

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**ЛАБОРАТОРИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СИСТЕМАХ**

**ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
по теме**

**«Экспериментальное исследование эффекта поля в  
сверхпроводнике NbN»**

**Долгопрудный, 2024 г.**

# 1 Введение

Механизм подавления сверхпроводимости в металлах, помещенных в электрическое поле, до сих пор остается спорным. Согласно классической теории, на расстоянии длины Дебая  $\lambda_D$  от поверхности металла наблюдается сильное экранирование, обусловленное высокой концентрацией свободных электронов. Однако имеется множество свидетельств подавления сверхпроводимости в постоянном электрическом поле. Было предложено несколько фундаментальных механизмов подавления сверхпроводимости [Ruf et al., 2024], описывающих так называемый «прямой полевой эффект», основанный на том, что длина когерентности куперовской пары  $\xi$  сравнима с толщиной металлической пленки. Среди них такие механизмы, как сверхпроводящий эффект ШвингераAmogretti [2023], подавление сверхпроводимости через поверхностную орбитальную поляризацию Mercaldo et al. [2020] и т.д.

Однако наблюдаемое подавление сверхпроводящей щели  $\Delta(T)$  сверхпроводника до сих пор остается не до конца объясненным явлением из-за неоднозначности экспериментальных результатов, вызванной тем, что для получения высокого значения напряжения в области сверхпроводника, гейты должны располагаться близко к сверхпроводнику (20-100 нм), что приводит к увеличению тока утечки и реализации механизма полевой эмиссии. Тем не менее, для практического использования также представляют интерес устройства, работа которых основана на инжекции квазичастиц через гейт Alegria et al. [2021].

Большинство исследований посвящено планарным схемам, в которых гейт и сверхпроводник расположены на подложке и разделены вакуумом, фактическое электрическое поле гейта таких систем имеет сложную конфигурацию De Simoni et al. [2018], Ritter et al. [2021]. Некоторые публикации посвящены изучению трехмерной структуры Elalaily et al. [2021], Yu et al. [2023]. В данной работе реализована многослойная структура, слои которой формируют плоский конденсатор и тонкую полоску сверхпроводника внутри. Такая геометрия обеспечивает однородное плоскопараллельное электрическое поле, значительно облегчая анализ результатов.

# 2 Описание образцов

Структура представляет собой сверхпроводящий мостик из нитрида ниобия(NbN), помещенный внутрь плоского конденсатора из молибдена(Mo). В качестве диэлектрика между обкладками использованы слои оксида кремния, полученные плазмохимическим осаждением из паровой фазы (PECVD SiO<sub>2</sub>).

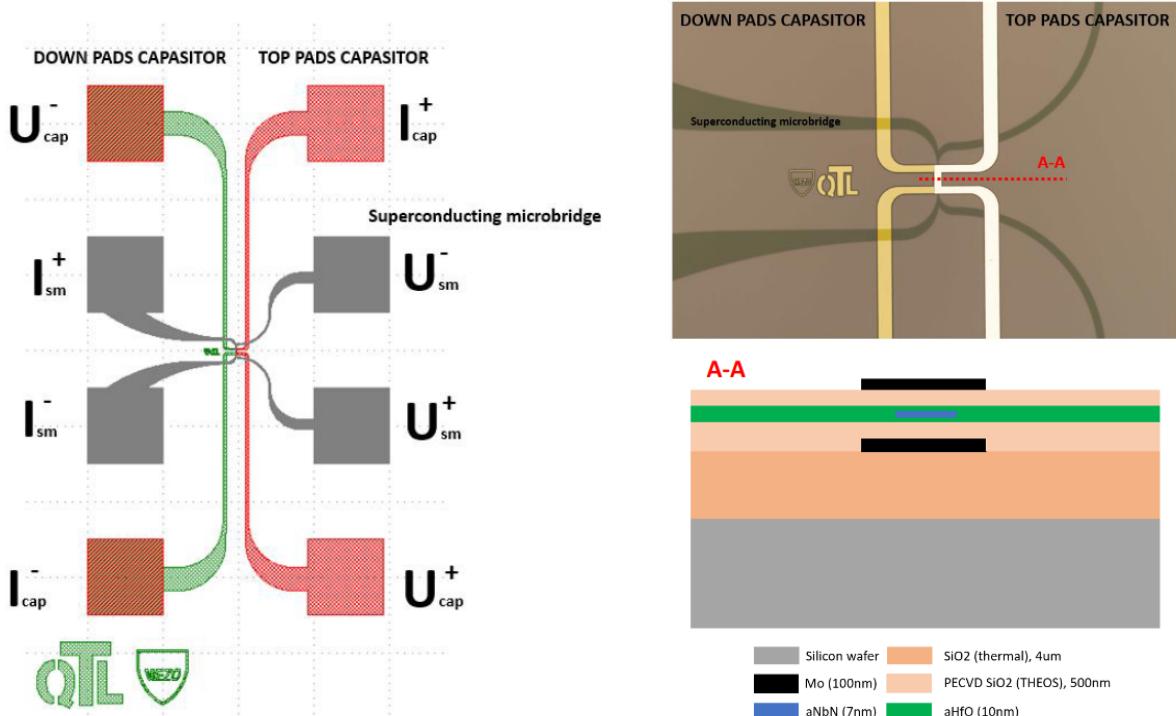


Рис. 1: Слева: дизайн структуры; справа: раскрашенная фотография СЭМ и схематическое изображение слоёв структуры при поперечном сечении через мостик.

### 3 Первичная обработка измерений

Исследовались три одинаковых образца (A, B, C). Измерения производились с помощью криостата замкнутого цикла attoDRY2100, позволяющего охладить образец до 3.8 К. Экспериментально полученная температура перехода нормальный металл/сверхпроводник у NbN составила  $T_c = 8.3$  К. NbN всех образцов переходит в сверхпроводящее состояние.

#### 3.1 Дифференциальное сопротивление в широком диапазоне температур.

Для двух образцов получены зависимости дифференциального сопротивления при охлаждении транспортной вставки в Аттокубе. Сопротивление повышается по мере приближении к критической температуре  $T_c$  сверхпроводника NbN. Далее происходит скачкообразное снижение сопротивления до остаточного значения 40-180 Ом.

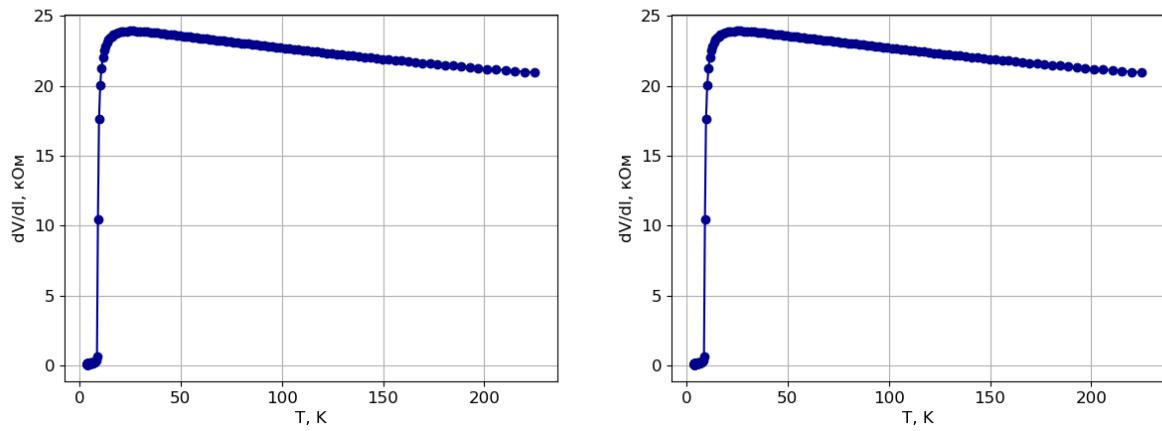


Рис. 2: Зависимость дифференциального сопротивления двух одинаковых образцов А(а) и В(б) от температуры.

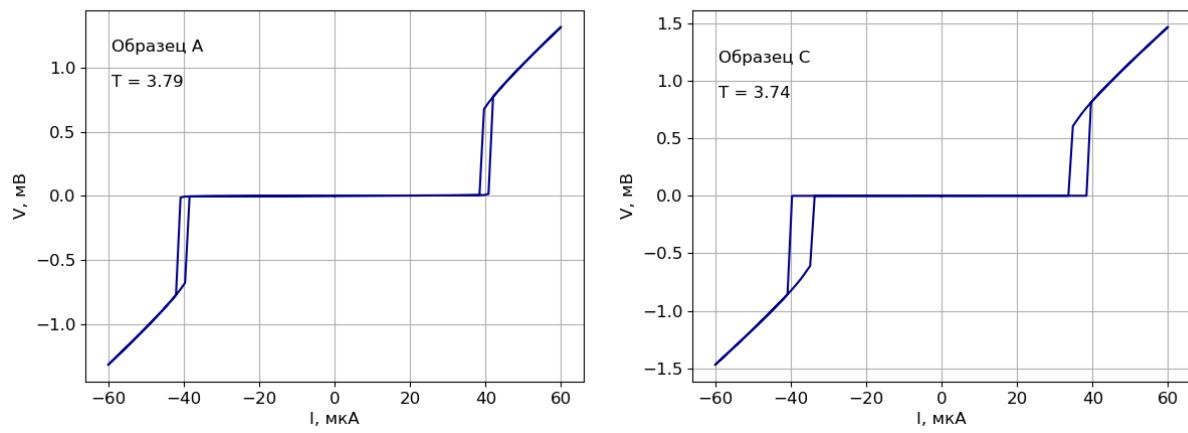


Рис. 3: Вольт-амперные характеристики двух образцов, измеренные в разных циклах охлаждения.

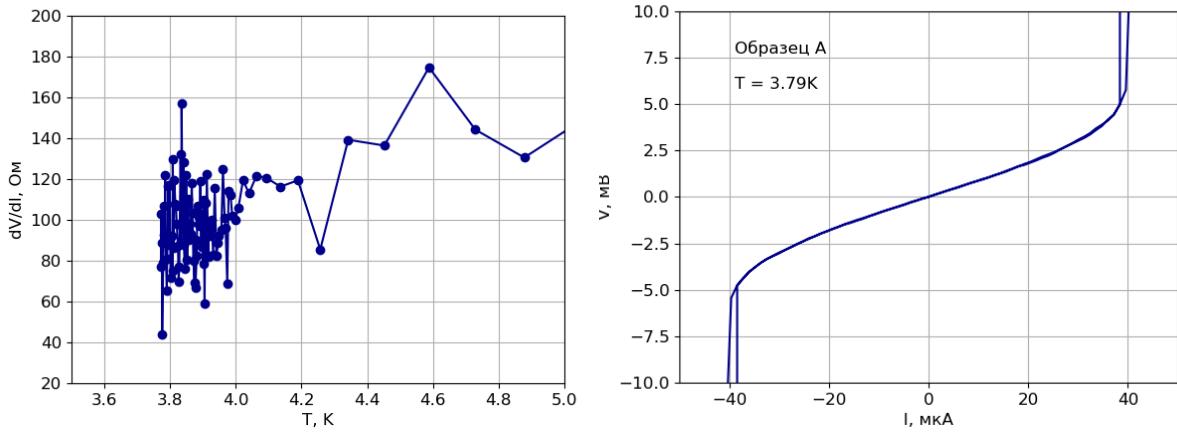


Рис. 4: Слева: Остаточное сопротивление образца В при  $T = 3.5$  К; справа: изгиб вольт-амперной характеристики, обусловленный остаточным сопротивлением образца А, вероятно, обусловленным деградацией границы NbN при малой толщине плёнки ( $t = 7$  nm) Rocci et al. [2020].

ВАХ конденсатора измерялась при комнатной температуре и при базовой температуре Аттокуба  $T = 3.8$  К, с помощью электрической схемы, изображенной на рисунке:

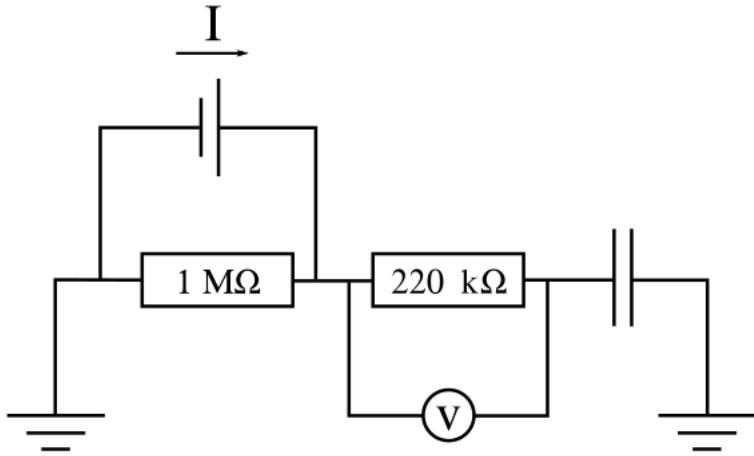


Рис. 5: Схема подключения приборов при измерении тока утечки с использованием источника тока Keithley 6221 для создания напряжения на конденсаторе.

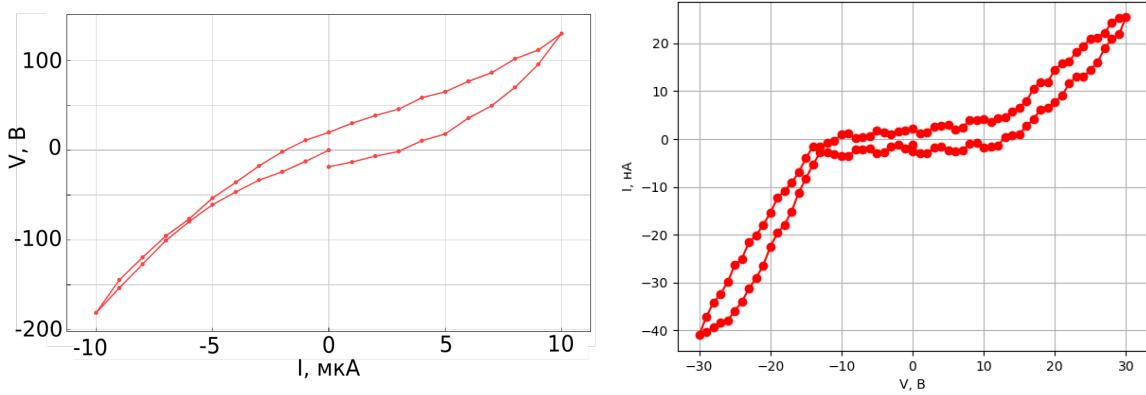


Рис. 6: Слева: ВАХ конденсатора при комнатной температуре; справа: ВАХ конденсатора при базовой температуре  $T = 3.8$  К, обычное подключение конденсатора (напряжение подается с помощью источника тока Yakogawa)

Ток утечки на три порядка превышает обычные значения в экспериментальных публикациях ( $I_{leak} \sim 10$  нА, вместо  $I_{leak} \sim 10$  пА) Ruf et al. [2024].

### 3.2 Отрицательное сопротивление

Была предпринята попытка обнаружить участки ВАХ, демонстрирующие отрицательное сопротивление. Для этого измерялась зависимость  $V(I)$  в большом диапазоне тока при малом шаге (контролировался ток и измерялось напряжение). Скачки не были обнаружены.

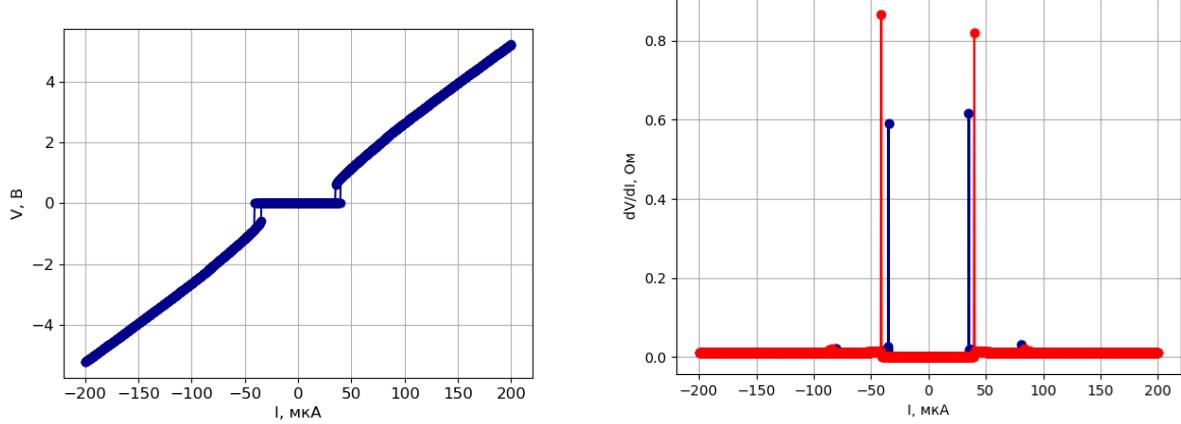


Рис. 7: слева: полная вольт-амперная характеристика образца до 200 мкА; справа: дифференциальное сопротивление, красная кривая соответствует прямому ходу измерения по току, синяя - обратному.

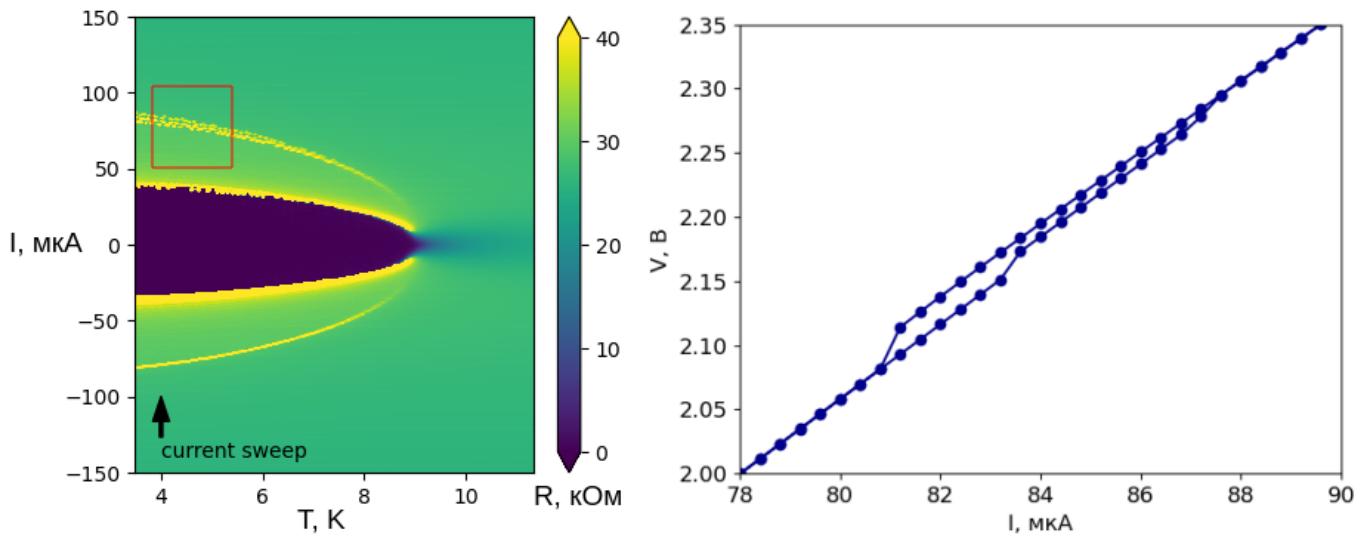


Рис. 8: Слева: дифференциальное сопротивление образца в зависимости от температуры, около  $I = 80$  мкА(область обозначена красным) при базовой температуре наблюдается ещё один гистерезис, сохраняющийся до перехода NbN в нормальное состояние; справа: участок ВАХ, на котором происходят скачки напряжения.

### 3.3 Различия между вольт-амперными характеристиками при разных напряжениях $V_{cap}$

Для обнаружения влияния электрического поля измерялись ВАХ NbN при разных напряжениях на обкладках конденсатора. При разных температурах вычитались кривые ВАХ при нулевом напряжении  $V_{cap} = 0$  В из кривых, полученных при ненулевом напряжении ( $V_{cap} = 10$  В, 20 В, 30 В).

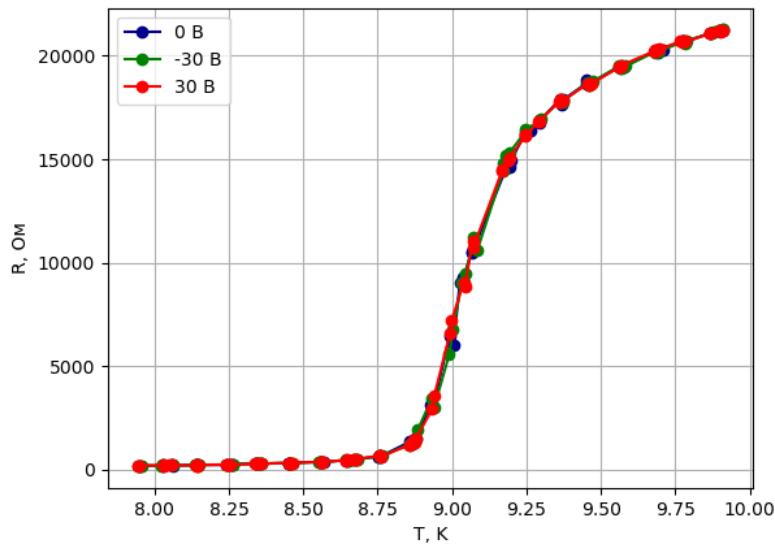


Рис. 9: Подробное измерение дифференциального сопротивления образца вблизи  $T_c$ .

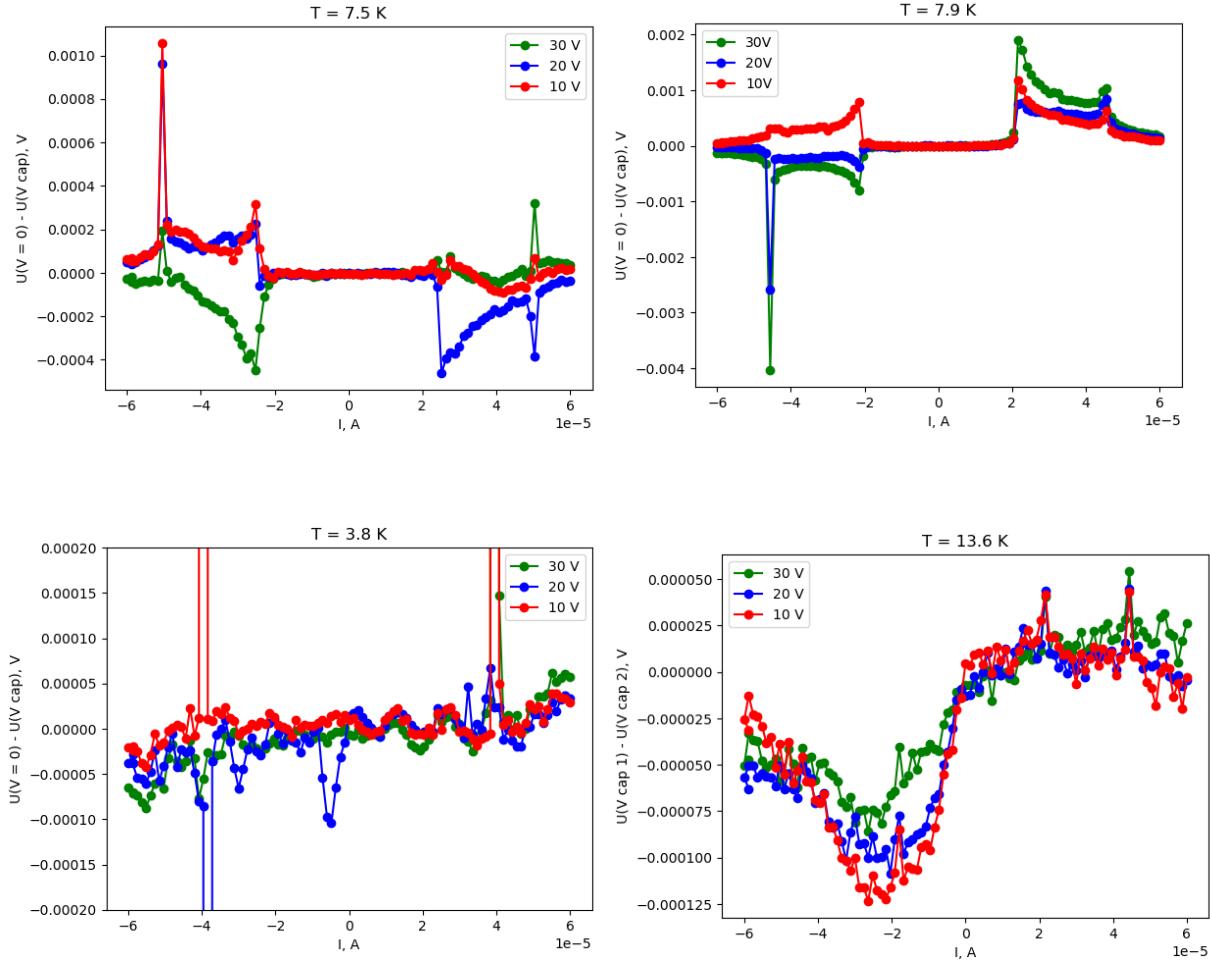
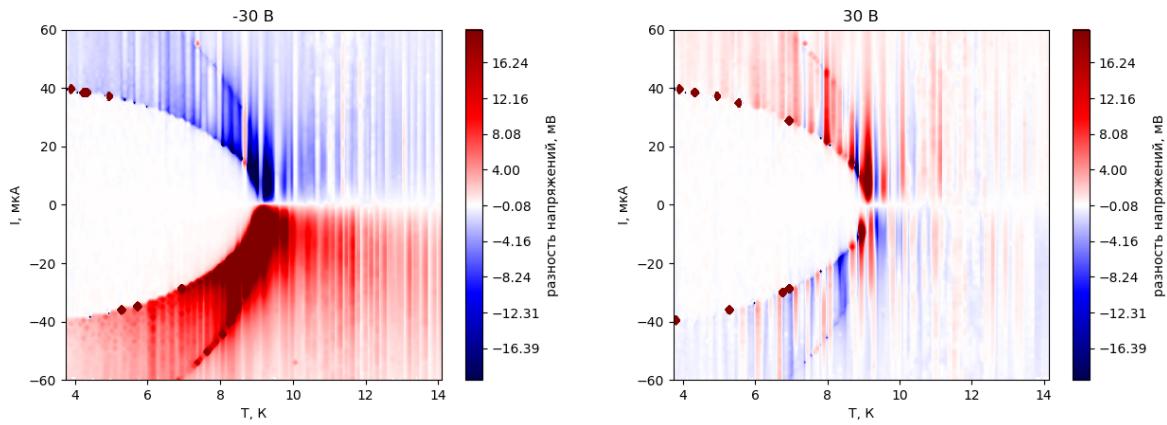


Рис. 10: Разность между ВАХ сверхпроводника при различных температурах.

Была исследована разность ВАХ в зависимости от температуры. При этом сначала программно устанавливалась температура нагревателя внутри АттоКуба, а затем производились измерения, при последовательном установлении напряжения от -30 В до 30 В. Наблюдаемые различия, скорее всего, обусловлены отставанием нагревания образца от момента начала измерений. При установлении определенной температуры и изменении напряжения на конденсаторе закономерностей в разности напряжений на диаграммах не наблюдается.



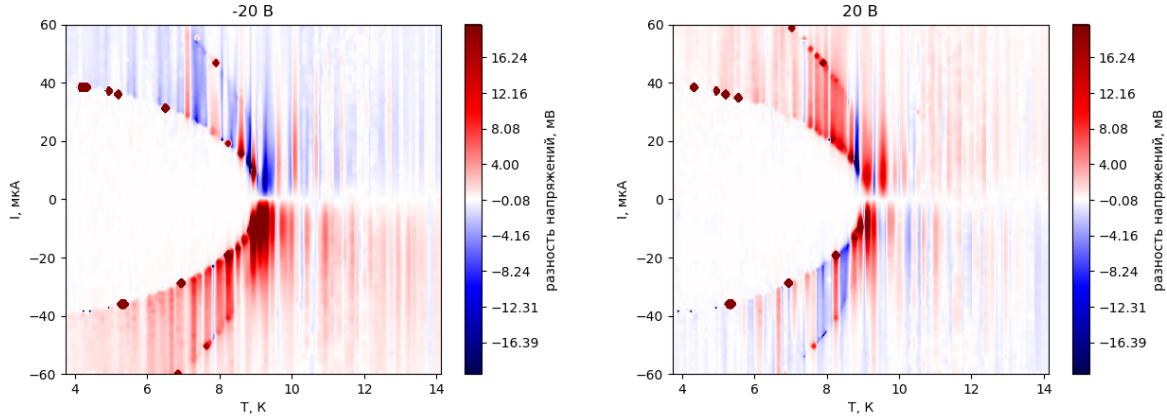


Рис. 11: Разность между ВАХ сверхпроводника при различных температурах.

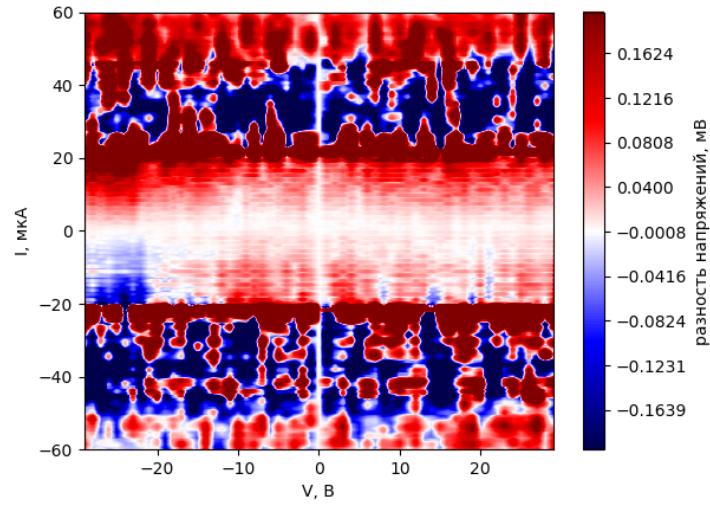


Рис. 12: Разность между ВАХ образца в зависимости от напряжения на конденсаторе при  $T = 7.9$  К

Полученные данные не демонстрируют монотонную зависимость амплитуды разности от приложенного напряжения. Наиболее выражена разница при температурах, близких к критической  $T_c \approx 8.3K$ .

Далее были произведены измерения при напряжении  $V_{cap}$ , достигающем 90 В. Результаты получились неоднозначными: в некоторых измерениях отчётливо наблюдается сдвиг критической температуры, но при повторном проведении эксперимента эффект не обнаруживается.

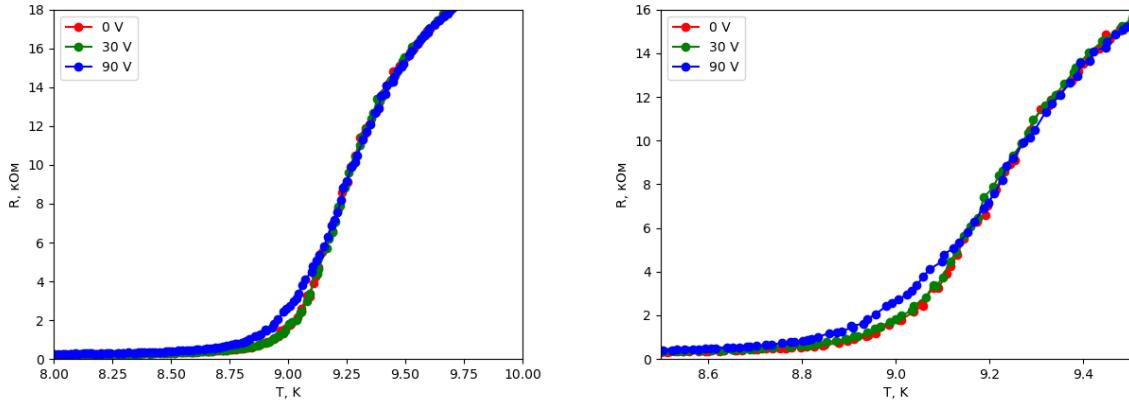


Рис. 13: Разность между ВАХ сверхпроводника при различных температурах.

Требуется повторение измерений в данной конфигурации при  $V_{cap} = 90$  В и при больших напряжения.

### 3.4 Гейтинг образца

#### 3.4.1 Гейт 1: напряжение на одной обкладке конденсатора

Образец также подключался в конфигурации «back-gate», часто применяемой при исследовании эффекта поля. В данной работе расстояние между сверхпроводником и гейтом  $\approx 500$  нм, при этом максимальное напряжение на гейте  $V_{gate} = 90$  В.

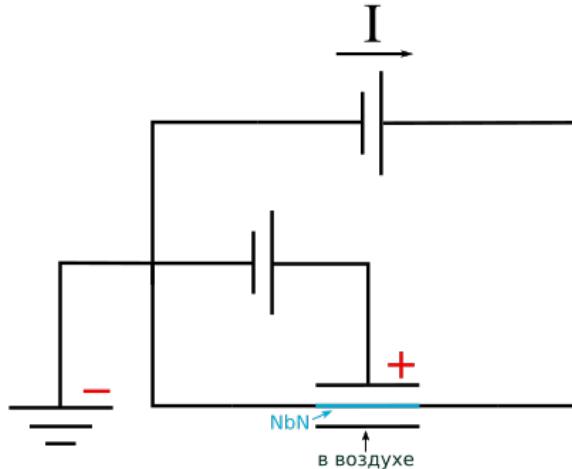


Рис. 14: Схема подключения образца при одностороннем гейтинге сверхпроводника

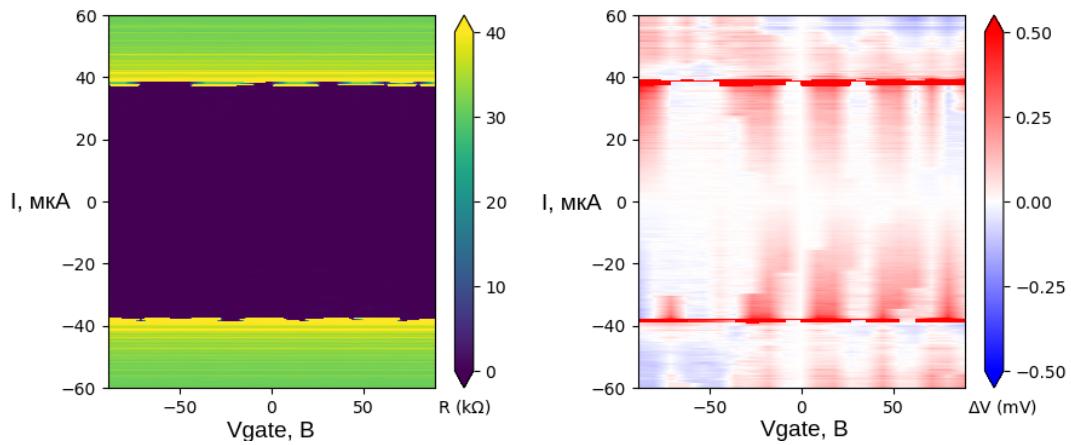


Рис. 15:  $T = 3.5\text{ K}$ , дифференциальное сопротивление(слева) и разность между ВАХ(справа)

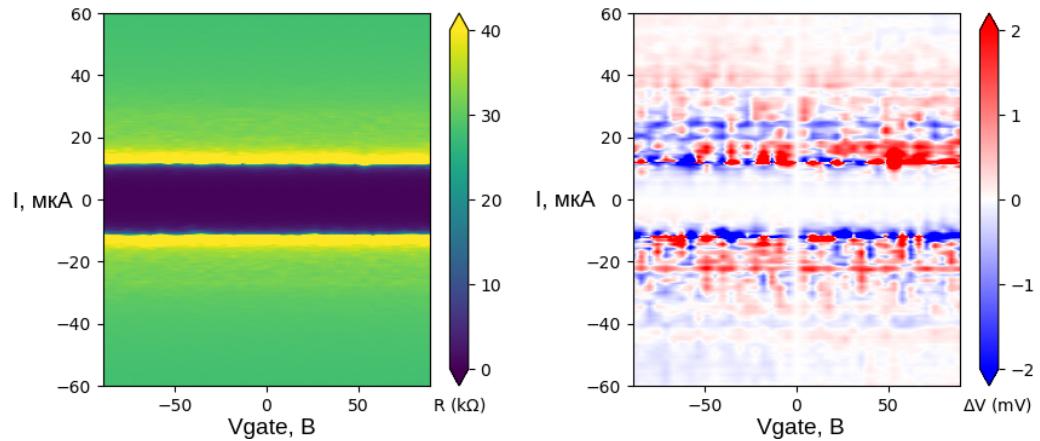


Рис. 16:  $T = 8.8\text{ K}$ , дифференциальное сопротивление(слева) и разность между ВАХ(справа)

### 3.4.2 Гейт 2: напряжение на обеих обкладках конденсатора

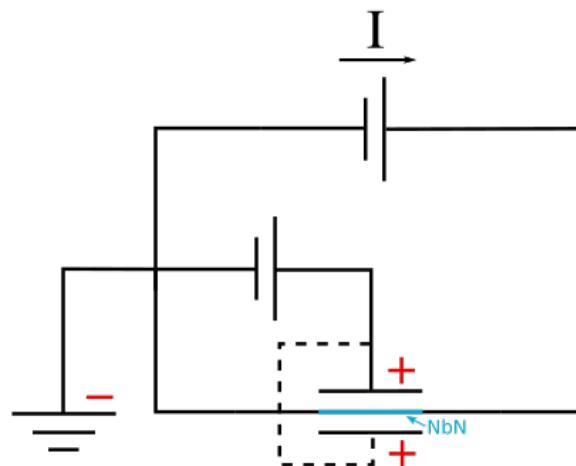


Рис. 17: Схема подключения образца при двустороннем гейтинге сверхпроводника

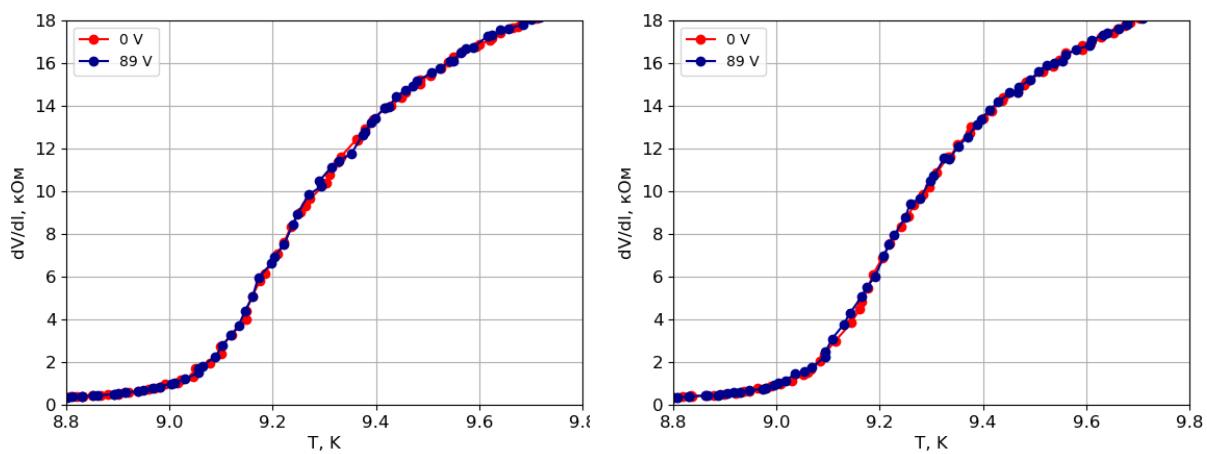


Рис. 18: Прямой(слева) и обратный(справа) ход измерений в присутствии поля (синяя кривая) и при  $V_{cap} = 0$  В (красная кривая).

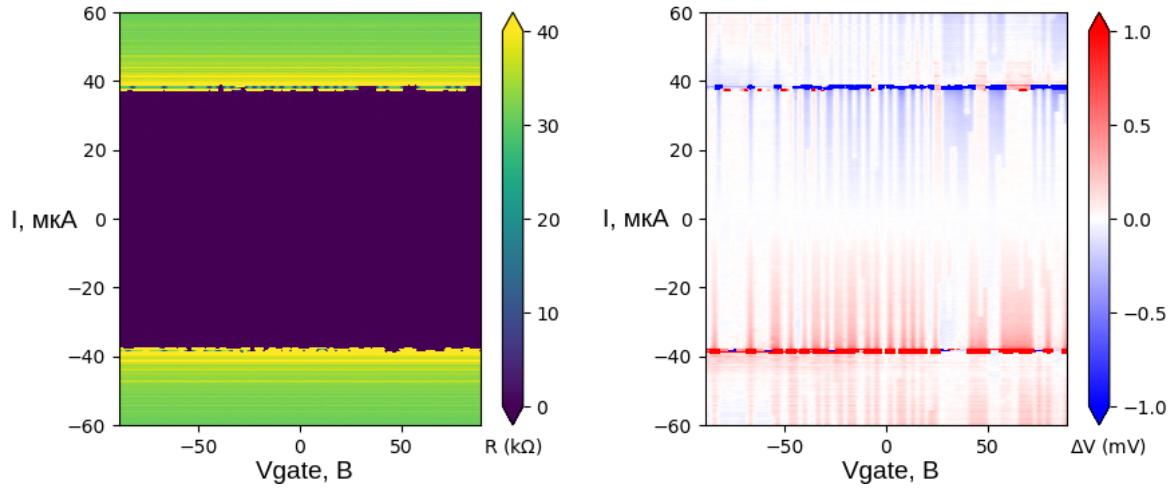


Рис. 19:  $T = 3.5$  K, дифференциальное сопротивление(слева) и разность между ВАХ(справа)

Закономерностей в изменении ВАХ не обнаружено.

### 3.5 Измерение ёмкости конденсатора

С помощью LCR Keysight E4980AL были определены емкости и сопротивления конденсаторов трех одинаковых образцов:

N	$C_p$ , пФ	$R_p$ , МОм
1	21.1	700
2	23.4	196
3	29.2	609



Рис. 20: Слева: зонды при измерении ёмкости конденсатора; справа: LCR Keysight E4980AL во время измерения.

## 4 Результаты

В рамках работы не было выявлено воспроизведимого подавления сверхпроводимости. Напряжение до  $V_{cap} = 90$  В подавалось на обкладки конденсатора, подключенные в различных конфигурациях. Максимальную напряженность поля внутри конденсатора можно оценить как  $E = U/d \approx 9 \cdot 10^7$  В/м, где  $d \approx 1$  мкм - расстояние между обкладками. При этом авторы теоретических работ, описывающих механизм подавления сверхпроводимости, опираются на экспериментальные значения  $E = 30 \cdot 10^7$  В/м Mercaldo et al. [2020],  $E = 70 \cdot 10^7$

В/м Chakraborty et al. [2023] и т.д. Напряженность поля вблизи расположенного в плоскости гейта сложной геометрии тяжело оценить без моделирования, однако, как правило, расстояние между образцом и гейтом на порядок меньше, чем в данном эксперименте Ruf et al. [2024] при схожих значениях подаваемых напряжений. Столь малое расстояние (< 100 нм) повышает вклад таких процессов, как автоэлектронная эмиссия с гейта и перегрев сверхпроводника, усложняя интерпретацию экспериментальных данных. Таким образом, при дальнейшем увеличении напряжения на конденсаторе и уменьшении расстояния между обкладками должен наблюдаться «эффект поля» с неопределенным механизмом.

## Список литературы

- Loren D. Alegria, Charlotte G. L. Böttcher, Andrew K. Saydari, Andrew T. Pierce, Seung Hwan Lee, Shannon P. Harvey, Uri Vool, and Amir Yacoby. High-energy quasiparticle injection into mesoscopic superconductors. *Nature Nanotechnology*, 16(4):404–408, January 2021. ISSN 1748-3395. doi: 10.1038/s41565-020-00834-8. URL <http://dx.doi.org/10.1038/s41565-020-00834-8>.
- Andrea Moretti. Superconductors in strong electric fields: Quantum electrodynamics meets superconductivity. *Journal of Physics: Conference Series*, 2531:012001, 06 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2531/1/012001.
- Subrata Chakraborty, Danilo Nikolić, Juan Carlos Cuevas, Francesco Giazotto, Angelo Di Bernardo, Elke Scheer, Mario Cuoco, and Wolfgang Belzig. Microscopic theory of supercurrent suppression by gate-controlled surface depairing. *Physical Review B*, 108(18), November 2023. ISSN 2469-9969. doi: 10.1103/physrevb.108.184508. URL <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.108.184508>.
- Giorgio De Simoni, Federico Paolucci, Paolo Solinas, Elia Strambini, and Francesco Giazotto. Metallic supercurrent field-effect transistor. *Nature Nanotechnology*, 13(9):802–805, July 2018. ISSN 1748-3395. doi: 10.1038/s41565-018-0190-3. URL <http://dx.doi.org/10.1038/s41565-018-0190-3>.
- Tosson Elalaily, Olivér Kürtössy, Zoltán Scherübl, Martin Berke, Gergő Fülöp, István Endre Lukács, Thomas Kanne, Jesper Nygård, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Péter Makk, and Szabolcs Csonka. Gate-controlled supercurrent in epitaxial Al/InAs nanowires. *Nano Letters*, 21(22):9684–9690, November 2021. ISSN 1530-6992. doi: 10.1021/acs.nanolett.1c03493. URL <http://dx.doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c03493>.
- Maria Teresa Mercaldo, Paolo Solinas, Francesco Giazotto, and Mario Cuoco. Electrically tunable superconductivity through surface orbital polarization. *Physical Review Applied*, 14(3), September 2020. ISSN 2331-7019. doi: 10.1103/physrevapplied.14.034041. URL <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.034041>.
- M. F. Ritter, A. Fuhrer, D. Z. Haxell, S. Hart, P. Gummam, H. Riel, and F. Nichele. A superconducting switch actuated by injection of high-energy electrons. *Nature Communications*, 12(1), February 2021. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/s41467-021-21231-2. URL <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-021-21231-2>.
- Mirko Rocci, Dhavala Suri, Akashdeep Kamra, Gilvânia Vilela, Yota Takamura, Norbert M. Nemes, Jose L. Martinez, Mar Garcia Hernandez, and Jagadeesh S. Moodera. Large enhancement of critical current in superconducting devices by gate voltage. *Nano Letters*, 21(1):216–221, December 2020. ISSN 1530-6992. doi: 10.1021/acs.nanolett.0c03547. URL <http://dx.doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c03547>.
- Leon Ruf, Claudio Puglia, Tosson Elalaily, Giorgio De Simoni, Francois Joint, Martin Berke, Jennifer Koch, Andrea Iorio, Sara Khorshidian, Peter Makk, Simone Gasparinetti, Szabolcs Csonka, Wolfgang Belzig, Mario Cuoco, Francesco Giazotto, Elke Scheer, and Angelo Di Bernardo. Gate control of superconducting current: Mechanisms, parameters and technological potential, 2024. URL <https://arxiv.org/abs/2302.13734>.
- Shujie Yu, Lei Chen, Yiping Pan, Yue Wang, Denghui Zhang, Guangting Wu, Xinxin Fan, Xiaoyu Liu, Ling Wu, Lu Zhang, Wei Peng, Jie Ren, and Zhen Wang. Gate-tunable critical current of the three-dimensional niobium nanobridge josephson junction. *Nano Letters*, 23(17):8043–8049, August 2023. ISSN 1530-6992. doi: 10.1021/acs.nanolett.3c02015. URL <http://dx.doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c02015>.