РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2023, том 68, № 9, с. 897–903

К 70-ЛЕТИЮ ИРЭ ИМ. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РАН

УДК 621.372.21

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И В ПРОГРАММАХ ЧИСЛЕННОГО ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 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 Московской обл., 141701 Российская Федерация*

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

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.
После доработки 10.05.2023 г.
Принята к публикации 25.05.2023 г.

Проведено моделирование сверхпроводниковых интегральных структур в частотном диапазоне 300...750 ГГц двумя методами: 1) с помощью ABCD-матриц, сопоставляемых каждому элементу схемы, 2) с использованием программы Ansys HFSS. Значения поверхностного импеданса сверхпроводящих пленок рассчитаны численно с помощью выражений из теории Маттиса–Бардина. Найдено, что для образцов с шириной микрополосковых линий менее четверти длины волны обе модели находятся в качественном соответствии друг с другом и с экспериментальными данными. Показано, что при увеличении ширины линий и геометрических размеров других элементов структуры возникают поперечные моды, а также искривление волнового фронта распространяющихся по линиям волн, что обусловливает различия между полуаналитическим и численным расчетом, который совпадает с экспериментом для всех образцов.

DOI: 10.31857/S0033849423090115, **EDN:** SBYWUN

ВВЕДЕНИЕ

Устройства современной сверхпроводниковой электроники находят широкое применение, как в различных прикладных задачах, так и в фундаментальных исследованиях ввиду уникальных характеристик, недостижимых приборами на других принципах: шумовая температура сверхпроводниковых приемников достигает нескольких значений квантового предела [1–3], а нелинейность вблизи щелевого напряжения при достаточно низких температурах является наиболее сильной из известных на сегодняшний день [4]. Смесители на основе туннельных джозефсоновских переходов являются основными компонентами в приемных системах на телескопах субмиллиметрового диапазона наземного базирования, например, на телескопах ALMA (https://almaobservatory.org), APEX (https://www.apex-telescope.org) и в строящемся комплексе на плато Суффа (http://asc-lebedev.ru/index.php?dep=16). Также использование сверхпроводниковых смесителей планируется и в предстоящих космических миссиях, например Миллиметрон (https://millimetron.ru/). С помощью сверхпроводникового гетеродинного приемника проводятся исследования излучения человеческого тела в терагерцовом (ТГц) диапазоне [5]. Подобные устройства также применялись при проведении анализа состава атмосферы как в лаборатории [6], так и на борту высотного аэростата [7].

Практически во всех работах, указанных выше, сверхпроводниковые устройства выполнены в виде планарных интегральных структур, сочетающих в себе микрополосковые линии, антенны и, собственно, распределенные и сосредоточенные джозефсоновские переходы. На эффективности работы сверхпроводниковых приемников сказываются не только параметры отдельных джозефсоновских переходов, но и согласование между элементами всей схемы [7, 8]. В связи с этим задача проектирования устройств с необходимыми параметрами заслуживает отдельного внимания.

Для проектирования подобных устройств, с одной стороны, можно воспользоваться методом ABCD-матриц, широко используемым при расчете электрических цепей [9, 10], с другой – можно рассчитывать непосредственно распределение полей в структуре в коммерческих 3D-симуляторах, напри-

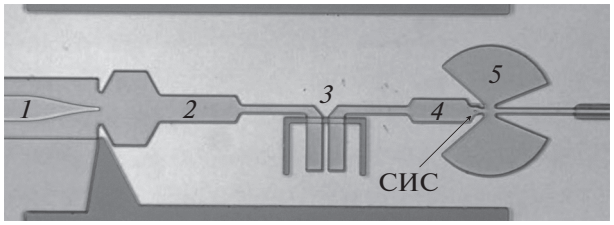

Рис. 1. Изображение схемы исследуемой сверхпроводниковой СВЧ-структуры, полученное с помощью оптического микроскопа: *1* – генератор СВЧ-сигнала на РДП; *2* – ступенчатый трансформатор импеданса между РДП и разрывом по постоянному току *3*; *4* – ступенчатый трансформатор импеданса между СИС-детектором и разрывом по постоянному току; *5* – радиальный замыкатель для отстройки емкости СИС-перехода.

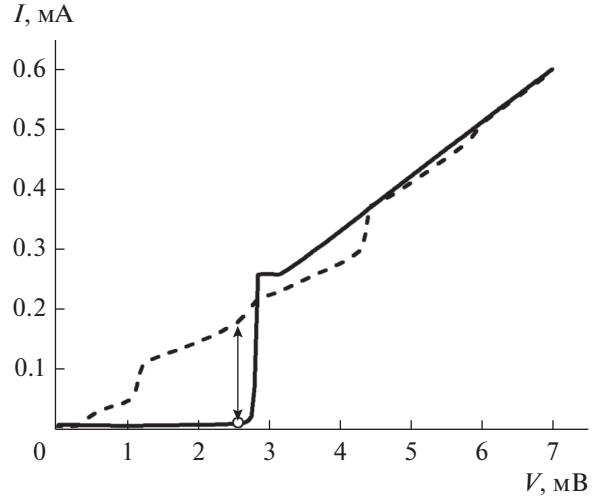

Рис. 2. Экспериментальные ВАХ СИС-перехода под действием внешнего переменного электромагнитного поля частотой 400 ГГц (штриховая кривая) и без него (сплошная); по величине тока накачки в рабочей точке (показана стрелкой) определяется приходящая мощность; критический ток подавлен с помощью магнитного поля.

мер, Ansys HFSS (https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss). В данной работе проводится сравнение результатов обоих методов между собой и с экспериментом.

1. МОДЕЛИРУЕМЫЕ УСТРОЙСТВА

Схема одного из устройств, исследуемых в данной работе, представлено на рис. 1. Подобные интегральные микросхемы применяются для исследования различных сверхпроводниковых детекторов и генераторов ТГц-диапазона [11, 12], а также являются составной частью сверхпроводникового интегрального гетеродинного приемника [2, 13].

В качестве генератора СВЧ-сигнала используется распределенный джозефсоновский переход (РДП), (см. рис. 1). Мощность, излучаемая РДП и проходящая через схему согласования *2*, *3* и *4* (см. рис. 1), детектируется при помощи сосредоточенного джозефсоновского перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС, положение указано стрелкой). Вольт-амперная характеристика (ВАХ) СИС-перехода с подавленным с помощью магнитного поля критическим током показана на рис. 2. Под действием внешнего переменного электромагнитного поля существенно повышается вероятность туннелирования квазичастиц через барьер в СИС-переходе [14]. Это приводит к появлению на ВАХ так называемой квазичастичной ступени, отстоящей по напряжению на hf/e от щелевого (f – частота внешнего сигнала), а по величине тока на ней оценивается доля прошедшей через схему мощности (см. рис. 2, штриховая линия).

Между генератором на РДП и принимающим СИС-переходом в схеме предусмотрен разрыв по постоянному току, выполненный в виде щелевой антенны. Такой способ позволяет подключить их независимо по постоянному току, в то же время обеспечивая возможность передачи СВЧ-сигнала. Для отстройки емкости СИС-перехода в схеме присутствует радиальный замыкатель, вносящий дополнительную индуктивность. Схема согласования между РДП, СИС-детектором и разрывом по постоянному току реализована с помощью ступенчатых трансформаторов импеданса в виде микрополосковых линий определенной толщины. Геометрические размеры были подобраны для каждого образца таким образом, чтобы обеспечить наилучшую передачу сигнала в требуемом диапазоне.

Технология изготовления сверхпроводниковых тонкопленочных интегральных многослойных структур, исследуемых в работе, описана многими авторами [15–17].

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ

2.1. Полуаналитическая модель

При моделировании исследуемых структур методом ABCD-матриц (или матриц передачи), каждый элемент схемы представляется в виде матрицы [9, 10, 18]. Перемножение ABCD-матриц всех элементов в соответствующем порядке даст в результате матрицу передачи всей структуры. Выражения для импеданса щелевой антенны можно найти, например, в [19].

Как показано в работах [20, 21], постоянная распространения и характеристический импеданс микрополосковой линии со сверхпроводящими электродами изменяются по сравнению с

идеальным микрополоском из-за проникновения магнитного поля в электроды. Аккуратные вычисления с учетом краевых эффектов дают выражения [20]:

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{эф}}}\sqrt{g_1^2 - \frac{jg_1g_2\left(Z^{в} + Z^{н}\right)}{k_0\eta_0}},$$
$$\gamma = \sqrt{-k_0^2\epsilon_{эф} + \frac{jg_2k_0\epsilon_{эф}\left(Z^{в} + Z^{н}\right)}{\eta_0 g_1}}, \quad (1)$$

где η_0 – волновое сопротивление вакуума; k_0 – волновой вектор волны в свободном пространстве; $\epsilon_{эф}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость слоя изолятора с поправкой на неоднородность поля в микрополосковой линии; g_1 учитывает краевые эффекты, связанные с конечной толщиной электродов и полем вне линии; g_2 – проникновение магнитного поля в электроды. Значения поверхностных импедансов $Z^{в}$ и $Z^{н}$ верхнего и нижнего электрода соответственно посчитаны с использованием выражений теории Маттиса–Бардина [22]. Более тонкие эффекты, связанные с конечным временем свободного пробега [23, 24] оказываются несущественными для пленок, изготовленных методом магнетронного напыления ввиду малости длины свободного пробега [25].

Вольт-амперные характеристики СИС-детектора при воздействии внешнего переменного сигнала по известной ВАХ в отсутствие накачки можно рассчитать с помощью выражений из [14]. Дифференциальное сопротивление вблизи рабочей точки (на ближайшей к щели квазичастичной ступени) на высоких частотах можно считать приблизительно равным R_n. Также на высоких частотах обязательно учитывать емкость СИС-перехода. Кроме того, наличие СИС-перехода существенно изменяет течение токов в электродах микрополоска. Для учета этого эффекта к импедансу СИС-перехода добавляется индуктивное слагаемое:

$$L_{\text{spread}} = 4\pi\left(\lambda_{в}\,\text{cth}\left(\frac{d_{в}}{\lambda_{в}}\right) + \lambda_{н}\,\text{cth}\left(\frac{d_{н}}{\lambda_{н}}\right) + \frac{H}{2}\right)\ln\left(\frac{R_{внеш}}{R_{СИС}}\right), \quad (2)$$

где $\lambda_{в}$, $\lambda_{н}$ и $d_{в}$, $d_{н}$ – глубины проникновения магнитного поля и толщины верхнего и нижнего электродов соответственно; H – толщина слоя изолятора; $R_{СИС}$ – радиус СИС-перехода; $R_{внеш}$ – характерное расстояние, на котором существенно искривляются линии тока. Во всех расчетах $R_{внеш}$ было выбрано равным 3 мкм.

Существенным ограничением данной модели является предположение о том, что в линиях возможны только продольные (квази-*TEM*) моды [21]. Использование многоступенчатых трансформаторов импеданса, необходимых для согласования разрыва по постоянному току, как с генератором, так и с детектором на СИС-переходе, приводит к тому, что на границе двух микрополосковых линий фронт волны может существенно отличаться от плоского. Однако в большинстве схем длина таких участков много меньше длины микрополосков, на которых волновой фронт плоский, и поэтому отклонение экспериментальных характеристик от расчетных незначительно.

2.2. Моделирование в Ansys HFSS

В Ansys HFSS для нахождения СВЧ-полей в структуре используется метод конечных элементов с адаптивной сеткой: производится серия последовательных разбиений структуры на тетраэдры, причем каждое последующее разбиение выполняется в областях, где изменение поля при переходе через границу тетраэдров на предыдущем шаге было наибольшим. Решения уравнений Максвелла ищутся в виде полиномов некоторой степени (по умолчанию, первой) с помощью минимизации функционала вида $\iint \varphi\Delta\varphi d^3r$ [26], где φ – электростатический потенциал, а интегрирование проводится по всему объему.

Возбуждение и прием сигнала в 3D-симуляторах осуществляются с помощью портов. По сути, порт представляет собой некоторую плоскость, для которой сначала ищутся собственные моды, а после найденное решение становится граничным условием для трехмерной задачи. В данной работе наиболее удобным оказалось использовать сосредоточенные порты ввиду того, что порт, соответствующий СИС-детектору, должен находиться внутри моделируемой области, где постановка волнового порта невозможна.

Моделирование структур в 3D-симуляторах в некотором смысле проще в контексте правильности учета краевых эффектов и распределения полей, а также взаимного влияния элементов друг на друга. Однако в большинстве коммерческих программ отсутствует встроенный модуль, который позволил бы учитывать сверхпроводниковые свойства материалов.

В качестве решения данной проблемы предлагается задавать граничные условия на поверхностях объектов, соответствующих сверхпроводящим электродам линии передачи. Как показано в работах [28, 29], при правильной постановке граничных условий, можно добиться хорошего согласия между результатами моделирования и экспериментом.

Во всех рассматриваемых схемах СИС-переход используется для непосредственного детекти-

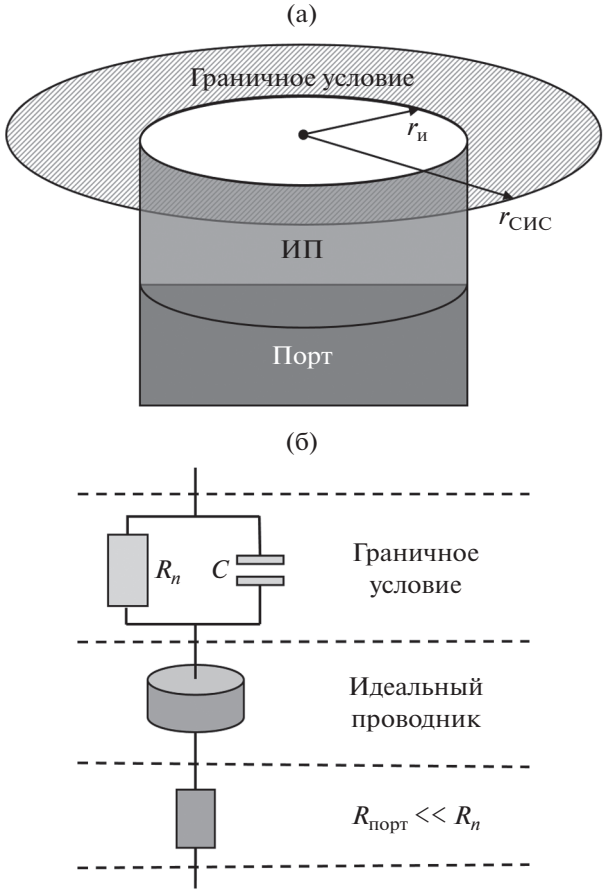

Рис. 3. Схема включения СИС-перехода в микрополосковую линию при моделировании в Ansys HFSS (а) и эквивалентная схема (б).

рования сигнала. Для того чтобы учесть изменение течения токов вблизи сосредоточенного СИС-перехода, а также чтобы задать порт непосредственно на нем, СИС-переход был установлен, как показано на рис. 3. Сосредоточенный порт $R_{порт}$ (см. рис. 3а) представлен прямоугольником, касающимся нижнего электрода и цилиндра из идеального проводника $R_и$. Высота и радиус $r_и$ идеально проводящего цилиндра никак не сказываются на результатах расчета. Вокруг идеального проводника расположено кольцо, внешний радиус которого равен радиусу СИС-перехода в образце, а внутренний – радиусу цилиндра. На кольце заданы граничные условия, соответствующие импедансу $Z_{СИС}$ параллельно соединенных емкости СИС-перехода и R_n – сопротивления выше щели. В пересчете на квадрат поверхности граничным условиям соответствует выражение

$$Z_{\square} = Z_{СИС}\frac{2\pi}{\ln\left(r_{СИС}/r_и\right)}. \qquad (3)$$

На рис. 3б изображена эквивалентная схема. Для перехода от мощности, регистрируемой портом, к полной мощности, приходящей на СИС-переход, необходимо воспользоваться выражением, полученным по правилу Кирхгофа:

$$S_{21}^{СИС} = S_{21}^{порт} + 10\lg\left(1+\frac{\mathrm{Re}\left(Z_{СИС}\right)}{R_{порт}}\right), \qquad (4)$$

где $R_{порт}$ – сопротивление порта, которое во всех симуляциях было выбрано равным 1 мОм – много меньше $\mathrm{Re}(Z_{СИС})$.

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчеты, выполненные с помощью обеих моделей, а также экспериментальные результаты представлены на рис. 4. Всего было проведено моделирование более 10 структур с различной топологией и параметрами СИС-переходов. Площади СИС-переходов в исследуемых образцах лежат в диапазоне 0.5...2.5 мкм^2, а плотности туннельного тока – 5...25 кА/см^2. Каждый образец спроектирован так, чтобы обеспечить наилучшее согласование в требуемом диапазоне. Для большинства

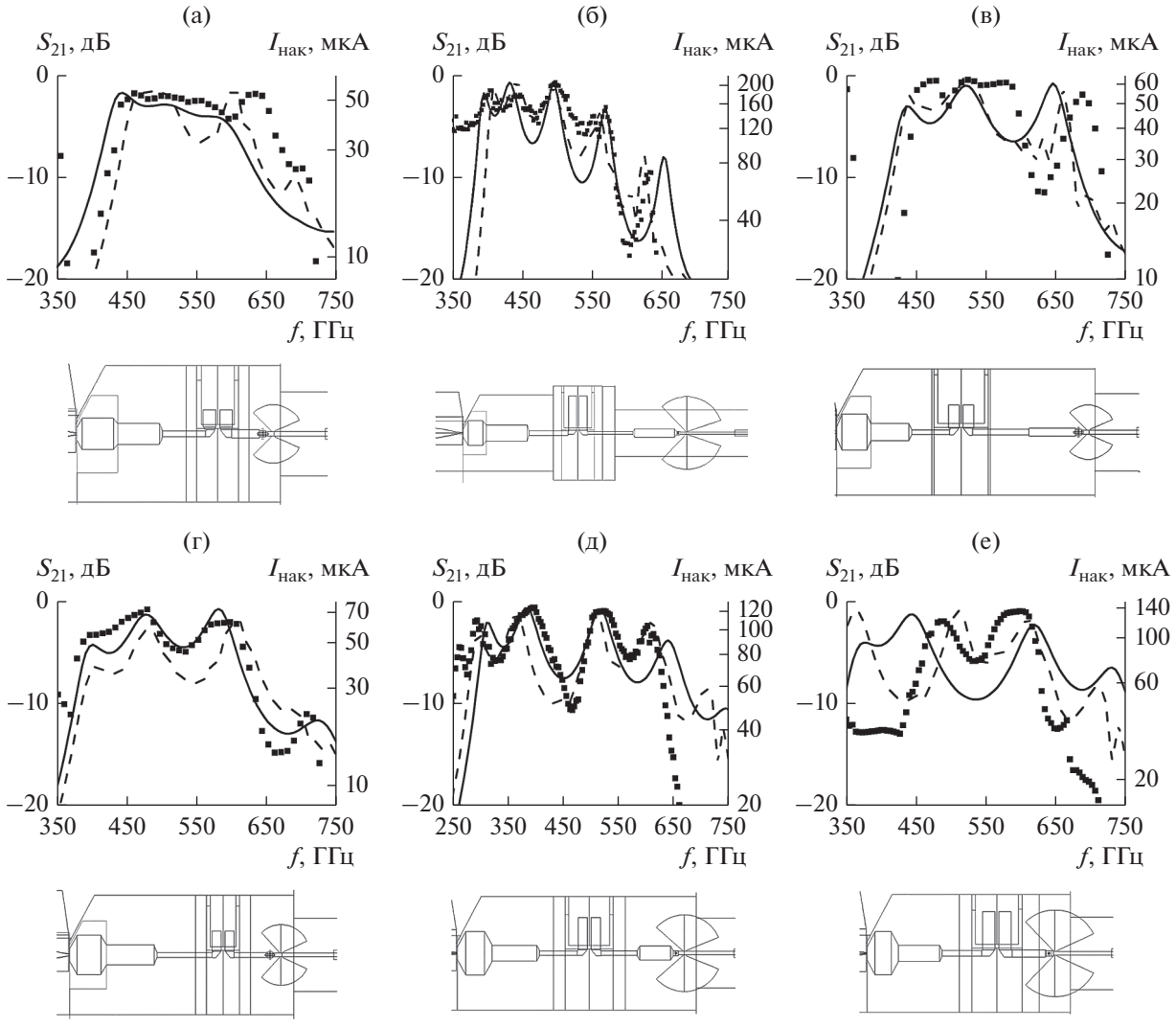

Рис. 4. Полуаналитический расчет (сплошная кривая) и расчет в Ansys HFSS (штриховая) параметра S_{21} для моделируемых структур, а также экспериментальные данные $I_{нак}$ (черные квадраты); под каждым графиком приведен чертеж соответствующей структуры: а, г, е – образцы с односекционным трансформатором импеданса между СИС-детектором и разрывом по постоянному току (см. *4* на рис. 1); б, в, д – с двухсекционным. Площади СИС-детекторов: 0.67 (а), 2.55 (б), 0.87 (в), 0.69 (г), 1.05 (д), 1.3 мкм^2 (е).

структур положение особенностей на кривых S_{21}, рассчитанных с помощью обеих моделей, совпадает по частоте с измеренным откликом СИС-перехода.

Следует отметить, что генератор на распределенном джозефсоновском переходе является сложной динамической системой, в которой также присутствует сильная нелинейность. Из-за этого в нем помимо сигнала на основной частоте возникают также и волны с кратными частотами. Этим обусловлена разница между расчетами и экспериментом на частотах ниже 350 ГГц. Оценка мощности, генерируемой РДП, также затруднительна, поэтому можно говорить лишь о качественном совпадении расчетов с экспериментом.

Как было отмечено в разд. 2, полуаналитический расчет предполагает, что в линиях распространяется квази-*TEM*-волна, иными словами, поверхности постоянной фазы имеют плоский фронт, перпендикулярный краям микрополосковых линий. Поэтому для образца на рис. 4е результаты полуаналитического расчета не соответствуют экспериментальным и Ansys HFSS. Искривление формы волнового фронта между СИС-переходом и радиальным замыкателем показано на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено моделирование сверхпроводниковых интегральных структур двумя способами, результаты которых находятся в качественном

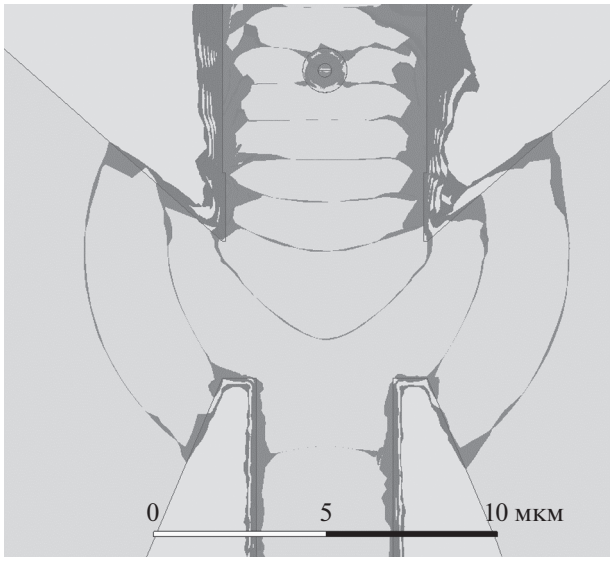

Рис. 5. Распределение амплитуды электрического поля на частоте 500 ГГц вблизи перехода от СИС-детектора к радиальному замыкателю с внешним радиусом 48 мкм, рассчитанное в Ansys HFSS; поверхности постоянной фазы сильно искривлены.

согласии как друг с другом, так и с результатами экспериментов. Реализованные программы уже позволили спроектировать образцы, покрывающие полностью диапазон 400...650 ГГц по уровню не ниже -3 ± 1 дБ. Часть образцов была изготовлена и успешно апробирована, несколько новых образцов готовятся к изготовлению. Методы, изложенные в данной работе, применимы для широкого класса структур и уже используются при проектировании схем сверхпроводниковых приемников и генераторов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны за возможность доступа к оборудованию уникальной научной установки “Криоинтеграл” (№ 352529), которое было использовано при изготовлении образцов и проведении измерений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Разработка и исследование структур выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-00019, https://rscf.ru/project/23-79-00019/). Численные расчеты проведены при бюджетном финансировании в рамках государственного задания. Функционирование уникальной научной установки “Криоинтеграл” поддержано Министерством науки и высшего образования РФ в рамках соглашения (RF-2296.61321X0041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kojima T., Kroug M., Takeda M. et al.* // Appl. Phys. Express 2009. V. 2. № 10. P. 102201. https://doi.org/10.1143/APEX.2.102201
2. *De Lange G., Birk M., Boersma D. et al.* // Superconductor Sci. Technol. 2010. V. 23. № 4. P. 045016. https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/4/045016
3. *Billade B., Pavolotsky A., Belitsky V.* // IEEE Trans. 2013. V. TST-3. № 4. P. 416. https://doi.org/10.1109/TTHZ.2013.2255734
4. *Шмидт В.В.* Введение в физику сверхпроводников М.: МЦНМО, 2000.
5. *Baksheeva K.A., Ozhegov R.V., Goltsman G.N. et al.* // IEEE Trans. 2021. V. TST-11. № 4. P. 381. https://doi.org/10.1109/TTHZ.2021.3066099
6. *Kinev N.V., Rudakov K.I., Filippenko L.V., Koshelets V.P. et al.* // Phys. Solid State. 2021. V. 63. P. 1414. https://doi.org/10.1134/S1063783421090171
7. *Barychev A.M.* Superconductor–Insulator–Superconductor THz Mixer Integrated with a Superconducting Flux-Flow Oscillator. PhD thesis, Delft: Delft Univ. Technol, 2005. 144 p.
8. *Водзяновский Я.О., Худченко А.В., Кошелец В.П.* // ФТТ. 2022. Т. 64. № 10. С. 1385. https://doi.org/10.21883/FTT.2022.10.53078.42HH
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. *Шевченко М.С., Филиппенко Л.В., Киселев О.С., Кошелец В.П.* // ФТТ. 2022. Т. 64. № 9. С. 1223. https://doi.org/10.21883/FTT.2022.09.52809.38HH
12. *Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V. et al.* // Superconducting Sci. Technol. 2004. V. 17. № 127. https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/5/007
13. *Koshelets V.P., Shitov S.V.* // Superconductor Sci. Technol. 2000. V. 13. № 5. P. 53. https://doi.org/10.1088/0953-2048/13/5/201
14. *Tucker J.R., Feldman M.J.* // Rev. Mod. Phys. 1985. V. 57. № 4. P. 1055. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.57.1055
15. *Filippenko L.V., Shitov S.V., Dmitriev P.N. et al.* // IEEE Trans. 2001. V. TAS-11. № 1. P. 816. https://doi.org/10.1109/77.919469
16. *Fominsky M.Yu., Filippenko L.V., Chekushkin A.M. et al.* // Electronic. 2021. V. 10. № 23. P. 2944. https://doi.org/10.3390/electronics10232944
17. *Tolpygo S.K., Bolkhovky V., Weir T.J. et al.* // IEEE Trans. 2014. V. TAS-25. № 3. P. 1. https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2369213
18. *Ампалихин А.А., Хан Ф.В., Филиппенко Л.В., Кошелец В.П.* // ФТТ. 2022. Т. 64. № 10. С. 1378. https://doi.org/10.21883/PSS.2022.10.54219.41HH
19. *Шитов С.В.* Интегральные устройства на сверхпроводниковых туннельных переходах для приемников миллиметровых и субмиллиметровых волн. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2003. 428 с.
20. *Yassin G., Withington S.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. № 9. P. 1983. https://doi.org/10.1088/0022-3727/28/9/028

21. *Swihart J.C.* // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. № 3. P. 461. https://doi.org/10.1063/1.1736025

22. *Mattis D.C., Bardeen J.* // Phys. Rev. 1958. V. 111. № 2. P. 412. https://doi.org/10.1103/PhysRev.111.412

23. *Zimmermann W., Brandt E.H., Bauer M. et al.* // Physica C: Superconductivity. 1991. V. 183. № 1–3. P. 99. https://doi.org/10.1016/0921-4534(91)90771-P

24. *Pöpel R.* // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. № 12. P. 5950. https://doi.org/10.1063/1.343622

25. *Nam S.B.* // Phys. Rev. 1967. V. 156. № 2. P. 470. https://doi.org/10.1103/PhysRev.156.470

26. *Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д.* // Анализ и оптимизация СВЧ-структур с помощью HFSS. Учеб. пособие. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.

27. *Kerr A.R., Pan S.K.* // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1990. V. 11. № 10. P. 1169. https://doi.org/10.1007/BF01014738

28. *Belitsky V., Risacher C., Pantaleev M., Vassilev V.* // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 2006. V. 27. № 1. P. 809. https://doi.org/10.1007/s10762-006-9116-5