

05

Спектральные измерения массива ниобиевых джозефсоновских контактов сверхпроводниковым приемником со смесителем на основе высокотемпературного бикристаллического перехода

© М.А. Галин,¹ Л.С. Ревин,^{1,2} А.В. Самарцев,^{1,2} М.Ю. Левичев,¹ А.И. Елькина,¹ Д.В. Мастеров,¹ А.Е. Парафин¹

¹ Институт физики микроструктур РАН,
603087 Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,
603087 Нижний Новгород, Россия
e-mail: galin@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 13 мая 2024 г.

В окончательной редакции 13 мая 2024 г.

Принято к публикации 13 мая 2024 г.

Выполнены спектральные измерения массива ниобиевых джозефсоновских контактов с целью оценки ширины линии джозефсоновского излучения. Массив состоит из 9996 последовательно соединенных контактов Nb/NbSi/Nb, занимающих площадь $5 \times 7 \text{ mm}^2$ на кремниевой подложке. Для анализа спектра джозефсоновского излучения использован сверхпроводниковый приемник гетеродинного типа со смесителем на основе высокотемпературного перехода. Обнаружено существенное уменьшение ширины линий излучения до 0.3–0.8 MHz при подключении массива к автономному источнику питания.

Ключевые слова: джозефсоновские контакты, ВТСП, супергетеродинный приемник, спектр, синхронизация, терагерцовое излучение

DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58339.166-24

Введение

Джозефсоновские контакты могут быть востребованы для решения многих фундаментальных и практических актуальных задач физики: от сверхчувствительного детектирования магнитного поля [1a] и стандартизации частоты [1b] до квантовых вычислений [1c] и исследования майорановских связанных состояний [1d]. Необычные эффекты, возникающие в джозефсоновских контактах, являются следствием когерентного движения куперовских пар через барьер между сверхпроводящими электродами. Одним из наиболее практически значимых эффектов является нестационарный эффект Джозефсона, связывающий постоянное напряжение на электродах V с основной частотой джозефсоновской генерации контакта f_J только через фундаментальные константы. Типичным значениям напряжений V соответствуют f_J , охватывающие диапазон от сотен GHz до десятков THz. Для такого диапазона до сих пор существует проблема создания компактных и перестраиваемых генераторов излучения, которая была названа проблемой терагерцовой щели [2]. Один джозефсоновский контакт излучает мощность, едва превышающую 1 pW (только если контакт не распределенный) [3], поэтому контакты следует объединять в массивы и добиваться их фазовой синхронизации, чтобы получить мощность, востребованную в практических приложениях. Критериям компактности и перестраиваемости массивы контактов в определенном смысле удовлетворяют, что позволяет их рассматривать

как один из вариантов решения проблемы терагерцовой щели.

Решению задачи синхронизации контактов в массивах может способствовать исследование спектра джозефсоновской генерации, так как ширина спектральной линии Δf непосредственно связана с числом N_s синхронизованных контактов, обычно как $\Delta f \sim 1/N_s$ или $\Delta f \sim 1/N_s^2$ [4]. Результаты спектральных измерений позволяют подобрать оптимальную топологию массива, способствующую наиболее эффективной синхронизации контактов, что приведет к повышению генерируемой мощности. Весьма распространен метод Фурье-спектроскопии, он активно применяется для исследования внутренних джозефсоновских контактов в мезах кристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO) [5–9]. Однако разрешение стандартных Фурье-спектрометров составляет от 1 до 10 GHz, чего обычно недостаточно для измерения ширины линии, и их используют в основном для исследования типов резонансных мод, возбуждаемых в мезах BSCCO.

Более высокое разрешение по частоте обеспечивается приемниками гетеродинного типа. Среди них необходимо выделить приемник со смесителем на основе перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС). Данный приемник имеет рекордную чувствительность на уровне квантового шума и высокое разрешение в сочетании с возможностью перестройки в широком диапазоне частот [10]. Приемник на основе СИС смесителя использовался для измерения ширины линии генерации мез

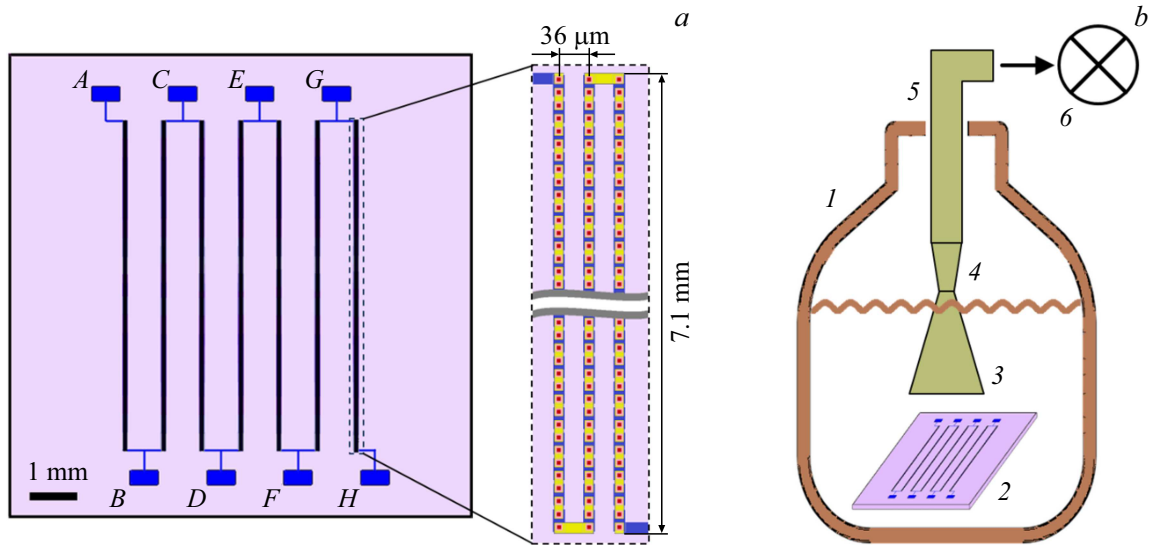


Рис. 1. *a* — топология массива джозефсоновских контактов. Буквами от *A* до *H* обозначены контактные площадки, позволяющие подключать к питанию отдельные секции массива. На вставке показана одна из секций с указанием длины секции и расстояния между однополосковыми линиями. Каждая линия содержит 476 Nb/NbSi/Nb контактов (квадраты на однополосковых линиях). *b* — схема вывода джозефсоновского излучения: *1* — сосуд Дьюара с жидким гелием, *2* — чип с массивом контактов, *3* — квадратный рупор, *4* — сужение до 3.1×1.55 mm (необходимо для подавления высших мод в волноводе), *5* — сверхразмерный волновод 11×5.5 mm, *6* — ВТСП смеситель.

BSCCO [11], длинного (распределенного) джозефсоновского контакта [12,13], а также массива дискретных ниобиевых контактов [14,15]. В [15] измерения на массиве сверхволновых размеров, содержащем 9996 ниобиевых контактов, были проведены в широком диапазоне частот ~ 200 – 300 GHz. Обнаружено, что на ширину линии джозефсоновской генерации существенно влияют технические шумы от измерительных приборов. Типичные значения Δf для основной гармоники составили от 3 до 6 MHz, однако после проведения мер, направленных на устранение технических шумов, ширину спектральной линии удалось уменьшить до 1.5 MHz.

В настоящей работе исследование ширины линии джозефсоновского излучения проведено с помощью супергетеродинного приемника, смесителем в котором являлся бикристаллический джозефсоновский переход на основе высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) YBaCuO. Такой приемник является хорошей альтернативой приемнику с СИС смесителем, так как обладает важными достоинствами [16]. Он работает при более высокой температуре вплоть до температуры кипения жидкого азота, что может сильно уменьшить затраты на его охлаждение. Также он имеет сильную нелинейность, что дает возможность смешения сигнала с высокими гармониками гетеродина. Данная возможность может быть очень востребованной с учетом отмеченных выше трудностей создания перестраиваемых генераторов в субмиллиметровом диапазоне [2]. В качестве объекта исследования выбран массив дискретных ниобиевых контактов, исследовавшийся в [15]. Спектральные измерения проведены в диапазоне 160–240 GHz, в том числе

при различном числе активных контактов в массиве. При подключении к массиву вместо источника тока автономного источника питания обнаружено существенное уменьшение линии джозефсоновской генерации до 0.3–0.8 MHz.

1. Топология массива и схема вывода джозефсоновского излучения

Исследованный массив из 9996 последовательно соединенных джозефсоновских переходов расположен на кремниевой подложке размером 1×1 cm и толщиной 0.38 mm (рис. 1, *a*). Массив делится на 7 секций, удаленных друг от друга на 0.75 mm. Каждая секция представляет собой 3 однополосковые линии длиной 7.1 mm, каждая линия содержит 476 контактов. Расстояние между центрами соседних линий $36 \mu\text{m}$. Размер контакта составляет $8 \times 8 \mu\text{m}$. Материал контакта — соединение ниобия и кремния с атомным содержанием ниобия около 10%. На концах массива и между секциями имеются ниобиевые контактные площадки, позволяющие подключать к цепи питания как весь массив, так и несколько соседних секций. Массив изготовлен методами электронной литографии и реактивного ионного травления [17,18].

Данный чип погружался в сосуд Дьюара с жидким гелием. Джозефсоновское излучение выводилось через горловину сосуда Дьюара по волноводному тракту, размещенному внутри металлической трубы длиной около 1 m (рис. 1, *b*). Чип располагался в нижнем конце тракта напротив апертуры рупора квадратной формы размером

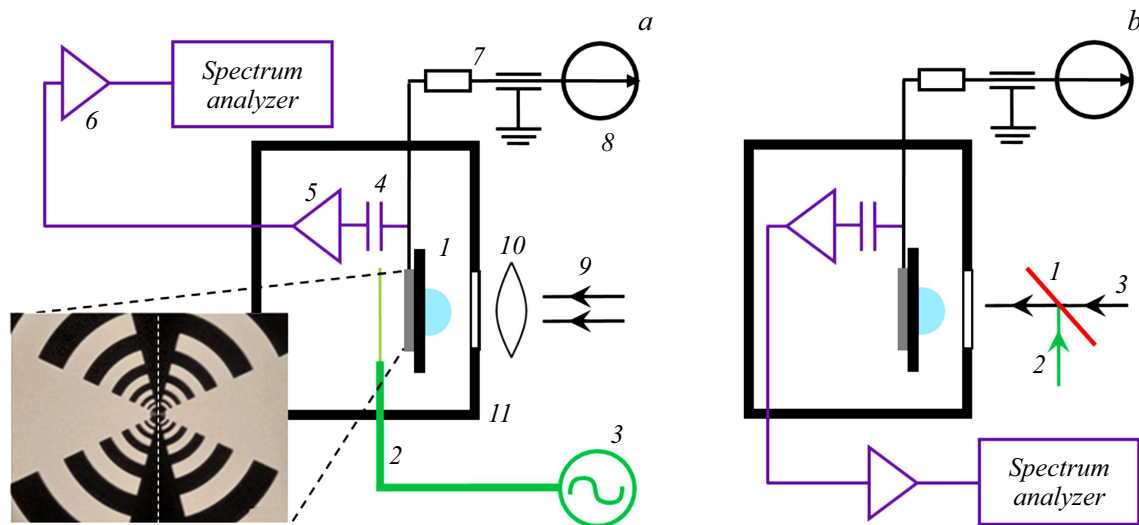


Рис. 2. Две схемы спектральных измерений. *a* — схема смешения на высоких гармониках НЧ гетеродина: 1 — ВТСП смеситель на кремниевой линзе, 2 — штыревая антенна, 3 — НЧ генератор, 4 — изолирующая емкость, 5 — охлаждаемый усилитель, 6 — комнатный усилитель, 7 — фильтр нижних частот, 8 — питание на постоянном токе, 9 — излучение массива джозефсоновских контактов, 10 — фторопластовая линза, 11 — криостат. На вставке — фотография образца с YBaCuO-смесителем, где штриховой линией обозначена бикристаллическая граница. *b* — схема смешения на первой/второй гармонике высокочастотного гетеродина: 1 — делитель луча, 2 — опорный сигнал ЛОВ, 3 — излучение массива джозефсоновских контактов.

13 × 13 mm. От паразитных магнитных полей чип был защищен пермалловым экраном цилиндрической формы. Основная часть тракта представляла собой прямоугольный волновод размером 11 × 5.5 mm. В исследуемом диапазоне частот он является сверхразмерным, что позволяет уменьшить поглощение излучения на стенках волновода. Более подробное описание схемы вывода джозефсоновского излучения см. в [15].

2. Схема измерений

ВТСП джозефсоновский смеситель представлял собой пленку сверхпроводника YBaCuO, напыленную на поверхность бикристаллической $Zr_{1-x}Y_xO_2$ -подложки с углом разориентации кристаллических решеток монокристаллов 24° в плоскости [001]. Джозефсоновский переход формировался на границе монокристаллов, его толщина составляла 0.1 μm, ширина 1.5 μm. Переход интегрирован в логопериодическую планарную антенну [19] для широкополосной связи с внешним излучением (вставка на рис. 2, *a*).

Спектральные измерения выполнены с использованием двух принципиальных схем (рис. 2). В обоих случаях ВТСП смеситель был закреплен на кремниевой гиперполусферической линзе и установлен в криостат замкнутого цикла, работающий по принципу Гиффорда–МакМагона. Смеситель охлаждался до температуры 6–7 К. В первой схеме источником гетеродинного сигнала являлся низкочастотный (НЧ) генератор R&S SMB100A (рис. 2, *a*). Гетеродинный сигнал поступал на симметричную антенну, расположенную вблизи сме-

сителя со стороны плоской поверхности кремниевой линзы. Сигнал от массива контактов подавался снаружи по квазиоптической схеме с внешней фторопластовой линзой и инфракрасными фильтрами, установленными на оптическом окне криостата, и фокусировался на переходе ВТСП смесителя с помощью кремниевой линзы. Сигнал на промежуточной частоте (ПЧ) формировался при смешении джозефсоновского излучения с высшими гармониками гетеродинного сигнала (с 8-й по 13-ю в зависимости от частоты генерации массива) и далее выводился по коаксиальному кабелю на анализатор спектра. Сигнал на ПЧ усиливался на 52 dB за счет предварительного усилителя, расположенного на холодной плите криостата, и комнатного усилителя. Шум на выходе составлял –64 dBm в диапазоне частот 1–3 GHz в полосе 3 MHz анализатора спектра. Для смешения постоянного тока смесителя использовался источник с батарейным питанием.

Второй вариант схемы измерения предполагал использование в качестве источника опорного сигнала лампы обратной волны (ЛОВ) с диапазоном излучения 115–175 GHz (рис. 2, *b*). В этом случае смешение сигналов происходило на первой или второй гармонике гетеродина. Выбор оптимальной мощности лампы осуществлялся механическим аттенуатором. Для объединения сигналов гетеродина и массива использовался делитель луча из тонкой пленки майлара или фторопласта. Использование данной схемы измерений обеспечивало более высокую чувствительность приемника из-за смешения на первой или второй гармонике, но требовало более тонкой и длительной настройки по сравнению со схемой, использующей НЧ генератор.

Предварительная характеристика ВТСП смесителя с учетом потерь в тракте позволила оценить эффективность преобразования. При смешении на первой гармонике сигнала частотой 165 GHz эффективность составляет -10 dB, на десятой гармонике — -29 dB.

3. Результаты

На рис. 3 показана вольт-амперная характеристика (ВАХ) полного массива джозефсоновских контактов (питание подключено к контактным площадкам *A* и *H*, см. рис. 1), а также ВАХ частей массива: двух (*AC*) и четырех (*DH*) секций. Как видно из рис. 3, критический ток массива составляет $I_c \approx 5.4\text{--}5.5$ mA, характерная джозефсоновская частота $f_c \approx 140$ GHz. Небольшой разброс по I_c в пределах 0.1 mA, наблюдаемый при подключении различных секций массива, связан с разбросом параметров контактов, а также неконтролируемым захватом небольшим числом контактов магнитных вихрей. На каждой ВАХ наблюдаются ступени тока, возникающие из-за возбуждения джозефсоновским излучением резонансных мод вдоль однополосковых линий массива [15,20,21]. Благодаря взаимодействию контактов с резонансной системой излучение на ступенях значительно усиливается. ВАХ полного массива (*AH*) содержит до 24 таких самоиндуцированных ступеней, которые полностью затухают при $V \approx 7$ V, что соответствует $f_J = 350$ GHz (см. [15], рис. 2, *a*). Здесь и далее величина f_J , употребленная по отношению к массиву, обозначает джозефсоновскую частоту, усредненную по всем контактам массива, которая вычисляется, согласно основному джозефсоновскому соотношению [3], как $f_J = KV/N$, где $K \approx 483.6$ GHz/mV, N — число контактов в массиве (в данном случае это может быть как весь массив *AH*, так и его часть). О соотношении этой величины с джозефсоновскими частотами отдельных контактов будет сказано ниже.

Спектральные измерения проводились с использованием обоих типов гетеродина: НЧ генератора и ЛОВ. Спектральные линии джозефсоновского излучения наблюдались на ступенях тока с 3-й по 6-ю, охватывающих частотный диапазон $f_J = 150\text{--}180$ GHz, а также на ступенях с 11-й по 14-ю, которым соответствует диапазон $f_J = 225\text{--}250$ GHz (рис. 3). В последнем случае в качестве опорного сигнала использовалась 2-я гармоника ЛОВ. Указанные промежутки будем называть соответственно основным и высокочастотным (ВЧ) диапазонами измерений. Самый сильный сигнал наблюдался в основном диапазоне на 4-й ступени тока.

В первой серии измерений массив подключался к источнику тока Keithley 6221 [22], благодаря чему в схеме с массивом реализовывался режим задания тока, т.е. в эквивалентной схеме Keithley являлся идеальным источником тока с бесконечным сопротивлением. В таком режиме проводились ранее все спектральные измерения с этим [15] и аналогичными [23,24] массивами

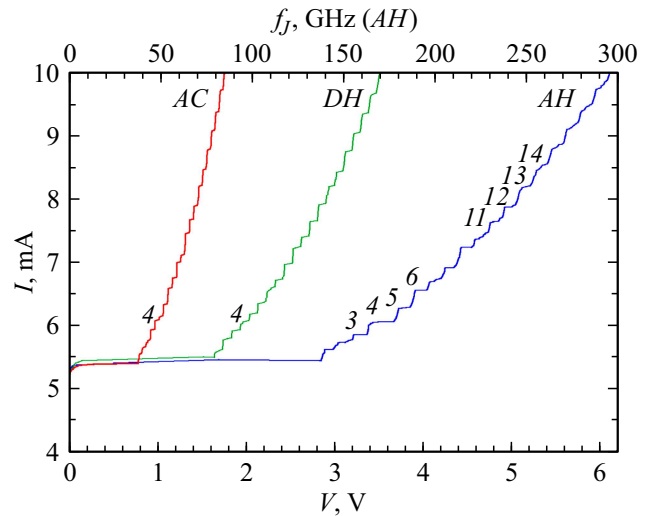


Рис. 3. ВАХ двух (*AC* — подключены контактные площадки *A* и *C*, см. рис. 1), четырех (*DH*) и всех семи (*AH*) секций массива джозефсоновских контактов. ВАХ получены при увеличении тока смещения (прямые ветви). Верхняя ось обозначает среднюю джозефсоновскую частоту f_J полного массива (*AH*). Для получения f_J частей *AC* и *DH* массива необходимо значения на верхней оси умножить соответственно на 7/2 и 7/4. Спектральные измерения проводились на пронумерованных ступенях, нумерация отсчитывается от $f_J = 139$ GHz — начала резистивной ветви ВАХ массива *AH*.

вами ниобиевых джозефсоновских контактов. Здесь, как и в [15], был сделан вывод о значительном влиянии технических шумов на полученные спектры, так как линии плохо аппроксимировались лоренцевой кривой и часто имели несимметричную форму, причем ширина линий определялась не только положением рабочей точки на ВАХ, но и конфигурацией подключенных измерительных приборов. Ширина спектральных линий немного уменьшалась с отключением от измерительной схемы вольтметра и термоконтроллера, являющихся второстепенными по отношению к процессу сканирования спектра. В основном диапазоне измерений ширина линий варьировалась в пределах 3–15 MHz. На рис. 4, *a* показаны типичные спектральные линии джозефсоновского излучения, снятые на ступенях с 4-й по 6-ю с использованием в качестве гетеродина как ЛОВ, так и НЧ генератора. Как и в [15,24], положение линий было близко к f_J . Спектральная частота отклонялась от f_J не более чем на 1.5 GHz, в большинстве случаев превышая f_J . Несовпадение этих частот объясняется наличием в окрестности узлов резонансной моды джозефсоновских контактов, колеблющихся в асинхронном режиме [21]. В отличие от остальной части контактов, находящихся в окрестности пучностей моды, их джозефсоновские частоты могут значительно отличаться от резонансной частоты, которой и соответствует максимум спектра.

При измерениях в ВЧ диапазоне ширина линии увеличивалась до 27 MHz. Отметим, что в [15] в этом же диапазоне для данного массива наблюдались значительно

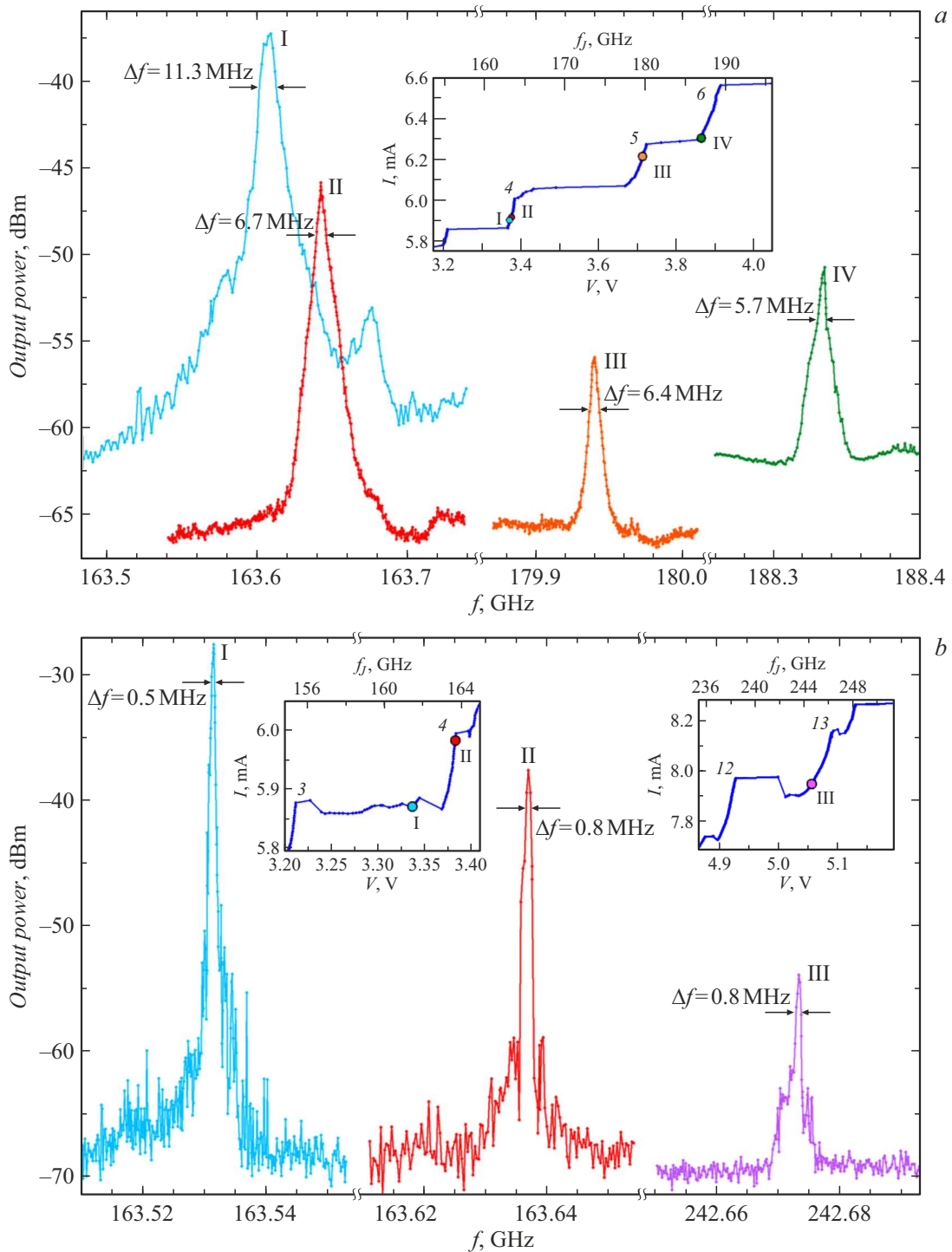


Рис. 4. Спектральные линии джозефсоновского излучения при подключении к массиву источника тока Keithley 6221 (a) и при автономном питании массива (b). Линии I (a, b) получены при использовании в качестве сигнала гетеродина основной гармоники ЛОВ, линия III (b) — при использовании в качестве такого сигнала 2-й гармоники ЛОВ, остальные — когда гетеродином являлся НЧ генератор. Около каждой линии указана ее ширина, измеренная на уровне 1/2 от максимального значения. Линии I и IV (a) получены при разрешении анализатора спектра (RBW) 3 MHz, линии II и III (a) — при разрешении 1 MHz, все линии (b) — при разрешении 300 kHz. На вставках изображены ступени тока ВАХ с отмеченными на них рабочими точками, в которых были получены приведенные спектры. Ступени пронумерованы согласно рис. 3. Искажение ВАХ (b) по сравнению с ВАХ на рис. 3 объясняется выбранной схемой питания массива, при которой на некоторых участках ВАХ не реализуется режим задания тока.

более узкие линии — их ширина составляла 3–6 МГц. Это несоответствие является дополнительным подтверждением существенного влияния технических шумов на спектр массива контактов. В разных условиях измерений это влияние оказывается неодинаковым — в рассматриваемом случае шумы уширяли спектральные линии значительно сильнее, чем в [15].

В процессе измерений было замечено, что положение спектральных линий во времени на оси частот нестабильно. Амплитуда колебаний линий составляет 1–10 МГц и обычно не превышает ширину самих линий. Данные колебания являются довольно низкочастотными, так как характерная частота таких колебаний оказывается ниже частоты сканирования линий спектра, составляющей не более 1 кГц.

В связи с нестабильностью спектральных линий по частоте была выбрана следующая методика измерения ширины линии. Снималось от 4 до 20 реализаций спектра в зависимости от амплитуды колебаний линии и относительного уровня шума. На каждой реализации выделялся участок, содержащий интересующую нас спектральную линию. Затем реализации аппроксимировались гауссовой функцией по методу наименьших квадратов с целью определения центральной частоты каждой линии. Конечный результат получался путем усреднения линий, предварительно смещенных на среднее значение центральных частот. Данная методика измерений позволяет избежать искажения смещающейся по частоте линии, которое неизбежно возникает при однократном сканировании, а также уширения линии при обычном усреднении реализаций без учета смещения центральной частоты. Все результаты, представленные в настоящей работе, получены указанным способом. Размер шумовой дорожки на представленных спектрах варьировался в пределах от 20 до 100 рВт и определялся количеством усреднений, полосой видеосигнала, а также уровнем технических шумов в измерительной системе, который мог заметно меняться по разным причинам.

Во второй серии измерений массив подключался к автономной схеме питания, не связанной с бытовой электросетью, которую можно представить в виде источника напряжения и последовательно подключенного резистора сопротивлением $R_i = 1 \text{ к}\Omega$. Ток в массиве регулировался напряжением на источнике в пределах $\pm 10 \text{ В}$. При такой схеме питания наблюдалось значительное уменьшение ширины линии джозефсоновской генерации до значений от 0.3 до 0.8 МГц. При этом результат измерений не зависел ни от типа гетеродина приемника, ни от частотного диапазона. Характерные примеры соответствующих спектров приведены на рис. 4, б, где показаны линии, полученные в основном диапазоне при использовании обоих типов гетеродина, а также линия, полученная в ВЧ диапазоне. Важно отметить, что в этой серии измерений вольтметр и термоконтроллер всегда были отключены от измерительной схемы.

Выбранная автономная схема питания приводит к искажению ВАХ массива по сравнению с ВАХ, получен-

ной в режиме задания тока (рис. 3). Однако искажения возникают только в местах ВАХ, где дифференциальное сопротивление R_d заметно превосходит R_i . На горизонтальных участках между ступенями $R_d = 3\text{--}25 \text{ к}\Omega$, что значительно выше R_i . В результате на этих участках, а также на переходе от сверхпроводящей к резистивной ветви появляются локальные провалы (см. вставки к рис. 4, б). Ступени же искажаются незначительно, так как на них $R_d = 100\text{--}500 \Omega$.

В одном из локальных провалов перед 4-й ступенью тока ВАХ (рис. 4, б, левая вставка) была получена линия на основной гармонике ЛОВ. Тем не менее положение этой линии по частоте соответствует 4-й ступени. Возможно, в данном случае реализуется двухмодовый режим генерации, т.е. в массиве возбуждаются сразу две резонансные моды, соответствующие 3-й и 4-й ступеням. Линия, соответствующая 3-й моде, не была сканирована из-за ограниченного частотного диапазона анализатора спектра. В двухмодовом режиме генерации джозефсоновские контакты делятся на две группы, принадлежащие разным модам. В результате средняя по массиву джозефсоновская частота f_J оказывается между ступенями тока, что и наблюдается на соответствующем участке ВАХ. Остальные же линии, показанные на рис. 4, б, как и в первой серии измерений, отклоняются от f_J не более чем на 1.5 ГГц.

Узкие линии также наблюдались при подключении автономного источника питания к частям массива, содержащим от 2 до 5 секций. Здесь измерения были проведены только на 4-й ступени тока ВАХ, а в качестве гетеродина использовалась ЛОВ. Ширина линий, как и в случае с полным массивом, составляла 0.3–0.8 МГц. Примеры линий, полученных при измерении на двух (AC) и четырех (DH) секциях, представлены на рис. 5. На линии DH вблизи 163.7 и 163.73 ГГц наблюдаются локальные максимумы, которые могут являться следствием осцилляций амплитуды сигнала гетеродина.

Значительное сужение спектральных линий во второй серии измерений, очевидно, связано с конфигурацией цепи питания массива. Наиболее очевидным объяснением кажется переход к другому типу источника питания: от идеального источника тока к источнику напряжения с последовательно подключенным сопротивлением. Изменения в спектре данного массива при переходе от источника тока к источнику напряжения уже наблюдались в исследованиях на полупроводниковом супергетеродинном приемнике [25]. Хотя эти изменения и имели другой характер, видимо, из-за большей инерционности измерительной системы, в [25] было предположено, что при питании источником напряжения спектральная линия значительно сужается. Причиной сужения линий также может являться автономность цепи питания, т.е. отсутствие ее связи с бытовой электросетью. Именно техническими шумами от сети объяснялись значительные колебания ширины спектральных линий в первой серии измерений, представленных в настоящей работе, а также в измерениях, описываемых в [15]. Кроме того,

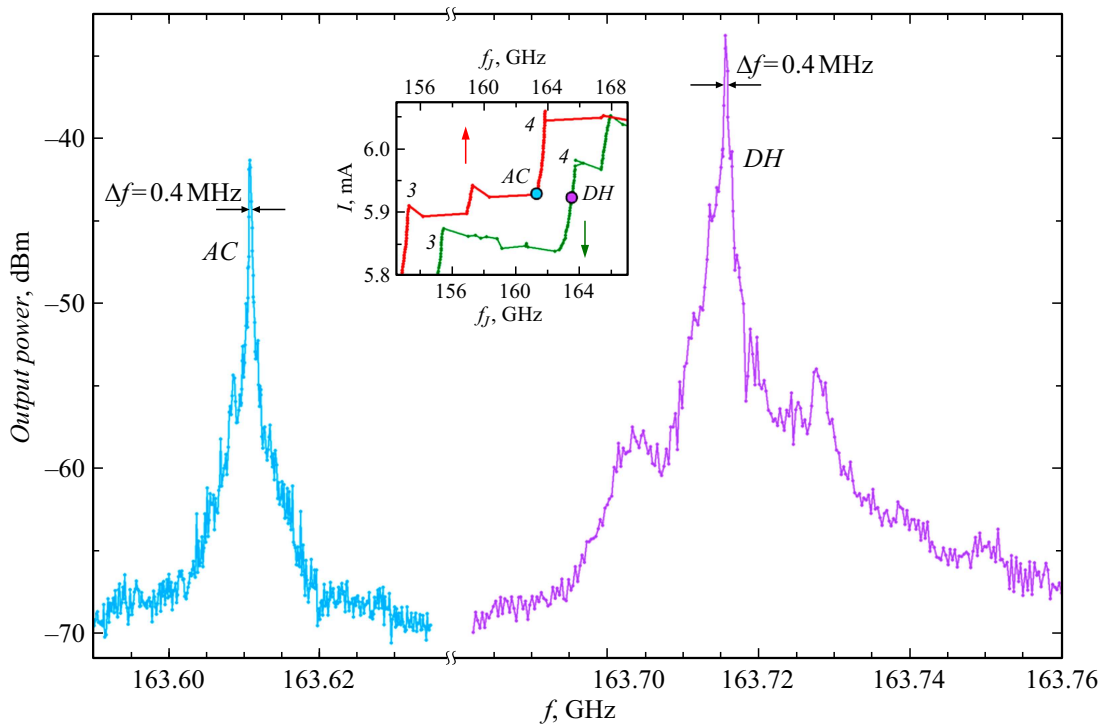


Рис. 5. Спектральные линии джозефсоновского излучения, полученные при подключении к автономному источнику питания двух (*AC*) и четырех (*DH*) секций массива. Гетеродином в измерениях являлась ЛОВ. Линии получены при разрешении анализатора спектра (RBW) 300 kHz. На вставке показаны рабочие точки на ВАХ, в которых наблюдались спектры. Для каждой ВАХ по горизонтальной оси вместо напряжения отложена усредненная джозефсоновская частота.

во второй серии измерений, как отмечено выше, второстепенные приборы были отключены от измерительной схемы. Такое же действие приводило к некоторому уменьшению ширины спектральных линий в первой серии измерений.

Ширина полученных спектральных линий в измерениях с автономным источником питания ограничивалась выбранным разрешением анализатора спектра RBW (resolution bandwidth), которое составляло 300 kHz. При дальнейшем уменьшении RBW линия размывалась шумами из-за наблюдаемой, как и в первой серии измерений, НЧ нестабильности линии на оси частот. Причем амплитуда колебаний составляла те же 1–10 MHz. Таким образом, в спектральных измерениях был, по сути, достигнут предел разрешения, поэтому спектральные линии джозефсоновского излучения могут быть уже линий, наблюдаемых в настоящей работе. Если считать, что в каждой секции массива синхронизованы порядка 1000 контактов (т.е. 70% от общего числа контактов в секции, что согласуется с численными расчетами в [21]), то, как следует из [4], ширина линии генерации от одной секции массива должна составлять не более 10 kHz (без учета того, что секции тоже могут быть синхронизованы между собой). Ограничение по разрешению спектральных линий не позволило также адекватно аппроксимировать линии гауссовой или лоренцевой кривыми для оценки влияния технических шумов.

Мы видим несколько возможных объяснений наблюдаемой НЧ нестабильности спектральных линий. Одной из очевидных причин кажутся те же технические шумы, которые приводят к уширению линий, только теперь это может быть шум, преобразованный на частоты ≤ 1 kHz благодаря нелинейным свойствам джозефсоновских контактов, или фликкер-шум. Однако характерной для НЧ нестабильности амплитуде отклонения 1–10 MHz соответствуют осцилляции наведенного тока 1–10 μ A, что кажется слишком большой величиной для шума. Другая возможная причина — нестабильность синхронизации джозефсоновских контактов в массиве. Как было показано в [21], массив может содержать определенную долю асинхронных контактов, располагающихся вблизи узлов резонансной моды. Возможно, число синхронных и асинхронных контактов постоянно меняется, что приводит к нестабильности свойств резонатора и, как следствие, к смещению резонансной частоты. Причиной НЧ нестабильности также могут быть возможные температурные колебания на массиве, вызванные, например, турбулентными конвекционными потоками в жидком гелии [26].

Мы исключаем в качестве причины НЧ нестабильности паразитное электромагнитное воздействие на массив со стороны элементов приемника. Мощность излучения ЛОВ составляла от 20 до 40 mW, и это излучение сложно полностью изолировать от массива (рис. 2, b).

С учетом типичной мощности излучения массива на выходе порядка нескольких μW [20] можно ожидать, что даже малая доля излучения ЛОВ, попавшая в тракт для джозефсоновского излучения, может оказать заметное воздействие на резонансную моду и таким образом сместить частоту генерации массива. Однако НЧ нестабильность имеет место и при использовании НЧ генератора (рис. 2, а), но его возможная связь с массивом сильно опосредована. Смещение джозефсоновского излучения происходило с 10-й или более высокой гармоникой сигнала НЧ генератора. Исследования схожего бикристаллического перехода показывают, что при сравнимой мощности опорного сигнала переход поглощает не более $4\mu\text{W}$ [27], а мощность на 10-й гармонике, переизлученная переходом, согласно нашим расчетам, будет ниже примерно на 5 порядков и составит не более 0.1 nW . С учетом конфигурации измерительной системы до массива доберется излучение мощностью еще на 2 порядка меньше, и лишь небольшая ее часть поглотится массивом. Очевидно, что итоговой мощности будет явно недостаточно для заметного воздействия на частоту спектральной линии.

Заключение

В работе проведены спектральные измерения массива ниобиевых джозефсоновских контактов с помощью супергетеродинного сверхпроводникового приемника. Смесителем в приемнике являлся ВТСП джозефсоновский переход на основе YBaCuO , сформированный на бикристаллической границе подложки $\text{Zr}_{1-x}\text{Y}_x\text{O}_2$. При питании массива от источника тока наблюдались спектральные линии джозефсоновского излучения, ширина которых составляла от 3 до 15 MHz в диапазоне 150–180 GHz и увеличивалась до 27 MHz в диапазоне 225–250 GHz. При подключении массива к схеме с автономным источником напряжения и последовательным резистором сопротивлением $1\text{ k}\Omega$ ширина линий уменьшалась до 0.3–0.8 MHz на всех измеряемых частотах, а также при подключении от 2 до 5 секций массива. Значительное сужение спектральных линий может объясняться как изменением конфигурации питания массива, так и уменьшением внешних шумов при переходе от источника, подключенного к бытовой электросети, к автономному источнику питания.

Во всех измерениях наблюдались НЧ колебания спектральных линий на оси частот. Амплитуда колебаний составляла 1–10 MHz, а частота не превышала 1 kHz. НЧ колебания не позволили в измерениях с автономным источником питания получить линии при RBW менее 300 kHz. Следовательно, ширина спектральных линий может быть меньше значений, наблюдаемых в настоящей работе. Для улучшения спектрального разрешения необходимо повысить скорость сканирования спектра.

Эффект НЧ нестабильности спектральных линий джозефсоновского излучения нуждается в дополнительном

исследовании. Данный эффект является препятствием для возможного применения массивов ниобиевых джозефсоновских контактов в качестве гетеродина. Проблема частотной стабилизации линий может быть решена путем разработки для данных массивов системы фазовой автоподстройки частоты, подобно тому, как это сделано для гетеродина сверхпроводникового интегрального приемника с СИС смесителем [10].

Благодарности

Авторы выражают благодарности В.В. Курину и В.А. Анфертьеву за полезные обсуждения результатов измерений, а также О. Киелеру (O. Kieler) за изготовление образца.

Финансирование работы

Работа поддержана НЦМУ „Центр фотоники“, при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2022-316 (разработка схемы вывода джозефсоновского излучения, измерение ВАХ массива джозефсоновских контактов), и Российским научным фондом, проект № 20-79-10384-П (спектральные измерения с помощью ВТСП смесителя).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Fundamentals and Frontiers of the Josephson Effect*, ed. by F. Tafuri (Springer Nature, Switzerland, AG, 2019); a — J. Gallop, L. Hao. Ch. 14: *Physics and Applications of NanoSQUIDS*, p. 555–585; b — S.P. Benz. Ch. 15: *Josephson Junctions for Metrology Applications*, p. 587–609; c — A.F. Kockum, F. Nori. Ch. 17: *Quantum Bit with Josephson Junctions*, p. 703–741; d — D. Golubev, T. Bauch, F. Lombardi. Ch. 13: *Josephson Effect in Graphene and 3D Topological Insulators*, p. 529–553.
- [2] M. Tonouchi. *Nature Photon.*, **1**, 97 (2007). DOI: 10.1038/nphoton.2007.3
- [3] M. Darula, T. Doderer, S. Beuven. *Supercond. Sci. Technol.*, **12** (1), R1 (1999). DOI: 10.1088/0953-2048/12/1/001
- [4] A.K. Jain, K.K. Likharev, J.E. Lukens, J.E. Sauvageau. *Phys. Rep.*, **109** (6), 309 (1984). DOI: 10.1016/0370-1573(84)90002-4
- [5] M. Ji, J. Yuan, B. Gross, F. Rudau, D.Y. An, M.Y. Li, X.J. Zhou, Y. Huang, H.C. Sun, Q. Zhu, J. Li, N.V. Kinev, T. Hatano, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, W.W. Xu, B.B. Jin, H.B. Wang, P.H. Wu. *Appl. Phys. Lett.*, **105** (12), 122602 (2014). DOI: 10.1063/1.4896684
- [6] T.M. Benseman, A.E. Koshelev, V. Vlasko-Vlasov, Y. Hao, U. Welp, W.-K. Kwok, B. Gross, M. Lange, D. Koelle, R. Kleiner, H. Minami, M. Tsujimoto, K. Kadowaki. *Phys. Rev. B*, **100** (14), 144503 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.100.144503

- [7] T. Kashiwagi, T. Yuasa, G. Kuwano, T. Yamamoto, M. Tsujimoto, H. Minami, K. Kadowaki. *Materials*, **14** (5), 1135 (2021). DOI: 10.3390/ma14051135
- [8] R. Kobayashi, K. Hayama, S. Fujita, M. Tsujimoto, I. Kakeya. *Phys. Rev. Appl.*, **17** (5), 054043 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.054043
- [9] H. Sun, S. Chen, Y.-L. Wang, G. Sun, J. Chen, T. Hatano, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, H. Wang, P. Wu. *Appl. Sci.*, **13** (6), 3469 (2023). DOI: 10.3390/app13063469
- [10] V.P. Koshelets, S.V. Shitov. *Supercond. Sci. Technol.*, **13** (5), R53 (2000). DOI: 10.1088/0953-2048/13/5/201
- [11] M. Li, J. Yuan, N.V. Kinev, J. Li, B. Gross, S. Guénon, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, D. Koelle, R. Kleiner, V.P. Koshelets, H. Wang, P. Wu. *Phys. Rev. B*, **86** (6), 060505 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.060505
- [12] N.V. Kinev, K.I. Rudakov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **9** (6), 557 (2019). DOI: 10.1134/S1063783420090140
- [13] N.V. Kinev, K.I. Rudakov, L.V. Filippenko, V.P. Koshelets. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **32** (4), 1500206 (2022). DOI: 10.1109/TASC.2022.3143483
- [14] F. Boussaha, M. Salez, A. Féret, B. Lecomte, C. Chaumont, M. Chaubet, F. Dauplay, Y. Delorme, J.-M. Krieg. *J. Appl. Phys.*, **105** (7), 073902 (2009). DOI: 10.1063/1.3099602
- [15] M.A. Galin, N.V. Kinev, M.Yu. Levichev, A.I. El'kina, A.V. Antonov, A.V. Khudchenko, G.P. Nazarov, V.V. Kurin, V.P. Koshelets. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **34** (3), 1100405 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2024.3386416
- [16] M. Malnou, C. Feuillet-Palma, C. Ulysse, G. Faini, P. Febvre, M. Sirena, L. Olanier, J. Lesueur, N. Bergeal. *J. Appl. Phys.*, **116** (7), 074505 (2014). DOI: 10.1063/1.4892940
- [17] 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.2009.2019063
- [18] 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
- [19] E.I. Glushkov, A.V. Chiginev, L.S. Kuzmin, L.S. Revin. *Beilstein J. Nanotechnol.*, **13**, 325 (2022). DOI: 10.3762/bjnano.13.27
- [20] M.A. Galin, A.M. Klushin, V.V. Kurin, S.V. Seliverstov, M.I. Finkel, G.N. Goltsman, F. Mueller, T. Scheller, A.D. Semenov. *Supercond. Sci. Technol.*, **28** (5), 055002 (2015). DOI: 10.1088/0953-2048/28/5/055002
- [21] 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
- [22] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://download.tek.com/datasheet/6220-6221.pdf>
- [23] F. Song, F. Müller, R. Behr, A.M. Klushin. *Appl. Phys. Lett.*, **95** (17), 172501 (2009). DOI: 10.1063/1.3253417
- [24] M.A. Galin, V.V. Kurin, I.A. Shereshevsky, N.K. Vdovicheva, A.V. Antonov, B.A. Andreev, A.M. Klushin. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **31** (5), 1500905 (2021). DOI: 10.1109/TASC.2021.3064533
- [25] M.A. Галин, М.Ю. Левичев, А.И. Елькина, А.В. Антонов, О. Кйелер. *Труды XXVII Международного симпозиума „Нанозифика и нанозлектроника“* (Нижний Новгород, Россия, 2023), т. 1, с. 25.
- [26] A. Libchaber. *Physica B+C*, **109–110**, 1583 (1982). DOI: 10.1016/0378-4363(82)90181-4
- [27] E. Matrozova, A. Parafin, D. Masterov, L. Revin, S. Pavlov. *Proceedings of 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC)* (Russia, Moscow, November 23–25, 2022), p. 45. DOI: 10.1109/RMC55984.2022.10079648