

Особенности электронного транспорта в джозефсоновских SNS мостиках переменной толщины

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



Мотивация

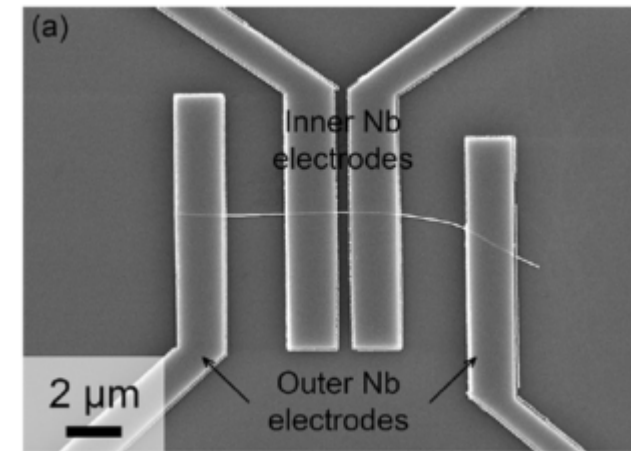
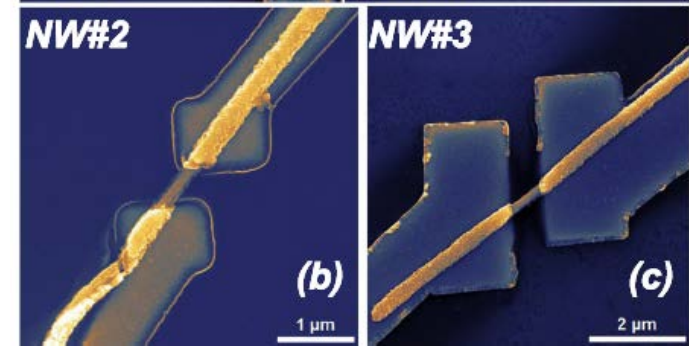
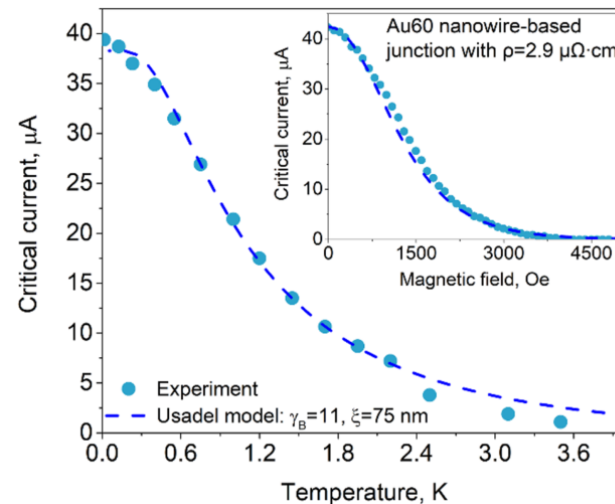
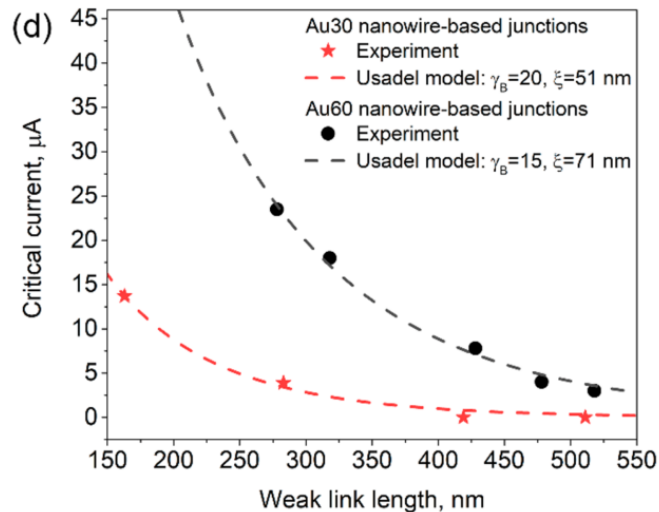
Джозефсоновские мостики являются перспективным типом контактов для создания сверхпроводниковой электроники.

Они масштабируемы до размеров порядка 100 нм

Обладают высоким критическим током

При малых размерах области слабой связи их характерное напряжение определяется только электродом

Хорошо описывают микроскопической теорией

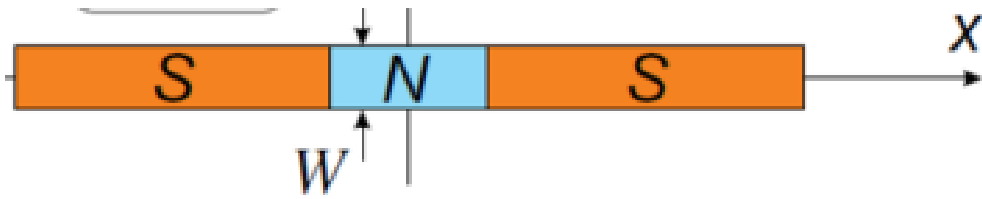


Soloviev, I. I., Bakurskiy, S. V., Ruzhickiy, V. I., Klenov, N. V., Kupriyanov, M. Y., Golubov, A. A., ... & Stolyarov, V. S. (2021). Miniaturization of Josephson Junctions for Digital Superconducting Circuits. *Physical review applied*, 16(4), 044060.

Skryabina, O. V., Egorov, S. V., Goncharova, A. S., Klimenko, A. A., Kozlov, S. N., Ryazanov, V. V., ... & Stolyarov, V. S. (2017). Josephson coupling across a long single-crystalline Cu nanowire. *Applied physics letters*, 110(22), 222605.

Sotnichuk, S. V., Skryabina, O. V., Shishkin, A. G., Bakurskiy, S. V., Kupriyanov, M. Y., Stolyarov, V. S., & Napolskii, K. S. (2022). Long Single Au Nanowires in Nb/Au/Nb Josephson Junctions: Implications for Superconducting Microelectronics. *ACS Applied Nano Materials*, 5(11), 17059-17066.

SNS переходы

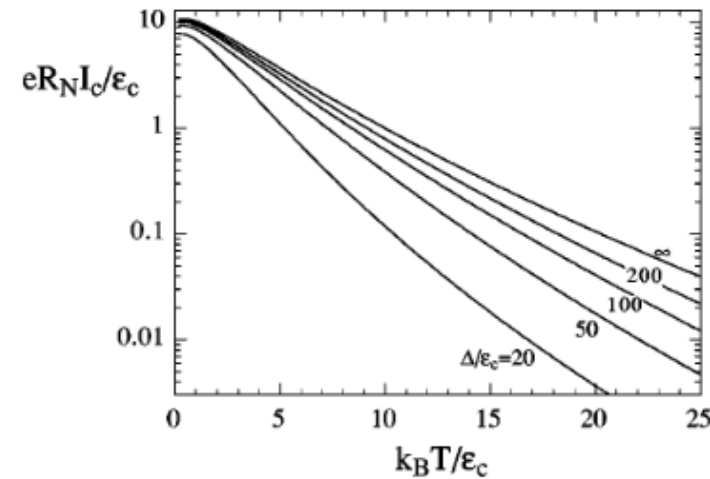
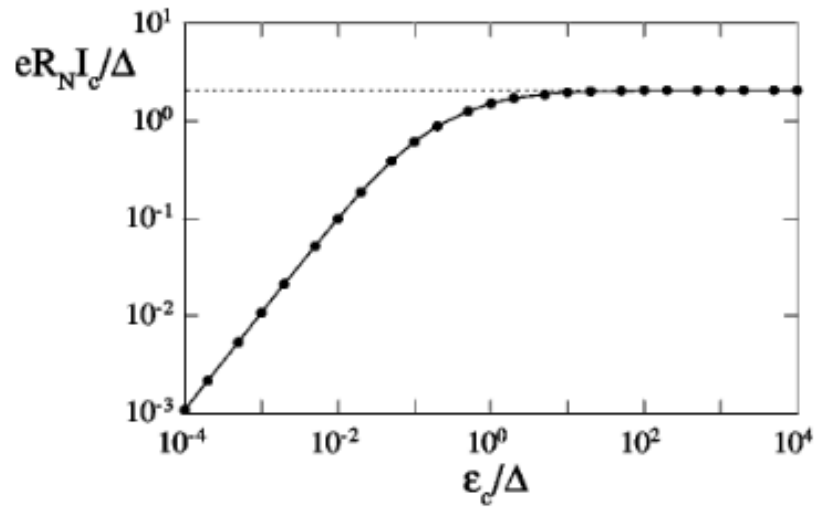


$$E_T \ll T,$$

$$\frac{eI_c R_n}{E_T} = \alpha \left(1 - \beta \exp \left\{ -\frac{\alpha E_T}{3.2T} \right\} \right), \quad E_T = \frac{D}{L^2},$$

$$E_T \gg T,$$

$$\frac{eI_c R_n}{E_T} = \frac{32}{3 + 2\sqrt{2}} \left(\frac{2\pi T}{E_T} \right)^{3/2} \exp \left\{ -\sqrt{\frac{2\pi T}{E_T}} \right\}$$



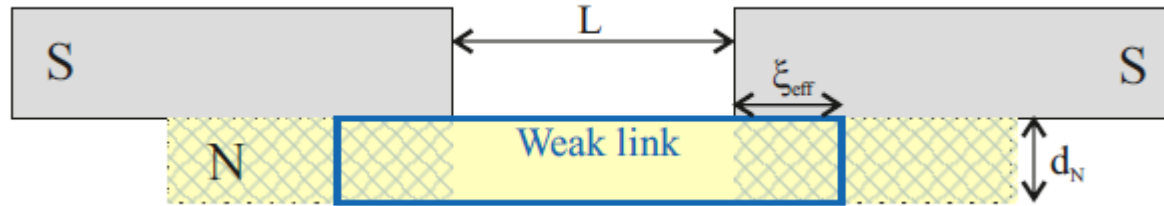
Учет конечной прозрачности границы:

$$E_T^{eff} = E_T \frac{Ar^B}{C+r}, \quad r = \frac{G_N}{G_B}.$$

Р. Dubos, Н. Courtois, В. Pannetier, F. Wilhelm, A. Zaikin, and G. Schön, Physical Review B **63**, 064502

J. Hammer, J. C. Cuevas, F. Bergeret, and W. Belzig, Physical Review B **76**, 064514 (2007).

Энергия Таулеса в мостиках



Под электродом:

$$\zeta^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \sin(\theta - \theta(\infty)) = 0, \quad x \geq 0,$$

$$\theta(\infty) = \arctan \frac{\pi T_c \sin(\theta_S)}{\omega \gamma_{BM} + \pi T_c \cos(\theta_S)},$$

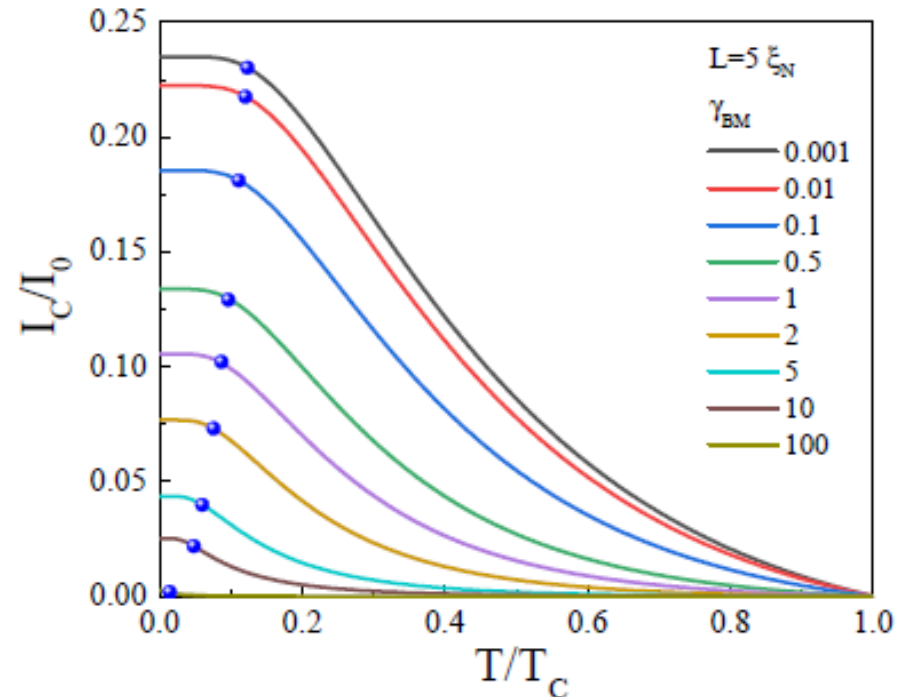
$$\zeta = \xi \sqrt{\frac{\pi T \gamma_{BM}}{\sqrt{(\omega \gamma_{BM})^2 + 2\pi T_c \omega \gamma_{BM} \cos(\theta_S)} + (\pi T_c)^2}},$$

Энергия Таулеса:

$$\epsilon = \frac{\xi_N^2}{(L + \xi_N \sqrt{\gamma_{BM}})^2}.$$

$$\epsilon = E_{Th}/\pi T_c. \quad \gamma_{BM} = \gamma_B d/\xi_N.$$

$$\frac{I_c}{I_0} = \frac{128\pi T}{T_c} \tan^2 \left(\frac{1}{2} \arctan \frac{\sin \frac{\theta(\infty)}{2}}{\cos \frac{\theta(\infty)}{2} + g} \right) \exp\left\{-\frac{L}{\xi}\right\},$$

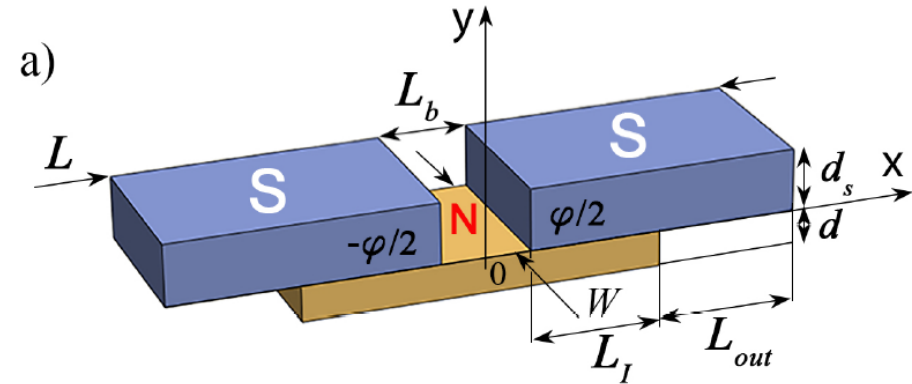


Растекание токов в электродах

$$\xi_{eff}^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(G^2 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - \Phi = -\delta \exp\{i\chi(x, 0)\},$$

$$L_b/2 \leq x \leq (L_l + L_b)/2$$

$$\xi_{eff}^2 = \frac{\gamma_{BM}}{G(G_s + \gamma_{BM}\omega)}, \quad \delta = \frac{G_s \Delta}{(G_s + \gamma_{BM}\omega)}.$$



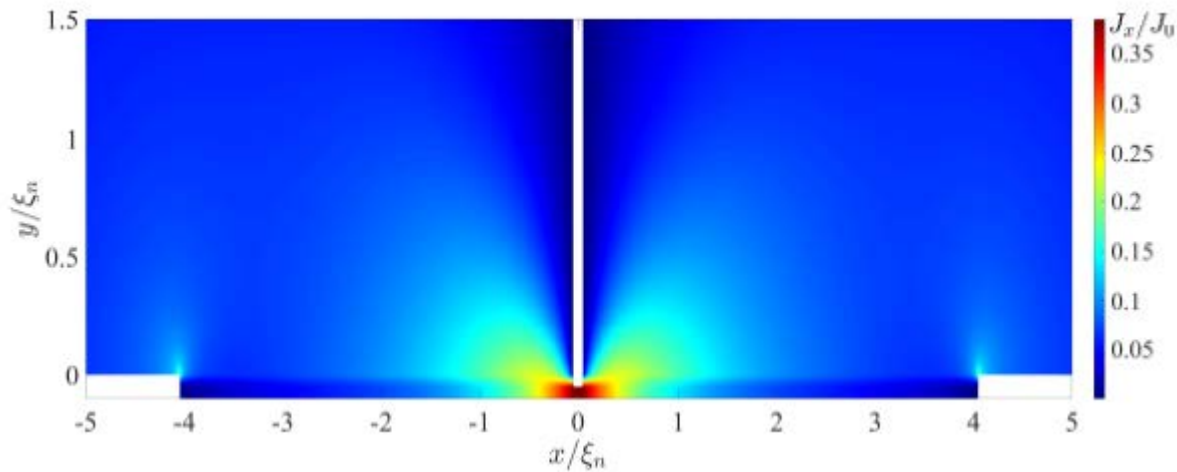
Фаза в электродах:

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} = 0.$$

На границе:

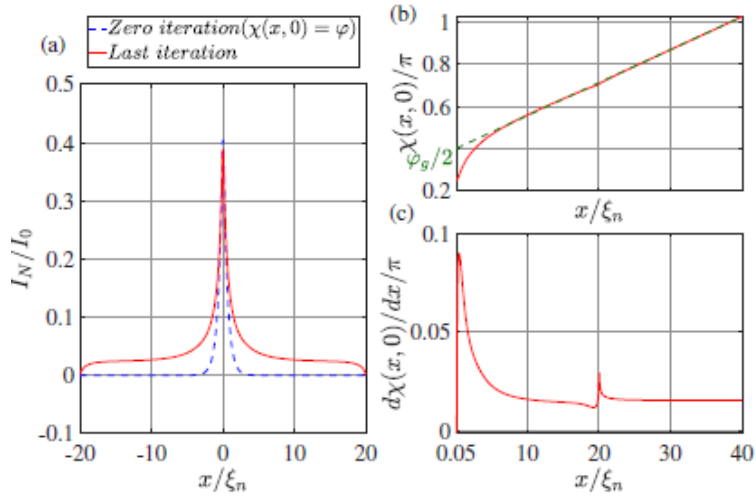
$$S_1 \frac{d}{dy} \chi(x, 0) = \frac{d}{dx} I_n,$$

$$\frac{I_n(x)}{I_0} = \frac{T}{T_c} \sum_{\omega \geq 0} \frac{G^2}{\omega^2} \left(\text{Im}\Phi \frac{\partial \text{Re}\Phi}{\partial x} - \text{Re}\Phi \frac{\partial \text{Im}\Phi}{\partial x} \right),$$

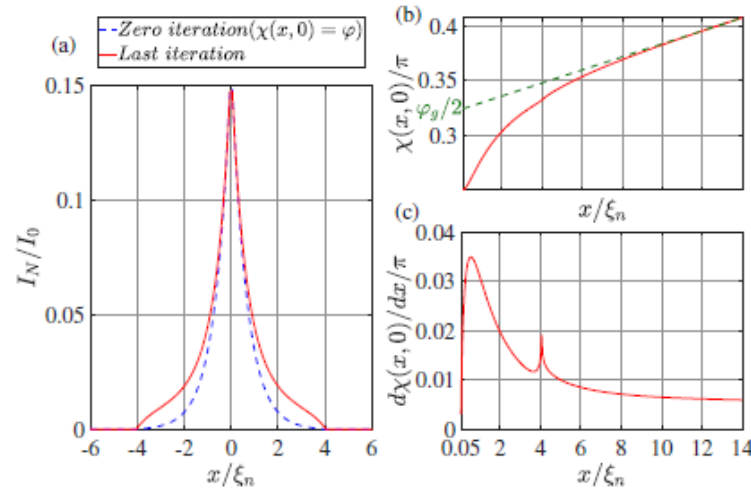


Растекание токов в электродах

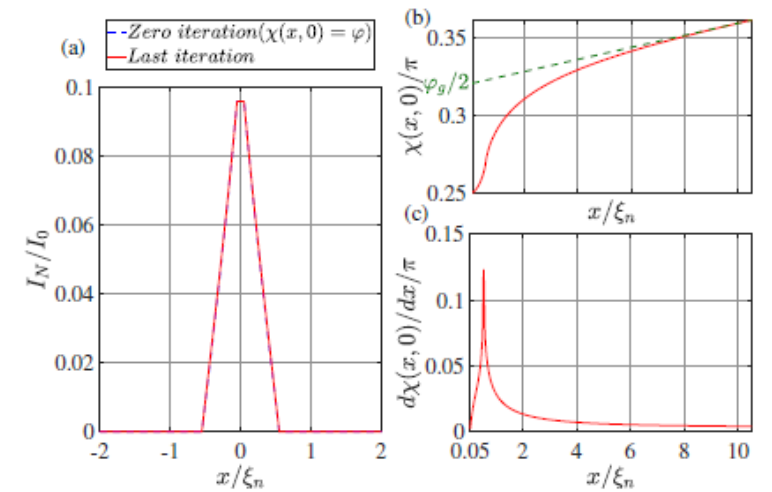
Широкий электрод $L_I=20 \xi_n$



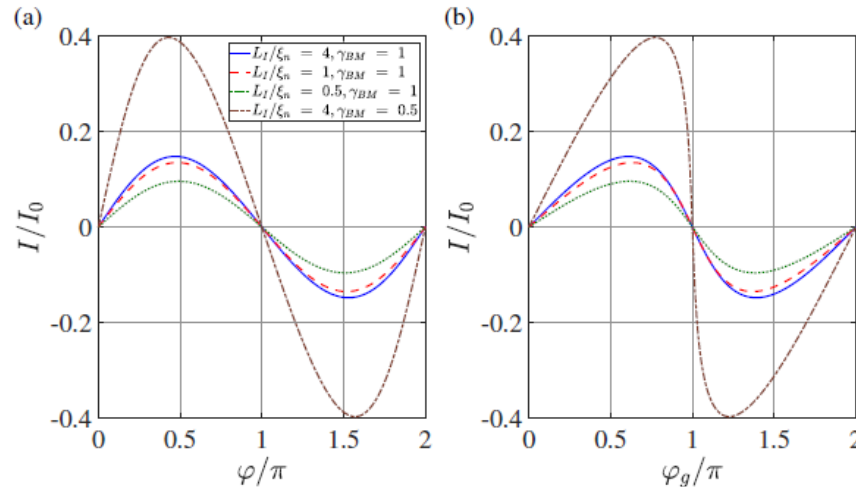
Средний электрод $L_I=4 \xi_n$



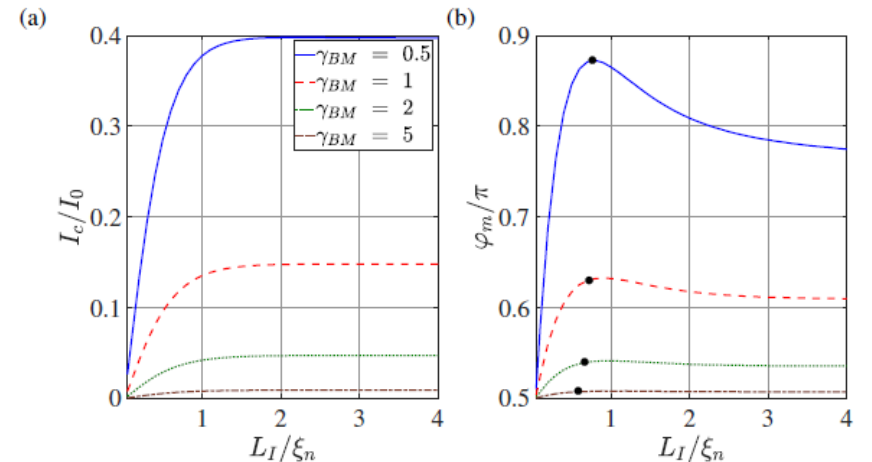
Узкий электрод $L_I=0.5 \xi_n$



Ток-Фазовая Зависимость



Зависимость критического тока от размера электрода



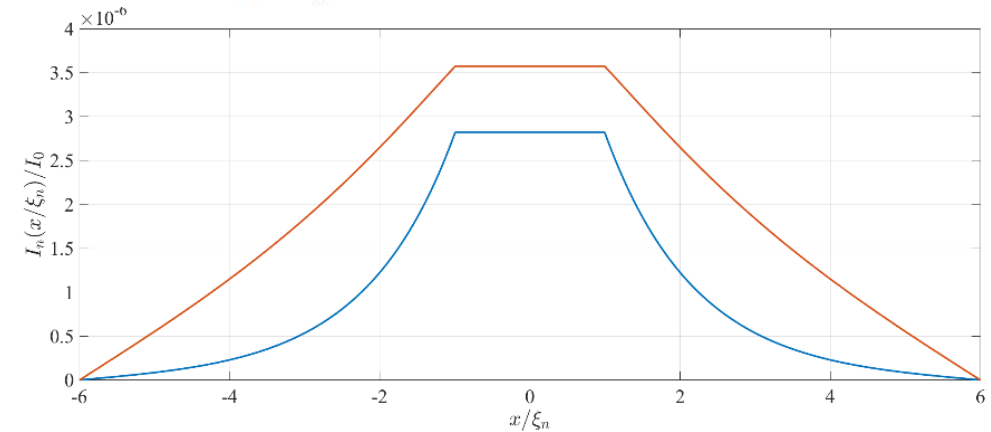
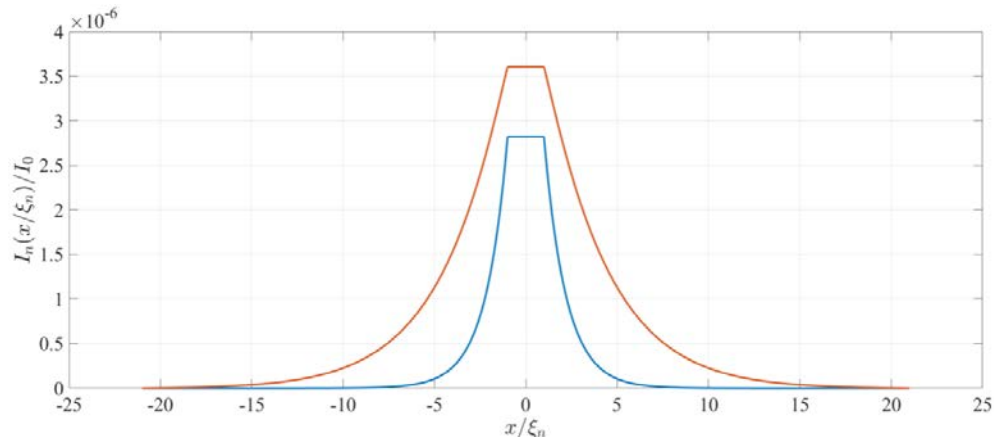
Система представляет из себя последовательное соединение джозефсоновского контакта и индуктивности

Конечная прозрачность границы

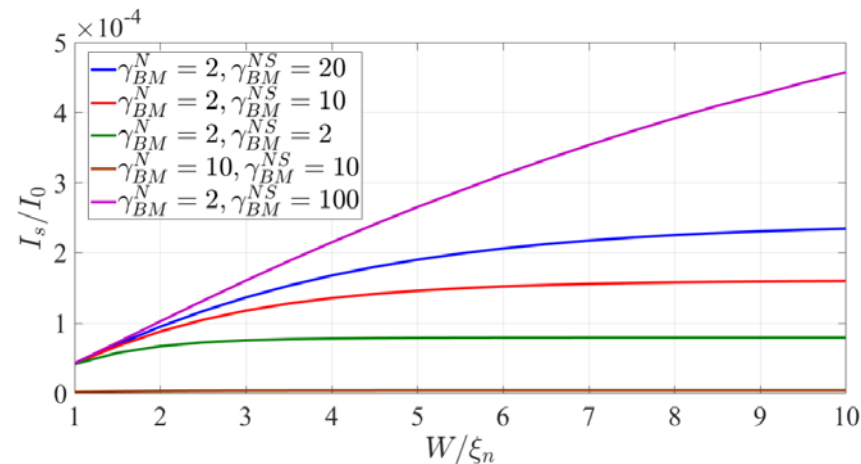
Важно сравнение падения фазы
на SN границе и в N-слое

$$\frac{I_N(x)}{J_0 \omega d_n} = \frac{T}{T_c} \sum_{\omega \geq 0} \frac{G^2}{\omega^2} \left(\text{Im} \Phi \frac{\partial \text{Re} \Phi}{\partial x} - \text{Re} \Phi \frac{\partial \text{Im} \Phi}{\partial x} \right),$$

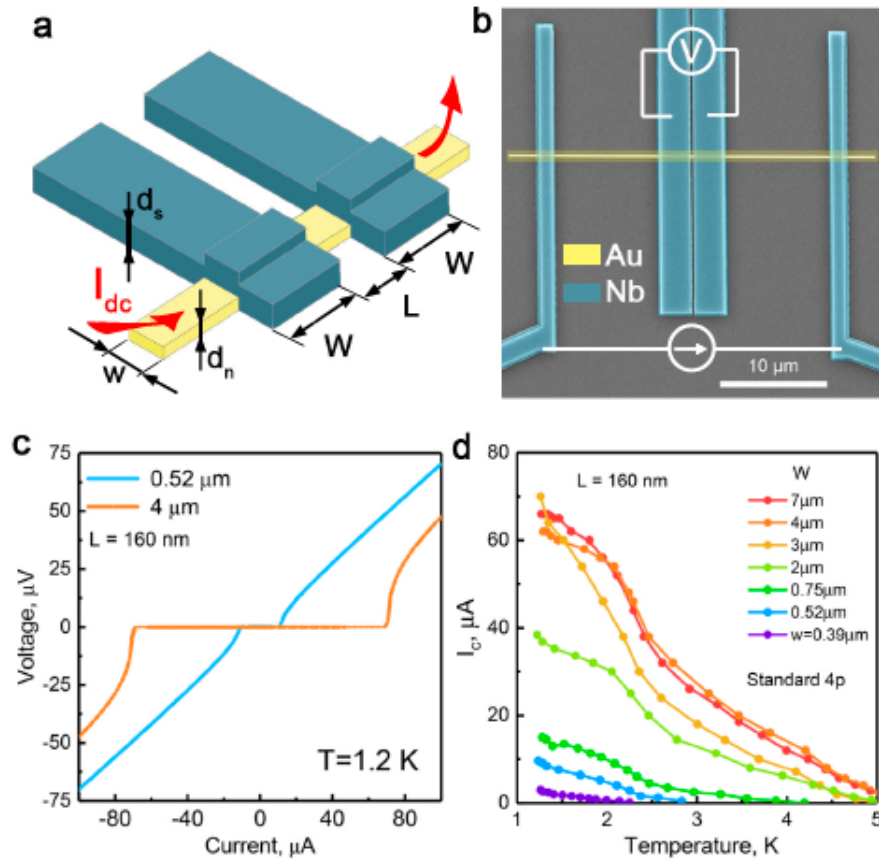
$$\frac{I_T(x)}{J_0 \omega \delta x} = \frac{1}{\gamma_B} \frac{T}{T_C} \sum_{\omega} \frac{G_s G}{\omega^2} \Delta |\Phi(x)| \sin(\chi_S - \chi_N(x))$$



Распределение тока I_N по нормальному слою мостика переменной толщины с а) $L=2$ и $W=20$ и б) $L=2$ и $W=5$ в нулевом приближении (синяя линия) и при учете падения фазы на границе (оранжевая линия)

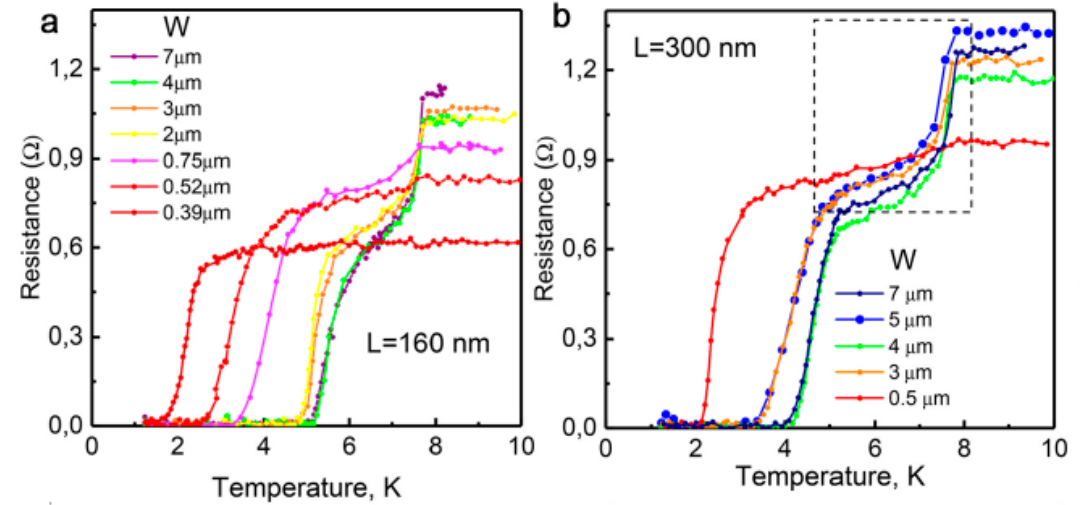


Сравнение с экспериментом

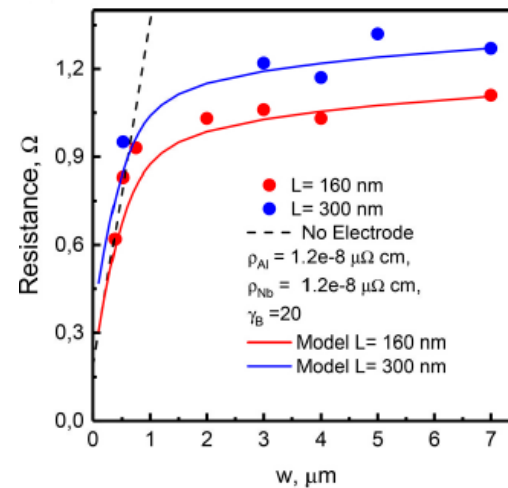


Экспериментальные данные получены группой В.С. Столярова в Центре Перспективных Методов Мезофизики и Нанотехнологий МФТИ

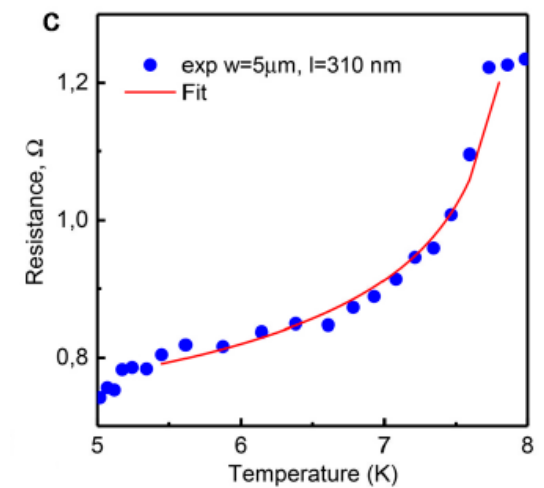
Зависимость $R(T)$ от ширины электродов W



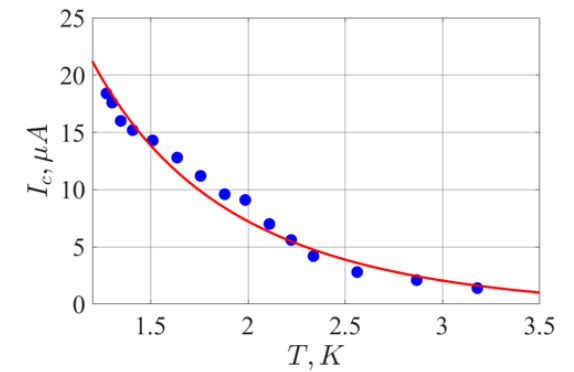
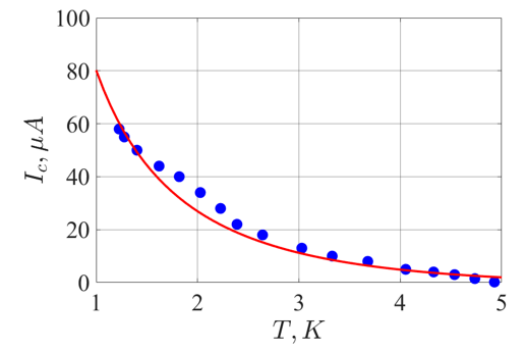
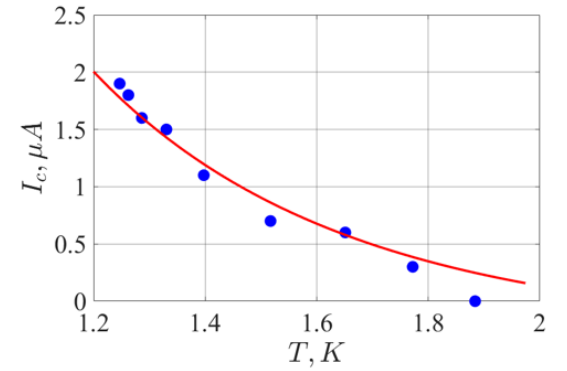
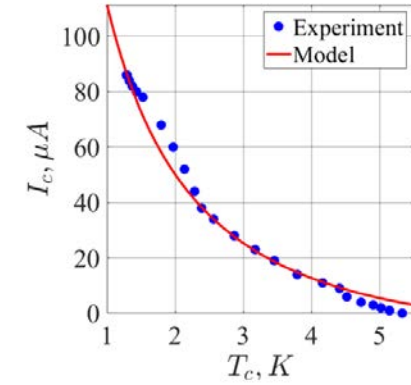
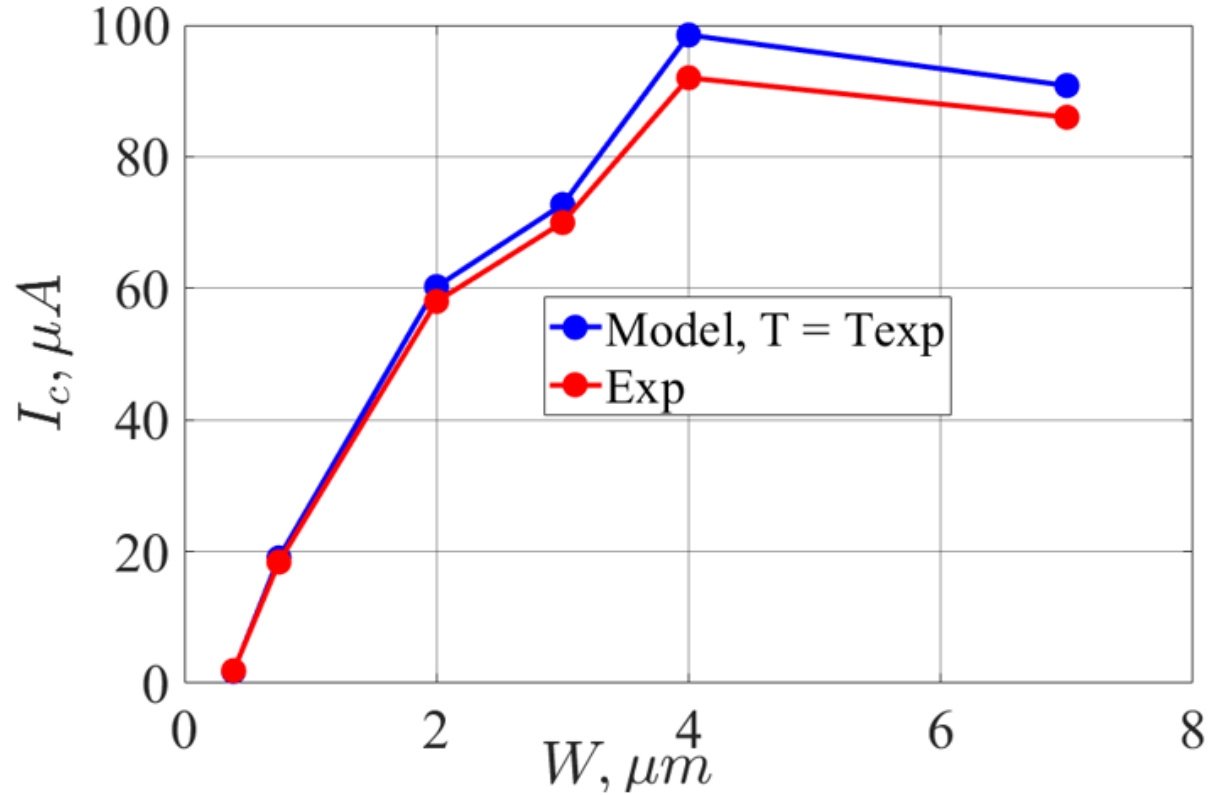
Сопротивление $T > T_c$



Сопротивление $T < T_c$



Сравнение с экспериментом



Итоги работы

- Получено аналитическое выражение для энергии Таулеса в SNS мостиках
- Учтено влияние растекания токов по электроду на токовые характеристики SNS мостика
- Учтено влияние малопрозрачной границы на токовые характеристики SNS мостика
- Построены зависимости критического тока от размеров электрода и проведено сравнение с экспериментом



Article

Contribution of Processes in SN Electrodes to the Transport Properties of SN-N-NS Josephson Junctions

Vsevolod Ruzhickiy ^{1,2,3,†}, Sergey Bakurskiy ^{1,3,†}, Mikhail Kupriyanov ^{1,3,*}, Nikolay Klenov ^{3,4}, Igor Soloviev ^{1,3}, Vasily Stolyarov ^{2,3,5} and Alexander Golubov ^{5,6}

LETTER

Thouless energy in Josephson SN-N-NS bridges