

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.1>

УДК: 538.945; 537.86

БИСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ В МЕТАМАТЕРИАЛЕ ИЗ ВЧ-СКВИДов

А.С. Аверкин¹, Л.В. Филиппенко², М.В. Фистуль¹

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4

²ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2026 г.

Аннотация. Экспериментально исследован нелинейный отклик одномерного сверхпроводящего метаматериала, изготовленного на основе 54 безгистерезисных высокочастотных сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов). Проведены измерения зависимостей резонансной частоты системы от мощности тона накачки в двух-тоновом режиме возбуждения как в отсутствие, так и при приложении внешнего постоянного магнитного поля. Метаматериал демонстрирует бистабильное поведение в широком диапазоне мощностей накачки, что указывает на возможность его применения в устройствах квантовой электроники и сверхпроводящих параметрических усилителях.

Ключевые слова: сверхпроводимость, ВЧ-СКВИД, контакт Джозефсона, СВЧ измерения, двух-тоновая микроволновая спектроскопия.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030” (Стратегический технологический проект НИТУ МИСИС «Квантовый интернет»). Экспериментальные образцы были изготовлены в рамках Госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Аверкин Александр Сергеевич, averkin.as@misis.ru

Введение

Джозефсоновские контакты [1,2] широко применяются в качестве нелинейных элементов сверхпроводящих цепей. Экспериментально продемонстрировано смешение сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов на одиночном контакте Джозефсона [3]. Одиночные высокочастотные сверхпроводящие квантовые интерферометры (ВЧ-СКВИДы), в которых Джозефсоновский контакт встроен в сверхпроводящую замкнутую цепь, уже используются для создания датчиков микроволновых сигналов малой мощности [4], микроволновых усилителей [5,6], и т.д.

Сверхпроводящие метаматериалы на основе ВЧ-СКВИДов представляют собой перспективную платформу как для изучения разнообразных нелинейных эффектов [7-9], так и для управления микроволновым излучением [10,11], создания приборов сверхпроводниковой электроники [12]. В частности, в таких метаматериалах предсказано и исследовано явление мультистабильности [8,9], найдены сложные пространственно-временные структуры (так называемые «химерные состояния» [7]), исследован отклик двумерных массивов на двухтоновое возбуждение [13]. Экспериментальные исследования в этой области охватывают как одномерные [14,15], так и двумерные массивы ВЧ-СКВИДов [16-18].

Развитие квантовых технологий стимулировало создание сверхпроводящих параметрических усилителей, обеспечивающих усиление с практически квантовоограниченным уровнем шума [19]. Реализованы несколько типов сверхпроводящих параметрических усилителей, использующих нелинейность кинетической индуктивности сверхпроводящих пленок [20], джозефсоновских контактов [21], сверхпроводящих нелинейных индуктивных элементов (SNAIL) [22], а также бифуркационные параметрические усилители [5,6]. Их работа основана на параметрическом процессе, требующем одновременной подачи двух сигналов: слабого сигнального тона и мощного тона накачки [23,24]. СКВИДы также используются в качестве нелинейных элементов сверхпроводящих параметрических усилителей бегущей волны [23-25]. Таким образом, СКВИДы

являются структурными элементами нелинейных сред, применяемых в сверхпроводящих метаматериалах и сверхпроводящих малошумящих параметрических усилителях.

Изучение параметрических эффектов в метаматериалах из ВЧ-СКВИДов представляет значительный интерес как для фундаментального понимания физики нелинейных сверхпроводящих структур, так и для оптимизации характеристик параметрических усилителей. Удобным методом исследования таких систем является двух-тоновая спектроскопия, когда мощный тон накачки управляет нелинейностью, а слабый сигнальный тон используется для считывания состояния ВЧ-СКВИДов [26,27]. Применение этого метода к одномерному массиву ВЧ-СКВИДов позволило получить аналитическое описание зависимости резонансной частоты от мощности микроволнового излучения [26].

В настоящей работе экспериментально и теоретически исследован отклик одномерного метаматериала, состоящего из 54 ВЧ-СКВИДов. Амплитуда отклика такой системы значительно превышает амплитуду отклика одиночного ВЧ-СКВИДа, что позволяет регистрировать слабые эффекты, недоступные при исследовании единичного элемента. Экспериментально измерены зависимости резонансной частоты метаматериала от мощности тона накачки в двух-тоновом режиме возбуждения как в отсутствие, так и при приложении внешнего постоянного магнитного поля. Обнаружено, что в присутствии магнитного поля метаматериал демонстрирует бистабильный отклик в широком диапазоне мощностей тона накачки.

1. Образец и измерительная установка

Ключевым элементом исследуемого метаматериала является ВЧ-СКВИД, состоящий из ниобиевого кольца, прерываемого Джозефсоновским контактом $Nb/AlO_x/Nb$. Параллельно Джозефсоновскому переходу подключен плоский конденсатор. Изготовлен образец со следующими параметрами ВЧ-СКВИДа: критический ток джозефсоновского перехода $I_c = 2,2$ мкА, емкость шунтирующего

конденсатора $C = 2$ пФ, геометрическая индуктивность контура ВЧ-СКВИДа $L_g = 82,5$ пГн. Джозефсоновская индуктивность при нулевой разности фаз на контакте $L_j(0) = 150$ пГн, параметр экранирования СКВИДа $\beta_L = L_g/L_j(0)$ определяет то, что ВЧ-СКВИД является безгистерезисным ($\beta_L = 0,55 < 1$).

Массив из 54 ВЧ-СКВИДов изготовлен в зазоре копланарной линии (КПЛ). Каждый ВЧ-СКВИД индуктивно связан с центральным проводником КПЛ. Характеристическое сопротивление КПЛ близко к $Z_0 = 50$ Ом. Фотография образца представлена на рисунке 1а. Образцы изготовлены с использованием трехслойного процесса $Nb/AlO_x/Nb$ на оборудовании, входящем в состав уникальной научной установки УНУ «Криоинтеграл» [28].

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1г. Образец установлен в держателе образца и подключен при помощи ультразвуковой сварки алюминиевой проволокой. Держатель образца установлен внутри магнитного экрана из криопермалоя, измерения проводились внутри криостата замкнутого цикла при температуре $T = 3,5$ К. Для подачи СВЧ сигналов на образец используются две коаксиальные линии. Внутри криостата на входной СВЧ линии установлены СВЧ аттенюаторы с общим затуханием 20 дБ. Выходная СВЧ линия проходит через СВЧ изолятор, установленный на нижней ступени криостата, и через два усилителя, установленные снаружи криостата. Коэффициент передачи S_{21} измерялся с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) Планар С1220.

При измерениях в одно-тоновом режиме СВЧ генератор не использовался. Магнитное поле подавалось на образец через магнитную катушку от источника тока, расположенного при комнатной температуре. При измерениях в двух-тоновом режиме тон накачки подается от генератора сигналов через направленный ответвитель СВЧ мощности.

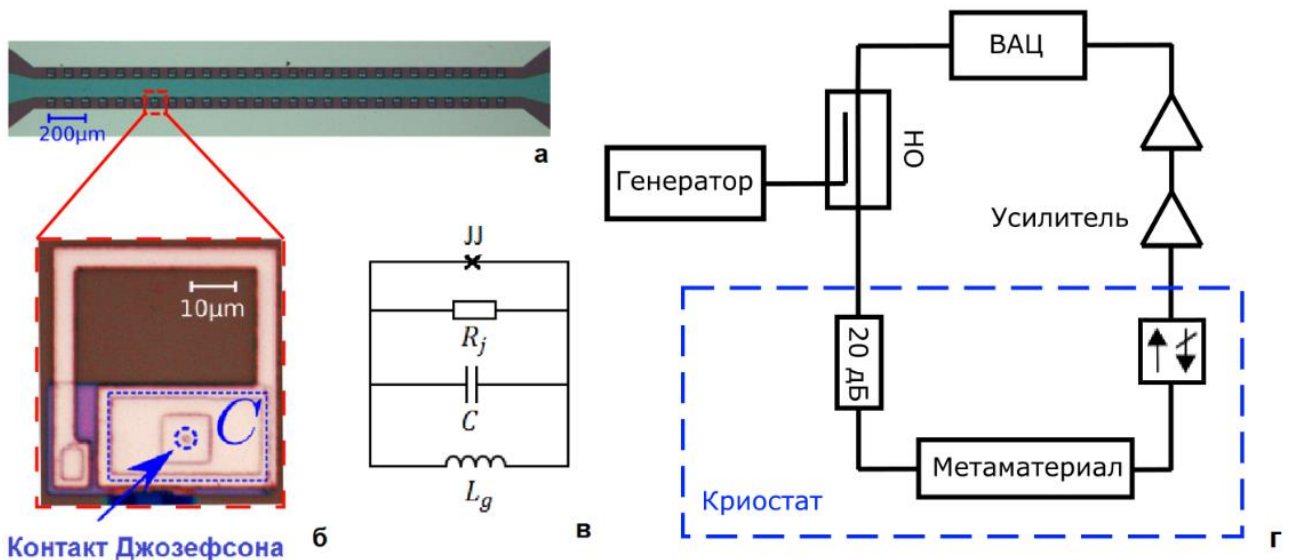


Рис. 1. (а) Фотография образца метаматериала с 54 ВЧ-СКВИДа. (б) Фотография одиночного ВЧ-СКВИДа. ВЧ-СКВИД состоит из контакта Джозефсона, шунтирующего конденсатора и кольца из сверхпроводника. (в) Эквивалентная схема ВЧ-СКВИДа. ВЧ-СКВИД может быть представлен идеальным джозефсоновским переходом, шунтирующей емкостью C , сопротивлением перехода в нормальном состоянии R_j и геометрической индуктивностью кольца СКВИДа L_g . (г) Схема экспериментальной установки.

2. Результаты измерений

На первом этапе коэффициент передачи S_{21} измерялся в отсутствие сигнала генератора. Измерения проводились при помощи ВАЦ в зависимости от постоянного магнитного поля, приложенного к образцу при помощи магнитной катушки (рис. 2). Мощность сигнала ВАЦ была фиксированной $P_s = -50$ дБм. На рисунке 2 на резонансной частоте ВЧ-СКВИДа виден резонансный провал глубиной около 3 дБ. Наличие резонанса показывает, что система слабо диссипативная.

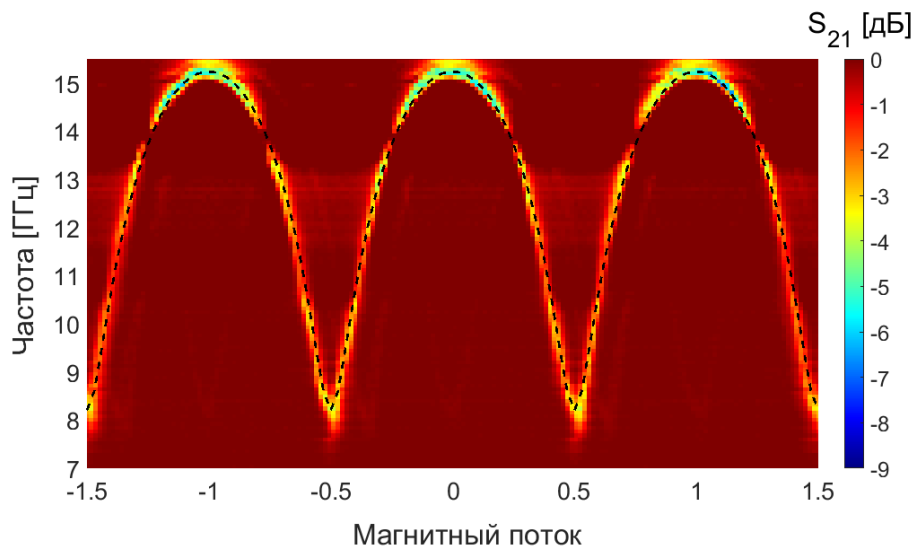


Рис. 2. Измеренный коэффициент передачи S_{21} S_{21} в зависимости от частоты и от постоянного магнитного поля в единицах Φ_0 . Аналитически рассчитанная зависимость резонансной частоты в зависимости от магнитного потока по формуле (6) в сочетании с формулой (3) (пунктирная линия).

Резонансная частота ВЧ-СКВИДов перестраивается постоянным магнитным полем от максимальной частоты $f_{max} = 15,2$ ГГц в отсутствии магнитного поля до минимальной частоты $f_{min} = 8,2$ ГГц при приложенном магнитном поле эквивалентном магнитному потоку равному $\Phi_0/2$, где $\Phi_0 = h/(2e)$ квант магнитного потока для куперовских пар, h постоянная планка, $2e$ заряд куперовской пары.

На втором этапе отклик образца измерялся под воздействием двух тонов: тона сигнала на частоте f_s и тона накачки на фиксированной частоте $f_p = 10$ ГГц. Коэффициент передачи сигнала S_{21} в зависимости от частоты сигнала f_s и от мощности тона накачки P_p измерен с помощью векторного анализатора цепей (рис. 3). Постоянное магнитное поле не подавалось на образец. При малой мощности тона накачки резонансная частота ВЧ-СКВИДов находится на частоте $f_r = 15,2$ ГГц. При увеличении мощности тона накачки резонансная частота ВЧ-СКВИДов уменьшается и начинает осциллировать в зависимости от мощности.

На третьем этапе, отклик образца был также измерен под воздействием двух тонов: сигнального тона на частоте f_s и тона накачки на фиксированной частоте $f_p = 10$ ГГц. Также был приложен внешний магнитный поток равный половине кванта магнитного потока. Коэффициент передачи сигнала S_{21}

в зависимости от частоты сигнала f_s и от мощности тона накачки P_p измерен с помощью векторного анализатора цепей (рис. 4). Измеренная резонансная частота ВЧ-СКВИДов $f_r = 8,2$ ГГц не зависит от мощности тона накачки при малой мощности тона накачки. При увеличении мощности накачки возникает область бистабильности между двумя резонансными частотами $f_1 = 8,2$ ГГц и $f_2 = 10,8$ ГГц в диапазоне мощностей накачки от $P_1 = -16$ дБм до $P_2 = -11$ дБм. Если мощность тона накачки превышает $P_2 = -11$ дБм, то бистабильный отклик исчезает и остается отклик только на одной резонансной частоте. При этом резонансная частота метаматериала из ВЧ-СКВИДов возрастает как функция мощности тона накачки.

3. Расчет резонансной частоты ВЧ-СКВИДа в двух-тоновом режиме возбуждения

ВЧ-СКВИД состоит из сверхпроводящего кольца со встроенным Джозефсоновским контактом (рис. 1б). Эквивалентная схема ВЧ-СКВИДа представлена на рисунке 1в. Контакт Джозефсона описывается моделью RCSJ [29]. В такой модели ток, протекающий в ВЧ-СКВИДе равен сумме токов через идеальный джозефсоновский переход с критическим током I_c , шунтирующий конденсатор C , сопротивление джозефсоновского контакта в нормальном состоянии R_j и тока, текущего через геометрическую индуктивность сверхпроводящего кольца ВЧ-СКВИДа L_g :

$$\omega_g^{-2} \ddot{\varphi} + \gamma \dot{\varphi} + \varphi + \beta_L(\varphi) \sin(\varphi) = A_{pe} \sin(\omega_p t) + A_{se} \sin(\omega_s t). \quad (1)$$

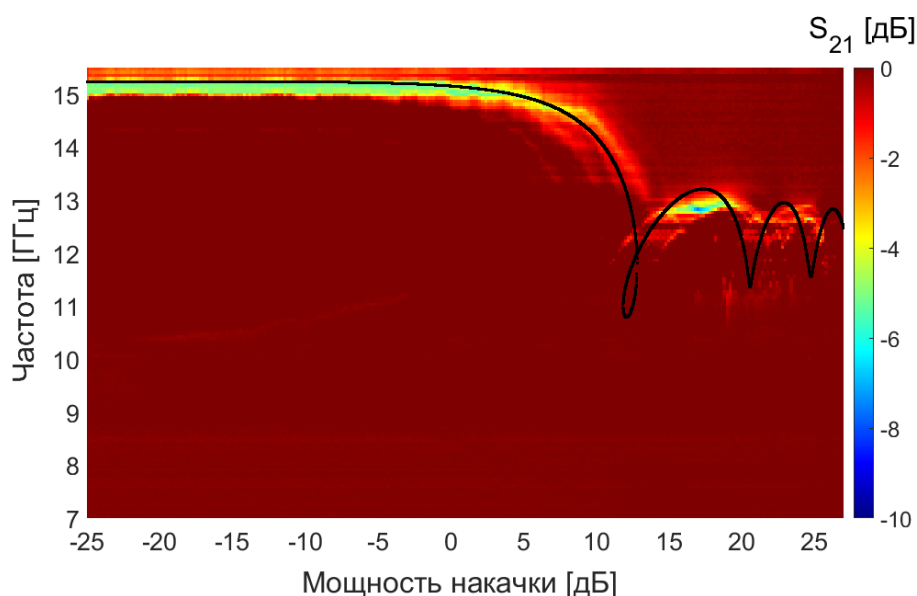


Рис. 3. Измеренный коэффициент передачи S_{21} в зависимости от частоты сигнального тона и от мощности тона накачки, приложенного на фиксированной частоте 10 ГГц. Измерения выполнены в отсутствие постоянного магнитного поля. Зависимость резонансной частоты ВЧ-СКВИДа как функция мощности тона накачки в двух-тоновом режиме, рассчитанная аналитически при отсутствии внешнего магнитного потока $\Phi_{ext} = 0$, по формуле (5) в сочетании с формулами (3) и (4) показана черной линией.

Амплитуда тона накачки дана выражением: $A_{pe} \sim q \frac{2\pi L_g}{\Phi_0} \sqrt{10^{-3P_p/10}}$;

амплитуда сигнального тона дана выражением: $A_{se} \sim q \frac{2\pi L_g}{\Phi_0} \sqrt{10^{-3P_s/10}}$, где P_p и P_s

мощности накачки и сигнала соответственно в дБм, q коэффициент связи между амплитудой сигнала на ВЧ-СКВИДе и амплитудой сигнала на выходе измерительных приборов. Параметр экранировки ВЧ-СКВИДа $\beta_L(\varphi)$ в зависимости от постоянной разности фаз φ_{DC} на джозефсоновском контакте задается формулой:

$$\beta_L(\varphi) = \beta_L \cos(\varphi_{DC}). \quad (2)$$

Зависимость постоянной разности фаз φ_{DC} от внешнего постоянного магнитного потока, приложенного к ВЧ-СКВИДу Φ_{ext} находится из решения трансцендентного уравнения:

$$2\pi \frac{\Phi_{ext}}{\Phi_0} = \varphi_{DC} + \beta_L \sin(\varphi_{DC}). \quad (3)$$

Подробное решение уравнения (1) выполнено в работах [8,26,27]. Решив уравнение (1), получаем трансцендентное уравнение, которое связывает амплитуду отклика A_p и амплитуду внешнего сигнала накачки A_{pe} :

$$A_{pe} = \sqrt{\left(A_p - A_p \frac{\omega_p^2}{\omega_g^2} + 2\beta_L \cos(\varphi_{DC}) J_1(A_p) \right)^2 + \left(A_p \frac{\omega_p}{\omega_c} \right)^2}, \quad (4)$$

где $J_1(A_p)$ – функция Бесселя первого порядка. Решив уравнение (1) получаем выражение для резонансной частоты ВЧ-СКВИДа в двух-тоновом режиме:

$$f_r = \frac{\omega_g}{2\pi} \sqrt{1 + \beta_L \cos(\varphi_{DC}) J_0(A_p) - (\gamma\omega_g)^2 / 4}, \quad (5)$$

где $J_0(A_p)$ – функция Бесселя нулевого порядка. Резонансная частота ВЧ-СКВИДа f_r в зависимости от мощности тона накачки P_p , рассчитанная аналитически по формуле (5) в сочетании с формулами (3) и (4), при нулевом внешнем магнитном потоке $\Phi_{ext} = 0$ для $R_j = 800$ Ом показана на рисунке 3. Резонансная частота ВЧ-СКВИДа f_r в зависимости от мощности тона накачки P_p , рассчитанная аналитически по формуле (5) в сочетании с формулами (3) и (4), при приложенном внешнем магнитном потоке равном половине кванта магнитного потока $\Phi_{ext} = \Phi_0/2$ для $R_j = 200$ Ом показана на рисунке 4.

4. Расчет резонансной частоты ВЧ-СКВИДа в одно-тоновом режиме возбуждения

Если формулу (5) применить для случая одно-тонового возбуждения ($A_p = 0$), тогда функция Бесселя $J_0(0) = 1$. Если также пренебречь малыми потерями

в контакте Джозефсона ($\gamma = 0$), то получаем стандартную формулу для резонансной частоты ВЧ-СКВИДа в одно-тоновом режиме:

$$f_r = \frac{\omega_g}{2\pi} \sqrt{1 + \beta_L \cos(\varphi_{DC})}. \quad (6)$$

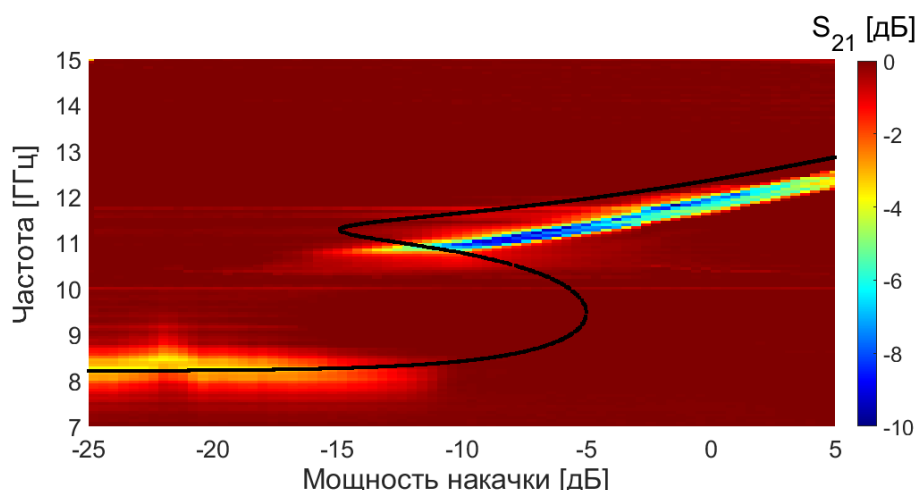


Рис. 4. Измеренный коэффициент передачи S_{21} в зависимости от частоты сигнального тона и от мощности тона накачки, приложенного на фиксированной частоте 10 ГГц. Также к образцу приложено постоянное магнитное поле, создающее магнитный поток равный половине кванта магнитного потока. Аналитическая зависимость резонансной частоты ВЧ-СКВИДа от мощности тона накачки, в присутствии магнитного потока $\Phi_{ext} = \Phi_0/2$, рассчитанная по формулам (3)-(5) показана черной линией.

В отсутствие внешнего магнитного потока ($\Phi_{ext} = 0$) по формуле (3) $\varphi_{DC} = 0$. Подставив значение $\varphi_{DC} = 0$ в формулу (6), получаем выражение для максимальной резонансной частоты ВЧ-СКВИДа:

$$f_{max} = \frac{\omega_g}{2\pi} \sqrt{1 + \beta_L}. \quad (7)$$

Если к ВЧ-СКВИДУ приложен внешний магнитный поток равный половине кванта магнитного потока $\Phi_{ext} = \Phi_0/2$, то по формуле (3) $\varphi_{DC} = \pi$. Подставив значение $\varphi_{DC} = \pi$ в формулу (6), получаем выражение для минимальной резонансной частоты ВЧ-СКВИДа:

$$f_{min} = \frac{\omega_g}{2\pi} \sqrt{1 - \beta_L}. \quad (8)$$

Зависимость резонансной частоты ВЧ-СКВИДа от внешнего постоянного магнитного потока, рассчитанная аналитически по формулам (3) и (6), показана на рисунке 2 пунктирной линией. На рисунке 2 аналитическая кривая построена для значения критического тока $I_c = 2,2$ мкА. При таком значении критического тока максимальная резонансная частота ВЧ-СКВИДа, рассчитанная по формуле (7), при нулевом внешнем магнитном потоке $\Phi_{ext} = 0$ равна $f_{max} = 15,2$ ГГц. Минимальная резонансная частота ВЧ-СКВИДа, рассчитанная по формуле (8), в точке пол кванта магнитного потока $\Phi_{ext} = \Phi_0/2$ равна $f_{min} = 8,2$ ГГц.

5. Дискуссия

Проведено измерение отклика одномерного метаматериала, состоящего из 54 ВЧ-СКВИДов, в нескольких режимах. На первом этапе резонансная частота метаматериала из ВЧ-СКВИДов измерена в зависимости от приложенного постоянного магнитного поля в одно-тоновом режиме возбуждения (рис. 2). Измеренная зависимость резонансной частоты хорошо совпала с зависимостью, рассчитанной аналитически по формуле (6) при использовании в расчете значения критического тока $I_c = 2,2$ мкА. Сравнение теоретических и экспериментальных кривых на рисунке 2 позволяет определить важные параметры метаматериала, то есть геометрическую частоту $\omega_g = 76,9$ ГГц и параметр экранировки $\beta_L = 0,55$. Эти параметры были использованы в расчетах.

На втором этапе резонансная частота метаматериала измерена как функция мощности СВЧ сигнала накачки в двух-тоновом режиме возбуждения в отсутствие постоянного магнитного поля (рис. 3). Измеренная зависимость резонансной частоты как функция мощности сигнала накачки хорошо совпадает с аналитически рассчитанной зависимостью по формуле (5) в сочетании с формулами (4) и (3). При малой мощности накачки измеренная резонансная частота $f_r = 15,2$ ГГц равняется резонансной частоте ВЧ-СКВИДа, рассчитанной аналитически по формуле (7).

И наконец, измерена резонансная частота метаматериала из ВЧ-СКВИДов в зависимости от мощности тона накачки в двух-тоновом режиме возбуждения

при наличии постоянного магнитного поля, соответствующего магнитному потоку равному половине кванта магнитного потока (рис. 4). На измеренной зависимости видно, что метаматериал из ВЧ-СКВИДов демонстрирует бистабильный отклик между двумя удаленными резонансными частотами $f_1 = 8,2$ ГГц и $f_2 = 10,8$ ГГц в диапазоне мощностей накачки от $P_1 = -16$ дБм до $P_2 = -11$ дБм. Измеренная зависимость резонансной частоты как функция мощности сигнала накачки хорошо совпадает с аналитически рассчитанной зависимостью по формуле (5) в сочетании с формулами (3) и (4) (черная линия на рис. 4).

В отсутствии магнитного поля и для выбранной частоты тона накачки $f_p = 10$ ГГц бистабильные состояния метаматериала из ВЧ-СКВИДов не наблюдались ни в эксперименте, ни в аналитических расчетах (рис. 3). Этот факт возможно объяснить тем что частота накачки $f_p = 10$ ГГц не попадает в интервал резонансных частот метаматериала из ВЧ-СКВИДов, то есть $f = 12,1 - 15,2$ ГГц. Однако, если к образцу приложен постоянный магнитный поток, равный половине кванта магнитного потока, то на эксперименте виден заметный бистабильный отклик между двумя удаленными друг от друга резонансными частотами $f_1 = 8,2$ ГГц и $f_2 = 10,8$ ГГц (рис. 4). В этом случае частота накачки $f_p = 10$ ГГц находится внутри диапазона перестройки метаматериала из ВЧ-СКВИДов $f = 8,2 - 12,4$ ГГц.

Заключение

В работе экспериментально исследован отклик одномерного сверхпроводящего метаматериала на основе 54 высокочастотных сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов) в линейном и нелинейном режимах. Показано, что структура обладает нелинейным откликом при двух-тоновом возбуждении. В присутствии внешнего постоянного магнитного поля в широком диапазоне мощностей тона накачки обнаружен выраженный бистабильный отклик, характеризующийся переключением между двумя удаленными резонансными частотами. Экспериментальные

зависимости хорошо совпали с зависимостями, рассчитанными аналитически. Полученные результаты демонстрируют перспективность одномерных массивов ВЧ-СКВИДов как платформы для изучения нелинейных параметрических эффектов в сверхпроводящих метаматериалах. Обнаруженный бистабильный отклик может найти применение при создании бифуркационных сверхпроводящих параметрических усилителей СВЧ мощности

Благодарности: Авторы благодарят В.П Кошельца, Ф. Юнга и С. Бутз за помощь при выполнении работы.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030” (Стратегический технологический проект НИТУ МИСИС «Квантовый интернет»). Экспериментальные образцы были изготовлены в рамках Госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. B. Josephson, “Possible new effects in superconductive tunnelling,” *Physics Letters*, vol. 1, no. 7, pp. 251–253, 1962. [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(62\)91369-0](https://doi.org/10.1016/0031-9163(62)91369-0)
2. P. W. Anderson and J. M. Rowell, “Probable observation of the Josephson superconducting tunneling effect,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 10, pp. 230–232, Mar 1963. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.10.230>
3. C. C. GRIMES and S. SHAPIRO, “Millimeter-wave mixing with josephson junctions,” *Phys. Rev.*, vol. 169, May 1968. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.169.397>
4. Y.-F. Chen, “Microwave Photon Counter Based on Josephson Junctions“, *Phys. Rev. Lett.* 107, 217401 Published 14 November, 2011, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.217401>

5. R. Vijay, M. H. Devoret, I. Siddiqi; Invited Review Article: The Josephson bifurcation amplifier. *Rev. Sci. Instrum.* 1 November 2009; 80 (11): 111101. <https://doi.org/10.1063/1.3224703>
6. N. Boulant, G. Ithier, P. Meeson, F. Nguyen, D. Vion, D. Esteve, I. Siddiqi, R. Vijay, C. Rigetti, F. Pierre, and M. Devoret, *Phys. Rev. B* 76, 014525 (2007). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.014525>
7. J. Hizanidis, N. Lazarides, and G. P. Tsironis, “Robust chimera states in squid metamaterials with local interactions,” *Phys. Rev. E*, vol. 94, p. 032219, Sep 2016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.94.032219>
8. P. Jung, S. Butz, M. Marthaler, M. V. Fistul, J. Leppäakangas, V. P. Koshelets, and A. V. Ustinov, “Multistability and switching in a superconducting metamaterial,” *Nature Communications*, vol. 5, p. 174507, Apr 2014. <https://doi.org/10.1038/ncomms4730>
9. Tsironis, G.P., Lazarides, N. & Margaris, I. Wide-band tuneability, nonlinear transmission, and dynamic multistability in SQUID metamaterials. *Appl. Phys. A* 117, 579–588 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8706-7>
10. N. Lazarides and G. Tsironis, “Superconducting metamaterials,” *Physics Reports*, vol. 752, pp. 1–67, 2018. *Superconducting Metamaterials*. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.06.005>
11. P. Jung, A. V. Ustinov, and S. M. Anlage, “Progress in superconducting metamaterials,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, p. 073001, may 2014. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/7/073001>
12. O.A. Mukhanov, S. Sarwana, D. Gupta, A.F. Kirichenko, S.V. Rylov, “Rapid single flux quantum technology for SQUID applications”, *Physica C: Superconductivity*, Vol. 368, Issues 1–4, 2002, Pages 196-202, ISSN 0921-4534. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(01\)01166-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(01)01166-2)
13. D. Zhang, M. Trepanier, T. Antonsen, E. Ott, and S. M. Anlage, “Intermodulation in nonlinear squid metamaterials: Experiment and theory,” *Phys. Rev. B*, vol. 94, p. 174507, Nov 2016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.174507>

14. P. Jung, S. Butz, S. V. Shitov, and A. V. Ustinov, “Low-loss tunable metamaterials using superconducting circuits with Josephson junctions,” *Applied Physics Letters*, vol. 102, p. 062601, 02 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4791697>
15. S. Butz, P. Jung, L. V. Filippenko, V. P. Koshelets, and A. V. Ustinov, “A one-dimensional tunable magnetic metamaterial: erratum,” *Opt. Express*, vol. 22, pp. 13041–13042, Jun 2014. <https://doi.org/10.1364/OE.22.013041>
16. M. Trepanier, D. Zhang, O. Mukhanov, and S. M. Anlage, “Realization and modeling of metamaterials made of rf superconducting quantum-interference devices,” *Phys. Rev. X*, vol. 3, p. 041029, Dec 2013. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.3.041029>
17. A. S. Averkin, A. P. Zhuravel, P. Jung, N. Maleeva, V. P. Koshelets, L. V. Filippenko, A. Karpov, and A. V. Ustinov, “Imaging coherent response of superconducting metasurface,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, pp. 1–3, 2016. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2516246>
18. M. Trepanier, D. Zhang, O. Mukhanov, V. P. Koshelets, P. Jung, S. Butz, E. Ott, T. M. Antonsen, A. V. Ustinov, and S. M. Anlage, “Coherent oscillations of driven rf squid metamaterials,” *Phys. Rev. E*, vol. 95, p. 050201, May 2017. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.050201>
19. M. A. Castellanos-Beltran, K. D. Irwin, G. C. Hilton, L. R. Vale, and K. W. Lehnert, “Amplification and squeezing of quantum noise with a tunable josephsonmetamaterial,” *Nature Physics*, vol. 4, pp. 929–931, Dec 2008. <https://doi.org/10.1038/nphys1090>
20. B. Ho Eom, P. K. Day, H. G. LeDuc, and J. Zmuidzinas, “A wideband, low-noise superconducting amplifier with high dynamic range,” *Nature Physics*, vol. 8, pp. 623–627, Aug 2012. <https://doi.org/10.1038/nphys2356>
21. K. O’Brien, C. Macklin, I. Siddiqi, and X. Zhang, “Resonant phase matching of josephson junction traveling wave parametric amplifiers,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, p. 157001, Oct 2014. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.157001>

22. N. E. Frattini, U. Vool, S. Shankar, A. Narla, K. M. Sliwa, and M. H. Devoret, “3-wave mixing josephson dipole element,” *Applied Physics Letters*, vol. 110, p. 222603, 05 2017. <https://doi.org/10.1063/1.4984142>
23. O. Yaakobi, L. Friedland, C. Macklin, and I. Siddiqi, “Parametric amplification in josephson junction embedded transmission lines,” *Phys. Rev. B*, vol. 87, p. 144301, Apr 2013. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.144301>
24. A. B. Zorin, “Josephson traveling-wave parametric amplifier with three-wave mixing,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 6, p. 034006, Sep 2016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.6.034006>
25. V. Gaydamachenko, C. Kissling, and L. Grunhaupt, “rf-squid-based traveling-wave parametric amplifier with input saturation power of -84 dbm across more than one octave in bandwidth,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 23, p. 064053, Jun 2025. <https://doi.org/10.1103/1qk4-fzkq>
26. E. I. Kiselev, A. S. Averkin, M. V. Fistul, V. P. Koshelets, and A. V. Ustinov, “Two-tone spectroscopy of a squid metamaterial in the nonlinear regime,” *Phys. Rev. Res.*, vol. 1, p. 033096, Nov 2019. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.1.033096>
27. Аверкин А.С., Филиппенко Л.В. Эффективная джозефсоновская индуктивность ВЧ-СКВИДа как функция мощности микроволнового облучения // Журнал Радиоэлектроники. – 2026. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.9>
28. УНУ «Криоинтеграл» – «Технологический и измерительный комплекс для создания сверхпроводниковых наносистем на основе новых материалов». <http://www.cplire.ru/rus/kriointegral/index.html>; <http://ckp-rf.ru/usu/352529/>
29. M. Tinkham, *Introduction to superconductivity* 2d ed. //McGraw-Hill international editions, -1996. с. 202.

Для цитирования:

Аверкин А.С., Филиппенко Л.В., Фистуль М.В. Бистабильные состояния в метаматериале из ВЧ-СКВИДов. // Журнал Радиоэлектроники. – 2026. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.1>