

02,08

Электродинамическое моделирование смесителя с гетеродином на чипе на основе джозефсоновского ВТСП-перехода и гибридной антенны Вивальди

© Е.А. Матрозова, А.В. Чигинев, Л.С. Ревин[†]

Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород, Россия

[†] E-mail: rls@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 18 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Проведено электродинамическое моделирование системы смесителя с гетеродином на основе высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) джозефсоновского перехода на одном чипе. В качестве смесителя предложен новый дизайн системы, совмещающий в себе лог-периодическую антенну и антенну Вивальди, показавший многообещающие результаты передачи опорного сигнала для частот до 125 GHz. Направленность и усиление антенны на частоте 100 GHz составили 6.51 и 6 dBi.

Ключевые слова: высокотемпературная сверхпроводимость, диаграмма направленности, лог-периодическая антенна.

DOI: 10.61011/FTT.2024.06.58238.33NN

1. Введение

В последние годы высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) джозефсоновские переходы всё чаще используются для создания высокочастотных устройств благодаря хорошей чувствительности, высокому пределу по ТГц-частоте, и возможности работы при относительно высоких температурах по сравнению с устройствами на основе низкотемпературных сверхпроводников. Одной из практически важных задач является создание ВТСП-смесителя на эффекте Джозефсона [1–3]. Последние впечатляющие результаты [4] связаны с измерением шумовой температуры при смешивании сигналов на частоте 600 GHz (900 K) и 1.5 THz (2500 K). При этом известно, что насыщение ВТСП-смесителя и ухудшение эффективности преобразования возникает с увеличением частоты сигнала и порядка гармоник. Поэтому важной задачей является исследование возможности использования высокочастотного источника опорного сигнала, расположенного на одном чипе со смесителем.

Помимо смешения с внешним гетеродином возможно смешение с собственной генерацией Джозефсона. Оценки ширины линии собственной генерации низковольтных джозефсоновских переходов YBaCuO дают значения порядка единиц GHz, а для высоковольтных переходов — десятков GHz. Наличие столь широкой линии обуславливает применение собственной генерации ВТСП-переходов для задач исследования шумовой температуры и для анализа широкополосного излучения. Использование внешних высокостабильных гетеродинных источников с шириной линии порядка единиц KHz позволяет исследовать спектральный состав внешнего сигнала. В настоящей работе рассматривается случай

смешения с внешним гетеродином на основе длинного джозефсоновского перехода, оценки ширины линии которого дают значения десятков MHz.

В работе [5] был предложен дизайн монолитного ВТСП-смесителя, расположенного полностью на чипе, используемый с внешним гетеродином. Благодаря компактности предложенного дизайна такой смеситель показал более эффективную передачу сигналов, а следовательно, более низкие потери, по сравнению со смесителями с разнесенными элементами. В настоящей работе мы дополнительно к этому предлагаем разместить гетеродинный источник непосредственно на чипе. Такой подход имеет ряд преимуществ по сравнению со смешением сигнала с внешним гетеродином: компактность, малые потери, низкие шумы, что должно положительно сказаться на характеристиках смесителя.

В низкотемпературных сверхпроводящих технологиях успешно показала себя концепция супергетеродинного смесителя на основе перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС), где источником опорного сигнала служит длинный джозефсоновский переход, расположенный на одном чипе с приёмником [9,10]. СИС-смесители основаны на туннелировании квазичастиц через барьер, расположенный между двумя сверхпроводниками, и их частота принципиально ограничена энергетической щелью в сверхпроводящем ниобии. Хотя недавно для расширения частотного диапазона были разработаны СИС-переходы с более высокой энергией щели. В отличие от СИС-смесителей, джозефсоновские ВТСП-смесители используют нелинейность тока куперовской пары. В дополнение к очевидному преимуществу — гораздо более высокой рабочей температуре, их более высокая энергетическая щель приводит к частоте

среза в несколько ТГц. Эффект Джозефсона, реализуемый при использовании ВТСП-переходов, позволяет осуществлять не только чувствительный прием внешнего сигнала, но и генерацию сигналов GHz и sub-THz диапазона частот [6–8].

Реализация ВТСП-приемника, аналогичного низкотемпературному СИС-приемнику, связана с определенными технологическими ограничениями. Высокотемпературные джозефсоновские переходы, образованные либо на границе бикристаллической подложки, либо методом ионного облучения, в отличие от ниобиевых переходов являются однослойными структурами. Таким образом, в данной технологии нет возможности реализовать передачу высокочастотного сигнала по микрополосковой линии. Тем не менее, работы по исследованию джозефсоновского ВТСП-источника сигнала на чипе активно ведутся [11–13].

Реализация возбуждения джозефсоновского ВТСП-смесителя гетеродинамическим источником возможна различными способами: копланарная линия, ближнепольное взаимодействие, антенна Вивальди.

При использовании копланарной линии [3] возможна передача сигнала только в узком диапазоне частот до 50 GHz. На более высоких частотах сигнал, подаваемый по копланарной линии, излучается в окружающее пространство до достижения им джозефсоновского перехода.

Возбуждение смесителя за счет ближнепольного взаимодействия [11] можно осуществить путем размещения джозефсоновского перехода в центр лог-периодической антенны [14,15] и расположения вблизи дипольной антенны. При этом для увеличения емкостной связи форма диполя может быть выполнена в виде линии, повторяющей край лог-периодической антенны. Критическим недостатком такой системы является слабость ближнепольного взаимодействия, обусловленная малостью торцевых площадей структур, образующих стенки „конденсатора“. При этом важную роль во взаимодействии структур начинают играть краевые эффекты распространения электромагнитных полей. Слабость и узкополосность ближнепольного взаимодействия существенно ограничивает возможность его использование для возбуждения джозефсоновского смесителя.

Перспективным альтернативным способом реализации смесителя на чипе может стать использование антенны Вивальди [16], представляющей собой сверхширокополосный излучатель, построенный на основе расширяющейся щелевой линии. В качестве нелинейного элемента предполагается использование джозефсоновского перехода. Антенна Вивальди имеет высокую направленность и излучает преимущественно в направлении открытого конца щели вдоль оси симметрии, создавая симметричный луч в Е- и Н-плоскостях. Взаимность конструкции антенны позволяет использовать ее как в качестве передатчика, так и в качестве приемника. Такая антенна имеет простую геометрию, легка в изготовлении, но при этом эффективна.

Предложенный новый дизайн смесителя, совмещающий в себе антенну Вивальди с лог-периодической антенной, может позволить реализовать смешение на одном чипе: прием внешнего сигнала осуществляется перпендикулярно к структуре с помощью лог-периодической антенны, тогда как опорный сигнал распространяется вдоль подложки, излучаемый антенной Вивальди.

2. Электродинамическое моделирование системы

Антенна Вивальди представляет собой экспоненциально расширяющуюся щель, которая начинается с равномерной щелевой линии и постепенно расширяется до ширины около $\lambda_{\text{eff}}/2$, где λ_{eff} — длина волны в среде. Благодаря такой конструкции электрическое поле постепенно преобразуется из щелевого режима в режим излучения и окончательно излучается, когда расстояние между двумя плечами антенны достигает $\sim \lambda_{\text{eff}}/2$. Таким образом, верхний и нижний пределы частоты определяются шириной щели антенны на питающей и излучающей сторонах соответственно. Размеры исследуемой антенны Вивальди (рис. 1, а) составляли: ширина — 880.3 μm , длина — 1200 μm , ширина щели в излучающей секции — 720 μm , ширина щели в питающей секции — 19.2 μm .

Диаграмма направленности (ДН) луча антенны Вивальди определяется размерами антенны, экспоненциальным законом раскрытия щелевой линии, а также толщиной и материалом подложки (диэлектрической проницаемостью) [17]. ДН в плоскости Н зависит от фазовой скорости направленной волны и длины антенны, а ДН в плоскости Е зависит также от формы конуса щели [18]. Для получения желаемой ДН необходимо управлять фазовой скоростью направленной волны, т.е. изменяя ширину/форму конуса или изменяя используемый материал подложки (диэлектрическую проницаемость ϵ , толщину d). Для антенны Вивальди, как и для других антенн на поверхностных волнах, по мере увеличения длины антенны ширина луча сужается, а усиление увеличивается [19].

При подборе материала подложки и ее толщины удобно руководствоваться эмпирической оценкой, связывающей характеристики подложки с формированием ДН антенны на поверхностных волнах [19,20]. Согласно данной оценке, верный подбор параметров подложки позволяет получить оптимальную ДН. Это связано с влиянием диэлектрической проницаемости ϵ и толщины подложки d на фазовую скорость направленной волны. В случае превышения верхнего предела оптимального диапазона значений d ($\epsilon^{-0.5} - 1$) происходит расщепление основного лепестка ДН и увеличение боковых лепестков. В случае значений меньше нижнего предела оптимального диапазона происходит уменьшение усиления и боковых лепестков ДН. Из данных оценок

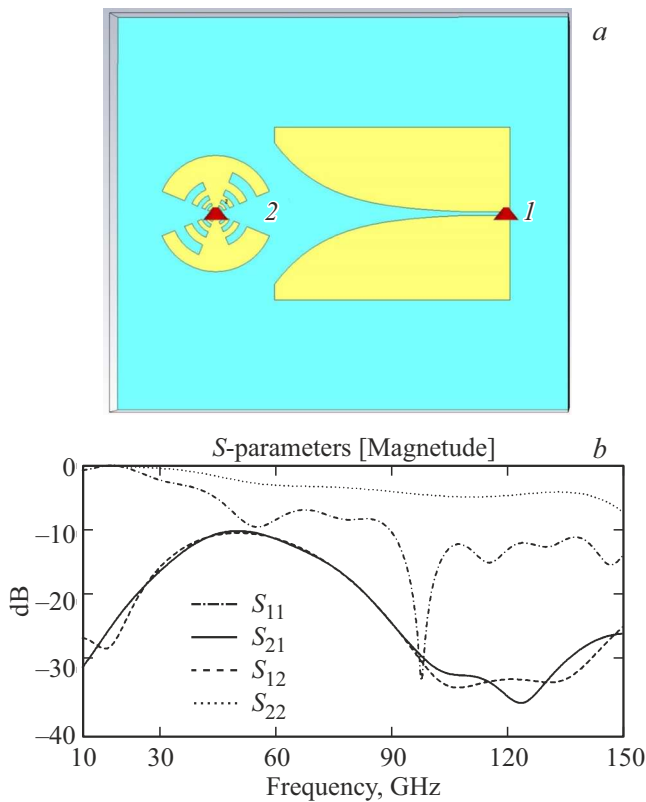


Рис. 1. Дизайн супергетеродинного приемника. *a)* Порт 1 — джозефсоновский генератор опорного сигнала, интегрированный в антенну Вивальди. Порт 2 — джозефсоновский смеситель, интегрированный в лог-периодическую антенну. *b)* S-параметры при возбуждении лог-периодической антенны с помощью антенны Вивальди.

следует, что при работе на высоких частотах порядка десятков и сотен GHz предпочтение следует отдавать максимально тонким подложкам с наименьшей диэлектрической проницаемостью. В нашем случае для антенны Вивальди (рис. 1, *a*) при использовании подложки из MgO ($\epsilon = 9.63$) толщиной $500 \mu\text{m}$ на частоте 200 GHz ДН усиления имеет основной лепесток, направленный вдоль центральной оси антенны с амплитудой -92.9 dBi , тогда как при использовании фианита ($\epsilon = 24$) той же толщины основной лепесток распадается на два, и на оси симметрии образуется провал ДН. В случае необходимости работы с подложками, имеющими высокую диэлектрическую проницаемость, возможным решением может стать либо значительное уменьшение толщины подложки, либо использование дополнительного слоя диэлектрика, располагающегося поверх всей структуры за исключением областей переходов [21]. Дальнейшее моделирование проводилось на подложках из MgO.

В качестве смесителя предлагается использовать лог-периодическую антенну [22,23] с размещенным в ее центре нелинейным элементом — джозефсоновским переходом. Лог-периодическая антенна имеет планарную геометрию, является широкополосной, при этом излуча-

ет в плоскости, перпендикулярной к плоскости антенны. Длины минимального и максимального лепестков антенны определяют частотный диапазон ее излучения. В данной работе рассматривается лог-антенна, рассчитанная на диапазон частот 50–800 GHz [24] с внешним диаметром $592.3 \mu\text{m}$.

Критическую роль при использовании ВТСП джозефсоновских переходов для практических применений играет вопрос их согласования с антенной системой. В целом ряде экспериментальных работ было показано, что переходы YBaCuO имеют низкое сопротивление порядка единиц Ω [25–29]. Решением данной проблемы может стать использование цепочек или массивов джозефсоновских переходов [24] либо использование высокоомных ВТСП-переходов, имеющих сопротивление порядка нескольких десятков Ω [1,4]. В проведенном моделировании импеданс порта, моделирующего джозефсоновский переход, составил 50Ω , что соответствует дифференциальному сопротивлению ВТСП-смесителя в рабочей точке.

Первым вариантом реализации приемника с гетеродином на чипе было совмещение антенны Вивальди и лог-периодической антенны (рис. 1, *a*). Выполняющий роль нелинейного элемента джозефсоновский ВТСП-переход располагался в центре лог-периодической антенны, опорный сигнал джозефсоновского генератора подавался с помощью антенны Вивальди.

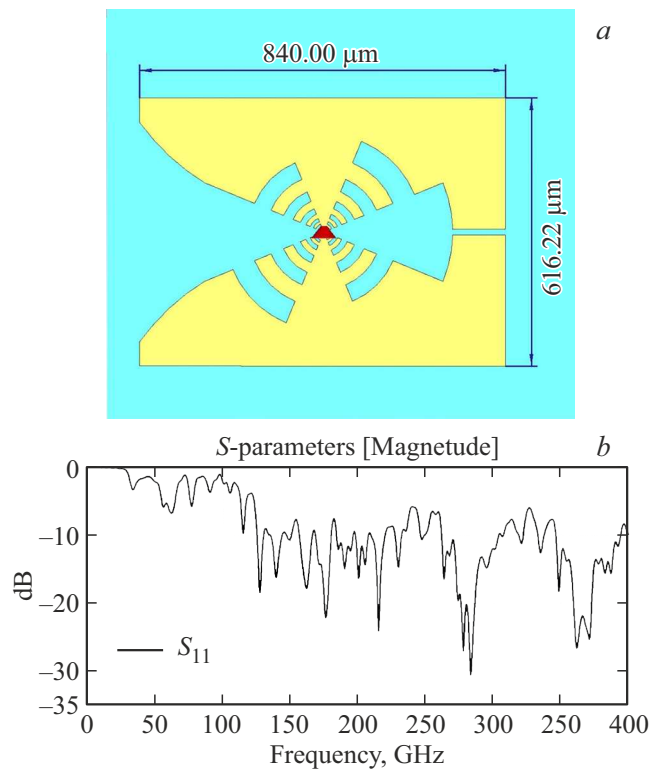


Рис. 2. Гибридная антенна. *a)* Дизайн гибридной антенны. *b)* S-параметры гибридной антенны.

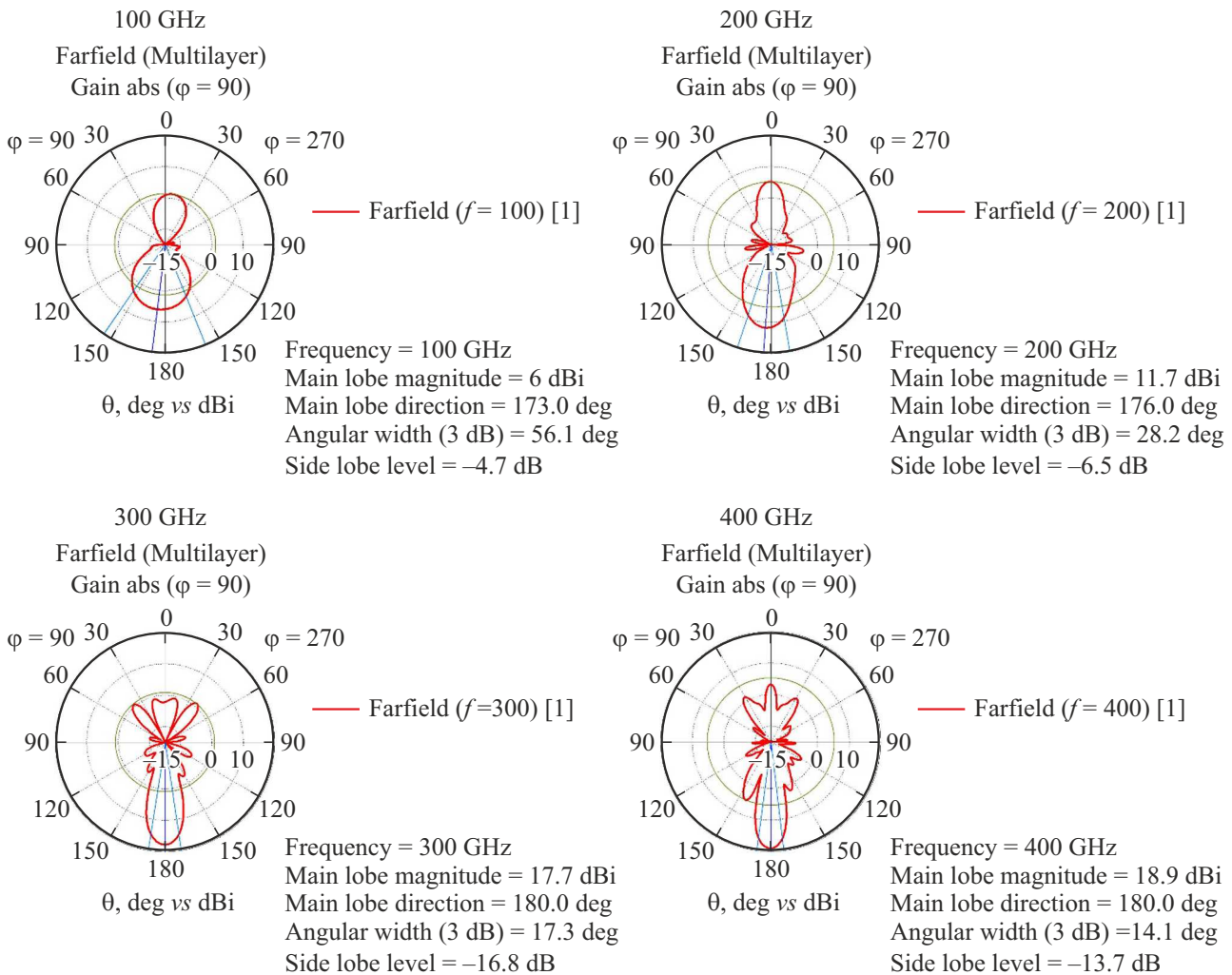


Рис. 3. Диаграммы направленности гибридной антенны для частот 100, 200, 300 и 400 GHz.

В качестве численного метода в моделировании использовался метод конечных разностей. Расчеты проводились во временной области в частотном диапазоне от 10 до 400 GHz. Возбуждение системы осуществлялось с помощью дискретных портов 1 и 2. Порт 1, моделирующий источник гетеродина, располагался между электродами антенны Вивальди, порт 2 (смеситель) — между электродами лог-периодической антенны в ее центре, на месте джозефсоновского ВТСП-перехода. В процессе моделирования вычислялись матрица рассеяния (S -параметры) системы. Для моделирования диаграмм направленности использовались программные мониторы полей в дальней зоне на частотах от 100 до 400 GHz включительно с шагом 100 GHz. Над подложкой граничные условия определялись как открытые с добавленным пространством; во всех остальных направлениях граничные условия открытые.

На рис. 1, *b* приведены S -параметры для данной системы. Из графика видно, что передача сигнала возможна в диапазоне от 30 до 70 GHz, при этом S_{12} находится примерно на уровне -15 dB. Такое существенное по-

давление сигнала объясняется особенностями работы используемых антенн: опорный сигнал антенны Вивальди излучается вдоль подложки, однако приемная лог-периодическая антенна принимает основную часть сигнала перпендикулярно к подложке.

Для решения проблемы плохой передачи сигнала было предложено использовать новый гибридный вариант антенны, в котором антенна Вивальди и лог-периодическая антенна совмещены (рис. 2, *a*). Ширина антенны составила $616.2 \mu\text{m}$, длина — $840 \mu\text{m}$, ширина раскрытия антенны — $504 \mu\text{m}$. При моделировании гибридная антенна была расположена на кремниевой линзе с радиусом 1.5 mm. S -параметр гибридной антенны приведен на рис. 2, *b*. Из рисунка видно, что данная антенна является широкополосной и хорошо излучает/принимает на частотах от 110 GHz.

ДН гибридной антенны для частот $f = 100, 200, 300$ и 400 GHz приведены на рис. 3. Направленность и усиление антенны на частоте 100 GHz составили 6.51 dBi и 6 dBi, на частоте 200 GHz — 12.3 dBi и 11.7 dBi, на частоте 300 GHz — 18.1 dBi и 17.7 dBi, на частоте

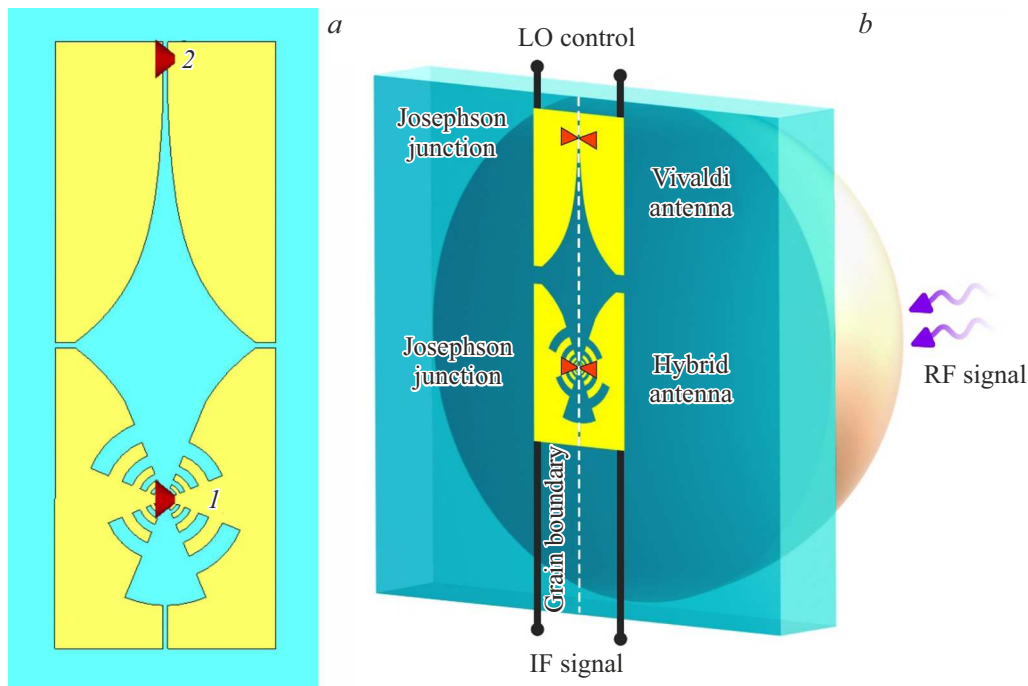


Рис. 4. Дизайн смесителя с гибридной антенной. *a)* Вид сверху. *b)* Схема построения джозефсоновского ВТСП-смесителя: Josephson junction – джозефсоновский переход; Grain boundary — бикристаллическая граница на кристалле MgO; LO Control — управление смещением постоянным током джозефсоновского перехода, расположенного в раскрыве антенны Вивальди; RF Signal — внешний высокочастотный сигнал; IF Signal — выходной сигнал на промежуточной частоте.

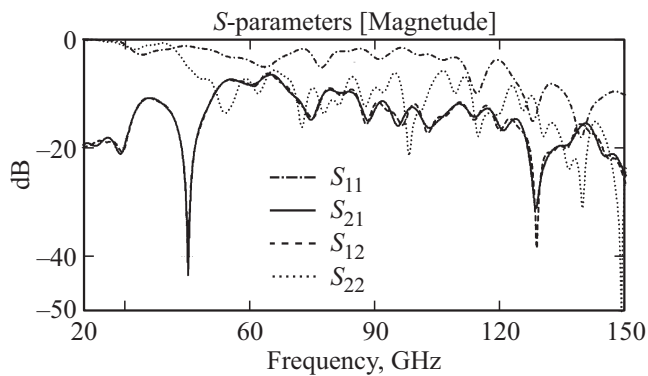


Рис. 5. S -параметры при возбуждении гибридной антенны с помощью антенны Вивальди.

400 GHz — 19.1 dBi и 18.9 dBi соответственно. Как видно из графиков, с ростом частоты ширина главного лепестка ДН сужается, направленность и усиление антенны увеличиваются.

Дизайн смесителя на основе гибридной антенны и антенны Вивальди приведен на рис. 4, *a*. Размеры гибридной антенны соответствуют приведенным на рис. 2. Общая схема построения джозефсоновского ВТСП-смесителя дана на рис. 4, *b*. Структура расположена на MgO-подложке; с обратной стороны подложки располагается кремниевая линза. Внешний ВЧ-сигнал подается со стороны линзы и принимается гибридной

антенной. Управление опорным сигналом гетеродина осуществляется за счет подачи постоянного тока смещения на джозефсоновский бикристаллический переход, расположенный в раскрыве антенны Вивальди. Смещение внешнего высокочастотного сигнала с сигналом от гетеродина происходит на джозефсоновском переходе, расположенном в центре гибридной антенны. Считывание выходного сигнала на промежуточной частоте осуществляется с гибридной антенны.

S -параметры полученной системы приведены на рис. 5. Видно, что передача сигнала возможна в полосе от 50 до 125 GHz, при этом S_{12} соответствует значению примерно -15 dB, что превосходит рабочий частотный диапазон, полученный для системы со стандартной лог-периодической антенной. Отметим, что использование высокоомных джозефсоновских переходов в данном случае играет ключевую роль: так, переход от 50-к 5Ω -джозефсоновским переходам приводит к подавлению S_{12} на значения порядка 10 dB в диапазоне частот 50–150 GHz.

3. Заключение

В результате электродинамического моделирования было получено, что создание смесителя, расположенного полностью на чипе с использованием джозефсоновского ВТСП-перехода возможно посредством использования нового гибридного типа антенны, совмещающего

в себе лог-периодическую антенну и антенну Вивальди. Передача сигнала в таких системах возможна до частот порядка 125 GHz. Направленность и усиление антенны на частоте 100 GHz составили 6.51 dBi и 6 dBi соответственно, параметр S_{12} соответствует значению порядка -15 dB.

Существует множество способов модификации антенны Вивальди, улучшающих ее усиление и диаграмму направленности. В работе [30] для увеличения усиления антенны используются дополнительные эллиптические элементы, располагающиеся по бокам от антенны Вивальди. В ряде работ [31,32] улучшение излучающих свойств антенны достигается за счет использования дополнительных планарных резонаторов в виде крестов, стрелок, квадратов и других геометрических фигур, а также прямоугольных слотов, вырезанных по бокам антенны Вивальди. В работе [33] предложено использование дополнительного диэлектрического резонатора. Применение модификаций дизайна антенны Вивальди для создания смесителя на чипе представляется перспективным и требует дальнейших исследований.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-79-10384-П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Shimakage, Y. Uzawa, M. Tonouchi, Z. Wang. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7**, 2, 2595 (1997).
- [2] M. Malnou, C. Feuillet-Palma, C. Ulysse, G. Faini, P. Febvre, M. Sirena, L. Olanier, J. Lesueur, N. Bergeal. *J. Appl. Phys.* **116**, 7, 074505 (2014).
- [3] X. Gao, T. Zhang, J. Du, A.R. Weily, Y.J. Guo, C.P. Foley. *Supercond. Sci. Technol.* **30**, 9, 095011 (2017).
- [4] D. Cunnane, J.H. Kawamura, N. Acharya, M.A. Wolak, X.X. Xi, B.S. Karasik. *Appl. Phys. Rev.* **109**, 11, 112602 (2016).
- [5] X. Gao, T. Zhang, J. Du, Y.J. Guo. *Supercond. Sci. Technol.*, **31**, 115010 (2018).
- [6] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind. *Supercond. Sci. Technol.* **14**, 12, 1040 (2001).
- [7] M.A. Galin, A.M. Klushin, V.V. Kurin, S.V. Seliverstov, M.I. Finkel, G.N. Goltsman, F. Müller, T. Scheller, A.D. Semenov. *Supercond. Sci. Technol.* **28**, 5, 055002 (2015).
- [8] L.S. Revin, D.V. Masterov, A.E. Parafin, S.A. Pavlov, D.A. Pimanov, A.V. Chiginev, A.V. Blagodatkin, I.V. Rakut', E.V. Skorokhodov, A.V. Gordeeva, A.L. Pankratov. *Appl. Sci.* **12**, 23, 11960 (2022).
- [9] V.P. Koshelets, S.V. Shitov. *Supercond. Sci. Technol.* **13**, 5, R53 (2000).
- [10] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.V. Shchukin, L.V. Filippenko, J. Mygind, A.V. Ustinov. *Phys. Rev. B* **56**, 9, 5572 (1997).
- [11] B. Chesca, D. John, M. Gaifullin, J. Cox, A. Murphy, S. Savel'ev, C.J. Mellor. *Appl. Phys. Lett.* **117**, 14, 142601 (2020).
- [12] M. Darula, T. Doderer, S. Beuven. *Supercond. Sci. Technol.* **12**, 1, R1 (1999).
- [13] K. Lee, I. Iguchi, K.Y. Constantinian. *Physica C* **320**, 1–2, 65 (1999).
- [14] H. Saijo, M. Morimoto, M. Yamashita, M. Tonouchi, M. Hangyo. *Technical Digest. CLEO/Pacific Rim'99* (Cat. No.99TH8464) **2**, 451 (1999).
- [15] M. Tonouchi, H. Saijo, M. Hangyo, O. Morikawa, P. Gu, M. Tani, K. Sakai. *Physica C* **357–360**, Part 2, 1600 (2001).
- [16] P.J. Gibson. 9th Eur. Microwave Conf. Proceed. **101** (1979).
- [17] P. Ludlow, V. Fusco. In: 2009 Loughborough Antennas & Propagation Conf. (IEEE) (2009). 445 p.
- [18] R. Janaswamy, D.H. Schaubert. *IEEE Trans. AP* **35**, 9, 1058 (1987).
- [19] K.S. Yngvesson, T.L. Korzeniowski, Y.-S. Kim, E.L. Kollberg, J.F. Johansson. *IEEE Trans. Microwave Theory. Techniques* **37**, 2, 365 (1989).
- [20] N. Tiwari, T.R. Rao. *ACES J.* **32**, 4, 366 (2017).
- [21] M.F. Abdullah, A.K. Mukherjee, R. Kumar, S. Preu. *J. Infrared Milli Terahz Waves* **41**, 6, 728 (2020).
- [22] M.M. Gitin, F.W. Wise, G. Arjavalinam, Y. Pastol, R.C. Compton. *IEEE Trans. Antennas Propag.* **42**, 3, 335 (1994).
- [23] Y. Huo, G.W. Taylor, R. Bansal. *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **23**, 6, 819 (2002).
- [24] E.I. Glushkov, A.V. Chiginev, L.S. Kuzmin, L.S. Revin. *Beilstein J. Nanotechnol.* **13**, 325 (2022).
- [25] C. Pegrum, T. Zhang, J. Du, Y.J. Guo. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26**, 3, 1500905 (2016).
- [26] X. Gao, H. Li, T. Zhang, J. Du, K. Smart, J. Ma, J. An. *Opt. Express* **30**, 20, 35311 (2022).
- [27] X. Gao, T. Zhang, J. Du, Y.J. Guo. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **10**, 1, 21 (2020).
- [28] X. Gao, H. Li, J. Song, J. An, X. Bu, H. Liu. *J. Appl. Phys.* **130**, 17, 173903 (2021).
- [29] J. Du, C.M. Pegrum, X. Gao, A.R. Weily, T. Zhang, Y.J. Guo, C.P. Foley. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27**, 4, 1500905 (2017).
- [30] S. Poorgholam-Khanjari, F.B. Zarrabi. *Opt. Commun.* **480**, 126482 (2021).
- [31] R.K. Kushwaha, P. Karuppanan. *Opt. Quant. Electron.* **51**, 9, 309 (2019).
- [32] O. Turkmen-Kucuksari, A. Kocakaya, S. Çimen, G. Çakır. *AEU — Int. J. Electron. Commun.* **113**, 152975 (2020).
- [33] J. Bourqui, M. Okoniewski, E.C. Fear. *IEEE Trans. AP* **58**, 7, 2318 (2010).

Редактор Е.В. Толстякова