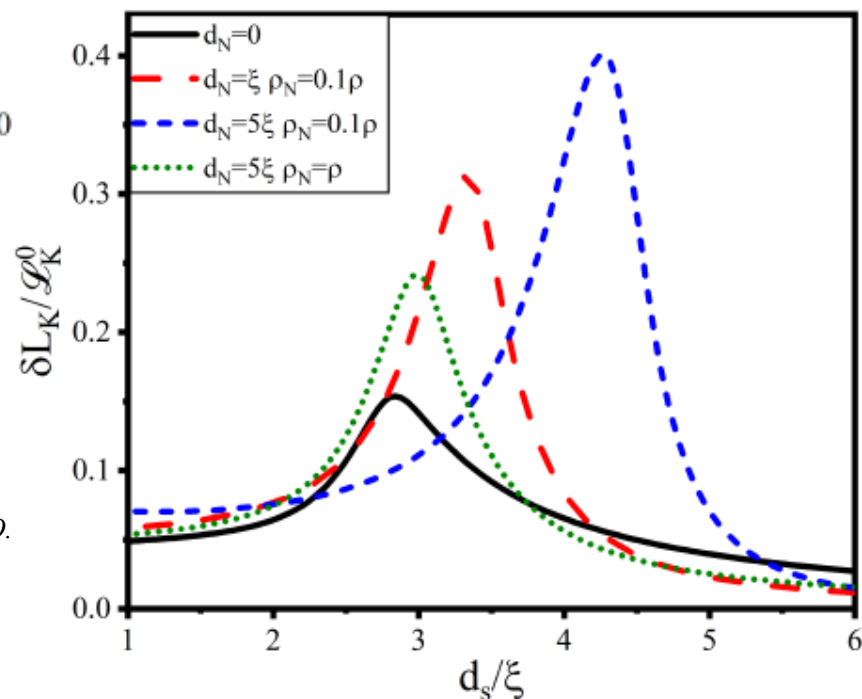
Изменение L_K до 100 %

$$\mathcal{L}_K^0 = (\mu_0 X \lambda_0^2) / (\xi W)$$

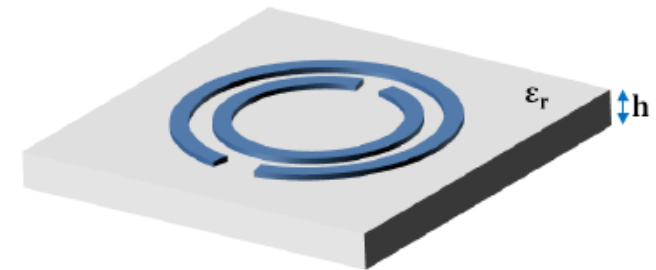
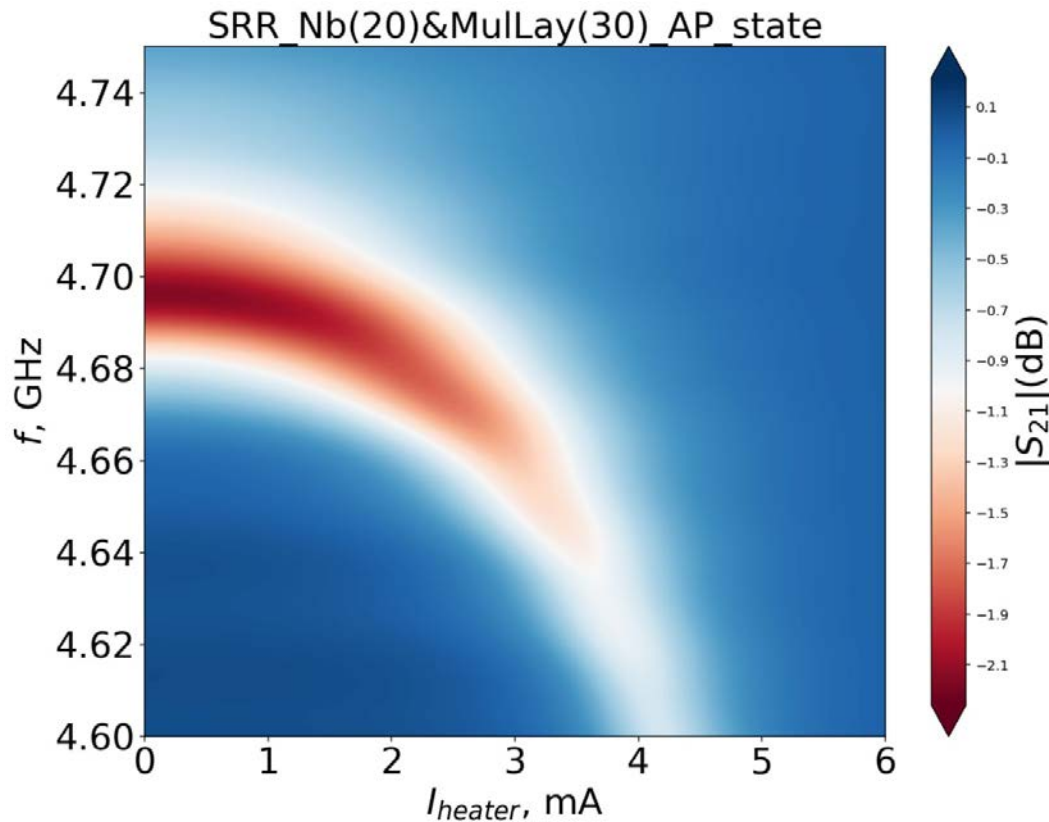
Сравнение Р и АР конфигураций

Спин-вентильный эффект зависит от наличия и свойств нормального слоя

Неилю А.А., Бакурский С.В., Кленов Н.В., Соловьев И.И., Куприянов М.Ю.
Магнитное управление кинетической индуктивностью в элементах
сверхпроводниковой электроники
Письма в ЖЭТФ, 121(1):63–71, 2025.



Экспериментальное исследование структур с триггерным эффектом



Split ring resonator (SRR)

$$2\pi f_r = 1/\sqrt{(L_g + L_k)C_{eq}}$$

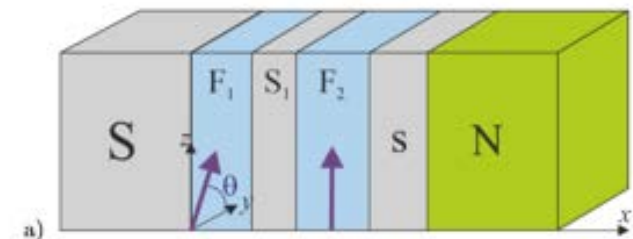
Nb-Co-Nb-Co-Nb-Al

20 -2.5 -8- 1.5 -8 - 20

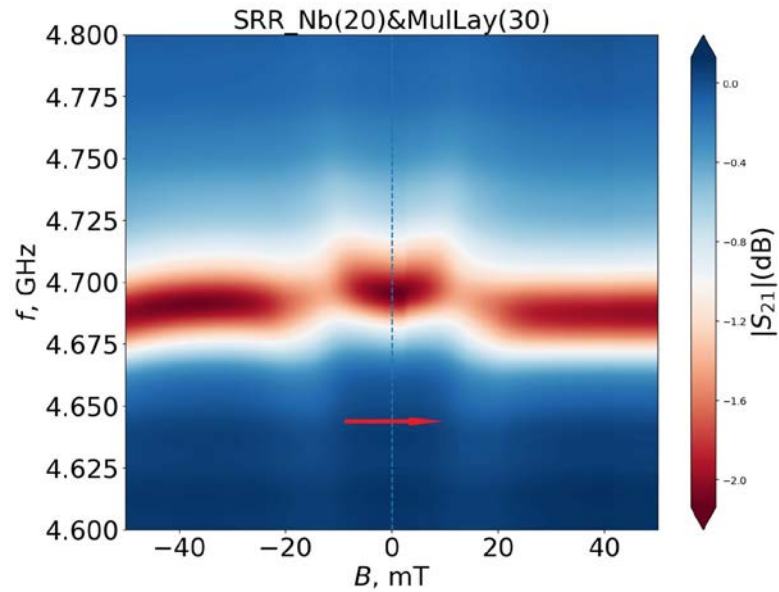
ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ В НМ

Совместно с лабораторией топологических
квантовых явлений в сверхпроводящих
системах ЦМН МФТИ:

Р. Тюменев, Д.С. Калашников, А.Г. Шишкин,
А.С. Сидоренко, И.А. Головчанский, А.А
Голубов, В.С. Столяров

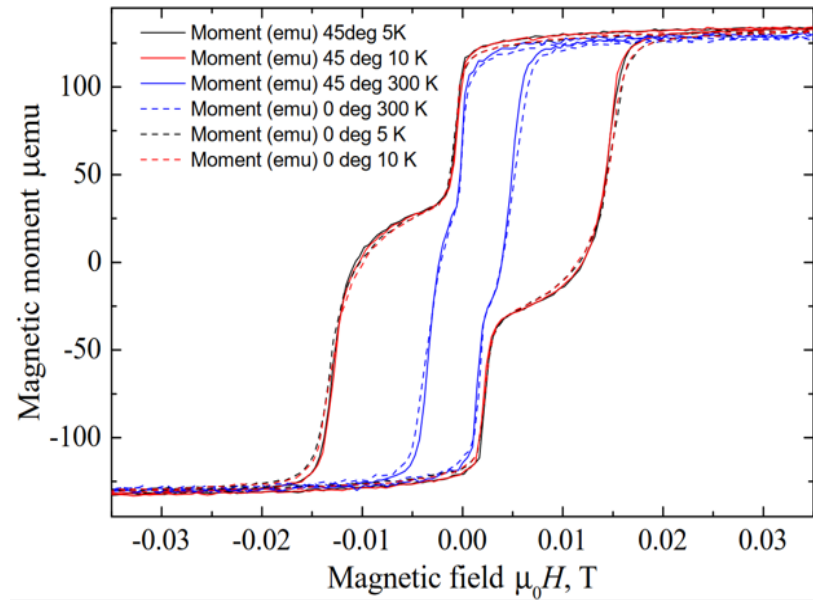
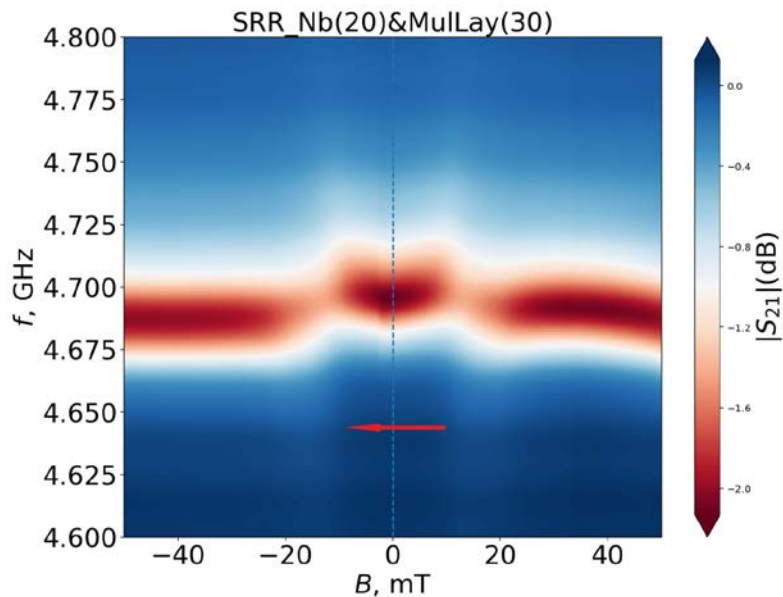


Экспериментальное исследование структур с триггерным эффектом



Обнаружена особенность при 2 мТ
Перемагничивание слоя Со

Обнаружена особенность при 15 мТ
Совпадение частоты с
ферромагнитным резонансом



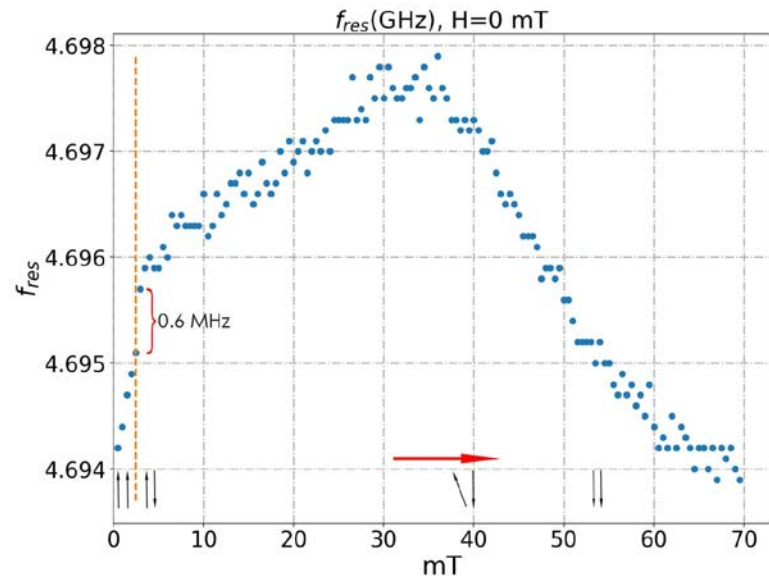
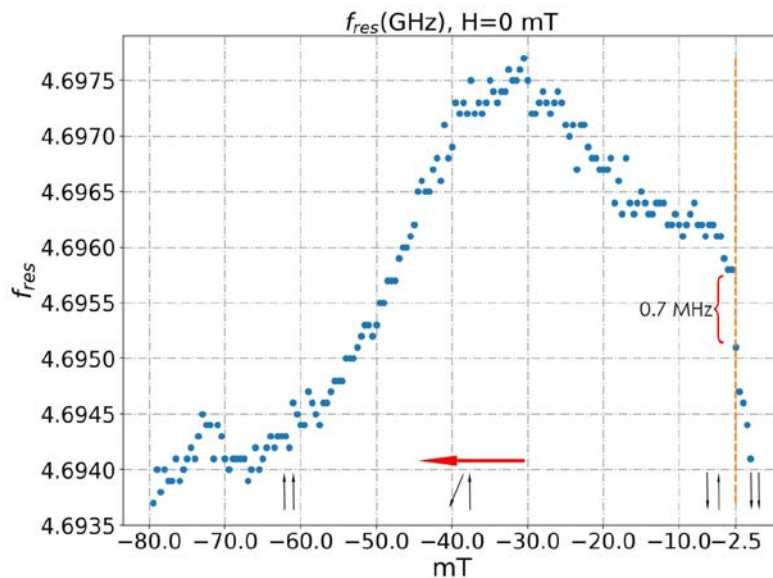
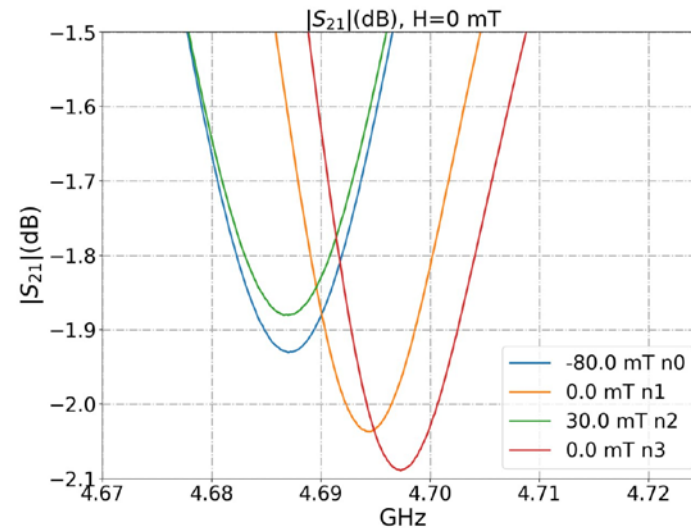
Эффект магнитной памяти

Состояние готовится следующим образом:

- 1) Полное перемагничивание в -100 мТ
- 2) Увеличение поля до величины $H=+x$
- 3) Сброс поля до нуля и измерение частоты при $H=0$

Магнитное переключение частоты на 0.5 МГц

Полное изменение на 4 МГц



Спасибо за внимание!

На основе материалов данной работы опубликованы статьи:

1) A. Neilo, S. Bakurskiy, N. Klenov, I. Soloviev, and M. Kupriyanov. *Spin-valve-controlled triggering of superconductivity. Nanomaterials*, 14(3):245, 2024.

2) Alexey Neilo, Sergey Bakurskiy, Nikolay Klenov, Igor Soloviev, Vasily Stolyarov, and Mikhail Kupriyanov. *Josephson spin valve controlled by a superconducting trigger effect. Applied Physics Letters*, 125:162601, 2024.

3) А. А. Неило, С. В. Бакурский, Н. В. Кленов, И. И. Соловьев, и М. Ю. Куприянов. *Магнитное управление кинетической индуктивностью в элементах сверхпроводниковой электроники. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 121(1):63–71, 2025.

И еще две публикации находятся в стадии подготовки. Также с использованием разработанных моделей проведено исследование многослойных структур Al-Pt:

4) Ivan A. Nazhestkin, Sergey V. Bakurskiy, Alex A. Neilo, Irina E. Tarasova, Nidzhat G. Ismailov, Vladimir L. Gurtovoi, Sergey V. Egorov, Sergey A. Lisitsyn, Vasily S. Stolyarov, Vladimir N. Antonov, Valery V. Ryazanov, Mikhail Y. Kupriyanov, Igor I. Soloviev, Nikolay V. Klenov, and Dmitry S. Yakovlev. *High kinetic inductance in platinum-coated aluminum nanobridge interferometers. Advanced Engineering Materials*, page 2402385, 2025