

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.5>

УДК: 51-37, 537.9, 53.05

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ВТСП ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ПЕРЕХОДА

Е.А. Матророва<sup>1,2</sup>, Л.С. Ревин<sup>1,2</sup><sup>1</sup> ИФМ РАН, 603087, Нижний Новгород, ул. Академическая, 7.<sup>2</sup> Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2024 г.

**Аннотация.** В работе исследован интегральный смеситель на основе ВТСП YBCO джозефсоновского перехода, расположенный полностью на чипе. Благодаря компактности такой смеситель должен обладать большей эффективностью передачи сигнала по сравнению со смесителями с разнесенными элементами. Кроме того, малые размеры смесителя могут иметь критическое значение для ряда прикладных задач. В представленной работе проведено электромагнитное моделирование интегрального смесителя, дана оценка его эффективности преобразования на основе аналитического подхода, предложенного авторами, а также приведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Показано, что исследуемый смеситель обладает достаточным значением эффективности преобразования для использования его на практике и позволяет производить смешение высокочастотного 600 ГГц сигнала с низкочастотным опорным сигналом с частотой менее 10 ГГц.

**Ключевые слова:** интегральный смеситель, ВТСП сверхпроводник, джозефсоновский переход, ТГц частота.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10384-Р).

**Автор для переписки:** Ревин Леонид Сергеевич, [rls@ipmras.ru](mailto:rls@ipmras.ru)

## Введение

В последние годы для создания ТГц устройств широкое распространение получило использование высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) джозефсоновских переходов [1]. ВТСП джозефсоновские переходы обладают целым рядом уникальных свойств, такими как малое энергопотребление, низкие шумы, широкополосность, способность работать при высоких температурах вплоть до 80 К [2] и частотах до единиц ТГц. Одной из практически важных задач является создание ВТСП-смесителя на основе эффекта Джозефсона [3-6], который может быть использован в ТГц-гетеродинных приемниках, обеспечивая крайне низкий уровень шума и высокую чувствительность. Такие ВТСП смесители представляют особый интерес для задач беспроводной связи, спектроскопии, систем безопасности, радиоастрономии и т.д. При этом для ряда задач возникает необходимость размещения устройства в ограниченном пространстве, что накладывает требования на максимальные размеры смесителя. Уменьшить размеры смесителя возможно разместив все его элементы полностью на чипе. К тому же благодаря компактности такой интегральный смеситель будет обладать большей эффективностью передачи сигнала, а значит, и меньшими потерями, по сравнению со смесителями с пространственно разнесенными элементами. В нашей работе исследуется дизайн интегрального смесителя, оптимизированного для низкочастотного опорного сигнала до 10 ГГц, сопряженного с широкополосной логопериодической антенной.

## 1. Электромагнитное моделирование интегрального смесителя

Важной конструктивной частью, выполняющей роль приемника ТГц сигнала, исследуемого интегрального смесителя является логопериодическая антенна [7, 8]. Выбор данного типа антенны обусловлен ее широкополосностью и возможностью приема сигнала в плоскости перпендикулярной плоскости антенны. Основными параметрами, отвечающими за геометрию этого типа антенн, являются углы  $\alpha$  и  $\beta$ , определяющие длину лепестков, параметр  $n$  – число лепестков, и их радиусы [9]:

$$R_n = \tau^{(n-1/2)} r_1, r_{n+1} = \tau^n r_1. \quad (1)$$

В исследуемом смесителе использовалась антенна со следующими параметрами:  $\alpha = 50^\circ$ ,  $\beta = 50^\circ$ ,  $r_1 = 19$  мкм,  $\tau = 1,6$ ,  $n = 7$ ; и внешним диаметром 1290 мкм. В центре антенны был расположен ВТСП джозефсоновский переход, представляющий собой нелинейный элемент и использующийся для смешения высокочастотного (ВЧ) сигнала с сигналом гетеродина. Данная логопериодическая антенна была промоделирована в диапазоне частот 50-800 ГГц [9]. Антенна размещалась на подложке из фианита (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 24$ ) толщиной 500 мкм, покрытой тонким слоем серебра (электропроводность  $\sigma = 6,3012 \times 10^7$  См м<sup>-1</sup>). На обратной стороне подложки размещалась кремниевая ( $\epsilon = 11,9$ ) линза диаметром 4 мм (рис. 1). Смоделированные диаграммы направленности логопериодической антенны на частотах 600 ГГц и 800 ГГц представлены на рис. 2а,б; S-параметры антенны – на рис. 2в. На резонансной частоте 600 ГГц антенна имеет высокую направленность с величиной главного лепестка 13 дБи, угловой шириной 7,6 град по уровню -3 дБ от максимума и уровнем боковых лепестков -2,8 дБ (рис. 2а); на частоте 800 ГГц величина главного лепестка составила 12,4 дБи, угловая ширина 12,4 град по уровню -3 дБ от максимума, уровень боковых лепестков – 4,1 дБ (рис. 2б). В диапазоне частот от 150 до 800 ГГц антенна показала хорошие приемные характеристики с  $S_{1,1} < -5$  дБ (рис. 2в).

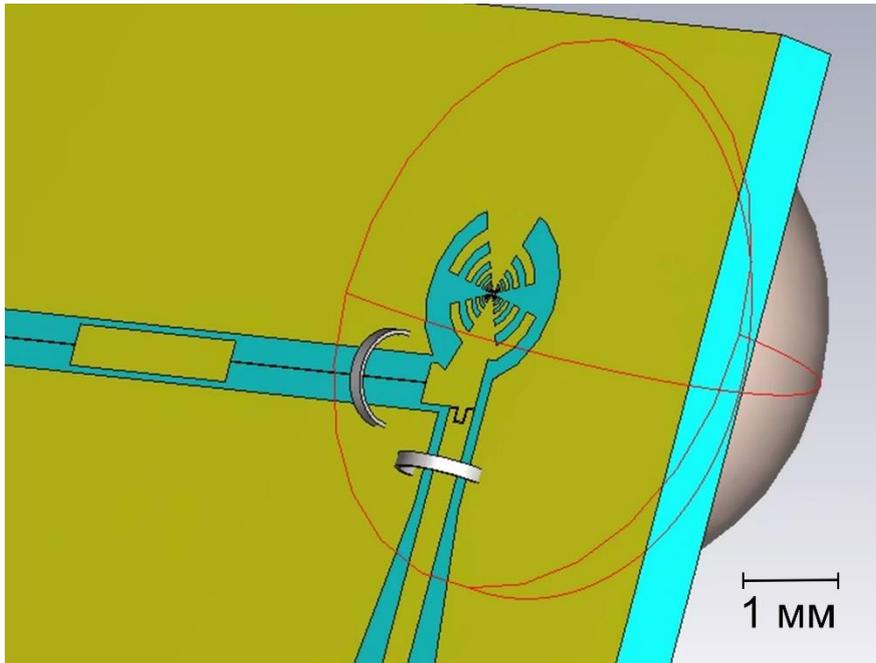


Рис. 1. Общий вид системы с логопериодической антенной и линзой.

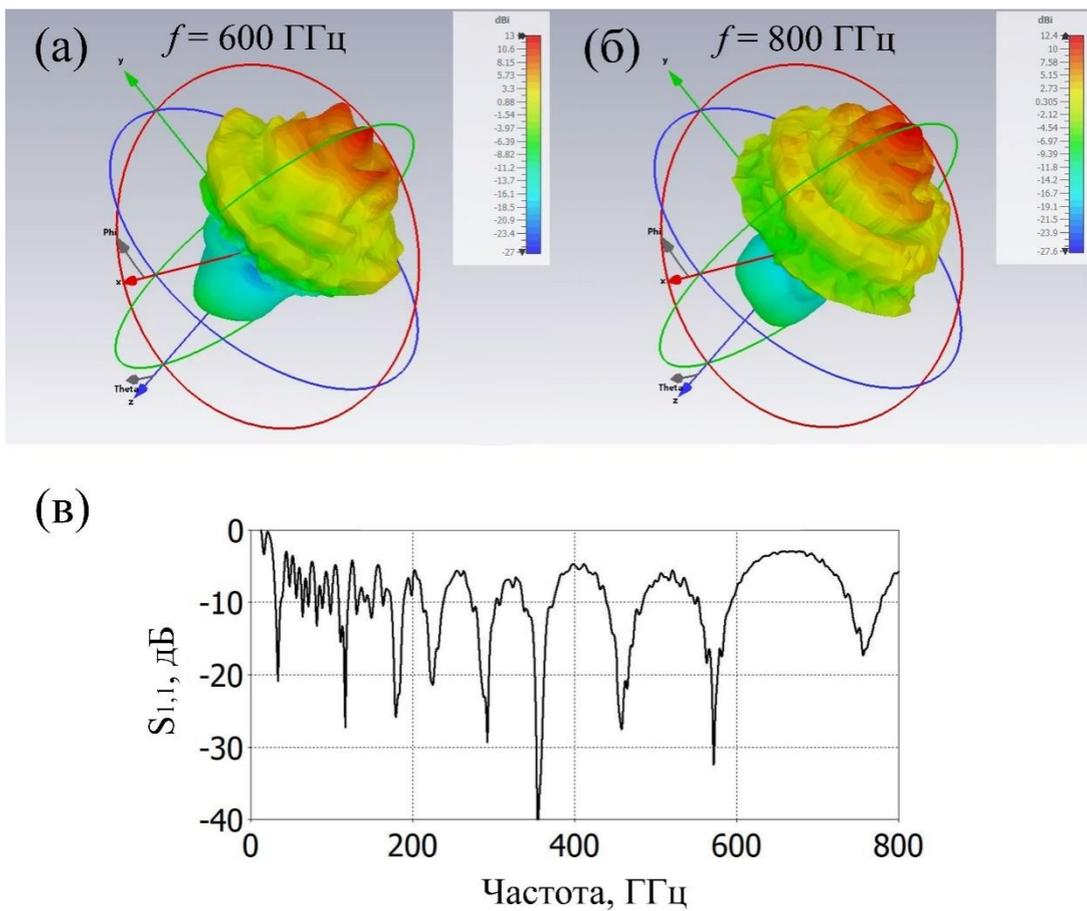


Рис. 2. Диаграммы направленности логопериодической антенна  
 (а) на частоте 600 ГГц, (б) на частоте 800 ГГц,  
 (в)  $S_{1,1}$  – параметр логопериодической антенны.

Дизайн ВТСП интегрального смесителя показан на рис. 3. Диплексер, смещающий тройник и логопериодическая антенна со встроенным джозефсоновским переходом располагаются на одном чипе. В представленной системе сигнал накачки гетеродина (LO) передается на логопериодическую антенну через полосовой фильтр длиной  $L_{LO}$ , терагерцовый ВЧ сигнал принимается антенной, а затем сигнал промежуточной частоты (ПЧ) проходит через фильтр нижних частот длиной  $L_{IF}$  на приемник ПЧ сигнала. Копланарный смещающий тройник на основе резисторной и конденсаторной цепей предназначен для разделения сигнала постоянного тока и сигнала ПЧ. Развязывающая емкость формируется путем разрыва центральной линии копланара. Контактные площадки постоянного тока расположены так, чтобы можно было использовать четырехточечный метод для измерения вольтамперной характеристики и установки оптимальной рабочей точки джозефсоновского смесителя. Алюминиевые проволочки используются для электрической связи земли копланара на всем чипе. При проектировании расположенных на чипе фильтров использовались аналитические оценки [10] с дальнейшим уточнением размеров в ходе электромагнитного моделирования. Тонкий слой пленки  $YBaCuO$ , расположенный под слоем серебра и повторяющий его форму, не учитывался в моделировании, поскольку он обладает большим значением поверхностного сопротивления, чем серебряная пленка в рассматриваемом ТГц диапазоне частот и не оказывает влияния на результат моделирования.

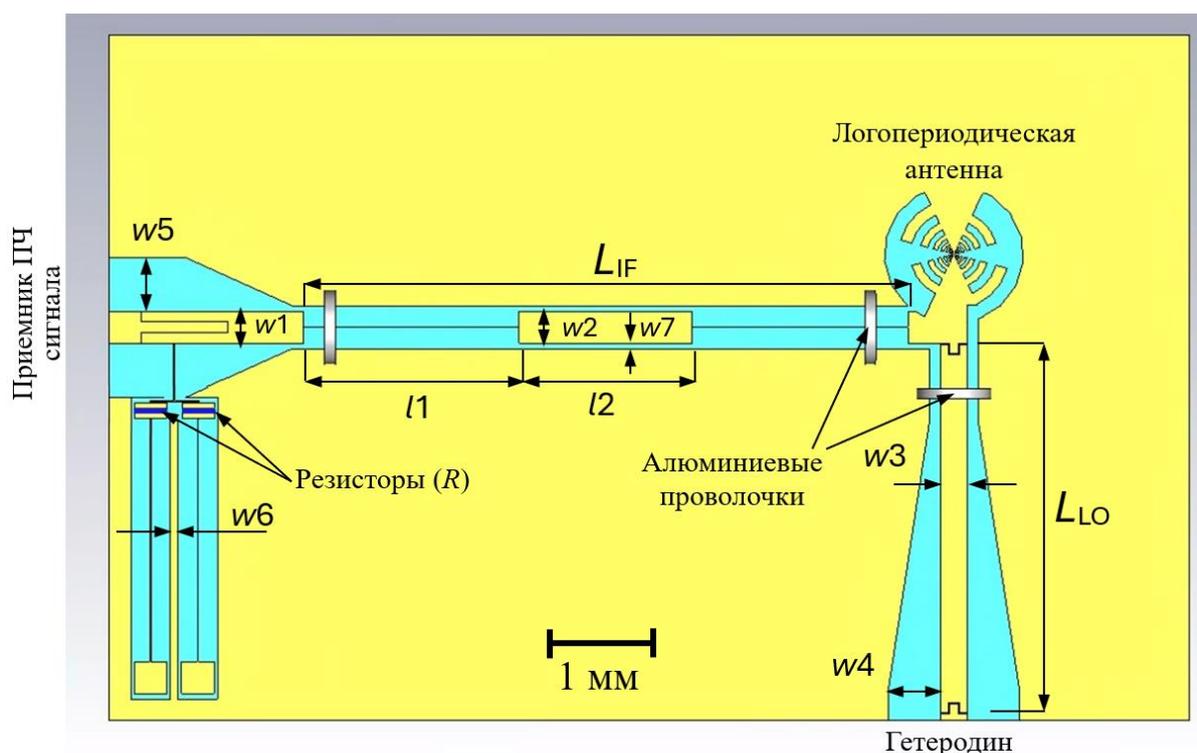


Рис. 3. Дизайн интегрального смесителя.

Параметры смесителя, обозначенные на рис. 3 представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры смесителя.

Длина фильтра канала гетеродина, $L_{LO}$	3450 мкм
Длина фильтра канала ПЧ, $L_{IF}$	5600 мкм
$l_1$	2000 мкм
$l_2$	1600 мкм
$w_1$	300 мкм
$w_2$	300 мкм
$w_3$	250 мкм
$w_4$	480 мкм
$w_5$	500 мкм
$w_6$	70 мкм
$w_7$	50 мкм
Сопротивление резисторов, $R$	500 Ом

В моделировании YBCO джозефсоновский переход представлен в виде дискретного порта. Отметим важность правильного задания импеданса дискретного порта, так, на высоких частотах в сотни гигагерц, импеданс ВТСП джозефсоновского перехода близок к нормальному сопротивлению [11, 12] и составляет несколько единиц Ом, тогда как для низких частот, соответствующих сигналам гетеродина и ПЧ сигнала, импеданс перехода

близок к динамическому сопротивлению в несколько десятков Ом. В моделировании учитывалась необходимость дальнейшего согласования смесителя с внешними подводными проводами, для этой цели копланарные линии, ведущие к приемнику ПЧ сигнала, и копланарные линии, ведущие к гетеродину, спроектированы так, чтобы на краях чипа иметь импеданс 50 Ом. Для разделения сигналов ПЧ и гетеродина использовался полосовой фильтр с полосой пропускания 7,1-9,5 ГГц и фильтр нижних частот с полосой пропускания до 4,8 ГГц. Распределение поверхностных токов на частотах 2,5 ГГц и 8,5 ГГц показаны на рис. 4а,б. Из рисунка видно, что благодаря реализации фильтрации на чипе происходит разделение каналов по частоте опорного сигнала и сигнала промежуточной частоты.

Моделируемые параметры  $S_{IF}$  и  $S_{LO}$  представлены на рис. 4в. Параметр  $S_{LO}$  (красная линия) показывает коэффициент передачи сигнала гетеродина через полосовой фильтр на логопериодическую антенну, а параметр  $S_{IF}$  (черная линия) показывает коэффициент передачи ПЧ сигнала от логопериодической антенны через фильтр нижних частот на приемник ПЧ сигнала.

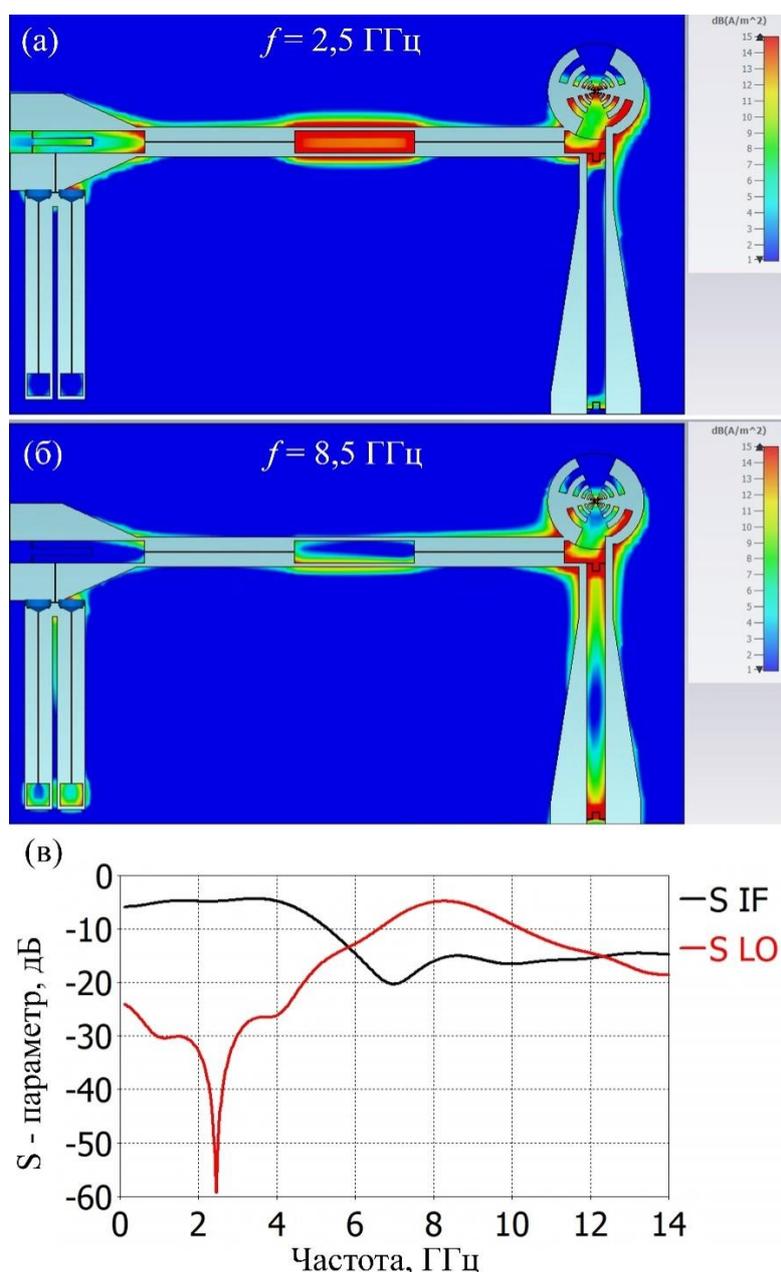


Рис. 4. Распределение поверхностных токов (а) на частоте 2,5 ГГц, (б) на частоте 8,5 ГГц; (в)  $S$  – параметры интегрального смесителя.  $S_{LO}$  (красная линия) – коэффициент передачи сигнала гетеродина на логопериодическую антенну;  $S_{IF}$  (черная линия) – коэффициент передачи ПЧ сигнала на приемник ПЧ сигнала.

## 2. Оценка эффективности преобразования интегрального смесителя

Для оценки эффективности работы смесителя была использована простая аналитическая теория, предложенная авторами [13], дополняющая и объединяющая результаты работы других групп [14-18]. Одной из важнейших характеристик смесителя является эффективность преобразования, которая определяется как отношение мощности ПЧ к мощности ВЧ сигнала:

$\eta = P_{IF} / P_{RF}$ . Эффективность преобразования смесителя зависит от целого ряда параметров: частоты ВЧ сигнала  $f_{RF}$  и сигнала гетеродина  $f_{LO}$  (или номера гармоники  $N$ ), температуры, тока смещения, параметров джозефсоновского перехода.

Для получения максимального значения мощности ПЧ сигнала критическое значение имеет правильный выбор тока (напряжения) смещения приемника. В случае смещения на высокой гармонике оптимальная рабочая точка должна быть выбрана исходя из условия  $V_{DC} \approx 0.5 f_{RF} h/2e$ , или:

$$V_{DC} \approx (N/2 - 1/2) f_{LO} h/2e \quad (2)$$

При неоптимальном выборе мощности гетеродина ступени Шапиро колеблются и оптимальна рабочая точка будет перемещаться от одной ступени к другой.

Для аналитической оценки оптимального значения мощности гетеродина может быть использована следующая формула [13]:

$$\text{optimal } P_{LO} \approx I_C V_C / 32 [(f_{LO}/f_C + 1,4)^2 + 2\pi f_{LO}/f_C (N/2 - 1)]^2 \quad (3)$$

Здесь  $I_C$ ,  $R_N$  – критический ток и нормальное сопротивление джозефсоновского перехода,  $V_C = I_C R_N$ ,  $f_C = I_C R_N / \Phi_0$  – характеристическая частота перехода.

Следующим важным параметром, отвечающим за режим работы смесителя, является мощность ВЧ сигнала. В случае превышения  $P_{RF}$  критического значения отклик смесителя  $P_{IF}(P_{RF})$  перестает быть линейным и наблюдается насыщение джозефсоновского перехода. При работе в оптимальной рабочей точке и с оптимальным значением мощности гетеродина максимальная мощность на промежуточной частоте достигается при  $P_{RF} \approx P_{LO}$  [2]. Однако в зависимости от параметров джозефсоновского перехода и частоты ВЧ сигнала максимальное значение мощности  $P_{RF}$  может быть меньше мощности  $P_{LO}$ .

Мощность ПЧ сигнала в оптимальной рабочей точке пропорциональна мощности высокочастотного сигнала [13]:

$$\max P_{IF} \leq \text{optimal } P_{LO} (R_D/8R_N f_C/f_{RF})^2 (N/2)^{-2/3} \quad (4)$$

где  $R_D$  – дифференциальное сопротивление джозефсоновского перехода.

В общем случае с учетом того, что максимальная мощность на промежуточной частоте достигается при  $P_{RF} \approx P_{LO}$ , можно получить оценку нижней границы эффективности преобразования в виде  $\eta \approx \max P_{IF} / P_{RF} = \max P_{IF} / \text{optimal } P_{LO}$ .

С учетом того, что дифференциальное сопротивление джозефсоновского перехода в свою очередь так же зависит от номера гармоники, итоговое значение мощности ПЧ будет иметь более резкую зависимость от номера гармоники, чем  $N^{-2/3}$ , и характеризоваться зависимостью близкой к  $P_{IF} \propto N^{-1}$ .

Экспериментальное исследование зависимости эффективности преобразования от номера гармоники проводилось в нескольких исследовательских группах [19-21], при этом степенная зависимость эффективности преобразования смесителей оказалась существенно различной. Для оценки работы интегрального смесителя мы провели сравнение результатов аналитических расчетов с экспериментальными данными, полученными для смесителя с близким значением частоты гетеродина  $f_{LO} = 8,75$  ГГц, но отличающимся по частоте ВЧ сигнала  $f_{RF} = 70,03$  ГГц, осуществляющего смешение на  $N = 8$  номере гармоники. Для интегрального смесителя использовались следующие параметры:  $f_{LO} = 8,5$  ГГц,  $f_{RF} = 600$  ГГц,  $N = 70$ ,  $I_C = 245$  мкА,  $R_N = 10$  Ом.

Для проверки адекватности предсказаний используемой теории проведено сравнение с экспериментальными данными из статьи [19]. На рис. 5 аналитические кривые представлены сплошными линиями, эксперимент отмечен символами: черная сплошная линия и кружки соответствуют случаю  $R_N = 10$  Ом,  $I_C R_N = 2.45$  мВ, красная линия и квадраты –  $R_N = 18$  Ом,  $I_C R_n = 1,53$  мВ, синяя линия и треугольники –  $R_n = 80$  Ом,  $I_C R_n = 1,8$  мВ. Было получено, что аналитическая оценка предсказывает большие значения эффективности преобразования, чем значения, измеряемые в эксперименте. Такое превышение аналитических значений эффективности преобразования над экспериментальными значениями можно объяснить отсутствием учета в теории

потерь на согласование, потерь в линиях передачи и тракте. Для фитовки экспериментальных данных аналитические кривые были сдвинуты на следующие значения: черная кривая – на 14 дБ, зеленая – на 22 дБ, красная – на 21 дБ. Необходимость сдвига аналитических кривых на разные величины может быть обусловлена различными импедансов образцов, что в свою очередь могло привести к различиям в согласовании и потерях. Таким образом, согласно рис. 5 можно говорить о качественном совпадении аналитических и экспериментальных данных. Значения эффективности преобразования для интегрального смесителя (не отображен на рисунке) близок к графику, соответствующему экспериментальному случаю, представленному черной сплошной линией, однако находится чуть ниже нее. Меньшее значение эффективности преобразования, полученное для интегрального смесителя, обусловлено смешением с внешним сигналом большей частоты, относительно экспериментального случая. Отсюда, отметим, что на практике необходимо находить компромисс между способностью принимать высокочастотные сигналы большей частоты и возникающими в результате потерями на преобразование.

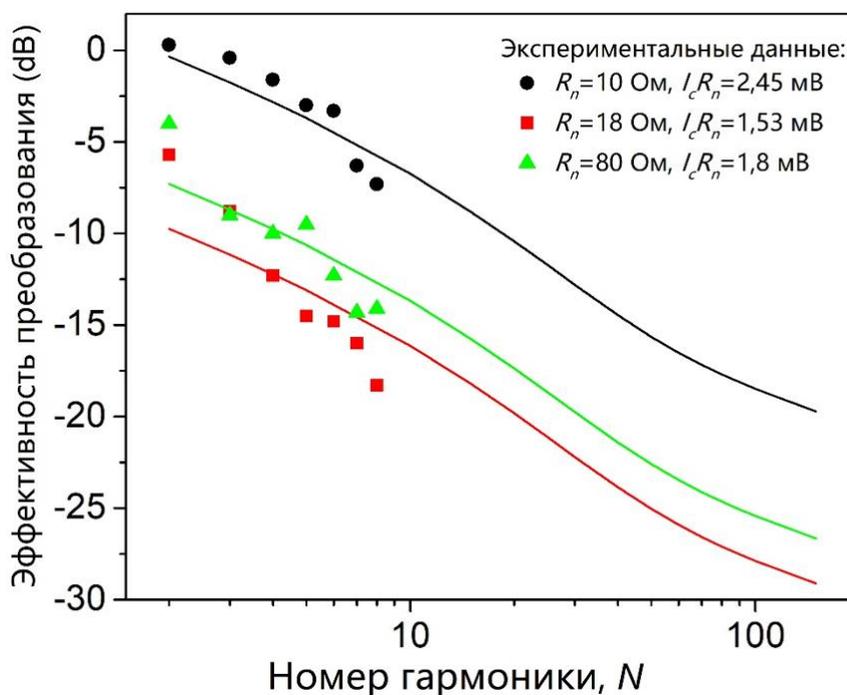


Рис. 5. Зависимость эффективности преобразования смесителя от номера гармоники: символы – экспериментальные значения из статьи [19], сплошные линии – аналитическая оценка.

Кроме того, проведено аналитическое сравнение важной для практических измерений характеристики – максимальной мощности ПЧ от температуры. Из рис. 6 видно, что с ростом температуры максимальная мощность ПЧ падает, причем начиная с температуры порядка 50 К скорость падения мощности ПЧ значительно возрастает. Меньшее значение мощности ПЧ для интегрального смесителя относительно оценки мощности ПЧ для экспериментальных данных обусловлено смешением на более высокой гармонике.

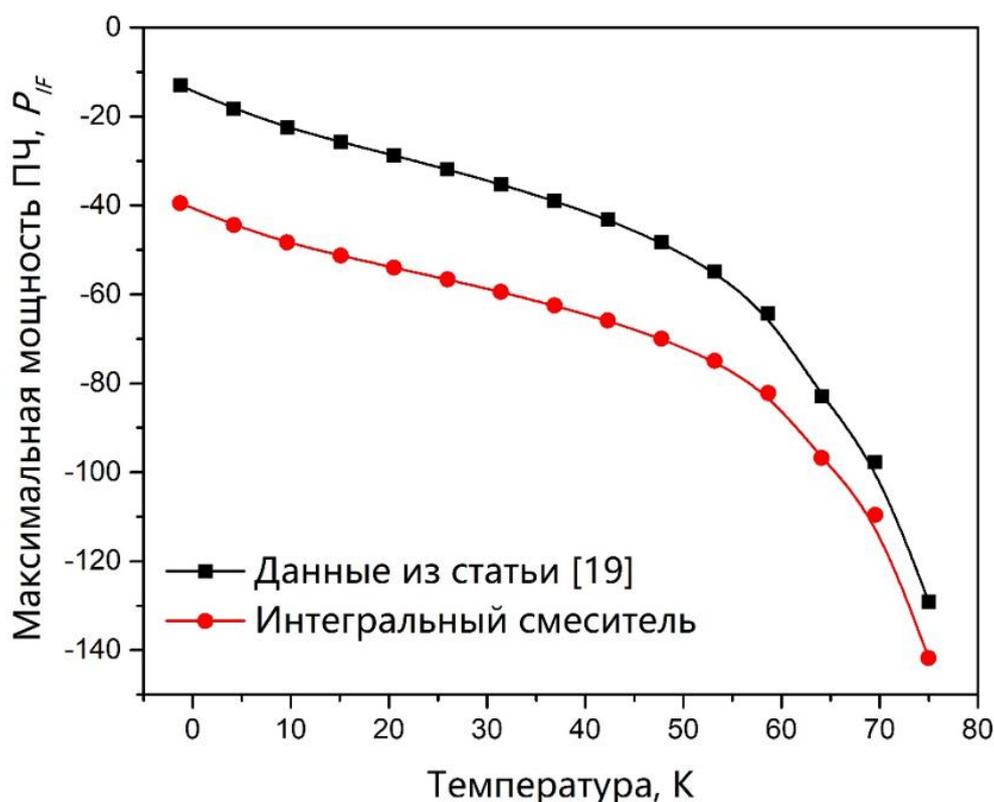


Рис. 6. Аналитическая оценка зависимости максимальной мощности ПЧ сигнала  $P_{IF}$  от температуры: черные квадраты и сплошная линия соответствуют данным из статьи [19]; красные круги и сплошная линия – интегральному смесителю.

## Заключение

В работе был предложен и исследован интегральный ВТСП джозефсоновский смеситель. Благодаря размещению смесителя полностью на чипе такой смеситель обладает компактными размерами и меньшими потерями на преобразование сигнала. При электромагнитном моделировании частота гетеродина составила 8,5 ГГц, а частота внешнего ВЧ сигнала 600 ГГц. Параметры моделирования (размеры структуры, материал подложки, параметры линзы, частоты гетеродина и ВЧ сигнала) выбирались таким образом, чтобы соответствовать реалистичным значениям и позволить изготовить такой смеситель на практике. В частности, при моделировании была учтена необходимость согласования смесителя с внешней системой с импедансом 50 Ом. Оценка эффективности преобразования моделируемого интегрального смесителя проводилась на основе предложенной авторами аналитической теории и проведению сравнения результатов с экспериментальными данными. Благодаря использованию в смесителе логопериодической антенны, исследуемый смеситель позволяет принимать ВЧ-сигнал в широком диапазоне частот и может быть использован в составе приемной системы для широкого круга задач, включая радиоастрономические наблюдения, а также задачи быстрой беспроводной связи.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10384-Р).

## Литература

1. Kleine-Ostmann T., Nagatsuma T. A review on terahertz communications research. *J. Infrared Millim. Terahz. Waves.* 2011. V.32. P.143-171. <https://doi.org/10.1007/s10762-010-9758-1>
2. Du J., Bai D.D., Zhang T., Guo Y.J., He Y.S., Pegrum C.M. Optimised conversion efficiency of a HTS MMIC Josephson down-converter. *Supercond. Sci. Technol.* 2014. V.27. №10. P.105002. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/10/105002>
3. Malnou M., Feuillet-Palma C., Ulysse C., Faini G., Febvre P., Sirena M., Olanier L., Lesueur J., Bergeal N. High-T<sub>c</sub> superconducting Josephson mixers for terahertz heterodyne detection. *J. of Appl. Phys.* 2014. V.116. P.074505. <https://doi.org/10.1063/1.4892940>
4. Gao X., Zhang T., Du J., Weily A.R., Guo J.J., Foley C.P. A wideband terahertz high-T<sub>c</sub> superconducting Josephson-junction mixer: electromagnetic design, analysis and characterization. *Supercond. Sci. Technol.* 2017. V.30, P.095011. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa7cc1>
5. Cunnane D., Kawamura J.H., Acharya N., Wolak M.A., Xi X.X., Karasik B.S. Low-noise THz MgB<sub>2</sub> Josephson mixer. *Appl. Phys. Rev.* 2016. V.109. P.112602. <https://doi.org/10.1063/1.4962634>
6. Gao X., Zhang T., Du J., Guo Y.J. Design, modelling and simulation of a monolithic high-T<sub>c</sub> superconducting terahertz mixer. *Supercond. Sci. Technol.* 2018. V.31. P.115010. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aade5b>
7. Anfertev V.A., Masterov D.V., Parafin A.E., Revin L.S. Experimental study of a harmonic mixer based on a series chain of YBaCuO bicrystal Josephson junctions in zero-bias operation. *Physics of the Solid State.* 2024. V.66, №6. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/58690>
8. Huo Y., Taylor G.W., Bansal R. Planar Log-Periodic Antennas on Extended Hemispherical Silicon Lenses for Millimeter/Submillimeter Wave Detection Applications. *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* 2002. V.23. P.819–839. <https://doi.org/10.1023/A:1015738932198>

9. Glushkov E.I., Chiginev A.V., Kuzmin L.S., Revin L.S. A broadband detector based on series YBCO grain boundary Josephson junctions. *Beilstein J Nanotechnol.* 2022. V.13. P.325-333. <https://doi.org/10.3762/bjnano.13.27>
10. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. 4rd ed. Wiley: USA. 2011.
11. Cortez A.T., Cho E.Y., Li H., Cunnane D., Karasik B. Tuning Y-Ba-Cu-O Focused Helium Ion Beam Josephson Junctions for Use as THz Mixers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* 2019. V.29. №5. P.1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2905166>
12. Shimakage H., Uzawa Y., Tonouchi M., Wang Z. Noise temperature measurement of YBCO Josephson mixers in millimeter and submillimeter waves. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1997. V.7. P.2595–2598. <https://doi.org/10.1109/77.621770>
13. Matrozova E.A., Revin L.S. Operation With Terahertz Mixer Based on YBaCuO Josephson Junction: Analysis and Numerical Simulation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* 2024. V.34. №9. P.1-8. <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3409064>
14. Likharev K.K., Ulrich B.T. *Systems with Josephson junctions – Theoretical principles*. Moscow Univ. Pub. 1978. P. 447.
15. Zavaleev V.P., Likharev K.K. Performance limits of the Josephson junction microwave receivers. *IEEE Trans. Magn.* 1981. MAG-17. P.830. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1981.1061122>
16. Taur Y. Josephson-Junction Mixer Analysis Using Frequency Conversion and Noise-Correlation Matrices. *IEEE Trans. Electron Devices.* 1980. V.ED-27. P.1921-1928. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1980.20129>
17. Schoelkopf R.J. Studies of noise in Josephson-effect mixers and their potential for submillimeter heterodyne detection. PhD Thesis. *California Institutes of Technology.* 1995.

18. Malnou M., Feuillet-Palma C., Ulysse C., Faini G., Febvre P., Sirena M., Olanier L., Lesueur J., Bergeal N. High-Tc superconducting Josephson mixers for terahertz heterodyne detection. *J. of Appl. Phys.* 2014. V.116. P.074505. <https://doi.org/10.1063/1.4892940>
19. Kita S., Fujizawa K. Performances of Josephson junction harmonic mixers with harmonic numbers 1-8 at 70 GHz. *Jap. Journ. Appl. Phys.* 1982. V.21. P.497-503. <https://doi.org/10.1143/JJAP.21.497>
20. Chen J., Myoren H., Nakajima K., Yamashita T. THz mixing properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> grain boundary Josephson junctions on bicrystal substrates. *Physica C*. 1997. V.293. P.288-291. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(97\)01559-1](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(97)01559-1)
21. Du J., Pegrum C.M., Gao X., Weily A.R., Zhang T., Guo Y.J., Foley C.P. Harmonic mixing using a HTS step-edge Josephson junction at 0.6 THz frequency. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2017. V.27. P.1500905. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2636081>

**Для цитирования:**

Матрозова Е.А., Ревин Л.С. Исследование интегрального гармонического смесителя на основе ВТСП джозефсоновского перехода // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.5>