

05

Многочастотная генерация в массивах джозефсоновских контактов

© М.А. Галин¹, Л.С. Ревин^{1,2}, М.Ю. Левичев¹, А.Е. Парафин¹, Д.В. Мастеров¹, В.В. Курин¹,
И.А. Шерешевский¹, Н.К. Вдовичева¹

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия
E-mail: galin@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 11 июня 2025 г.

Принято к публикации 11 июня 2025 г.

В ходе экспериментального исследования спектров электромагнитного излучения большого массива низкотемпературных джозефсоновских контактов, изготовленных на основе ниобия, обнаружено явление многочастотной генерации. Спектр массива измерялся сверхпроводниковым приемником, смеситель в котором представляет собой высокотемпературный бикристаллический джозефсоновский переход. Проведенное численное моделирование джозефсоновской системы, аналогичной исследуемой экспериментально, показало, что режим многочастотной генерации возникает при наличии в массиве контактов собственных мод с близкими частотами.

Ключевые слова: массив джозефсоновских контактов, бикристаллический джозефсоновский контакт, спектроскопия, метод FDTD, резонатор.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.17.60971.20344

Одним из проявлений нелинейных свойств джозефсоновского контакта является генерация на нем переменного напряжения при приложении постоянного тока выше критического значения. При этом контакт излучает электромагнитный сигнал в миллиметровом или терагерцевом диапазоне. Однако мощность такого сигнала очень мала и не превышает пиковаттного уровня [1,2]. Детектируемая мощность дополнительно подавлена из-за большого рассогласования контакта с внешней средой, диссипации излучения в окружающей структуре и большой доли высших гармоник в спектре [2].

Для получения мощности генерации, достаточной для практических приложений, необходимо использовать массивы джозефсоновских контактов. Массивы обычно состоят из сосредоточенных контактов, размер которых l не превышает джозефсоновскую глубину проникновения λ_J . В отличие от длинного джозефсоновского контакта, у которого $l \gg \lambda_J$, массив сосредоточенных контактов не нуждается в управляющей линии для индуцирования магнитного поля, а синхронизация контактов потенциально позволяет добиться узкой линии генерации, ширина которой обратно пропорциональна числу синхронизированных контактов [3].

Настоящая работа посвящена спектральным исследованиям массива низкотемпературных контактов, выполненных на основе ниобия. Подобные массивы востребованы в качестве стандартов напряжения, и технология их изготовления постоянно совершенствуется. Они характеризуются малым разбросом критических токов джозефсоновских контактов $\sim 2\text{--}3\%$ [4], что позволяет изготавливать схемы программируемых стандартов напряжения, содержащих $\sim 10^5$ контактов [5].

По этому показателю с ними не могут конкурировать джозефсоновские контакты другого типа: высокотемпературные контакты имеют гораздо худшую воспроизводимость [6,7], а для внутренних контактов на основе соединения BiSrCaCuO добавляется также проблема неоднородного разогрева [8,9]. Малый разброс параметров в сочетании с удачной топологией сверхпроводниковой схемы и большим числом контактов дает надежду на получение достаточно узкой спектральной линии джозефсоновской генерации. Изначально узкая линия генерации облегчает процедуру фазовой автоподстройки частоты, которая приводит к дополнительному сужению линии до степени, требуемой для практических приложений, в частности для применения массива в качестве гетеродина [10,11]. В настоящей работе был обнаружен эффект генерации массива одновременно на нескольких частотах. Этот эффект является паразитным в случае указанных выше применений массива контактов, однако может оказаться полезным для других научных и технологических задач.

Исследованный массив содержит 9996 джозефсоновских контактов Nb/NbSi/Nb, выращенных на кремниевой подложке (рис. 1). Контакты распределены по семи одинаковым секциям. Каждая секция представляет собой три однополосковые линии (ОПЛ) длиной 7.1 mm, каждая ОПЛ содержит 476 контактов. Геометрически ОПЛ параллельны друг другу и соединены последовательно по постоянному току. Между секциями расположены контактные площадки, которые позволяют подключать к источнику питания как весь массив, так и отдельные его части. Размер контакта $8 \times 8 \mu\text{m}$, толщина прослойки NbSi около 10 nm. Процесс изготовления таких контактов описан в [4,12].

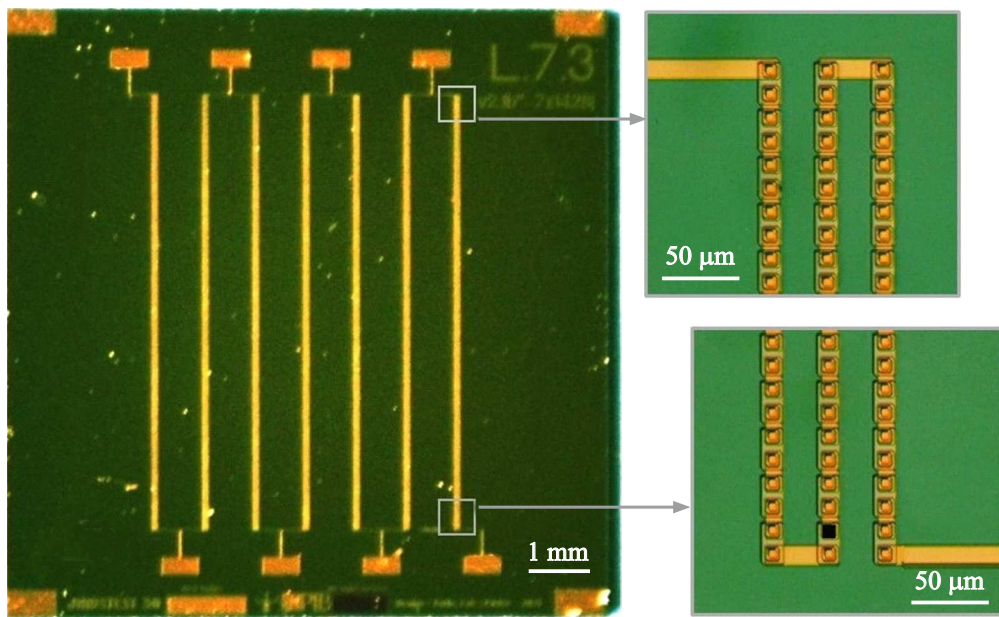


Рис. 1. Фотография массива джозефсоновских контактов Nb/NbSi/Nb. На вставках показаны фрагменты массива. Черным квадратом на нижней вставке обозначено положение одного из контактов.

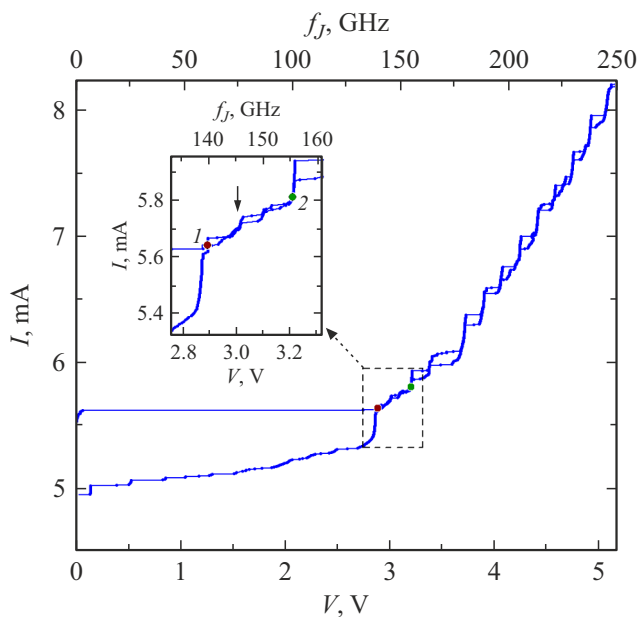


Рис. 2. ВАХ массива джозефсоновских контактов. На верхней оси отложена джозефсоновская частота, усредненная по всему массиву. В отмеченных на вставке точках проводились измерения, представленные на рис. 3. Стрелкой указана ступень, которой соответствует вторая спектральная линия на рис. 3, а.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) массива изображена на рис. 2. Гистерезис образован за счет неодновременного перехода отдельных контактов из резистивного состояния в сверхпроводящее [13]. Резистивная ветвь ВАХ массива состоит из отдельных участков повышенной дифференциальной проводимости или сту-

пеней, также разделенных между собой гистерезисными переходами. Эти ступени являются следствием резонансов, возникающих в массиве при совпадении джозефсоновских частот контактов с частотами утекающих (leaky) мод. Резонансы возбуждаются на прямолинейных участках массива — ОПЛ, из которых образована каждая секция. В [11] для подобного массива было показано, что длина таких ОПЛ соответствует среднему расстоянию между ступенями Δf_J , представленному в величинах усредненной по всем контактам массива джозефсоновской частоты f_J , если рассматривать каждую ОПЛ как однополосковый резонатор, расположенный на границе сред подложки и воздуха. Для исследованного в настоящей работе массива имеем $\Delta f_J = 8.2$ GHz, что меньше, чем для массива в [11], из-за большей длины ОПЛ: 7.1 mm вместо 5 mm.

Тем не менее идеальной эквидистантности между ступенями не наблюдается. Кроме того, на ВАХ имеется более тонкая структура в виде ступеней меньшего размера, плавных переходов между ступенями и т.п. Это можно объяснить более сложным устройством резонансной системы в массиве, которое не сводится к одномерному резонатору в виде ОПЛ. На это указывают результаты в [14], где было проведено сканирование массива низкотемпературным лазерным микроскопом, что позволило визуализировать распределение электромагнитного поля, возбуждаемого на массиве. Результаты выявили сильную связь между ОПЛ, составляющими одну секцию, что приводит фактически к формированию на всей секции двумерной модовой структуры. Кроме того, в [15] было показано, что в формировании мод может участвовать и подложка.

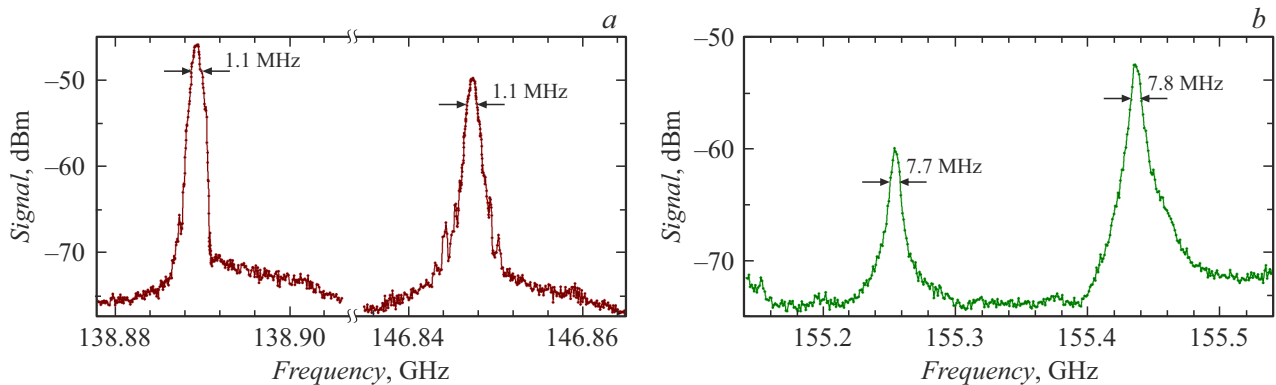


Рис. 3. Спектр джозефсоновской генерации, измеренный в точках ВАХ 1 (а) и 2 (б), отмеченных на рис. 2. Для каждой линии указана ширина, измеренная на уровне 1/2 от максимума.

Образец охлаждался жидким гелием внутри сосуда Дьюара. Джозефсоновское излучение выводилось наружу по волноводному тракту. Как и в [16], измерения проводились на приемнике со смесителем, представляющим собой высокотемпературный джозефсоновский контакт, сформированный на бикристаллической границе подложки из оксида иттрия-циркония. В [16] на спектре как для всего массива, так и для его части всегда наблюдалась одна линия, соответствующая определенному резонансу. Ширина линий варьировалась от 0.3 до ~ 10 MHz в зависимости от типа источника питания и уровня технических шумов. Было замечено, что на краях основных ступеней ВАХ, а также на малых ступенях положение линий на спектре может значительно отличаться от f_J . Было сделано предположение, что такое сильное отклонение частоты связано с возбуждением в массиве сразу двух резонансов, соответствующих соседним ступеням ВАХ. В измерениях, представленных в настоящей работе, получено подтверждение данной гипотезы.

На рис. 3,а показан спектр генерации, снятый при смещении по ВАХ на верхний край первой ступени (точка 1 на вставке к рис. 2). Питание осуществлялось с помощью источника тока Keithley 6221. Измерения охватывали диапазон частот шириной 8 GHz, на краях которого наблюдаются две спектральные линии шириной ~ 1 MHz. Их не удастся наблюдать одновременно из-за ограниченной полосы усилителей промежуточной частоты ~ 2 GHz, поэтому для регистрации второй линии изменялась частота гетеродина при фиксированном положении рабочей точки. Левая спектральная линия связана с возбуждением резонанса на той же ступени ВАХ, где расположена рабочая точка. Эта ступень расположена в диапазоне $f_J = 138\text{--}139$ GHz, что соответствует положению линии на спектре. Правая линия, скорее всего, связана с возбуждением резонанса на одной из двух небольших ступенек, расположенных между двумя основными ступенями. Эта ступенька указана стрелкой на вставке к рис. 2. Она расположена в диапазоне $f_J = 145\text{--}146$ GHz, что примерно соответствует поло-

жению на спектре правой линии. Небольшое отличие этого положения от f_J может объясняться вкладом в f_J от асинхронных контактов массива [17].

На рис. 3,б представлен спектр массива, измеренный на нижнем краю второй основной ступени ВАХ (точка 2 на вставке к рис. 2). Спектр содержит две линии джозефсоновской генерации шириной около 8 MHz. Они удалены друг от друга менее чем на 200 MHz, поэтому на сверхпроводниковом приемнике их удастся наблюдать одновременно. Частоты этих линий хорошо соответствуют положению рабочей точки на ВАХ. Несмотря на то что линии заметно шире и ниже, чем представленные на рис. 3,а, они имеют ту же природу, т.е. являются линиями двухчастотного резонансного возбуждения, соответствующего второй основной ступени. Таким образом, даже в пределах одной ступени может происходить расщепление резонансных мод из-за сложного устройства системы, в которую встроены массив джозефсоновских контактов.

Наблюдение в измерениях двухчастотной генерации массива джозефсоновских контактов было подкреплено результатами численного моделирования. Вычислительный алгоритм объединяет метод Finite Difference Time Domain (FDTD) с уравнениями резистивной модели контакта [18]. Излучающая система, называемая джозефсоновской антенной, включает в себя произвольное количество контактов, источники ЭДС и пассивные линейные элементы, которые объединены тонкими идеальными проволоками в единую цепь. Антенна может располагаться на подложке. Более подробное описание метода вычислений вместе с результатами расчета ВАХ, излучаемой мощности, спектров переменного тока и напряжения и диаграммы направленности можно найти в [17].

Моделируемая джозефсоновская антенна состоит из семи линий длиной $L = 1.8$ mm, соединенных между собой параллельно (рис. 4,а). На центральной линии расположен источник ЭДС с внутренним сопротивлением 50Ω , а на остальных линиях размещено по 40 джозефсоновских контактов. Критический ток, нормальное

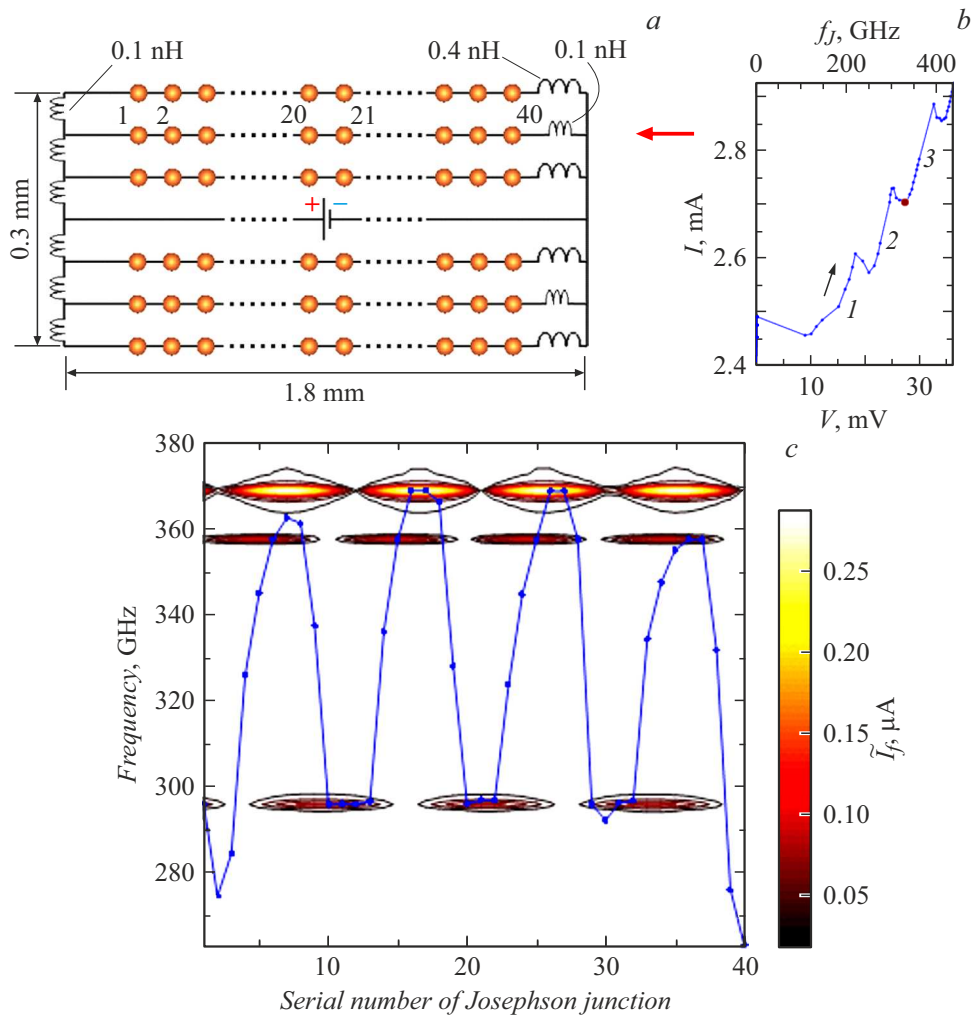


Рис. 4. *a* — схема джозефсоновской антенны, выбранная для численного моделирования. Кружки обозначают джозефсоновские контакты, некоторые из них пронумерованы. Указаны также значения индуктивностей, длина и ширина антенны. В центре обозначен источник ЭДС. *b* — ВАХ второй линии джозефсоновской антенны. На верхней оси отложена джозефсоновская частота, усредненная по контактам в линии. Стрелкой показано направление записи ВАХ. Цифрами 1–3 обозначены ступени. В точке, указанной на ВАХ, проводился расчет спектра переменного тока. *c* — амплитуда спектра переменного тока в зависимости от номера контакта второй линии. Сплошная линия, наложенная на спектр, обозначает распределение джозефсоновской частоты по контактам.

сопротивление и параметр Маккамбера контакта равны соответственно $I_c = 2.5$ mA, $R_n = 0.5 \Omega$ и $\beta = 0.2$. В конце каждой линии с контактами располагается также индуктивность. Для двух линий, расположенных вторыми от верхнего и нижнего края антенны, эта индуктивность имеет значение 0.1 nH, для остальных — 0.4 nH. Индуктивности со значением 0.1 nH имеются также слева на коротких вертикальных отрезках, соединяющих каждую линию. Они предназначены для развязки линии с источником ЭДС и линий с контактами по переменному току. Подложка отсутствует, окружающее пространство — вакуум.

На рис. 4, *b* представлена ВАХ второй линии антенны, записанная при повышении ЭДС от 700 до 945 mV. Как и в измерениях (рис. 2), ВАХ имеет наклонные ступени,

которые возникают из-за резонансного возбуждения на линии с контактами. Переходы между ступенями, как и переход на резистивную ветвь ВАХ, имеют отрицательный наклон из-за конечного сопротивления источника.

На рис. 4, *c* представлен результат расчета амплитуды спектра переменного тока в рассматриваемой линии при токе смещения 2.7 mA, что соответствует положению между второй и третьей ступенями ВАХ (рис. 4, *b*). На спектре проявляются три резонансные моды, представляющие собой стоячие волны с разным количеством пучностей: нижняя мода имеет три пучности, а две верхние моды — четыре. Число пучностей определяет номер резонанса, с которым обычно связана определенная ступень ВАХ. Частота нижней моды $f = 296$ GHz, что соответствует верхнему краю второй ступени, в то

время как для верхних мод имеем $f \approx 360\text{--}370\text{ GHz}$, что соответствует центру третьей ступени (рис. 4, *b*). Заметим также, что нижняя мода удалена от верхних примерно на $60\text{--}70\text{ GHz}$, что хорошо соответствует фундаментальной частоте f_0 тонкой антенны длины L : $f_0 = c/(2L) = 83.3\text{ GHz}$, где $c = 3 \cdot 10^{11}\text{ mm/s}$ — скорость света в вакууме. Все отмеченное выше позволяет утверждать, что нижняя мода соответствует второй ступени, а верхние моды — третьей. Результаты моделирования аналогичны спектрам, полученным в измерениях с ниобиевым массивом контактов, где также наблюдались как сравнительно удаленные друг от друга линии, соответствующие соседним ступеням ВАХ (рис. 3, *a*), так и близкие линии, принадлежащие одной ступени (рис. 3, *b*).

Генерация двух близких спектральных линий, соответствующих одной и той же ступени ВАХ, объясняется снятием вырождения собственных мод резонансной системы, из-за связи между линиями с контактами. Вырождение снимается благодаря различным индуктивностям в соседних линиях, что приводит к отличию их электрических длин, а значит, и парциальных частот от аналогичных величин для общей резонансной системы. Таким образом, можно утверждать, что одна из верхних мод на рис. 4, *c* определяется парциальной модой второй линии, а другая — парциальными модами соседних линий. За счет взаимодействия линий между собой собственные частоты смещаются относительно парциальных. Этим можно объяснить смещенное положение нижней моды на рис. 4, *c* относительно центра второй ступени ВАХ.

Таким образом, в результате измерений и путем численного моделирования обнаружена возможность генерации массива джозефсоновского контакта на нескольких частотах. Очевидно, что обнаруженный эффект препятствует эффективному применению массива контактов в качестве гетеродина для стандартных супергетеродинных приемников. Эффект многочастотной генерации может быть нейтрализован за счет повышения добротности резонаторов, которыми здесь являются секции ОПЛ. Также необходимо минимизировать электромагнитные переотражения, возникающие на поворотах ОПЛ и переходах ОПЛ в контактные площадки, так как эти переотражения ведут к возникновению вторичных резонансов на близких частотах. С другой стороны, многочастотная генерация может быть полезна в ряде приложений: в многополосной радиолокации для генерации многочастотного фазоманипулированного сигнала [19], в микроволновой интерферометрии для контроля характеристик плазмы в токамаках [20] и пр. В определенных условиях массив джозефсоновских контактов может оказаться хорошей альтернативой традиционным генераторам в подобных приложениях, поэтому может возникнуть потребность в развитии обнаруженного эффекта многочастотной генерации.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10384-П).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.К. Янсон, В.М. Свистунов, И.М. Дмитренко, ЖЭТФ, **48**, 976 (1965). [I.K. Yanson, V.M. Svistunov, I.M. Dmitrenko, JETP, **21** (3), 650 (1965).]
- [2] M. Darula, T. Doderer, S. Beuven, Supercond. Sci. Technol., **12** (1), R1 (1999). DOI: 10.1088/0953-2048/12/1/001
- [3] A.K. Jain, K.K. Likharev, J.E. Lukens, J.E. Sauvageau, Phys. Rep., **109**, 309 (1984). DOI: 10.1016/0370-1573(84)90002-4
- [4] O. Kieler, R. Wendisch, R.-W. Gerdau, T. Weimann, J. Kohlmann, R. Behr, IEEE Trans. Appl. Supercond., **31** (5), 1100705 (2021). DOI: 10.1109/TASC.2021.3060678
- [5] S. Bauer, R. Behr, J. Herick, O. Kieler, M. Kraus, H. Tian, Y. Pimsut, L. Palafox, Meas. Sci. Technol., **34** (3), 032001 (2023). DOI: 10.1088/1361-6501/aca5a5
- [6] S.K.H. Lam, J. Lazar, J. Du, C.P. Foley, Supercond. Sci. Technol., **27** (5), 055011 (2014). DOI: 10.1088/0953-2048/27/5/055011
- [7] K.-H. Müller, E.E. Mitchell, Phys. Rev. B, **109** (5), 054057 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevB.109.054057
- [8] D. Oikawa, H. Mitarai, H. Tanaka, K. Tsuzuki, Y. Kumagai, T. Sugiura, H. Andoh, T. Tsukamoto, Appl. Phys. Lett., **10** (8), 085113 (2020). DOI: 10.1063/5.0018989
- [9] M.M. Krasnov, N.D. Novikova, R. Cattaneo, A.A. Kalenyuk, V.M. Krasnov, Beilstein J. Nanotechnol., **12**, 1392 (2021). DOI: 10.3762/bjnano.12.103
- [10] V.P. Koshelets, M. Birk, D. Boersma, J. Dercksen, P.N. Dmitriev, M.I. Faley, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.A. Artanov, K.I. Rudakov, A. de Lange, G. de Lange, V.L. Vaks, M.Y. Li, H. Wang, IEEE Trans. Appl. Supercond., **5** (4), 687 (2015). DOI: 10.1109/tthz.2015.2443500
- [11] M.A. Galin, A.M. Klushin, V.V. Kurin, S.V. Seliverstov, M.I. Finkel, G.N. Goltsman, F. Müller, T. Scheller, A.D. Semenov, Supercond. Sci. Technol., **28** (5), 055002 (2015). DOI: 10.1088/0953-2048/28/5/055002
- [12] F. Mueller, R. Behr, T. Weimann, L. Palafox, D. Olaya, P.D. Dresselhaus, S.P. Benz, IEEE Trans. Appl. Supercond., **19** (3), 981 (2009). DOI: 10.1109/TASC.2009.2017911
- [13] M.A. Galin, E.A. Borodianskyi, V.V. Kurin, I.A. Shereshevsky, N.K. Vdovicheva, V.M. Krasnov, A.M. Klushin, Phys. Rev. Appl., **9** (5), 054032 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.054032
- [14] M.A. Galin, F. Rudau, E.A. Borodianskyi, V.V. Kurin, D. Koelle, R. Kleiner, V.M. Krasnov, A.M. Klushin, Phys. Rev. Appl., **14** (1), 024051 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.14.024051
- [15] F. Song, F. Müller, R. Behr, A.M. Klushin, Appl. Phys. Lett., **95** (17), 172501 (2009). DOI: 10.1063/1.3253417

- [16] М.А. Галин, Л.С. Ревин, А.В. Самарцев, М.Ю. Левичев, А.И. Елькина, Д.В. Мастеров, А.Е. Парафин, *ЖТФ*, **94** (7), 1044 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58339.166-24 [M.A. Galin, L.S. Revin, A.V. Samartsev, M.Yu. Levichev, A.I. El'kina, D.V. Masterov, A.E. Parafin, *Tech. Phys.*, **69** (7), 973 (2024). DOI: 10.61011/TP.2024.07.58800.166-24].
- [17] M.A. Galin, I.A. Shereshevsky, N.K. Vdovicheva, V.V. Kurin, *Supercond. Sci. Technol.*, **34** (7), 075005 (2021). DOI: 10.1088/1361-6668/abfd0b
- [18] К.К. Лихарев, *Введение в динамику джозефсоновских переходов* (Наука, М., 1985), с. 38–40.
- [19] Y. Chen, L. Jiang, Q. Liu, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **32**, (16), 975 (2020). DOI: 10.1109/LPT.2020.3006881
- [20] M. Varavin, A. Varavin, D. Naydenkova, J. Zajac, F. Zacek, S. Nanobashvili, R. Panek, V. Weinzettl, P. Bilkova, K. Kovarik, F. Jaulmes, M. Farnik, M. Imrisek, O. Bogar, *Fusion Eng. Des.*, **146**, 1858 (2019). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.03.051