

02,13

Экспериментальное исследование элементов джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны на цепочке СКВИДов

© Р.А. Юсупов, Л.В. Филиппенко, М.Ю. Фоминский, В.П. Кошелец

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

E-mail: yusupovrenat@hitech.cplire.ru

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Рассмотрены вопросы проектирования джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны (ДПУБВ) на базе хорошо отработанной технологии сверхпроводниковых микросхем с заданными и контролируемыми параметрами на основе высококачественных туннельных переходов Nb–AlO_x–Nb. Данная технология была адаптирована для получения структур с необходимыми параметрами и большим количеством переходов в одной структуре. Для отработки и оптимизации технологии разработаны, изготовлены и исследованы базовые элементы перспективного джозефсоновского параметрического усилителя. В измерениях на постоянном токе экспериментально определен ряд параметров, необходимых для проектирования микросхемы ДПУБВ, предназначенной для СВЧ-измерений. Разработан оригинальный дизайн ДПУБВ на основе цепочки СКВИДов в копланарной линии для реализации по ниобиевой технологии ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН; определены параметры основных элементов ДПУБВ.

Ключевые слова: джозефсоновский параметрический усилитель бегущей волны (ДПУБВ), джозефсоновские метаматериалы (ДММ), джозефсоновские переходы (ДП), холодный усилитель, копланарные линии, квантовые шумы, СИС, СКВИД.

DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52804.13NN

1. Введение

В настоящее время наблюдается возрастающий интерес к разработке различных квантовых устройств (кубитов, детекторов с квантовым уровнем чувствительности и т.п.), которые в силу своей природы работают при низких и сверхнизких температурах на частотах в единицы и десятки GHz. Для связи с квантовыми системами необходимы элементы и устройства, которые могут работать при сверхнизких температурах и позволяют контролировать, обрабатывать и считывать информацию, а также усиливать слабые высокочастотные сигналы. Практические параметры линейных полупроводниковых СВЧ-усилителей достигли предельных значений и не позволяют получить полосу, усиление и шумы, требуемые для создания систем считывания кубитов в квантовом компьютере, детекторов аксионов, усилителей промежуточной частоты радиоастрономических гетеродинных приемников и систем считывания матриц криогенных болометров с частотным разделением каналов. Применение джозефсоновских туннельных переходов (ДП) позволяет реализовать нелинейную индуктивность без потерь и обеспечивает получение характеристик, недостижимых для диссипативных нелинейных элементов. При реализации рассматриваемого фазочувствительного джозефсоновского усилителя возможно снижение шумовой температуры ниже квантового предела в режиме сжатия квантовых состояний. Предполагается, что разработка принципиально нового

типа широкополосного микроволнового усилителя бегущей волны позволит обойти ограничения по полосе и динамическому диапазону, существующие для традиционного параметрического усилителя на сосредоточенных элементах, и даст возможность снизить шумы ниже квантового предела [1].

Джозефсоновские параметрические усилители [2] считаются наиболее совершенными устройствами для тонких экспериментов в области квантовых измерений и квантово-информационных технологий, однако до настоящего времени не получили широкого распространения. Интерес к данным устройствам возрос после демонстрации параметрического усилителя бегущей волны на основе кинетической индуктивности тонкой сверхпроводящей пленки [3]. Однако наибольшее внимание исследовательских групп в последние годы привлекают джозефсоновские параметрические усилители в режиме бегущей волны, обеспечивающие большой коэффициент усиления на единицу длины при меньшей мощности накачки на основе цепочек высокочастотных (ВЧ) или постоянного тока (ПТ) СКВИДов [4–7]. В отличие от сосредоточенных джозефсоновских параметрических усилителей с ограниченной полосой усиления, ДПУБВ обеспечивают взаимодействие сигнала и накачки по всей длине микрополосковой линии и обеспечивают расширение полосы и динамического диапазона усилителя.

В работе Зорина [8] была предсказана возможность создания джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны (количеством элементов в пределах

300–600), который может обеспечить коэффициент усиления в районе 20 dB в полосе 4–8 GHz (см. рис. 1, *a*). Более поздние работы [9] уже не столь оптимистичны и говорят о достижениях усиления 7–10 dB в широкой полосе при разумном числе ячеек, равном 1175. Первая реализация в РТВ [10] показала принципиальную возможность создания такого типа усилителя, а его модернизация, выполненная в HYPRES, продемонстрировала среднее усиление около 10 dB в этой полосе, но при достаточно сильной неравномерности АЧХ [11]. Работавший прототип такого усилителя на основе ниобиевых СИС-переходов был реализован по технологии с плотностью тока 100 A/cm², в работе исследовались симметричные ВЧ СКВИДы с джозефсоновскими переходами с номинальным критическим током от 4 до 12 μ A.

До настоящего времени не проведены измерения шумовой температуры, которая должна составлять, согласно теории, менее 1 K при рабочей температуре 4.2 K. Не реализован прототип такого усилителя, работающий при милликельвиновых температурах и имеющий шумовую температуру, близкую к квантовому пределу, менее 0.5 K на 8 GHz.

2. Дизайн и проектирование ДПУБВ

Нами был разработан симметричный дизайн линии ДПУБВ (рис. 1, *b*) и отдельных тестовых структур для определения индуктивных параметров элементов. Критический ток перехода в реальных образцах определяется сочетанием двух факторов: первый — это $R_n S$ — параметр, определяемый условиями формирования туннельного барьера; второй — это S — площадь самого перехода (удобнее говорить о линейном размере — диаметре d_j). Нами были выбраны единый размер ДП диаметром $d_j = 2 \mu\text{m}$ (переходы круглой формы) и параметр трехслойной структуры $R_n = 1000 \Omega/\mu\text{m}^2$. Соответствующий критический ток оценивается как $I_c = 5.3 \mu\text{A}$, с учетом того, что Nb-сверхпроводник с сильной связью и реально измеряемый критический ток (I_c) переходов составляет величину 0.5–0.6 от скачка тока при щелевом напряжении (I_g). Нормальное сопротивление такого перехода (R_n) оценивается равным 320 Ω , а емкость перехода $C_j = 160 \text{ fF}$. Уменьшение размера перехода позволило бы реализовать меньший критический ток, но для работы ДПУБВ критически необходимо создавать цепочки переходов с небольшим относительным разбросом критических токов.

Для оценки оптимальных параметров конструкции ДПУБВ на основе ВЧ СКВИДов было создано программа расчета в среде MathCAD. Основной параметр ДПУБВ — безразмерная индуктивность СКВИДа $\beta_L \equiv 2\pi L_g I_c / \Phi_0$ [8], где L_g — геометрическая индуктивность, должна быть меньше единицы для безгистерезисной формы вольт-поточковой характеристики, и стремится к 1 для оптимального усиления каждой отдельной ячейки. Значение геометрической индуктивности L_g ,

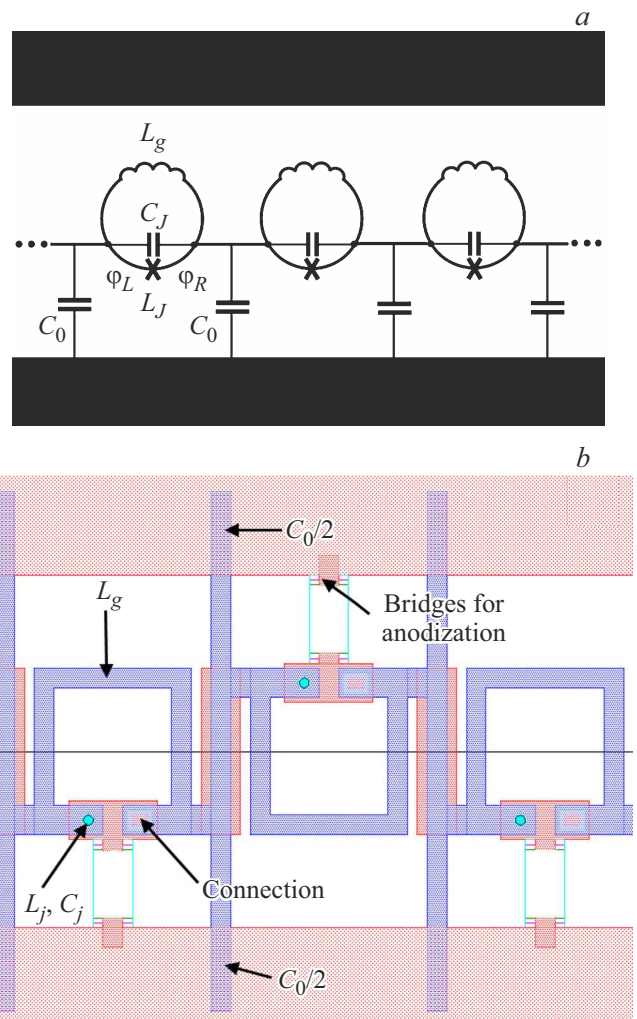


Рис. 1. *a*) Электрическая схема линии передачи, включая массив ВЧ СКВИДов. Джозефсоновский переход представлен как параллельное соединение джозефсоновской индуктивности L_j и туннельной емкости C_j . *b*) Вид разработанной геометрии линии с ВЧ СКВИДАми.

определяется размером и геометрией петли СКВИДа, но определение точных значений аналитически в таких схемах является достаточно сложной задачей. В нашей схеме были выбраны СКВИДы квадратной формы, их проще проектировать и рассчитывать, при этом они обеспечивают достаточно плотное размещение ячеек. Ширина петли СКВИДа составляла 4 μm , такая ширина линии надежно и точно получается в рамках используемой технологии.

Для более точного численного расчета индуктивностей использовалась программа InductEx, созданная для расчета сверхпроводниковых схем. Рассчитанные таким образом индуктивности (L_g) оказались выше (57 pH), чем рассчитанные по простой аналитической формуле $1.25\mu_0 d$ для квадратной рамки (37.5 pH), в которой есть зависимость только от внутреннего размера петли. Для достижения нужной геометрической индуктивности рас-

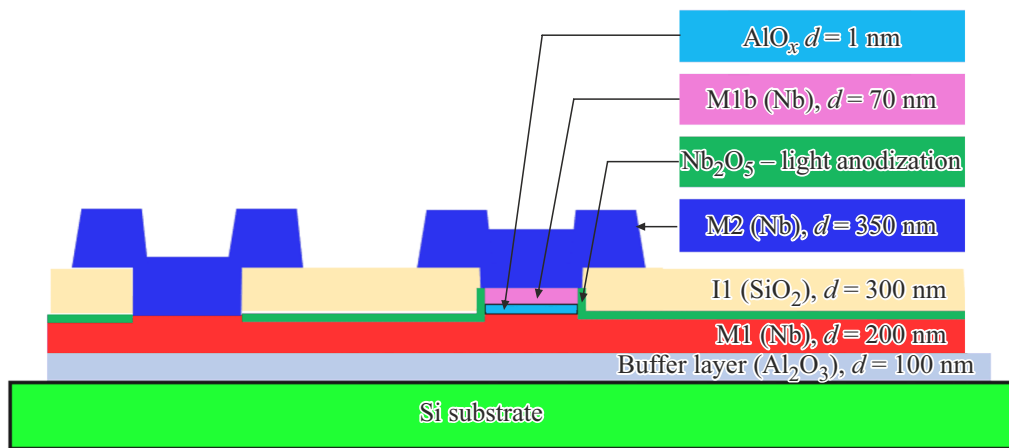


Рис. 2. Сечение интегральной схемы с двумя сверхпроводниковыми слоями.

считанная сторона квадратной рамки составила $24\ \mu\text{m}$. Емкость на землю C_0 должна обеспечивать импеданс $Z_0 = (L/C)^{1/2}$ каждой ячейки близкий к $50\ \Omega$ для согласования с линий передач, а частота среза $f_0 = (LC)^{-1/2}$ должна быть достаточно низкой. Рассчитанная емкость на одну ячейку должна составлять $23\ \text{fF}$, в разработанной конструкции она реализуется двумя симметричными областями перекрытия сверхпроводниковых слоев с земляными проводниками копланарной линии.

Для трехчастотного режима работы для частоты сигнала $f_s \sim 0.5 \cdot f_p$ усиление структуры из N ячеек оценивается как $G = \cosh^2(g_0 N)$, где экспоненциальный фактор усиления равен $g_0 = |\chi|(\beta_L I_p / 4I_c) \cdot (f_p / f_0)$. рассчитанной линии усилителя с $\beta_L = 0.9$ количество ячеек для достижения желаемого усиления $20\ \text{дБ}$ составило не менее 700 штук. Аналогично рассчитываются параметры для двухконтактных СКВИДов постоянного тока, других размеров петель, а также варианты с зашунтированными джозефсоновскими переходами.

Для спроектированных цепочек СКВИДов рассчитаны оптимальные параметры копланарной линии, в которой они находятся. Для образцов на кремниевых высокоомных подложках ($\rho > 10\ \text{k}\Omega \cdot \text{cm}$) толщиной $0.5\ \text{mm}$, с обратной стороны которых находится металлический экран, толщине металлизации (Nb) $0.2\ \mu\text{m}$, ширине центральной линии $34\ \mu\text{m}$, оптимальный зазор до „заземленных“ проводников составил $19\ \mu\text{m}$.

3. Технология изготовления образцов с тестовыми структурами

В ИРЭ успешно функционирует технологический комплекс по изготовлению сверхпроводниковых структур на основе высококачественных туннельных переходов Nb–AlO_x–Nb, позволяющий получать структуры с плотностью туннельного тока $0.1\ \text{kA/cm}^2 \div 10\ \text{kA/cm}^2$ микронных и субмикронных размеров [12–14]. Данная

технология была адаптирована для изготовления образцов с двумя сверхпроводящими слоями, анодизацией и дополнительным слоем изоляции для надежного предотвращения коротков (см. рис. 2). Ключевые требования к технологии — это относительно невысокая плотность туннельного тока (примерно $0.3\ \text{kA/cm}^2$), возможность создания структур с большим числом ДП (до 1000 шт.) и маленькие относительные разбросы параметров этих переходов. Дополнительно была заложена возможность напыления шунтирующих сопротивлений для тестовых измерений. Емкости на землю, которая необходима для реализации линии усилителя предложено реализовать за счет слоя изолятора I1, данная емкость имеет оценочное значение $0.17\ \text{fF}/\mu\text{m}^2$.

Все напыления пленок проводятся магнетронным напылением. Сначала наносится тонкий ($100\ \text{nm}$) буферный слой Al₂O₃, данный подслой является стоп слоем для травления трехслойной структуры. Затем в едином цикле без разрыва вакуума наносится трехслойная структура Nb/AlO_x/Nb, толщины соответствующих слоев 200 , 7 и $80\ \text{nm}$. Геометрия нижнего слоя сверхпроводника формировалась методом „взрывной фотолитографии“ (lift-off) по маске M1. Следующая операция — формирование области туннельных переходов травлением из трехслойной структуры по маске I1. По этой же маске резиста проходит анодирование, в первую очередь стенок переходов и напыление в области незакрытые резистом изолятора SiO₂ толщиной $250\ \text{nm}$, что обеспечивает запыление нижнего электрода для предотвращения электрического контакта двух сверхпроводниковых слоев. Для контакта двух сверхпроводниковых слоев в нужных областях (ранее они также были прикрыты резистом по маске I1) по маске EТСН травлением формируется окна. Следующий этап опциональный — формирование шунтов из Mo, несверхпроводящего при температуре $4.2\ \text{K}$. В структурах реальных усилителей шунтированные переходы не требуются, и используются только в тестовых структурах. Структура второго

Таблица 1. Параметры нанесения пленок слоев

| Слой | Шаблон | Материал | Описание слоя | Толщина, nm |
|------|------------|------------------------------------|---|-----------------|
| | | Al_2O_3 | Буферный слой | 100 |
| M1 | Негативный | $\text{Nb}/\text{AlO}_x/\text{Nb}$ | Трехслойная структура: базовый электрод Nb, туннельный барьер AlO_x , верхний электрод Nb | 200 7 200 |
| I1 | Негативный | AlO_x/Nb | Формирование области туннельного перехода методом реактивного ионного травления (RIE) | 80 |
| | | Nb_2O_5 | Легкая анодизация; 10 V | 20 |
| | | SiO_2 | SiO_2 , изолятор Емкость: $0.17 \text{ fF}/\mu\text{m}^2 \pm 25\%$ (Оценка) | 300 |
| ETCH | Позитивный | | Травление (Nb и AlO_x) для прямого контакта M1 с M2 (RIE + KOH) | |
| M2 | Позитивный | Nb | Nb, сверхпроводник. Лондонская глубина проникновения: $\lambda_L = 85 \text{ nm} \pm 5\%$ | 350 |
| CONT | Позитивный | Al/Au | Контактные площадки | 200 |
| ALO | Позитивный | | Окончательное удаление мостиков для анодизации (RIE) | |

сверхпроводникового слоя (M2) толщиной 350 nm формируется методом „взрывной литографии“. Последним технологическим слоем являются контактные площадки из золота, толщиной 200 nm, структура также создается методом „взрывной“ литографии. Для лучшей адгезии золота к ниобию используется тонкий (1–2 nm) подслои алюминия. Последний этап — это удаление травлением дополнительных мостиков, которые соединяли все области с туннельными переходами для их анодизации. Все параметры нанесения пленок приведены в табл. 1.

По данной технологии изготовлено две серии образцов, включающие в себя отдельные одиночные ПТ СКВИДы и цепочки ВЧ и ПТ СКВИДов. Для предварительного тестирования изготовленных микросхем, содержащих прототипы элементов ДПУБВ, и оценки параметров переходов, в состав шаблона были включены три тестовых чипа, которые изготавливались на одной подложке с рабочими микросхемами. На каждом тестовом чипе изготавливалось несколько туннельных СИС-переходы различной площади (диаметр от 2 до 4 μm).

4. Схема измерений и результаты измерений

Представлены результаты измерений одиночных тестовых СИС переходов, а также цепочек и одиночных ПТ СКВИДов при температуре 4.2 K. Для первичного тестирования использовался зонд-вставка в транспортный дюар с жидким гелием, позволяющий прово-

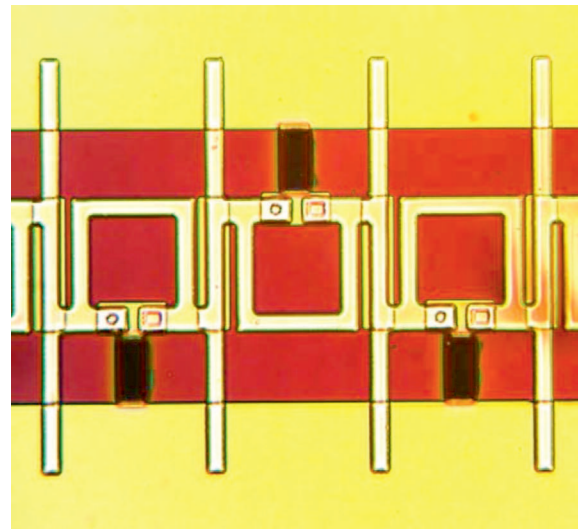


Рис. 3. Вид изготовленной цепочки ВЧ СКВИДов в копланарной линии.

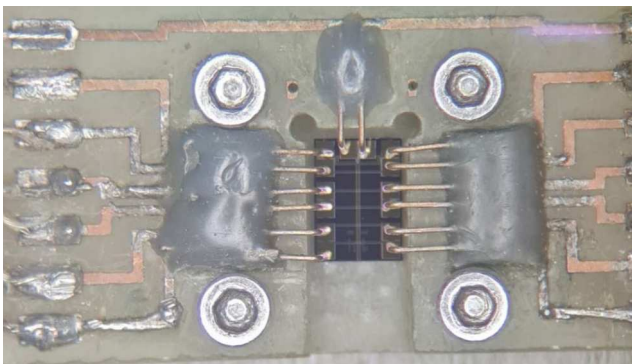
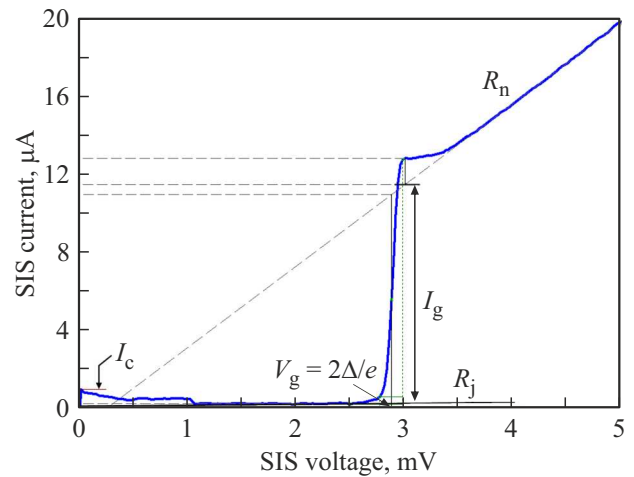
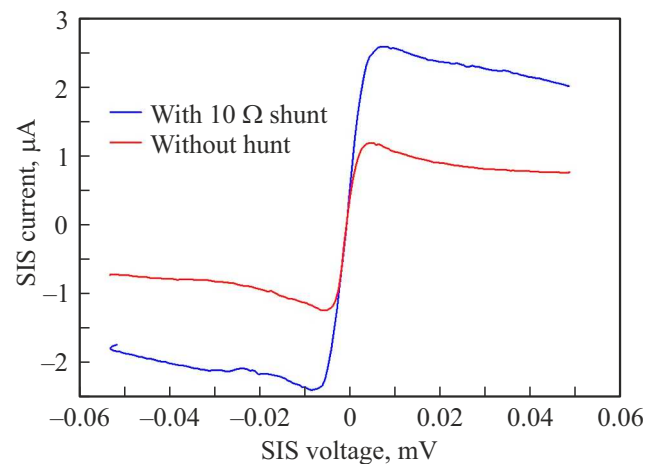
дить оперативное тестирование изготовленных образцов. В измерительной головке криогенного зонда крепилась подложка с изучаемыми структурами (предусмотрено 14 контактных площадок), плата с образцом находилась внутри экранов из криогенного пермаллоя и сверхпроводящего свинца. Контакты осуществлялись с помощью иглоочек из бериллиевой бронзы, которая обладает достаточной степенью упругости при $T = 4.2 \text{ K}$

Таблица 2. Измеренные значения критических токов для ДП разных размеров

| $d_j, \mu\text{m}$ | $S, \mu\text{m}^2$ | R_n, Ω | $I_g, \mu\text{A}$ | $I_c, \mu\text{A}$ | I_c/I_g |
|--------------------|--------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 8.73 | 59.83 | 35 | 74 | 40 | 0.54 |
| 4.73 | 17.56 | 120 | 21 | 9.2 | 0.44 |
| 4.23 | 14.05 | 150 | 17 | 6.8 | 0.40 |
| 3.73 | 10.92 | 194 | 13 | 4.7 | 0.36 |
| 3.23 | 8.19 | 257 | 10 | 2.5 | 0.25 |
| 2.73 | 5.85 | 349 | 7 | 1.5 | 0.21 |

(см. рис. 4). Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилось по четырехконтактной схеме. Измерения проводились как в режиме задания напряжения, чтобы лучше прописать особенности ВАХ при напряжениях в районе щели, так и в режиме задания тока, чтобы была возможность точнее зарегистрировать критический ток изготовленных СИС-структур. Все переходы во всех изготовленных структурах демонстрируют высокое качество, отношение сопротивлений R_j/R_n более 45 и одинаковую щель $V_g = 2.88 \text{ mV}$ (см. рис. 5), что позволяет создавать по такой технологии высококачественные джозефсоновские метаматериалы (ДММ).

В схеме ДПУБВ на СКВИДах ключевыми параметрами являются геометрическая индуктивность петли СКВИДа и критический ток перехода, от которого зависит джозефсоновская индуктивность. В режиме задания напряжения при скачке тока на нормальное сопротивление присутствует так называемая коленообразная особенность. Для использования данных туннельных структур в ДММ она не играет роли, так как важны значения критического тока. Прямые измерения критического тока в подобных структурах сильно подвержены влиянию внешних магнитных полей и электрических наводок, поэтому измеряемые значения сильно зависят от параметров системы измерений. Для описанной системы измерений значения критических токов были выше в зашунтированных небольшим (10Ω) параллельным сопротивлением переходах (см. рис. 6).

**Рис. 4.** Вид держателя образцов для предварительного тестирования образцов при температуре 4.2 К.**Рис. 5.** Измеренная вольтамперная характеристика для одиночного ПТ СКВИДа в режиме задания напряжения с подавленным критическим током.**Рис. 6.** ВАХ с критическим током для одиночного ПТ СКВИДа записанные в режиме задания напряжения.

Значения измеренного критического тока (I_c) оказываются заметно меньше, чем значения скачка тока (I_g) при целевом напряжении (V_g) щели. Теоретическое значение I_c/I_g для переходов со сверхпроводниками с сильной связью, к которым и относится ниобий, составляет 0.5–0.6. В измеренных тестовых переходах это отношение зависело от площади переходов и составило от 0.2 для маленьких переходов до 0.55 для больших переходов (см. табл. 2). В первую очередь мы связываем это с тепловыми шумами СИС-перехода, которые при температуре 4.2 К составляют 0.4–0.5 μA и наличием дополнительных наводок, которые для нашей неоптимизированной тестовой системы составляли до 1 μA . Для переходов с большей площадью и большими критическими токами эти механизмы играли меньшую роль.

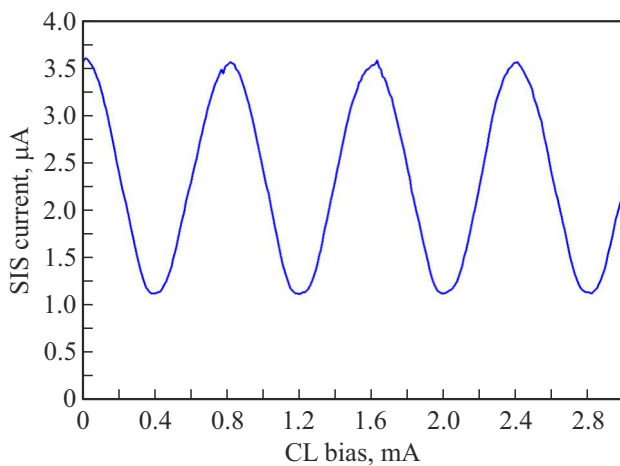


Рис. 7. Зависимость тока от магнитного потока через СКВИД, задаваемого пропусканием постоянного тока через управляющую линию.

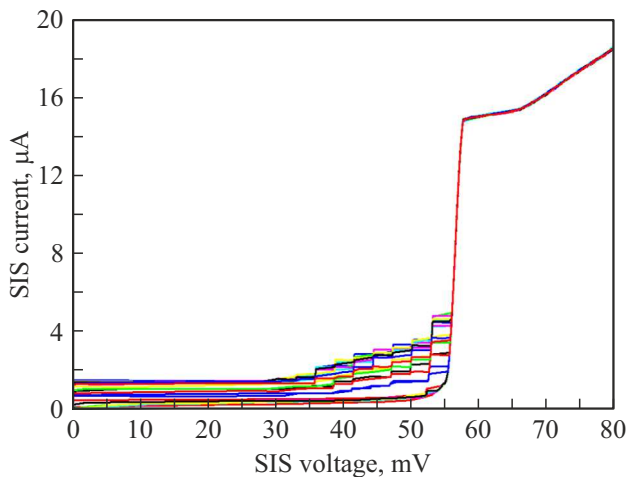


Рис. 8. Вольтамперные характеристики цепочки из 20 ПТ СКВИДов, снятые в режиме задания тока при различных значениях тока (0–1 mA) в управляющей линии.

На рис. 7 представлены результаты измерения тестовых ПТ СКВИДов структур, демонстрирующие модуляцию критического тока и позволяющие определить индуктивности исследуемых элементов. Магнитное поле в таких структурах задавалось пропусканием постоянного тока через дополнительную линию на расстоянии $19 \mu\text{m}$ от петли СКВИДа. Отношение значений максимального и минимального тока на ток-поточковой характеристике СКВИДа зависит от соотношения геометрической и джозефсоновской индуктивности, и значение безразмерного параметра β_L в данном измерении составило примерно 0.5, что меньше заложенного при проектировании значения 0.9. Данные измерения также демонстрируют возможность подстройки линии СКВИДов пропусканием тока управления через „заземленные“ проводники в копланарной линии.

Для цепочек СКВИДов измеряемые ВАХ сильно зависят также от конфигурации системы, что усложняет оценку параметров отдельных ячеек. На рис. 8 в качестве примера показана ВАХ цепочки из 20 последовательно соединенных ПТ СКВИДов, снятые с разными значениями магнитного поля; что приводит к вариации значений критических токов отдельных ячеек. Измеренные критические токи для такой цепочки составили до $3 \mu\text{A}$ в пересчете на один ДП и отношение $I_c/I_g \approx 0.5$ (без учета коленообразной особенности чуть выше щелевого напряжения). Следовательно, для проектирования линии на основе ВЧ СКВИДов можно ориентироваться на значения тока при щелевом напряжении.

5. Заключение

Разработаны и исследованы базовые элементы для реализации ДПУБВ на основе СКВИДов. Один из вариантов конструкции такого ДПУБВ представляет из себя цепочку ВЧ СКВИДов в копланарной линии. Нами был разработан оригинальный дизайн такого усилителя с учетом особенностей Nb–AlO_x–Nb технологии ИРЭ. Для этого были рассчитаны оптимальные характеристики схемы с учетом параметров, зависящих от выбранных режимов технологии. Расчетное значение критического тока джозефсоновского перехода $I_c = 5.3 \mu\text{A}$. Определены оптимальные технологические параметры $R_n S = 1000 \mu\text{m}^2$ и площади переходов $S = 3.14 \mu\text{m}^2$, позволяющие получить требуемый критический ток.

Отработана технология изготовления, проведено измерение основных параметров элементов ДПУБВ, продемонстрировано их соответствие заложенным при проектировании. Разработаны схемы, содержащие отдельные элементы и узлы ДПУБВ: одиночные СКВИДы и их цепочки, включенные в копланарные линии. Изготовленные структуры с ДП демонстрируют высокое качество: $R_j/R_n = 47$, щель 2.88 mV , что позволяет создавать на основе таких переходов структуры ДПУБВ. Измерения на постоянном токе тестовых структур показали отличие измеренных параметров от заложенных. Это связано с зависимостью критического тока (I_c) от размеров перехода при прямых измерениях в недостаточно экранированной системе. Для цепочек ВЧ СКВИДов в линии ДПУБВ более показательным является значение скачка тока (I_g) при щелевом напряжении, которое в изучаемых структурах соответствует заложенным значениям.

Измерения цепочек элементов с ДП продемонстрировали принципиальную возможность изготовления подобных многоэлементных структур с заданными параметрами и небольшим разбросом параметров. Продемонстрирована возможность накачки сигнала в линию СКВИДов пропусканием сигнала накачки через „заземленные“ проводники в копланарной линии, все это открывает возможность реализации ДПУБВ на базе уже имеющейся ниобиевой технологии.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет проекта РФФ № 21-42-04421, туннельные структуры изготовлены в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в рамках государственного задания с использованием УНУ „Криоинтеграл“, поддерживаемой грантом МНВО РФ, соглашение № 075-15-2021-667.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Quantum squeezing / Eds P.D. Drummond, Z. Ficek. Springer Science & Business Media 27 (2013).
- [2] B. Yurke, L.R. Corruccini, P.G. Kaminsky, L.W. Rupp, A.D. Smith, A.H. Silver, R.W. Simon, E.A. Whittaker. Phys. Rev. A **39**, 2519 (1989).
- [3] B.Ho Eom, P.K. Day, H.G. LeDuc, J. Zmuidzinis. Nature Phys. **8**, 623 (2012)
- [4] K.O. Brien, C. Macklin, I. Siddiqi, X. Zhang. Phys. Rev. Lett. **113**, 157001 (2014).
- [5] T.C. White, J.Y. Mutus, I.C. Hoi, R. Barends, B. Campbell, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, E. Jeffrey, J. Kelly, A. Megrant, C. Neill, P.J. J.O'Malley, P. Roushan, D. Sank, A. Vainsencher, J. Wenner, S. Chaudhuri, J. Gao, J.M. Martinis. Appl. Phys. Lett. **106**, 242601 (2015).
- [6] M.T. Bell, A. Samolov. Phys. Rev. Appl. **4**, 024014 (2015).
- [7] C. Macklin, K.O. Brien, D. Hover, M.E. Schwartz, V. Bolkhovskiy, X. Zhang, W.D. Oliver, I. Siddiqi. Science **350**, 307 (2015).
- [8] A.B. Zorin. Phys. Rev. Appl. **6**, 034006 (2016).
- [9] T. Dixon, J.W. Dunstan, G.B. Long, J.M. Williams, P.J. Meeson, C.D. Shelly. Phys. Rev. Appl. **14**, 3, 034058 (2020).
- [10] A.B. Zorin, M. Khabipov, J. Dietel, R. Dolata. 16th Int. Supercond. Electron. Conf. (ISEC), 1 (2017).
- [11] A. Miano, O.A. Mukhanov. IEEE Trans. Appl. Supercond. **29**, 5, 1501706 (2019).
- [12] O. Kiselev, M. Birk, A. Ermakov, L. Filippenko, H. Golstein, R. Hoogeveen, N. Kinev, B. van Kuik, A. de Lange, G. de Lange, P. Yagoubov, V. Koshelets. IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**, 612–615 (2011).
- [13] S. Butz. Supercond. Sci. Tech. **26**, 9, 094003 (2013).
- [14] M.I. Faley, E.A. Kostyurina, K.V. Kalashnikov, Y.V. Maslennikov, V.P. Koshelets, R.E. Dunin-Borkowski. Sensors, **17**, 2798 (2017).

Редактор Ю.Э. Кутаев