

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.4>

УДК: 538.945, 537.862

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА МАССИВА НИОБИЕВЫХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ КОНТАКТОВ, ИЗМЕРЕННОГО С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО СМЕСИТЕЛЯ

М.А. Галин¹, А.И. Елькина¹, М.Ю. Левичев¹, Д.В. Мастеров¹,
А.Е. Парафин¹, Л.С. Ревин^{1,2}

¹Институт физики микроструктур РАН,
603087, Нижегородская обл., Кстовский район, дер. Афонино, ул. Академическая, д.7

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д.24

Статья поступила в редакцию 24 января 2025 г.

Аннотация. Выполнены спектральные измерения массива ниобиевых джозефсоновских контактов сверхволновых размеров с помощью супергетеродинного приёмника со смесителем на основе высокотемпературного бикристаллического перехода. Массив изготовлен на кремниевой подложке и состоит из 9996 последовательно соединённых переходов Nb/NbSi/Nb, размещённых на параллельных однополосковых линиях длиной 7.1 мм. Смесителем в приёмнике являлся джозефсоновский переход, образованный плёнкой YBaCuO на бикристаллической границе подложки $Zr_{1-x}Y_xO_2$. Спектральные измерения проводились в частотных диапазонах 150-180 ГГц и 225-250 ГГц. Целью работы являлось исследование влияния на спектральную линию джозефсоновской генерации некоторых факторов внешней электрической цепи: типа источника питания и уровня технических шумов. Обнаружено существенное уменьшение ширины линии с ~ 10 МГц до 0.5-0.8 МГц при подключении массива к автономному источнику напряжения вместо источника тока и минимизации технических шумов. Наблюдалось смещение спектральной частоты линии от

усреднённой по массиву джозефсоновской частоты, что объясняется особенностями синхронизации джозефсоновских контактов в больших массивах.

Ключевые слова: массив джозефсоновских контактов, синхронизация, спектр, ВТСП, бикристаллический джозефсоновский переход.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-79-10384-П.

Автор для переписки: Галин Михаил Александрович, galin@ipmras.ru

Введение

Системы, состоящие из большого числа джозефсоновских контактов (массивы), рассматриваются как перспективные генераторы миллиметрового и терагерцового диапазона волн [1,2]. Такие системы представляют собой сложную динамическую систему из взаимно-связанных осцилляторов. В случае не очень близкого расстояния между контактами (много больше длины когерентности), связь между контактами в массиве осуществляется через возбуждаемую ими общую электромагнитную моду [3]. При этом контакты в массиве должны быть синхронизованы для генерации мощности, достаточной для практического применения. Вместо линейной зависимости мощности джозефсоновской генерации от числа контактов N в массиве, мы получаем квадратичную зависимость при взаимной синхронизации контактов. Кроме повышения мощности генерации, синхронизация контактов приводит также к сужению спектральной линии. При этом, как показывает резистивная модель джозефсоновского контакта, ширина линии джозефсоновской генерации Δf может быть связана с числом N синхронизованных контактов как $\Delta f \sim 1/N$, так и $\Delta f \sim 1/N^2$, в зависимости от величины внешней нагрузки и типа источника питания [4]. Таким образом, массивы с довольно большим N и при условии стабилизации частоты генерации могут найти применение в спектроскопии в качестве гетеродина приёмника.

В данной работе исследована ширина спектральной линии массива, содержащего 9996 ниобиевых джозефсоновских контактов, при подключении различных типов источников питания и минимизации уровня технических шумов. Сделаны предположения о причинах наблюдаемом во всех измерениях отклонении спектральной частоты от средней по массиву джозефсоновской частоты.

1. Описание образца и схема измерений

Внешний вид массива представлен на рис. 1а. Массив изготовлен на кремниевой подложке методами электронной литографии и реактивного ионного травления [5,6]. Джозефсоновские контакты в массиве распределены по 7 секциям, каждая из которых представляет собой 3 полосковых отрезка (линии) из ниобия длиной $L = 7.1$ мм, ориентированных параллельно и удалённых друг от друга на расстоянии 36 мкм (рис. 1а, вставка). Центральная линия соединена с левой и правой на противоположных концах, в результате получается последовательное соединение контактов в каждой секции. Линия содержит 476 джозефсоновских контактов, так что всего в массиве $N = 476 \times 3 \times 7 = 9996$ контактов. Прослойкой в джозефсоновском переходе является соединение NbSi с ~10%-ым содержанием ниобия. Размер каждого контакта 8×8 мкм², период следования контактов в линиях 15 мкм. Между секциями имеются контактные площадки, которые позволяют подключать питание как ко всему массиву, так и к отдельным его секциям (рис. 1а).

Массив размещался на конце волноводного тракта напротив апертуры квадратного рупора (рис. 1б). Данная система погружалась в сосуд Дьюара с жидким гелием, откуда излучение по волноводному тракту выводилось наружу. Для получения максимальной мощности на выходе массив был ориентирован под углом около 45° к плоскости рупора (рис. 1б). Данная асимметрия углового распределения мощности уже наблюдалась ранее на больших ниобиевых массивах [7].

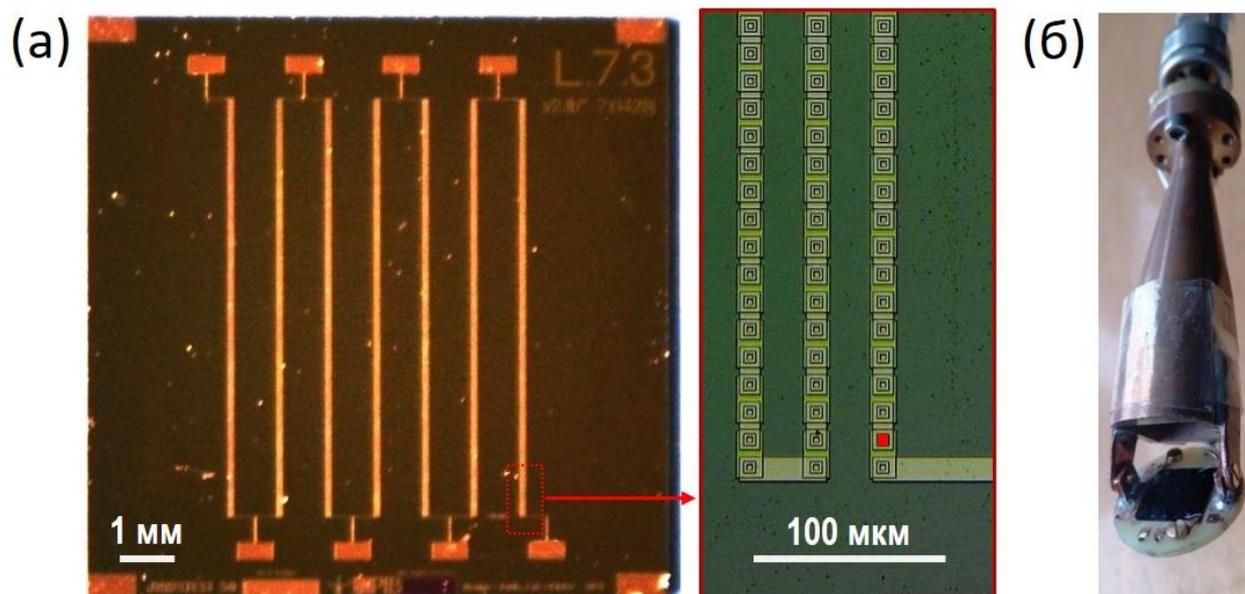


Рис. 1. (а) Массив джозефсоновских контактов (фотография). На вставке показан фрагмент массива (фотография, полученная на оптическом микроскопе). Красным квадратом отмечена область, занимаемая джозефсоновским контактом. (б) Массив джозефсоновских контактов, закреплённый на держателе из стеклотекстолита и установленный напротив апертуры рупора волноводного тракта.

При токе выше критического значения 5.5 мА на ВАХ массива появляется постоянное напряжение и возникает джозефсоновская генерация. Мощность излучения усиливается вблизи резонансных частот ниобиевых линий. Возбуждённая за счёт джозефсоновской генерации электромагнитная мода линий синхронизует контакты на своей резонансной частоте. При этом на ВАХ массива в области этих частот возникают ступени тока (рис. 2), на которых и проводились спектральные измерения. В отличие от ступеней Шапиро, возникающих на ВАХ джозефсоновских контактов при внешнем облучении [3], данные самоиндуцированные ступени являются наклонными, что объясняется конечной добротностью резонаторов. Все измерения проводились в диапазоне длин волн $\sim 1\text{-}2$ мм, что значительно больше L , поэтому массив джозефсоновских контактов является по отношению к генерируемому излучению сверхволновым.

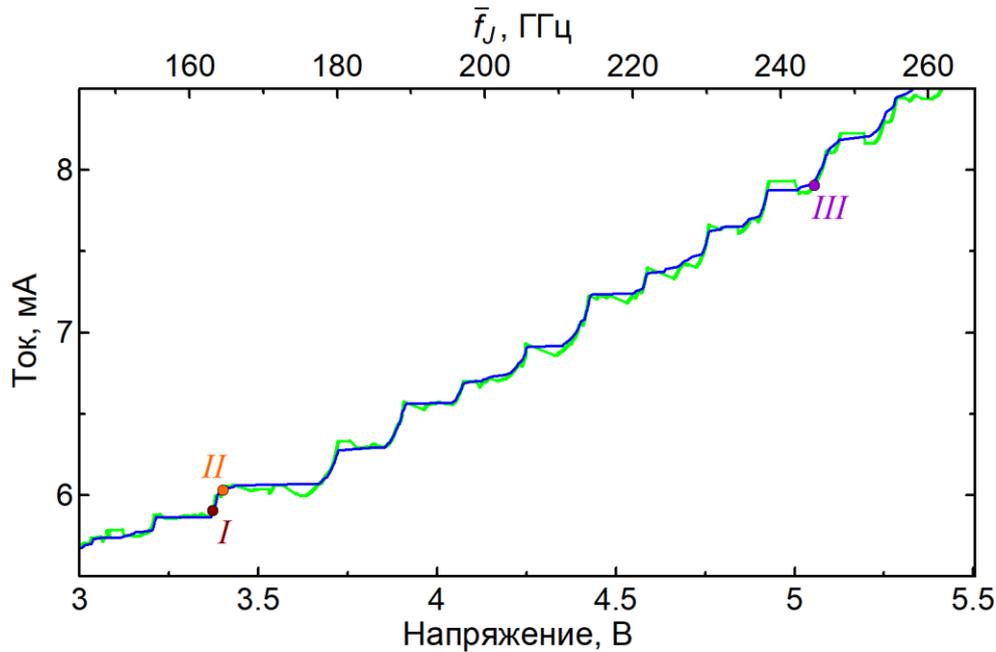


Рис. 2. ВАХ массива джозефсоновских контактов, измеренная в режиме заданного тока (синяя кривая) и при питании от источника напряжения с последовательно включённым сопротивлением $R_i = 1$ кОм (светло-зелёная кривая). ВАХ незначительно отличаются друг от друга на горизонтальных участках, где дифференциальное сопротивление превышает R_i , но на ступенях тока совпадают. Вдоль верхней оси отложена усреднённая по массиву джозефсоновская частота \bar{f}_J . В точках, обозначенных на ВАХ, проводились измерения, представленные на рис. 3.

Смесителем в приёмнике являлся джозефсоновский переход, который был образован путём напыления высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) $YBaCuO$ на бикристаллическую подложку $Zr_{1-x}Y_xO_2$ с углом разориентации монокристаллических решёток 24° в направлении $[001]$. Джозефсоновский переход шириной 1.5 мкм формировался на бикристаллической границе подложки. Переход интегрирован в логопериодическую планарную антенну для широкополосной связи с внешним излучением (рис. 3, вставка) [8]. Смеситель был закреплен на кремниевой линзе и установлен в криостате замкнутого цикла, в котором он охлаждался до температуры 6 К (рис. 3). В качестве гетеродина использовалась лампа обратной волны (ЛОВ), излучающая в диапазоне частот 115-175 ГГц. Смешение сигнала происходило на первой или второй гармонике ЛОВ. Сигнал гетеродина и джозефсоновское излучение объединялись с помощью делителя луча и затем направлялись

на смеситель через оптическое окно криостата (рис. 3). Эффективность преобразования смесителя с учётом потерь в тракте составляла -10 дБ на частоте 165 ГГц. Сигнал промежуточной частоты (ПЧ) после смесителя подавался сначала на охлаждаемый усилитель, расположенный внутри криостата, а затем на внешний усилитель. Суммарное усиление составляло 52 дБ в частотной полосе 1-3 ГГц. Усиленный сигнал ПЧ принимался анализатором спектра Gratten GA4063. В полосе разрешения спектра 3 МГц уровень шума составлял -64 дБм.

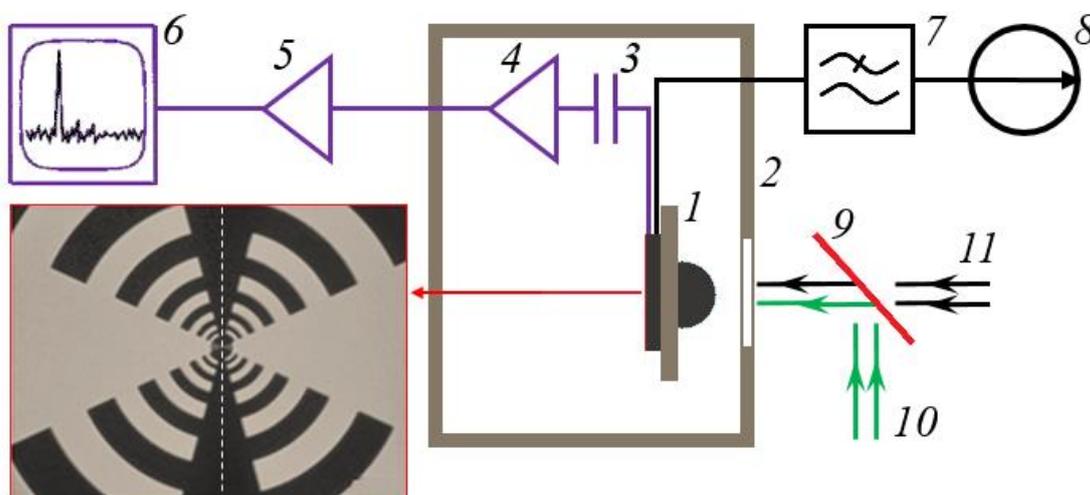


Рис. 3. Схема спектральных измерений: 1 – ВТСП смеситель на кремниевой линзе, 2 – криостат, 3 – изолирующая емкость, 4 – охлаждаемый усилитель, 5 – комнатный усилитель, 6 – анализатор спектра, 7 – фильтр нижних частот, 8 – автономный источник тока, 9 – делитель луча, 10 – сигнал гетеродина, 11 – излучение массива джозефсоновских контактов. На вставке приведена фотография образца со смесителем, где штриховой линией обозначена бикристаллическая граница.

В каждом измерении снималось от 4 до 20 реализаций спектра в зависимости от относительного уровня шума, а конечный результат получался путём усреднения этих реализаций. При питании массива от стабилизированного источника тока Keithley 6221 ширина спектральной линии джозефсоновской генерации составляла ~ 10 МГц в диапазоне частот 150-180 ГГц (первая гармоника ЛОВ, рис. 4) и достигала 27 МГц в диапазоне 225-250 ГГц (вторая гармоника ЛОВ). Было замечено, что ширина линий несколько уменьшалась при отключении от электрической схемы второстепенных измерительных

приборов: вольтметра и термоконтроллера. Кроме того, линии плохо аппроксимировались лоренцевой кривой и имели несимметричную форму. Эти наблюдения, как и в аналогичных спектральных измерениях со смесителем на основе туннельного перехода Nb/AlO_x/Nb [9], указывали на значительное влияние технических шумов на полученные спектры.

При подключении массива к автономному источнику напряжения с последовательно включённым резистором сопротивлением 1 кОм и при отключении указанных выше приборов наблюдалось значительное уменьшение ширины линии джозефсоновской генерации до значений 0.5-0.8 МГц как на первой, так и на второй гармонике гетеродина (рис. 4). Такие же узкие линии наблюдались в такой конфигурации цепи и на частях массива, содержащих от 2 до 5 секций. Причиной сужения линий может являться как переход к другому типу источника питания, в котором ток не стабилизирован, так и уменьшение связи электрической схемы с электросетью, что приводит к дополнительному понижению уровня технических шумов.

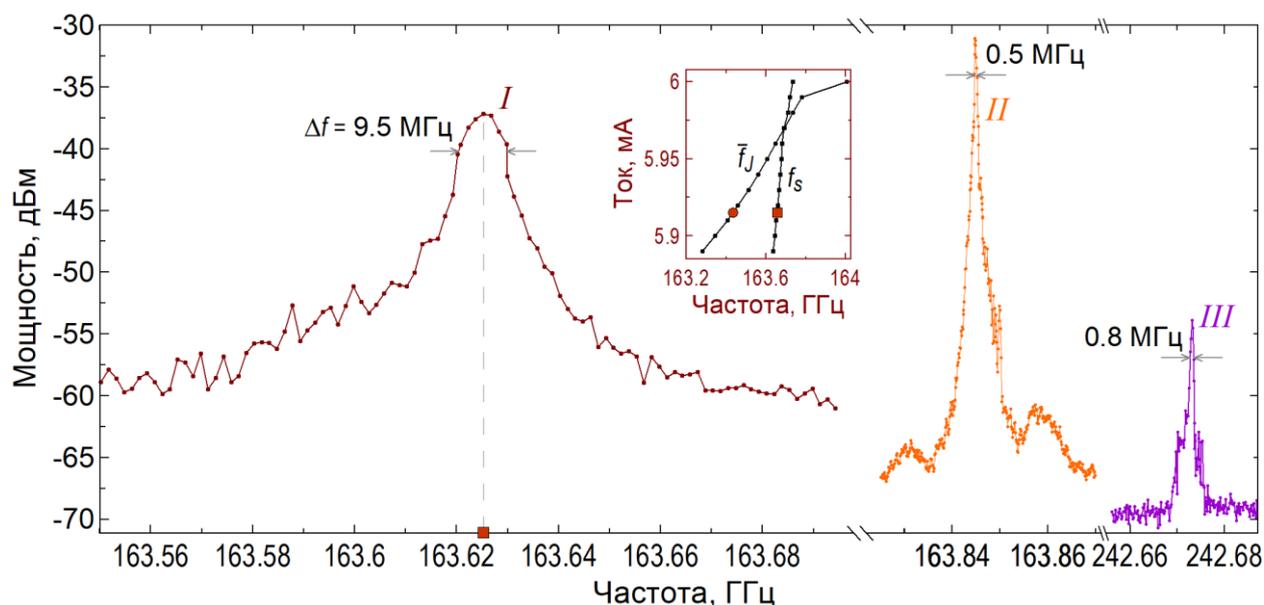


Рис. 4. Спектральные линии джозефсоновской генерации при подключении источника тока (*I*) и автономного источника напряжения (*II* – на первой гармонике ЛОВ, *III* – на второй гармонике ЛОВ). Точки на ВАХ массива, на которых снимались линии, указаны на рис. 2. На вставке показано изменение спектральной частоты f_s и усреднённой по массиву джозефсоновской частоты \bar{f}_J вдоль ступени тока ВАХ. Красные символы соответствуют спектральной линии *I*.

В измерениях с источником напряжения минимальное разрешение анализатора спектра, при котором спектральные линии были ещё различимы, составляло 300 кГц. При дальнейшем уменьшении разрешения линия размывалась из-за её колебаний вдоль оси частот (рис. 5). Амплитуда колебаний составляла от 1 до 10 МГц, а характерная частота колебаний оказывалась ниже частоты сканирования линий спектра, составляющей не более 1 кГц, т. е. это были довольно низкочастотные (НЧ) колебания. Таким образом, в спектральных измерениях был, по сути, достигнут предел разрешения, поэтому ширина линии джозефсоновской генерации ниобиевого массива может быть меньше полученных оценок.

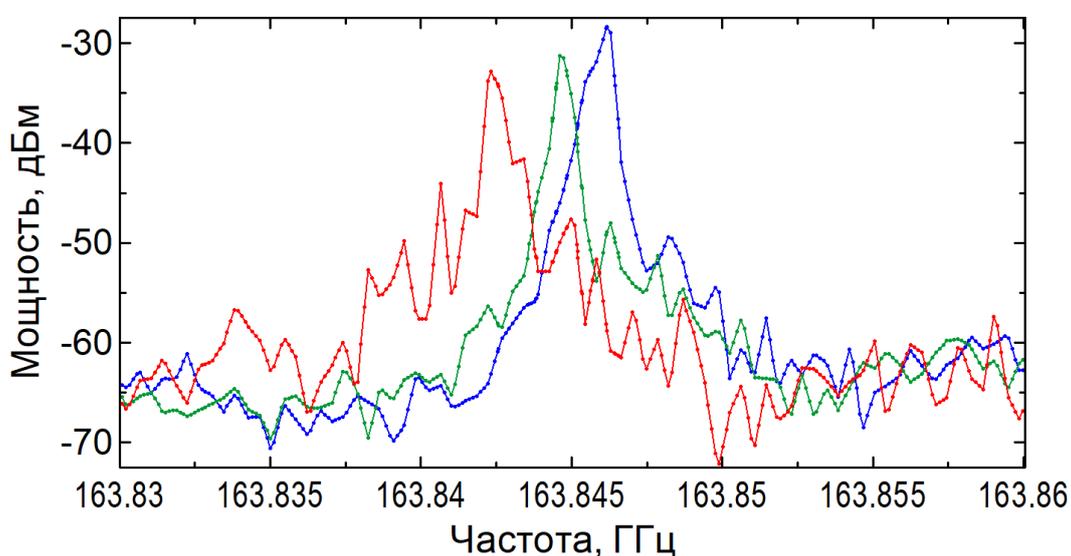


Рис. 5. Спектральная линия II (см. рис. 4), снятая в различные моменты времени. Положение линии смещается вдоль оси частот из-за низкочастотных колебаний.

В связи с НЧ колебаниями спектральных линий была выбрана следующая методика усреднения спектра по измеренным реализациям. Участок каждой реализации, содержащий спектральную линию, аппроксимировался гауссовой функцией по методу наименьших квадратов с целью определения спектральной частоты для каждой линии. С учётом найденных частот реализации сдвигались на среднее значение спектральной частоты, после чего и проводилось их усреднение. Благодаря данной методике удаётся избежать уширения усреднённого спектра из-за НЧ колебаний.

Во всех измерениях положение линий на оси частот f_s не совпадало со средней по массиву джозефсоновской частотой \bar{f}_J . В большинстве случаев \bar{f}_J отличалась от f_s на несколько сотен МГц (рис. 4, вставка). Несовпадение этих частот, очевидно, объясняется наличием в массиве контактов, джозефсоновские частоты которых f_J по каким-то причинам не совпадают с частотой резонансной моды f_s . Как было показано в [10], в подобных резонансных джозефсоновских системах контакты, находящиеся в окрестности узлов моды, оказываются слабо связанными с резонансными колебаниями, поэтому осциллируют в асинхронном режиме. Их f_J могут значительно отличаться от резонансной частоты f_s , что и приводит в итоге к отклонению \bar{f}_J от f_s . В других случаях, преимущественно на краях ступеней тока, разница между \bar{f}_J и f_s сильно возрастала, достигая значений 2-4 ГГц. Такое сильное расхождение может объясняться дополнительным возбуждением в массиве соседней моды, более низкой или более высокой в зависимости от того, к какой из соседних ступеней тока близка точка на ВАХ. Эта мода возбуждается джозефсоновскими контактами, параметры которых (критический ток и критическое сопротивление) сравнительно сильно отличаются от средних значений этих параметров по массиву, причём отличаются в сторону соответствующей моды (ступени). Дополнительная мода захватывает как те же контакты, которые её возбудили, так и другие, близкие по параметрам. Расстояние между соседними ступенями вдоль оси частот, как видно из рис. 2, составляет в среднем 8-9 ГГц, т. е. соседняя мода может захватить существенную часть (до 50 %) контактов массива. В таком случае на спектре должно наблюдаться две линии джозефсоновской генерации, но из-за ограниченного частотного диапазона анализатора спектра в наших измерениях сделать этого не удалось.

Заключение

Проведены спектральные измерения массива, содержащего 9996 ниобиевых джозефсоновских контактов, с помощью супергетеродинного сверхпроводникового приемника. Смесителем в приемнике являлся ВТСП джозефсоновский переход на основе $YBaCuO$. Измерения проводились в частотных диапазонах 150-180 ГГц и 225-250 ГГц. При питании массива от источника тока наблюдались спектральные линии джозефсоновского излучения, ширина которых составляла 10-30 МГц. При подключении массива или его части (от 2 до 5 секций из 7) к автономному источнику напряжения с резистором сопротивлением 1 кОм и при отключении от цепи второстепенных измерительных приборов ширина линий уменьшалась до 0.5-0.8 МГц. Значительное сужение спектральных линий может объясняться как изменением типа источника питания, так и уменьшением технических шумов за счёт ослабления связи электрической цепи с электросетью. В измерениях наблюдалось отклонение спектральной частоты (максимума линий спектра) от усреднённой по массиву джозефсоновской частоты, что объясняется несинхронностью с резонансной модой джозефсоновских контактов, расположенных в окрестностях узлов моды, а также возбуждением соседней резонансной моды при смещении на края ступени тока ВАХ.

В данных измерениях был достигнут предел разрешения спектров по частоте из-за НЧ колебаний спектральных линий вдоль оси частот, поэтому ширина спектральных линий может быть меньше полученных значений. Данный эффект нестабильности линий 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.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-79-10384-П.

Литература

1. Darula M., Doderer T., Beuven S. Millimetre and sub-mm wavelength radiation sources based on discrete Josephson junction arrays // *Superconductor Science and Technology*. – 1999. – V. 12. – №. 1. – P. R1–R25. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/12/1/001>
2. Kleiner R., Wang H. Terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ intrinsic Josephson junction stacks // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – V. 126. – №. 17. – P. 171101. <https://doi.org/10.1063/1.5116660>
3. Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 320 с.
4. Jain A.K., Likharev K.K., Lukens J.J., Sauvageau J.J. Mutual phase-locking in Josephson junction arrays // *Physics Reports*. – 1984. – V. 109. – №. 6. – P. 309–426. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(84\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(84)90002-4)
5. Mueller F., Behr R., Weimann T., Palafox L., Olaya D., Dresselhaus P.D., Benz S.P. 1 V and 10 V SNS programmable voltage standards for 70 GHz // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2009. – V. 19. – №. 3. – P. 981–986. <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2017911>
6. Kieler O., Wendisch R., Gerdau R.-W., Weimann T., Kohlmann J., Behr R. Stacked Josephson junction arrays for the pulse-driven AC Josephson voltage standard // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2021. – V. 31. – №. 5. – P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3060678>
7. Galin M.A., Borodianskyi E.A., Kurin V.V., Shereshevskiy I.A., Vdovicheva N.K., Krasnov V.M., Klushin A.M. Synchronization of large Josephson-junction arrays by traveling electromagnetic waves // *Physical Review Applied*. – 2018. – V. 9. – №. 5. – P. 054032. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.054032>
8. Glushkov E.I. Chiginev A.V., Kuzmin L.S., Revin L.S. A broadband detector based on series YBCO grain boundary Josephson junctions // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. – 2022. – V. 13. – №. 1. – P. 325–333. <https://doi.org/10.3762/bjnano.13.27>

9. Galin M.A., Kinev N.V., Levichev M.Yu., El'kina A.I., Antonov A.V., Khudchenko A.V., Nazarov G.P., Kurin V.V., Koshelets V.P. Linewidth measurements of a large niobium Josephson junction array // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2024. – V. 34. – №. 3. – P. 1100405.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3337197>
10. Galin M.A., Shereshevsky I.A., Vdovicheva N.K., Kurin V.V. Coherent radiation of active Josephson traveling-wave antennas // *Superconductor Science and Technology.* – 2021. – V. 34. – №. 7. – P. 075005. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abfd0b>

Для цитирования:

Галин М.А., Елькина А.И., Левичев М.Ю., Мастеров Д.В., Парафин А.Е., Ревин Л.С. Особенности спектра массива ниобиевых джозефсоновских контактов, измеренного с помощью высокотемпературного джозефсоновского смесителя. // *Журнал радиоэлектроники.* – 2025 – № 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.4>