

02,13

Разработка джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны на основе алюминиевых СИС-переходов

© М. Тарасов¹, А. Гунбина², С. Лемзяков³, Д. Нагирная¹, М. Фоминский¹, А. Чекушкин¹, В. Кошелец¹, Э. Голдобин⁴, А. Калабухов⁵

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

³ Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва, Россия

⁴ Тюбингенский университет Эберхарда Карла, Тюбинген, Германия, DE72074

⁵ Чалмерский технологический университет, Гетеборг, Швеция, SE-412 96.

E-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

Поступила в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 9 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Разработаны, изготовлены и исследованы прототипы конструкции джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны на основе алюминиевых переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник в форме скин-слоев постоянного тока, включенных в центральный проводник копланарной линии. Отработаны три технологических маршрута для изготовления таких устройств: два с использованием теневого напыления и один с использованием магнетронного напыления и прямой электронной литографии. Измерены вольт-амперные характеристики переходов при температуре 0.3 К. Создана криогенная установка для измерения спектральных характеристик такого усилителя, содержащая холодный полупроводниковый усилитель с циркулятором и охлаждаемые аттенюаторы каналов входного сигнала и накачки. Измерен спектр поглощения копланарного направленного ответвителя с четвертьволновым резонатором, предназначенным для измерений коротких цепочек от одного до 27 скин-слоев.

Ключевые слова: сверхпроводниковые туннельные переходы, скин-слои, джозефсоновские параметрические усилители бегущей волны, алюминиевые СИС-переходы, магнетронное напыление.

DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51242.11H

1. Введение

Полупроводниковые СВЧ-усилители не позволяют получить шумовые характеристики, необходимые для создания систем считывания кубитов, детекторов аксионов, систем частотного мультиплексирования матриц криогенных болометров. Применение джозефсоновских СИС-переходов позволяет реализовать нелинейную индуктивность без потерь и обеспечивает получение характеристик, недостижимых для диссипативных нелинейных элементов. Разработка джозефсоновского широкополосного СВЧ-усилителя бегущей волны может позволить обойти ограничения по полосе и динамическому диапазону, существующие для традиционного параметрического усилителя на сосредоточенных элементах, и дать возможность снизить шумы ниже квантового предела. Недавние теоретические работы [1] показали возможность преодолеть эти ограничения и получить усиление до 20 dB в полосе более 5 GHz. Принципиальная возможность расширения полосы джозефсоновского параметрического усилителя до 4 GHz при усилении до

17 dB была экспериментально продемонстрирована [2]. Еще более сложной задачей является создание прототипа такого усилителя, работающего при милликельвиновых температурах и имеющего шумовую температуру близкую к квантовому пределу менее 0.5 K на частоте в районе 8 GHz, чему и посвящена настоящая работа.

2. Выбор материала и технологии для различных применений

В случае применения джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны (ДПУБВ) в качестве усилителя промежуточной частоты (УПЧ) СИС-смесителя, или в системе считывания болометра при температуре жидкого гелия, естественным выбором материала усилителя является ниобий или его нитриды. В этом случае ДПУБВ находится на одной температурной ступени с первым каскадом, что позволяет укоротить тракты промежуточной частоты и существенно уменьшить потребляемую мощность по сравнению с полупроводниковыми усилителями, которые потребляют значительную

мощность. Для гелиевых температур существует хорошо отработанная технология ниобиевой трехслойной структуры Nb–AlO_x–Nb, выполняемая в едином вакуумном цикле и включающая магнетронное напыление, плазмохимическое травление ниобия, плазменное или ионное травление алюминия. Однако применение ниобиевых усилителей совместно с источниками при милликельвиновых температурах сопряжено с проблемами большой тепловой нагрузки на низкотемпературную ступень, либо к дополнительным потерям в длинных трактах промежуточной частоты между низкотемпературной ступенью с первым каскадом и ступенью с температурой 3 К, на которой располагается УПЧ. Для применений в качестве каналов считывания милликельвиновых болометров, детекторов аксионов, кубитов, требующих рабочих температур 0.1 К и ниже, предпочтительным может быть применение джозефсоновских СИС-переходов на основе алюминия с критической температурой 1.2 К.

При одинаковой площади переходов и одинаковых режимах окисления, асимптотическое сопротивление ниобиевых и алюминиевых переходов одинаково, поскольку в обоих случаях в качестве туннельного барьера используется оксид или нитрид алюминия. А вот критические токи отличаются как отношение критических температур, т.е. почти в восемь раз. Для типичного СИС-перехода площадью $4.5 \mu\text{m}^2$ и асимптотического сопротивления 230Ω критический ток составит $12 \mu\text{A}$ для ниобия и $1.5 \mu\text{A}$ для алюминия. Главный параметр при проектировании ДПУБВ — это нелинейная индуктивность джозефсоновского перехода, и она будет в восемь раз больше для алюминия при том же размере переходов. Очень важным параметром для криогенного усилителя является рассеиваемая мощность, которая для одинаковых сопротивлений пропорциональна квадрату тока, т.е. отличается в 64 раза. Там, где для достижения необходимой нелинейности можно обойтись одним алюминиевым переходом, в случае ниобия их нужно восемь, в результате тепловыделение отличается в 512 раз.

Для алюминиевых СИС-переходов мощность накачки будет во столько же раз меньше по сравнению с ниобиевыми. Количество переходов в цепочке определяется коэффициентом усиления на одну ячейку g_0 , который при оптимальном индуктивном параметре $\beta_L \approx 1$ и амплитуде накачки $I_p/I_c = 0.5$ определяется выражением $g_0 = (1/16)f_p/f_0$, где $f_0 = Z_0 2I_c/\Phi_0$, $Z_0 = 50 \Omega$, $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$. В результате имеем $g_0 \propto 1/I_c$, т.е. усиление на ячейку при прочих равных условиях для алюминиевых СИС в восемь раз больше и требуется в восемь раз меньше ячеек по сравнению с ниобиевыми СИС.

Размытие ВАХ тепловыми шумами для джозефсоновского перехода определяется шириной полосы, в которой шумы воздействуют на джозефсоновский переход, и составляет $0.7eV_\Delta/h$ (где e заряд электрона, V_Δ напряжение, соответствующее энергетической щели, h постоянная Планка), т.е. порядка 500 GHz для ниобия и 50 GHz для алюминия, т.е. на порядок меньше. Рабочая

температура ниобиевого перехода 4 К, алюминиевого — 0.3 К. В результате размытие ВАХ ниобиевого перехода при гелиевой температуре оказывается порядка $0.4 \mu\text{A}$, тогда как для алюминиевого — порядка 5 nA при 0.3 К, т.е. на два порядка меньше.

Важным преимуществом алюминиевых сверхпроводниковых структур является отсутствие вмороженных квантов магнитного потока для пленок толще двойной лондонской глубины проникновения. Для алюминия это толщина больше 100 nm, а у наших образцов толщина 300 nm. Для пленок из ниобия, являющегося сверхпроводником второго рода, наличие абрикосовских вихрей неизбежно, что приводит к дополнительным шумам, возникающим при спонтанных движениях вихрей.

Таким образом, для достижения предельных характеристик ДПУБВ предпочтительным является использование алюминиевых структур, а ниобиевые конструкции позволяют оперативно отработать схемотехнику и испытать такие усилители при температуре жидкого гелия без применения сложных сорбционных криостатов и криостатов растворения. Ниобиевые усилители могут быть использованы в качестве следующего каскада усиления на температурной ступени 3 К, что позволит обеспечить как температурную развязку, так и дополнительное усиление. В случае трехступенчатого усиления на уровнях 0.3, 3, 70 К с использованием алюминиевого ДПУБВ, ниобиевого ДУПВ, полупроводникового усилителя, можно ограничиться усилением порядка 10 dB на каждый каскад, избежать самовозбуждения и теплового перегрева холодной ступени.

3. Топология, технология, измерения

Традиционно алюминиевые СИС-переходы изготавливали методом теневого напыления либо с висячим мостиком резиста методом Долана [3], либо по безмостиковой технологии напылением в узкие ортогональные канавки в толстом резисте [4,5]. Электронно-лучевое напыление производится с наклоном 45° в двух ортогональных положениях пластины. После первого напыления слой алюминия окисляется для формирования туннельного барьера. Заземляющая емкость 0.12 pF для волнового сопротивления 50Ω дает частоту среза 28 GHz, при этом плазменная частота составляет 12 GHz. В петле ВЧ-сквида в качестве джозефсоновского перехода стоит СИС-переход площадью $10 \mu\text{m}^2$ с критическим током $1 \mu\text{A}$ и кинетической индуктивностью 300 pH при нулевом смещении. В качестве дополнительной кинетической индуктивности используются четыре СИС-перехода с критическим током $5 \mu\text{A}$, либо 16 СИС-переходов с критическим током $20 \mu\text{A}$, чтобы сквозным током $10 \mu\text{A}$ задавать значение постоянного магнитного потока, равное половине кванта магнитного потока. На рис. 1, а приведено оптическое изображение одного СКВИД-элемента усилителя, в котором индуктивность петли сквида состоит как из геометрической

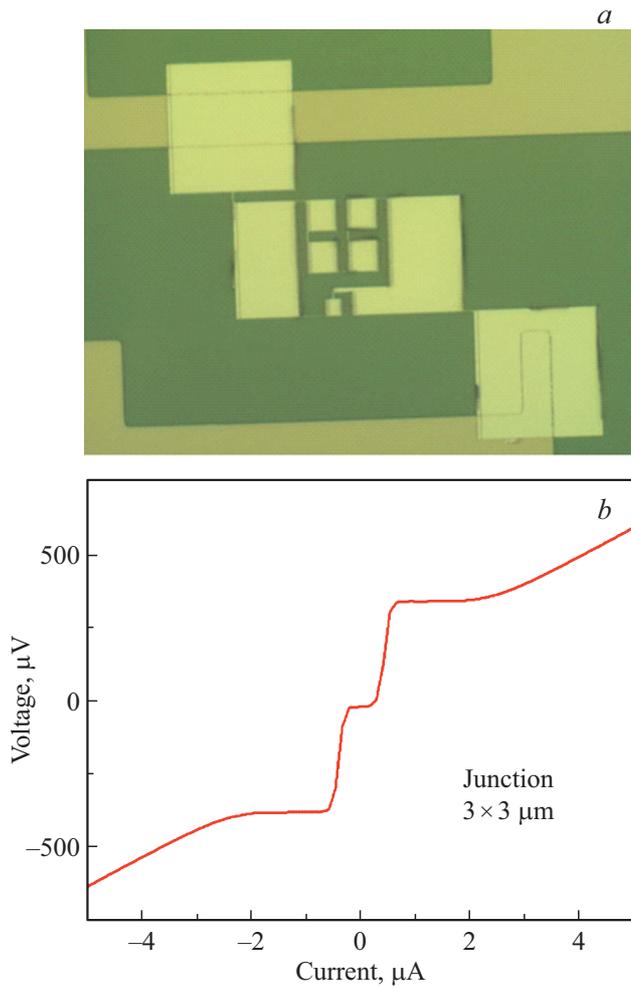


Рис. 1. ДПУБВ, изготовленный теневым напылением, с дополнительными кинетическими индуктивностями на основе СИС-переходов: (а) оптическое изображение элемента, (b) измеренная ВАХ перехода размером $3 \times 3 \mu\text{m}$ при температуре 0.28 К.

индуктивности, так и из кинетической индуктивности четырех джозефсоновских СИС-переходов (измеренная ВАХ отдельного СИС-перехода приведена на рис. 1, b).

Описанная технология теневого напыления в промышленных масштабах не применяется по причине большой трудоемкости и невысокой воспроизводимости. Стандартная технология сверхпроводниковых интегральных схем на основе ниобия и нитридов использует магнетронное напыление. Однако до последнего времени не удавалось реализовать аналогичный процесс для алюминиевых СИС-структур. Нами был разработан следующий технологический маршрут: первой литографией формируется топология нижнего электрода, далее экспонируется и напыляется первый алюминиевый электрод толщиной 300 нм. Третья литография открывает окна над первым слоем алюминия, производится ионное или плазменное травление естественного оксида алюминия и небольшого слоя чистого алюминия,

после чего открытый алюминий окисляется для формирования туннельного барьера, затем в эти же окна напыляется верхний слой алюминия толщиной 350 нм. Вольт-амперные характеристики элемента цепочки скивдов, включенного в копланарную линию, приведены на рис. 2. Для проверки технологической совместимости и исследования разных режимов работы скивдов были изготовлены несколько вариантов топологии образцов, включающие копланарные линии с цепочками скивдов и параллельные копланарные линии для подачи мощности накачки и постоянного магнитного поля. Помимо проходной линии изготовлены также варианты с четвертьволновым копланарным резонатором и с различной длиной цепочек (включающих 1, 10, 100, 350 скивдов). Размеры переходов варьировались от 1×1 до $2 \times 2 \mu\text{m}$ (критические токи $0.3\text{--}1.2 \mu\text{A}$, джозефсоновская кин-

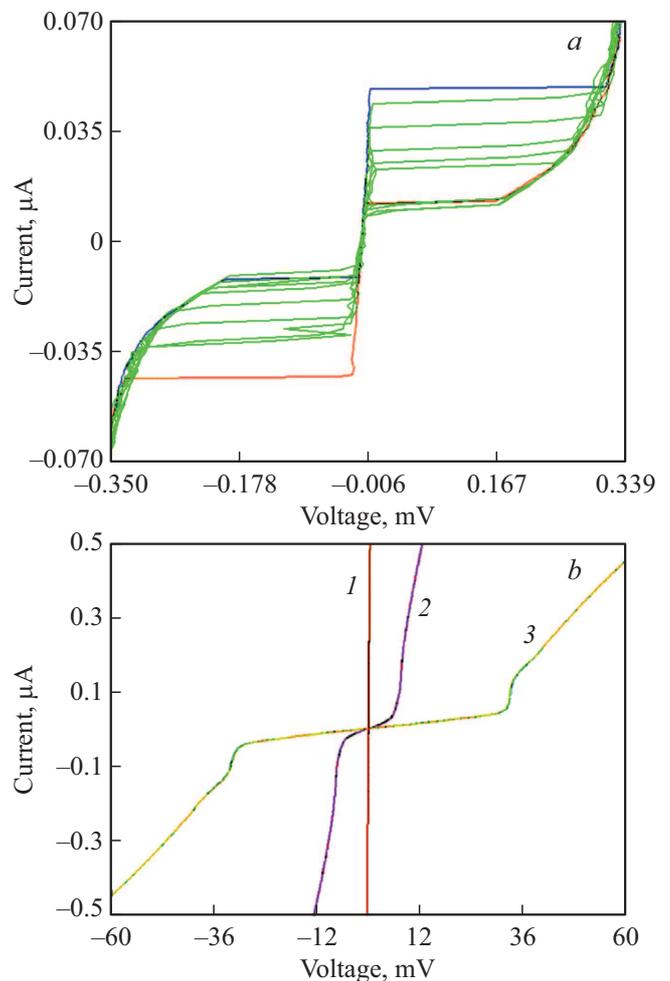


Рис. 2. (а) Вольт-амперные характеристики одного скивда при различных значениях внешнего магнитного потока: от нулевого (кривая с максимальным критическим током) до равного половине кванта магнитного потока (кривая с минимальным критическим током); (b) вольт-амперные характеристики цепочек из 10 (1), 20 (2) и 100 (3) скивдов. Образцы изготовлены методом магнетронного напыления и прямой электронной литографии.

тическая индуктивность 600–200 пН), геометрическая петля — от 50 до 260 μm^2 (порядка 10 и 20 пН). Такая технология, в отличие от теневой, позволяет напылять достаточно толстые электроды, порядка 300 нм. Сквиды с переходами $2 \times 2 \mu\text{m}$ имели нормальное сопротивление 360 Ω , с переходами $1 \times 1 \mu\text{m}$ — 600 Ω , цепочки из 10 таких сквидов — 6 к Ω , из 20 сквидов — 12 к Ω , из 100 сквидов — 58 к Ω , что говорит о достаточной воспроизводимости структур, изготовленных по такой технологии.

Для измерения изготовленных образцов была использована модифицированная измерительная установка, разработанная для исследования болометров с СВЧ-считыванием [6,7], см. фото на рис. 3 и блок-схему на рис. 4. Криостат HELIOX-AC-V Oxford Instruments был оборудован коаксиальными линиями с фильтрами, аттенюаторами, холодным усилителем с циркулятором на входе. Для измерений на постоянном токе использовались охлаждаемые до температуры образца 0.3 К резисторы по 500 к Ω , подключенные по витым парам к симметричному источнику задания смещения и измерения ВАХ. Измерения и настройка элементов тракта проводились с использованием двухпортового векторного анализатора цепей ARINST VNA-PR1 и

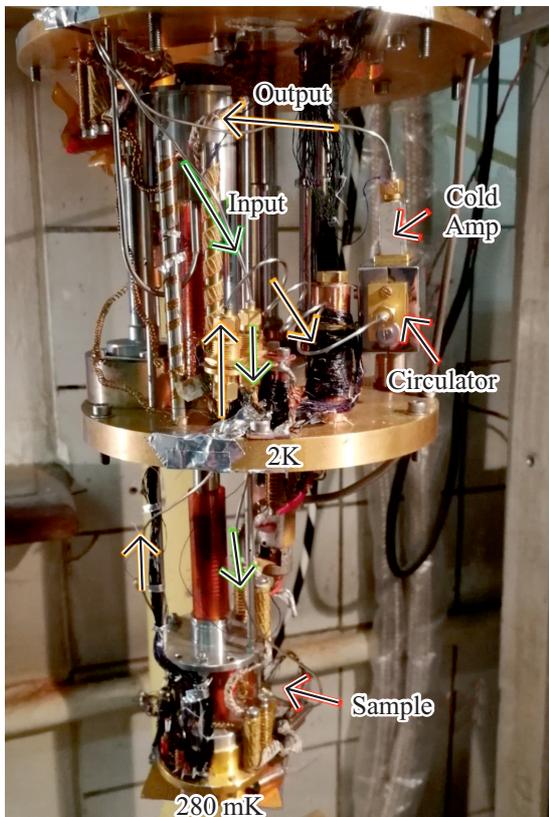


Рис. 3. Фотография криостата с входными и выходными коаксиальными трактами, холодным полупроводниковым усилителем с циркулятором на ступени 3 К, и образцом на ступени 280 мК.

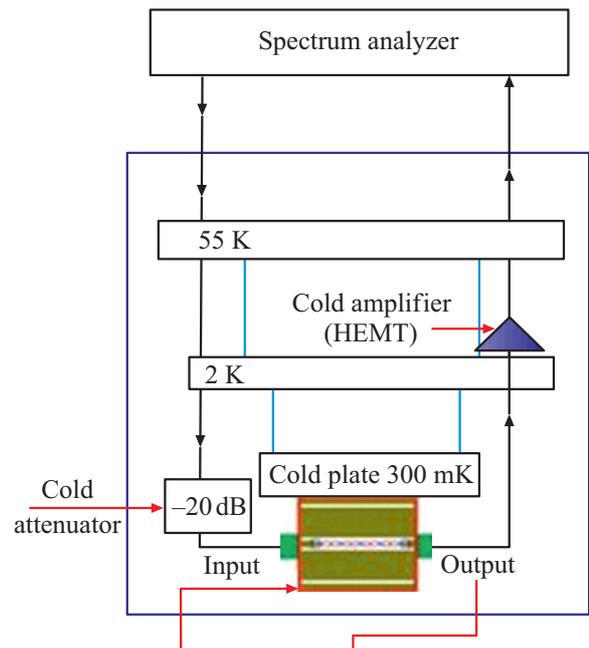


Рис. 4. Блок-схема измерительной установки для исследования ДПУБВ на проход. Образец и холодный аттенюатор размещены на ступени 300 мК, холодный полупроводниковый усилитель с циркулятором на ступени 2 К.

анализатора спектра ARINST SSA-TG R2 производства KROKS (Воронеж). Ненагруженная добротность составляла около 200. Наличие цепочки сквидов в центральной линии приводит к вариациям добротности и частоты в зависимости от постоянного магнитного потока и мощности накачки.

Дальнейшая оптимизация структуры предполагает исследование в качестве базового элемента би-сквида [8], содержащего стандартный пт-сквид и дополнительный джозефсоновский переход, частично шунтирующий геометрическую индуктивность петли кинетической индуктивностью в 2–4 раза больше, чем геометрическая. Согласно теории [8], такой тип сквида может улучшить линейность сигнальной характеристики и расширить динамический диапазон всего усилителя.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ РАН (№ 030-2019-0003) и государственного задания ИПФ РАН. Изготовление, разработка и исследование образцов выполнены при поддержке грантом РФФИ № 21-42-04421 на базе уникальной научной установки (УНУ № 352529). Развитие отдельных элементов технологии ТГц-детекторов выполнялись А. Гунбиной в ИПФ РАН в рамках проекта РФФИ № 19-19-00499.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.B. Zorin. Phys. Rev. Appl. **6**, 034006 (2016).
- [2] A. Miano, O. Mukhanov. IEEE Trans. Appl. Supercond. **29**, 5, 1501706 (2019).
- [3] G. Dolan. Appl. Phys. Lett. **31**, 5, 337 (1977).
- [4] M. Brink. Shadow mask sidewall tunnel junction for quantum computing. United States Patent Application Publication (2018) US 2018/0358538 A1.
- [5] М. Тарасов, А. Гунбина, Д. Нагирная, М. Фоминский. Способ изготовления устройств с тонкопленочными туннельными переходами. Патент на изобретение. RU 2019123125 А., (2019).
- [6] М.А. Тарасов, С. Махашабде, А.А. Гунбина, Р.А. Юсупов, А.М. Чекушкин, С.А. Лемзяков, Д.В. Нагирная, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, В.С. Эдельман, А.С. Калабухов, Д. Винклер. ФТТ **62**, 9, 1580 (2020).
- [7] A.A. Gunbina, S. Mahashabde, M.A. Tarasov, G.V. Yakorov, R.A. Yusupov, A.M. Chekushkin, D.V. Nagirnaya, S.A. Lemzyakov, V.F. Vdovin, A.S. Kalaboukhov, D. Winkler. Proceedings ASC (2020) Wk2EPo1E-03.
- [8] V.K. Kornev, I.I. Soloviev, N.V. Klenov, O.A. Mukhanov. Supercond. Sci. Technol. **22**, 114011 (2009).

Редактор Е.Ю. Флегонтова