

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ СТРУКТУР¹© 2023 г. Ф. В. Хан^{a, b, *}, А. А. Атепалихин^{a, b}, Л. В. Филиппенко^a, В. П. Кошелец^a^a Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация^b Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская область, 141701 Российская Федерация

*E-mail: khanfv@hitech.cplire.ru

Поступила в редакцию 17.05.2023 г.

После доработки 17.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Разработаны и исследованы сверхпроводниковые интегральные структуры, предназначенные для согласования импедансов генератора на основе распределенного джозефсоновского перехода и детектора на основе туннельного перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник в субтерагерцовом диапазоне частот. Проведено моделирование структур с помощью метода матриц передачи. Выполнен расчет дизайнов в программе численного трехмерного моделирования. Найдено качественное соответствие результатов, полученных двумя методами. Спроектированы три дизайна с различными топологиями, покрывающие частотный диапазон 250...680 ГГц по уровню –2 дБ.

DOI: 10.31857/S0033849423100066, EDN: YZFXBY

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день устройства сверхпроводниковой электроники получили широкое распространение благодаря набору уникальных характеристик, недостижимых для приборов, работающих на других принципах. Низкая шумовая температура [1, 2], сильная нелинейность, рабочие частоты в терагерцовой (ТГц) области, а также возможность интеграции сверхпроводниковых элементов, — все это обуславливает использование приборов на основе туннельных джозефсоновских переходов типа сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) в качестве источников ТГц-излучения и приемников с высокой чувствительностью. Подобные устройства применяются в различных областях науки и техники — начиная от исследования состава веществ [3] и заканчивая радиоастрономическими приложениями, такими как система радиотелескопов ALMA (<https://almaobservatory.org>) и проект Миллиметрон (<https://millimetron.ru/>).

Сверхпроводниковые устройства обычно имеют топологию планарных интегральных структур, выполненных на одной подложке вместе с антенной и включающих в себя помимо туннельных джозефсоновских контактов микрополосковые

линии со сверхпроводящими электродами, по которым распространяется сигнал и с помощью которых осуществляется согласование между элементами схемы.

Наилучшие характеристики генераторов и приемных элементов достигаются, с одной стороны, путем совершенствования технологии изготовления образцов [4]: так современные методы электронной и оптической литографии, ионного травления и магнетронного напыления позволяют получить переходы высокого качества и достичь значений шумовой температуры приемника всего в несколько значений стандартного квантового предела в ТГц-диапазоне частот ($T_{\text{кв}} = hf/k_B$, где f — рабочая частота). С другой стороны, работоспособность устройств существенным образом зависит от дизайна структуры. Как показано в работе [5], многократные отражения от СИС-детектора, возникающие в результате рассогласования элементов, приводят к повышению шумовой температуры и уменьшению рабочей полосы на промежуточной частоте.

В данной работе проводится расчет, исследование и оптимизация ниобиевых интегральных согласующих структур в частотном диапазоне 250...700 ГГц для обеспечения наилучшего согласования. Структуры были рассчитаны с помощью полуаналитической модели, основанной на методе матриц передачи, и в программе численного

¹ Работа удостоена премии на 19-м конкурсе молодых ученых имени Ивана Анисимкина.

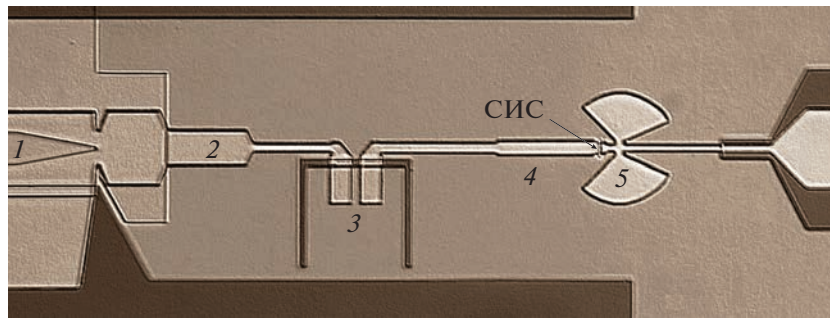


Рис. 1. Характерное изображение одной из сверхпроводниковых интегральных структур, полученное с помощью оптического микроскопа. Цифрами обозначены: 1 – генератор на РДП, 2, 4 – ступенчатые трансформаторы импеданса, 3 – разрыв по постоянному току в виде щелевой антенны, 5 – радиальный замыкатель, предназначенный для отстройки емкости СИС-детектора. Образцы, спроектированные в данной работе, отличаются геометрическими размерами элементов внутри каждого из блоков 1–5.

трехмерного моделирования Ansys HFSS. Результаты расчетов сравниваются между собой и с экспериментальными данными для ранее изготовленных образцов.

1. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Изображение сверхпроводниковой линии передачи СВЧ-сигнала показано на рис. 1. В качестве генератора ТГц-сигнала используется распределенный джозефсоновский переход (РДП), частота генерации f которого связана с приложенным напряжением V известным соотношением: $hf = 2eV$ [6]. Детектор в схеме выполнен на основе сосредоточенного СИС-перехода, в котором под действием внешнего переменного сигнала резко

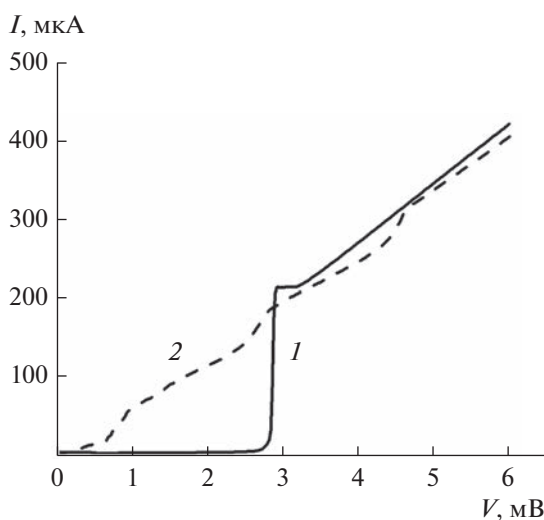


Рис. 2. Экспериментально измеренные ВАХ СИС-перехода, используемого в качестве детектора излучения: 1 – автономная ВАХ; 2 – ВАХ под воздействием переменного внешнего сигнала частотой 400 ГГц.

повышается вероятность туннелирования квази-частиц и, как следствие, возрастает ток при напряжениях ниже щелевого (возникают так называемые квазичастичные ступени) [7]; этот эффект используется в экспериментальных образцах для оценки приходящей мощности. Вольтамперная характеристика (ВАХ) СИС-перехода под действием внешнего сигнала частотой 400 ГГц и автономная ВАХ показаны на рис. 2. Для обеспечения независимого подключения РДП и СИС-детектора по постоянному току и возможности передачи СВЧ-сигнала в широкой полосе частот в линии присутствует разрыв по постоянному току, выполненный в виде щелевой антенны.

2. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СТРУКТУР

При проектировании сверхпроводниковых интегральных согласующих структур были использованы две модели, описанные в работе [8]. Обе модели находятся в хорошем согласии друг с другом и экспериментальными данными для ранее изготовленных образцов (рис. 3).

2.1. Полуаналитический метод

При моделировании первым способом используется метод матриц передачи (или ABCD-матриц) и рассчитывается доля приходящей от генератора к детектору мощности [9, 10]. Каждый элемент структуры представлен в расчете в виде четырехполосника с соответствующей матрицей. При перемножении матриц в порядке следования элементов от детектора к генератору получается результирующая матрица всей структуры, из которой после преобразований можно вычислить коэффициент S_{21} .

По сравнению с обычной микрополосковой линией в сверхпроводниковой линии возникают

дополнительные эффекты: частичное проникновение магнитного поля в электроды линии передачи и обусловленное этим изменение фазовой скорости [11], а также возникновение сильного затухания волн на частотах, близких к щели. Данные эффекты учитываются с помощью расчетного отдельно импеданса на квадрат поверхности верхнего и нижнего электродов по формулам из теории Маттиса—Бардина [12].

Разработанная программа позволяет относительно быстро производить расчет структуры при изменении геометрического размера или другого параметра отдельных элементов схемы (например, толщины слоя изоляции), что значительно ускоряет процесс проектирования и оптимизации. В связи с этим разработку новых топологий сверхпроводниковых интегральных схем проводили с помощью данного метода.

2.2. Численный расчет в программе трехмерного моделирования

Дополнительно к расчету с помощью ABCD-матриц было проведено моделирование всех спроектированных структур в программе Ansys HFSS; в HFSS производится решение уравнений Максвелла во всей моделируемой структуре с помощью метода конечных элементов, а после находится коэффициент S_{21} , соответствующий отношению амплитуды сигнала на выходном порте к амплитуде сигнала на входе, что можно интерпретировать (с точностью до возведения в квадрат) как мощность, приходящую от генератора к детектору. Моделирование сверхпроводящих элементов и постановка соответствующих граничных условий обсуждались в работах [13, 14].

Моделирование новых образцов позволило, с одной стороны, верифицировать результаты расчетов, полученные полуаналитическим методом, а с другой — показать, что обе модели приводят к одним и тем же результатам для широкого класса структур.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Для согласования РДП и СИС-детектора через разрыв по постоянному току используются многоступенчатые трансформаторы импеданса, выполненные в виде отрезков микрополосковых линий длиной $\lambda/4$, где λ — длина волны распространяющегося по линии излучения в центре полосы согласования ($\lambda \sim 100...300$ мкм).

В простейшем случае одноступенчатого трансформатора наилучшее согласование между генератором с импедансом $Z_{\text{ген}}$ и нагрузкой с импедансом $Z_{\text{н}}$ получается, если характеристический импеданс линии равен $Z = (Z_{\text{вх}} Z_{\text{н}})^{1/2}$. Для обеспечения согласования между СИС-детектором, генера-

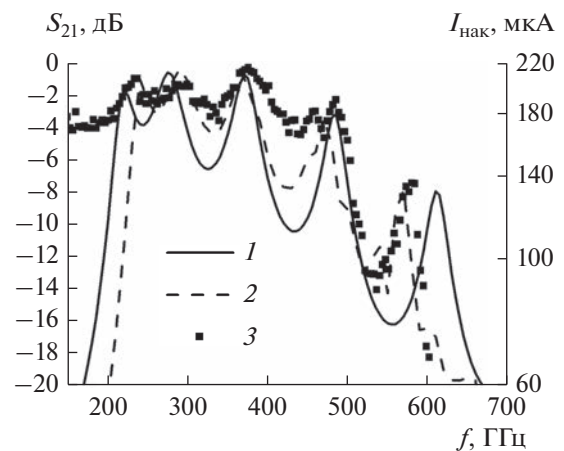


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для образца, изготовленного ранее: 1 — частотная зависимость коэффициента S_{21} , полученная с помощью полуаналитического расчета, 2 — результаты численного расчета; 3 — экспериментально измеренные значения тока накачки $I_{\text{нак}}$ СИС-детектора в зависимости от частоты РДП.

тором (абсолютные значения порядка нескольких долей ома) и разрывом по постоянному току (десятки ом) в широкой полосе частот требуется использовать трансформаторы, состоящие из нескольких секций; выражения для характеристического импеданса каждой секции можно найти, например, в [9]. При постоянной толщине слоя изолятора и электродов характеристический импеданс взаимно однозначно связан с шириной микрополоски. Значение ширины выбирается на этапе проектирования.

Ранее было установлено, что ширина полосы согласования импеданса СИС-перехода с внешней структурой зависит от параметра χ , который показывает степень шунтирования СИС-перехода [15]:

$$\chi = 2\pi f R_{\text{вч}} C S,$$

где f — частота излучения, $R_{\text{вч}}$ — высокочастотный импеданс перехода (зависящий от напряжения в рабочей точке), C — емкость перехода на единицу площади ($\sim 0.08...0.09$ пФ/мкм²), S — площадь перехода.

Характерное значение параметра χ для СИС-перехода с нормальным сопротивлением 13 Ом и площадью 1 мкм² на частоте 400 ГГц составляет примерно 2.8. Ширина полосы согласования импеданса детектора на СИС-переходе со структурой обратно пропорциональна параметру χ : $\Delta f \sim 1/\chi$. Это мотивирует уменьшать его значение, расширяя тем самым рабочий диапазон согласования по частоте. Одним из способов достижения малых значений χ является повышение плотности туннельного тока джозефсоновского перехода путем уменьшения толщины барьера d . Поскольку зависимость

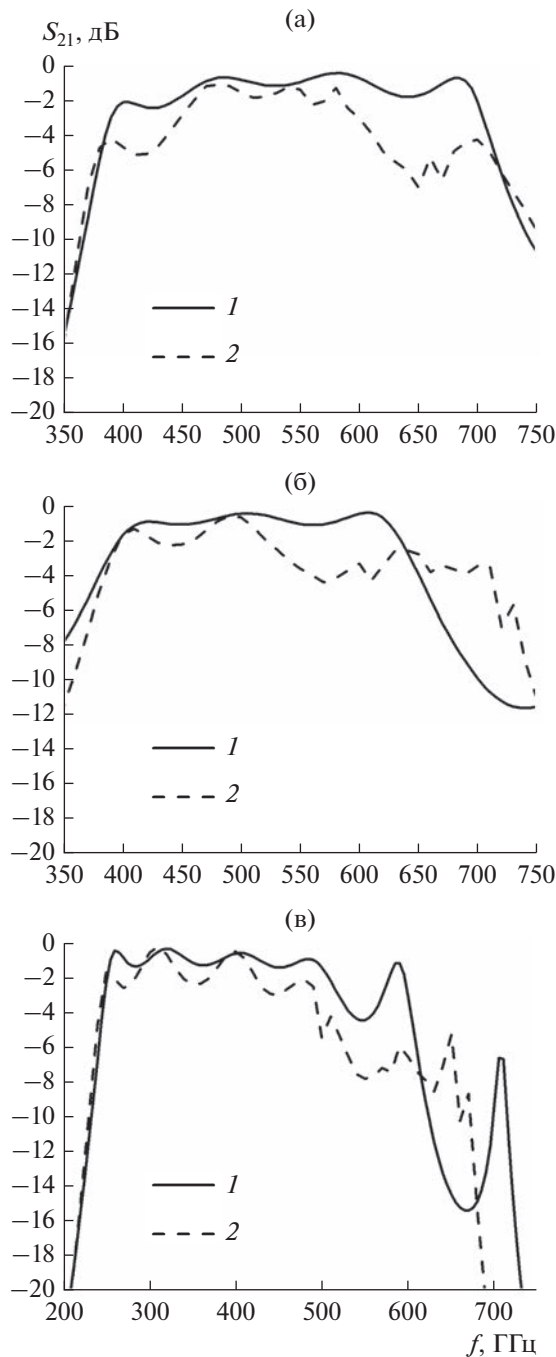


Рис. 4. Зависимости параметра S_{21} от частоты: 1 — полуаналитический расчет; 2 — численное моделирование; а — дизайн высокочастотной линии с двухсекционным трансформатором между СИС-детектором и разрывом по постоянному току; б — высокочастотная линия с односекционным трансформатором; в — низкочастотная линия.

$R(d)$ имеет экспоненциальный характер, а зависимость $C(d)$ — линейный, то значительное уменьшение сопротивления приведет к незначительному возрастанию емкости, и произведение $R_{вч}C$ уменьшится.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 4 показаны расчеты трех дизайнов сверхпроводниковых линий передачи, покрывающих диапазон 250...680 ГГц по уровню не хуже -2 дБ. Высокочастотная линия с характеристикой, показанной на рис. 4а, выполнена с двухсекционным трансформатором между разрывом по постоянному току и СИС-детектором (см. рис. 1, позиция 4). В другой высокочастотной линии (рис. 4б) используется односекционный трансформатор. Зависимость параметра S_{21} от частоты, показанная на рис. 4в, соответствует низкочастотной линии. Результаты полуаналитического расчета и численного моделирования находятся в качественном соответствии друг с другом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные и апробированные на экспериментальных образцах методы моделирования сверхпроводниковых линий передачи позволили оптимизировать топологию согласующих структур. Спроектированы три дизайна с полосой согласования 360...680, 400...610 и 250...550 ГГц по уровню -2 дБ. Получено качественное соответствие между результатами численного моделирования и полуаналитического расчета.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны за возможность доступа к оборудованию уникальной научной установки “Криоинтеграл” (№ 352529), поддержанной в рамках соглашения Министерства науки и высшего образования РФ (RF-2296.61321X0041); оборудование было использовано при изготовлении образцов и проведении исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Разработка технологии изготовления, изготовление образцов и эксперимент выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00019, <https://rscf.ru/project/23-79-00019/>. Численные расчеты выполнены за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Lange G., Boersma D., Dercksen J. et al. // Superconductor Sci. Technol. 2010. V. 23. № 4. P. 045016. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/4/045016>
2. Billade B., Pavolotsky A., Belitsky V. // IEEE Trans. 2013. V. TST-3. № 4. P. 416. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2013.2255734>

3. *Kinev N.V., Rudakov K.I., Filippenko L.V., Koshelets V.P.* // Phys. Solid State. 2021. V. 63. P. 1414.
<https://doi.org/10.1134/S1063783421090171>
4. *Fominsky M.Yu., Filippenko L.V., Chekushkin A.M. et al.* // Electronic 2021. V. 10. № 23. P. 2944.
<https://doi.org/10.3390/electronics10232944>
5. *Chenu J.Y., Navarrini A., Bortolotti Y. et al.* // IEEE Trans. 2016. V. TST-6. № 2. P. 223.
<https://doi.org/10.1109/TTTHZ.2016.2525762>
6. *Шмидт В.В.* Введение в физику сверхпроводников. М.: МЦНМО, 2000.
7. *Tucker J.R., Feldman M.J.* // Rev. Mod. Phys. 1985. V. 57. № 4. P. 1055.
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.57.1055>
8. *Хан Ф.В., Атепалихин А.А., Филиппенко Л.В., Кошелев В.П.* // РЭ. 2023. Т. 68. № 9. С. 904.
9. *Фуско В.* СВЧ цепи. М.: Радио и связь, 1990.
10. *Frickey D.A.* // IEEE Trans. 1994. V. MTT-42. № 2. P. 205.
<https://doi.org/10.1109/22.275248>
11. *Swihart J.C.* // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. № 3. P. 461.
<https://doi.org/10.1063/1.1736025>
12. *Mattis D.C., Bardeen J.* // Phys. Rev. 1958. V. 111. № 2. P. 412.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.111.412>
13. *Kerr A.R., Pan S.K.* // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1990. V. 11. № 10. P. 1169.
<https://doi.org/10.1007/BF01014738>
14. *Belitsky V., Risacher C., Pantaleev M., Vassilev V.* // Intern. J. Infrared Millimeter Waves. 2006. V. 27. № 1. P. 809.
<https://doi.org/10.1007/s10762-006-9116-5>
15. *Likharev K.K.* Dynamics of Josephson Junctions and Circuits. Amsterdam: OPA, 1986.