

Смеситель частот диапазона 13...67 ГГц

Д. С. Данилов^{1,2✉}, А. В. Дроздов^{2,3}, Ц. М. Батоев^{1,2}
Ю. А. Ламанов^{1,2}, А. С. Загородний^{1,2}, Н. Д. Малютин¹

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

²АО «НПФ "Микран"», Томск, Россия

³ООО "Радио Гигабит", Нижний Новгород, Россия

✉ danilov.ds@micran.ru

Аннотация

Введение. С каждым годом требования к характеристикам измерительной техники растут. Одной из таких характеристик является полоса пропускания прибора. Данный факт вынуждает создавать широкополосные микросхемы для применения в СВЧ-блоках приборов, таких как векторные анализаторы цепей (ВАЦ) и анализаторы спектра. Одной из микросхем, применяемой в блоках приемников подобного оборудования, является смеситель частот. От диапазона частот смесителя зависит полоса частот приемника и, как следствие, полоса пропускания всего прибора в целом.

Цель работы. Исследование и разработка сверхширокополосной интегральной схемы смесителя частот диапазона 13...67 ГГц на основе технологии квазивертикальных диодов Шоттки на подложке GaAs АО «НПФ "Микран"».

Материалы и методы. Проведен анализ существующих классических и модифицированных вариантов трансформаторов, применяемых в смесителях. Ни один из данных трансформаторов не удовлетворяет требованиям указанной полосы пропускания. Предложена модификация схемы трансформатора, которая позволила добиться рабочего диапазона частот 10...70 ГГц. На базе полученного трансформатора и диодной GaAs-технологии АО «НПФ "Микран"» разработана полная топология смесителя. Проведен электродинамический анализ интегральной схемы. При измерениях применялись ВАЦ до 67 ГГц.

Результаты. Представлены результаты разработки широкополосного смесителя с полосой рабочих частот 10...67 ГГц. Приведено схемотехническое решение на основе балансной схемы с модифицированными трансформаторами и цепью вывода промежуточной частоты. Показаны расчетные зависимости и результаты измерений интегральной схемы смесителя. Полученные потери преобразования в диапазоне от 10 до 67 ГГц не более 10 дБ.

Заключение. Предложен вариант доработки схемы трансформатора, разработан новый широкополосный трансформатор с диапазоном рабочих частот от 10 до 70 ГГц. На его основе выполнено моделирование и изготовлена микросхема смесителя. Данная микросхема может использоваться в приемопередающих блоках современных измерительных приборов. По совокупности характеристик микросхема является аналогом смесителя Marki Mikrowave MM1-1467L.

Ключевые слова: интегральная схема, GaAs, смеситель, диоды Шоттки, модификация трансформатора Маршанда

Для цитирования: Смеситель частот диапазона 13...67 ГГц / Д. С. Данилов, А. В. Дроздов, Ц. М. Батоев, Ю. А. Ламанов, А. С. Загородний, Н. Д. Малютин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 89–98. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-89-98

Источник финансирования. Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2023-0014 от 16.01.23).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.07.2023; принята к публикации после рецензирования 09.10.2023; опубликована онлайн 29.11.2023



13...67 GHz Frequency Mixer

Daniil S. Danilov^{1✉}, Alexey V. Drozdov^{2,3}, Tsyren M. Batoev^{1,2},
Yuri A. Lamanov^{1,2}, Andrey S. Zagorodny^{1,2}, Nickolay D. Malyutin¹

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

²JSC "MICRAN", Tomsk, Russia

³Radio Gigabit LLC, Nizhnyi Novgorod, Russia

✉ danilov.ds@micran.ru

Abstract

Introduction. The requirements for the performance of measuring devices, including their operating frequency, are constantly becoming stricter. This encourages the creation of wide-band microcircuits for application in microwave blocks of devices, such as vector network analyzers (VNA) and spectrum analyzers (SA). One of such microcircuits, used in the receiver system, is a frequency mixer. The operating range of the mixer determines the operating range of the measuring instrument.

Aim. Research and development of an ultra-wideband integrated circuit for a 13...67 GHz frequency mixer based on the GaAs QSBD technology by Micran JSC.

Materials and methods. An analysis of existing classic and modified circuit transformers used in mixers was conducted. A modification of the transformer circuit, which allowed a frequency range of 10...70 GHz to be achieved, was proposed. Based on the obtained transformer and GaAs diode technology of Micran JSC, a complete mixer topology was developed and produced. An electrodynamic analysis of the integrated circuit was carried out; measurements were performed using a VNA up to 67 GHz.

Results. A wideband mixer with a frequency range of 10...67 GHz is developed. A circuit design is proposed based on a balanced circuit with modified transformers and an intermediate frequency output circuit. The calculated dependences and measurement results of the integrated circuit of the mixer are presented. The mixer exhibits a conversion loss of less than 10 dB in the range of 10...67 GHz.

Conclusion. A new broadband transformer with a range of operating frequencies from 10 to 70 GHz was developed. On its basis, a mixer microcircuit was simulated and manufactured. This microcircuit can be used in the receiving and transmitting units of modern measuring instruments. In terms of its characteristics, the proposed microcircuit is an analog of the Marki Mikrowave MM1-1467L mixer.

Keywords: integrated circuit, GaAs, mixer, Schottky diodes, Marchand transformer modification

For citation: Danilov D. S., Drozdov A. V., Batoev Ts. M., Lamanov Yu. A., Zagorodny A. S., Malyutin N. D. 13...67 GHz Frequency Mixer. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 5, pp. 89–98. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-89-98

Acknowledgments. The research was supported by the Russian Ministry of Science and Higher Education (project FEWM-2023-0014, 16.01.23).

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 03.07.2023; accepted 09.10.2023; published online 29.11.2023

Введение. Растущие требования к полосе пропускания в системах беспроводной связи и измерительной технике вынуждают разрабатывать интегральные схемы, работающие на более высоких частотах и с большей полосой рабочих частот [1]. Одной из основных монолитно-интегральных схем (МИС), представляющей интерес для использования в широкополосных измерительных приборах, таких как векторный

анализатор цепей (ВАЦ) или анализатор спектра, является смеситель [2, 3]. Нередко пассивные смесители частот строятся по двухбалансной [4, 5] и звездообразной [6, 7] схемам с использованием трансформаторов на основе мостов Маршанда и их модификаций. Подобные трансформаторы работают в полосе частот не больше двух октав и существенно ограничивают полосу рабочих частот смесителя.

Целью статьи является исследование и разработка монолитно-интегральной схемы смесителя частот диапазона 13...67 ГГц на основе новой схемы широкополосного трансформатора. Представлены схемотехническое решение, топология, сравнения результатов проектирования и измерения.

Разработка схемы смесителя. На рис. 1, а представлена классическая двойная балансная схема смесителя. Данная схема имеет ряд преимуществ по сравнению с однобалансной схемой, таких как улучшенное подавление паразитных гармоник, развязка, более высокий и равномерный коэффициент преобразования [8]. Недостатком подобной схемы является цепь вывода промежуточной частоты, так как она существенно ограничивает полосу рабочих частот смесителя по радиочастотному сигналу (RF). Для устранения этого изменена цепь вывода промежуточной частоты (IF). Модифицированная схема приведена на рис. 1, б. Главным преимуществом этой схемы является увеличение полосы рабочих частот смесителя, а также более высокий уровень изоляции между RF и гетеродином (LO) [9]. Сбалансированные радиочастотные сигналы подаются через полюсы А–В диодного кольца, тогда как сбалансиро-

ванные сигналы LO подаются через полюсы С–D. Полюсы А–В и С–D действуют как виртуальная земля для LO и RF соответственно. Поэтому сдвиг фазы сигнала между полюсами А–В и С–D приводит к высокой изоляции RF–LO. Следовательно, амплитудный и фазовый дисбаланс трансформатора напрямую влияет на уровень подавления паразитных гармоник и коэффициент преобразования [10].

Трансформатор. Разработка трансформатора при использовании балансных схем смесителя является наиболее важной задачей, поскольку именно от него зависит полоса рабочих частот, развязка и коэффициенты отражения по портам смесителя. Трансформатор на основе связанных линий представляет собой шестиполюсник с одним входом и двумя выходами. Для аналитического расчета часто такой трансформатор представляют в виде восьмиполюсника, один из выходов которого короткозамкнут [11]. Такой восьмиполюсник симметричен относительно линии А (рис. 2).

Длина связанных линий четвертьволнового трансформатора $\lambda/4$ выбирается исходя из средней частоты требуемого диапазона. Геометрические размеры трансформатора и размеры компонентов выбирались в ходе оптимизации топологии и настройки трансформатора для достижения соответствующих характеристик.

Наиболее популярным трансформатором для разработки смесителей частот является трансформатор Маршанда [12], который обеспечивает малые вносимые потери, широкую полосу пропускания и хороший баланс амплитуды и фазы (рис. 3).

Однако при разработке смесителей частот с диапазоном от двух и более октав трансформатор

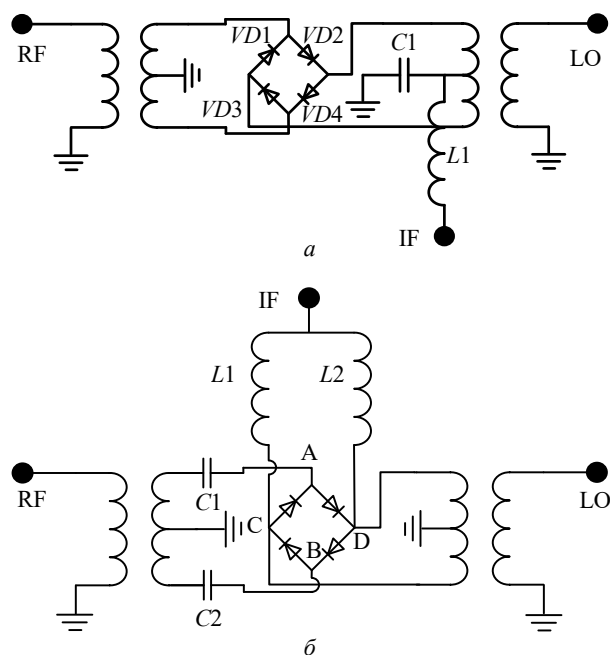


Рис. 1. Балансная схема смесителя: а – классическая; б – модифицированная

Fig. 1. Balance scheme: a – classical; б – modified

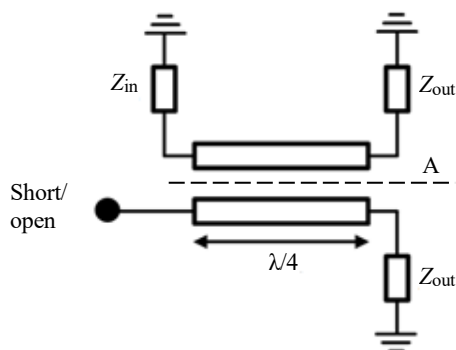


Рис. 2. Схема трансформатора на основе связанных линий

Fig. 2. Transformer scheme

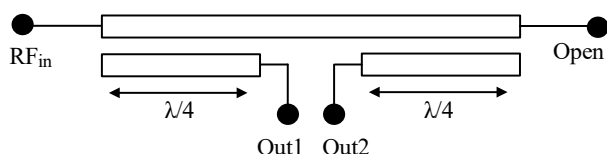


Рис. 3. Трансформатор на основе мостов Маршанда
Fig. 3. Transformer based on Marshand balun

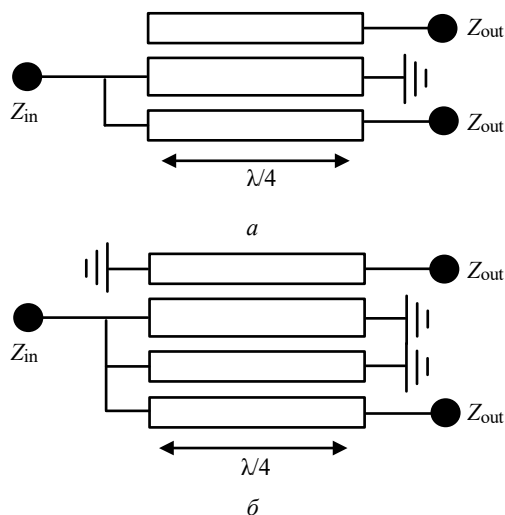


Рис. 4. Модифицированные широкополосные трансформаторы на основе: а – трехпроводной линии; б – двух пар двухпроводных линий
Fig. 4. Modified broadband transformers: а – based on a three-wire line; б – based on two pairs of two-wire lines

по схеме мостов Маршанда реализуем при большом коэффициенте связи между линиями. Уменьшение расстояния между проводниками приводит к повышению коэффициента связи, однако нередко технология производства ограничивает минимальное расстояние между проводниками на уровне 5...8 мкм. По этой причине возможности применения подобных трансформаторов ограничены при разработке смесителей на основе планарных технологий. Одним из способов увеличения частотного диапазона трансформаторов по схеме Маршанда может быть использование воздушных линий, что неприменимо при проектировании МИС, для реализации же на микрополосковых линиях более широкополосных трансформаторов необходимо прибегнуть к другим схемам (рис. 4).

Схема, представленная на рис. 4, а, отражает класс трансформаторов, запатентованных в 2000 г. [13]. Как правило, аналитический метод расчета параметров таких трансформаторов на основе микрополосковых линий затруднен по ряду причин, поэтому прибегают к численным методам расчета. Простой метод проектирова-

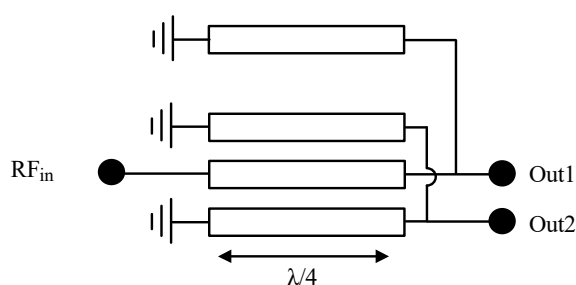


Рис. 5. Схема трансформатора диапазона 10...70 ГГц
Fig. 5. 10...70 GHz band transformer circuit

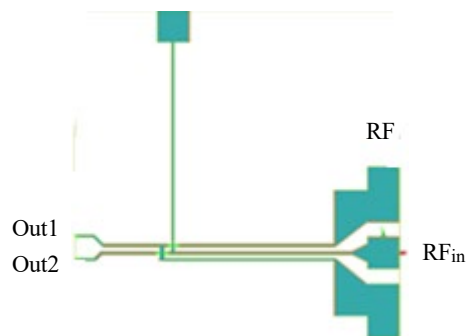


Рис. 6. Топология трансформатора диапазона 10...70 ГГц
Fig. 6. Topology of the 10...70 GHz band transformer

ния для такого типа структуры найден в более ранней публикации [14]. Метод состоит в замене трехпроводной линии на две двухпроводные линии, как показано на рис. 4, б.

В настоящей статье представлена схема трансформатора (рис. 5) и реализована его топология (рис. 6), которая является модификацией топологии, примененной в [9, 10].

Трансформатор работает в диапазоне частот 10...70 ГГц. На рис. 5 и 6 обозначены полюса трансформатора как шестиполюсника: RF_{in} – вход; $Out1$, $Out2$ – противофазные выходы. Пример расчета схем подобных трансформаторов представлен в [15–17] и основан на нахождении элементов ABCD-матрицы для четного и нечетного режимов возбуждения связанных линий и преобразования в матрицу S-параметров для шестиполюсной цепи. В [14] представлен схожий пример расчета матрицы S-параметров через нахождение Y-параметров.

На рис. 7, 8 приведены частотные характеристики трансформатора разработанной топологии: коэффициенты передачи $|S_{21}|$, $|S_{31}|$ и отражения $|S_{11}|$, дисбаланс амплитуд и фаз между портами 2 и 3 трансформатора.

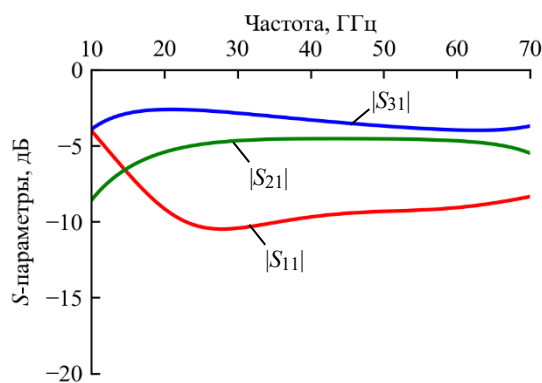


Рис. 7. S-параметры трансформатора
Fig. 7. S-parameters of the transformer

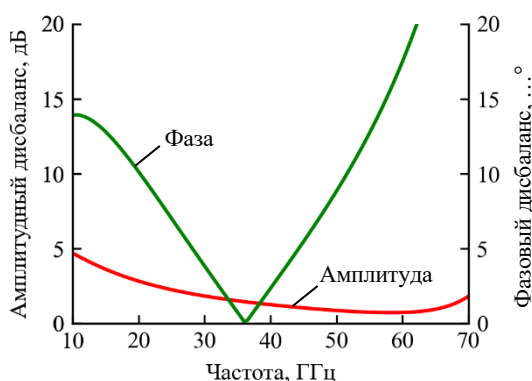


Рис. 8. Амплитудный и фазовый дисбаланс трансформатора

Fig. 8. Amplitude and phase imbalance of the transformer

Как видно из представленных характеристик, значение коэффициента передачи трансформатора составляет -5 дБ в полосе частот, дисбаланс амплитуды не более 5 дБ, дисбаланс фазы не более 25° . Данный трансформатор можно использовать при разработке сверхширокополосных преобразователей частот.

Одним из основных препятствий при разработке широкополосного смесителя является то, что порты на выходе симметрирующего трансформатора подключаются на нелинейную нагрузку в виде диодного кольца, которое, в свою очередь, имеет частотно-зависимый комплексный импеданс. В связи с этим оптимизация конечных характеристик смесителя, таких как коэффициент передачи, коэффициент отражения и развязки, выполняются при моделировании всей топологии смесителя.

Диод. В разработке смесителя применялся квазивертикальный диод Шоттки на базе технологического процесса "GaAs квазивертикальный диод Шоттки (QSBD)" фирмы

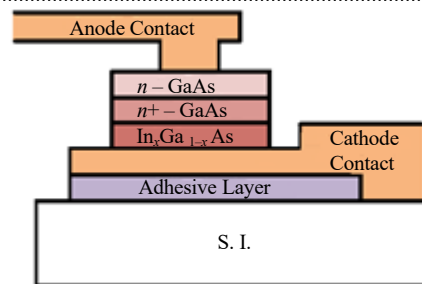


Рис. 9. Гетероструктура диода Шоттки

Fig. 9. Schottky diode heterostructure

АО «НПФ "Микран"». На рис. 9 – гетероструктура, используемая при производстве.

Перед проектированием была создана модель диода, основанная на извлеченной вольт-амперной характеристике, параметрах SPICE и точной 3D-модели конструкции диода. Подробное описание предложенной модели, методов извлечения и ее верификации даны авторами статей [18–20].

Моделирование и измерение смесителя.

На рис. 10 представлена полная топология разработанного смесителя, где Порт 1 – вход сигнала RF; Порт 2 – вход гетеродина; Порт 3 – выход IF. Выбор топологии трансформатора обусловлен требованиями к ширине полосы частот по RF и высоким коэффициентам изоляции LO–RF и RF–IF, что, в свою очередь, может обеспечить только двухбалансная схема.

Как было указано, нагрузкой трансформатора в смесителе является диодное кольцо, а не 50 Ом, как при моделировании трансформатора отдельным устройством. В связи с этим при расчете всей топологии трансформаторы оптимизировались под соответствующую комплексную нагрузку для удовлетворения требуемым характеристикам.

На рис. 10 можно увидеть, как был оптимизирован трансформатор по гетеродину, а также

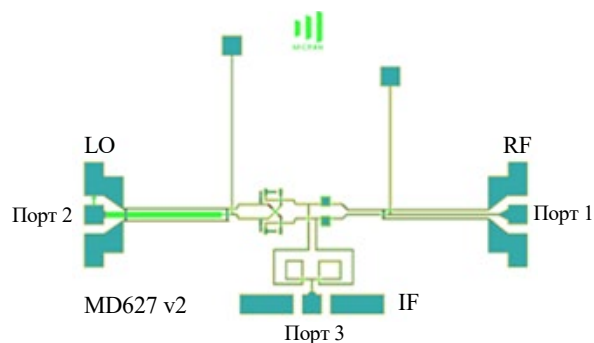


Рис. 10. Топология смесителя 13...67 ГГц

Fig. 10. 13...67 GHz mixer topology

был настроен трансформатор по RF-сигналу, который подключается к диодному кольцу через цепь вывода IF, что дополнительно вносит комплексную нагрузку.

На рис. 11 представлены графики потерь преобразования. Измерения МИС проводились на зондовой станции с применением четырехпортового ВАЦ, один из портов которого выступал в роли LO, а два других в роли источника RF-сигнала и приемника IF-сигнала соответственно.

Получен коэффициент преобразования выше -10 дБ во всем требуемом диапазоне. Измерения выполнены при IF 100 МГц и мощности гетеродина 13 дБм. Коэффициенты отражения (возвратные потери) по RF и IF приведены на рис. 12, 13.

Коэффициент отражения в худшей точке -4 дБ, на частотах выше 8 ГГц – ниже -6 дБ.

На рис. 14 изображены потери преобразования по IF при фиксированной частоте сигнала RF.

На рис. 13 и 14 видно, что IF смесителя достигает 6 ГГц. Сигнал RF при измерениях фиксировался на частоте 60 ГГц.

Как видно из представленных характеристик, смеситель работает в диапазоне 13...67 ГГц. Ухудшение коэффициентов отражения и неравномерность коэффициента преобразования связаны с тем, что выходные трансформаторы нагружены на комплексную нагрузку (диодное кольцо и цепь IF), а также имеется неидеальность балансов фаз на выходах балунов. Особенностью данной микросхемы является использование новых симметрирующих трансформаторов, позволяющих расширить рабочую полосу частот классической схемы балансного смесителя.

В таблице представлено сравнение характеристик изготовленной интегральной схемы с аналогом компании Marki Microwave MM1-1467L [21].

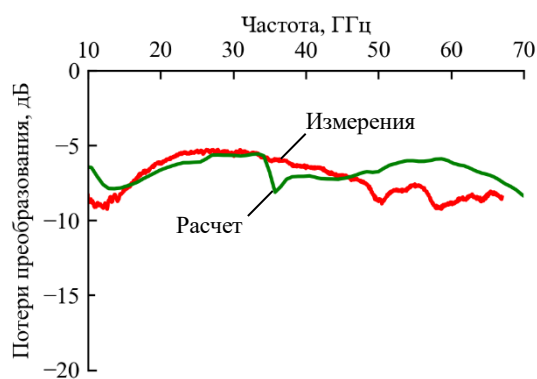


Рис. 11. Сравнение расчета и результатов измерений потерь преобразования

Fig. 11. Comparison of calculation and measurement results of conversion loss

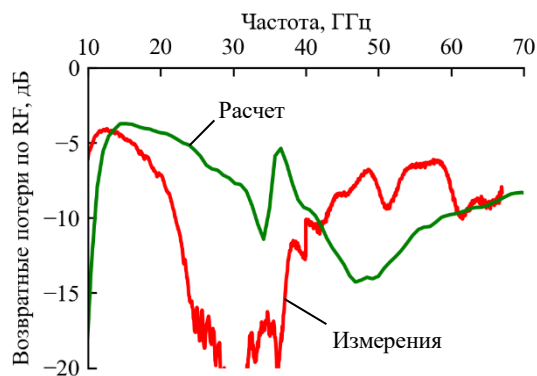


Рис. 12. Сравнение расчета и измерения коэффициента отражения по RF

Fig. 12. Comparison of calculation and measurement of RF return loss

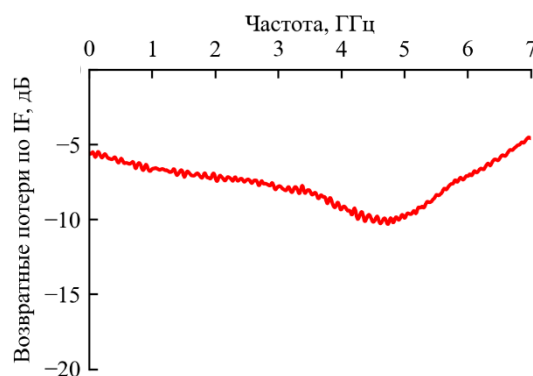


Рис. 13. Результат измерения коэффициента отражения по IF

Fig. 13. Measurement of IF return loss

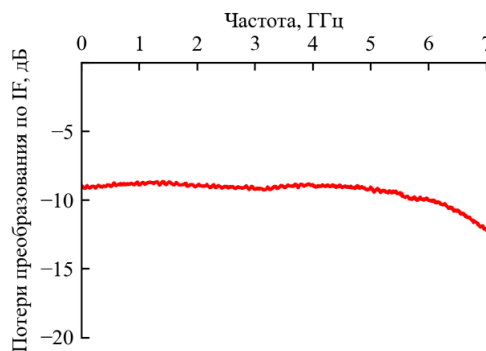


Рис. 14. Значения измерений коэффициента преобразования IF при фиксированном LO

Fig. 14. Measurement of IF conversion loss at a fixed LO

Сравнение с аналогом

Comparison with an analog

Смесители частот	Диапазон рабочих частот по RF, ГГц	$ S_{11} $ по RF, дБ	Коэффициент преобразования, дБ	Диапазон IF, ГГц	Необходимая мощность LO, дБм
MM1-1467L	14...67	–4	–10	24	8...12
Изготовленного	13...67	–4	–8.5	6	9...13

Из таблицы видно, что у полученного смесителя больше диапазон рабочих частот, значительно лучше коэффициент преобразования по IF, но меньше диапазон IF, чем у аналога. По остальным параметрам схемы сравниваемых смесителей схожи.

Заключение. В данной работе представлен выбор, обоснование и расчет нового сверхширокополосного трансформатора диапазона частот

10...70 ГГц. На основе полученной схемы была разработана топология и представлены характеристики смесителя частот диапазона 10...67 ГГц с коэффициентом преобразования не менее –8.5 дБ во всей полосе. Данная микросхема может использоваться как в отдельных блоках, так и при разработке приемников для использования в ВАЦ или анализаторах спектра частот.

Авторский вклад

Данилов Даниил Сергеевич – разработка схемы и топологии МИС; измерение образца; написание текста статьи.

Дроздов Алексей Викторович – настройка топологии смесителя; редактирование статьи.

Батоев Цырен Мункобатоевич – настройка топологии смесителя; обработка полученных экспериментальных данных; редактирование статьи.

Ламанов Юрий Александрович – настройка топологии смесителя; обработка полученных экспериментальных данных; редактирование статьи.

Загородний Андрей Сергеевич – общее руководство исследованием; измерение опытного образца; редактирование статьи.

Малютин Николай Дмитриевич – общее руководство исследованием; обсуждение результатов; редактирование статьи.

Author's contribution

Daniil S. Danilov, development of MIC scheme and topology; sample measurement; writing the text of the article.

Alexey V. Drozdov, setting up mixer topology; article editing.

Tsyren M. Batoev, setting up mixer topology; processing of experimental data obtained; editing the paper.

Yury A. Lamanov, setting of the mixer topology; processing of the received experimental data; editing of the article.

Andrey S. Zagorodny, general management of the research; experimental data processing; editing of the article.

Nickolay D. Malyutin, general management of the study; discussion of the results; editing of the article.

Список литературы

1. Доценко В. В., Малютин Н. Д. Разработки аппаратуры радиолокации, приборостроения и электронной компонентной базы СВЧ: основные результаты выполнения комплексных проектов НИИ систем электрической связи и АО «НПФ "Микран"» // Докл. ТУСУР. 2017. Т. 20, № 3. С. 79–85. doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-79-85

2. Хибель М. Основы векторного анализа цепей. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 504 с.

3. Раушер К. Основы спектрального анализа – Rhode&Shwartz. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 226 с.

4. A 3 GHz to 10 GHz GaAs double balanced mixer / Y. Pu, Z. Huang, S. Pan, G. Wang // IEEE ITOEC. 2017. P. 1083–1086. doi: 10.1109/ITOEC.2017.8122521

5. A highlylinear double balanced Schottky diode S-band mixer / M. Sudow, K. Andersson, P. A. Nilsson, N. Rorsman // IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. 2006. Vol. 16, № 6. P. 336–338. doi: 10.1109/LMWC.2006.875625

6. Novel Miniature and Broadband Millimeter-wave Monolithic Star Mixers / C. Kuo, C. Kuo, C. Kuo, S. Maas, H. Wang // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2008. Vol. 56, № 4. P. 793–802. doi: 10.1109/TMTT.2008.919063

7. Yeom K. W., Ko D. H. A novel 60-GHz monolithic star mixer using gate-drain-connected pHEMT diodes // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53, № 7. P. 2435–2440. doi: 10.1109/TMTT.2005.850402

8. Maas S. A. Microwave Mixers. 2nd ed. Norwood, MA: Artech House, 1993. 384 p.
9. Данилов Д. С., Дроботун Н. Б. GaAs монолитные интегральные схемы широкополосных смесителей частоты на основе диодов с барьером Шоттки // Nanoindustry Russia. 2020. № 13. С. 435–437. doi: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.435.437
10. Drobotun N., Danilov D., Drozdov A. A Decade Bandwidth Mixers Based on Planar Transformers and Quasi-vertical Schottky Diodes Implemented in GaAs MMIC Technology // 2020 50th European Microwave Conf. (EuMC). 2021. P. 957–960. doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338211
11. Leong Y., Ang K., Lee C. A derivation of a class of 3-port baluns from symmetrical 4-port networks // Proc. of IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest. Seattle, USA, 2–7 June 2002. P. 1165–1168. doi: 10.1109/MWSYM.2002.1011855
12. Дроздов А. В., Данилов Д. С. Широкополосный симметрирующий трансформатор на основе мостов Маршанда для применения в интегральных микросхемах // Науч. сессия ТУСУР-2015: материалы докл. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: В-Спектр, 2013. Т. 2. С. 13–16.
13. Tanaka H., Sasaki Y., Hashimoto T. Unbalanced-to-Balanced Converter. US Patent, no. 6.040.745, 21 March, 2000.
14. Cho C., Gupta K. C. A New Design Procedure for Single Layer and Two-Layer Three-Line Baluns // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1998. Vol. 46, № 12. P. 2514–2519.
15. Kian Sen Ang, Robertson I. D. Analysis and design of impedance-transforming planar Marchand baluns // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49, № 2. P. 402–406. doi: 10.1109/22.903108
16. Ahn H., Kim B. Toward Integrated Circuit Size Reduction // IEEE Microwave Magazine. 2008. Vol. 9, iss. 1. P. 65–75.
17. Tunable Impedance Transformer Based on Split Strip Lines / N. D. Malutin, A. V. Andreev, G. A. Mal'yutin, R. M. Sharabudinov // Proc. of Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Tomsk, Russia, 18–20 Apr. 2019. P. 337.
18. Моделирование диодов с барьером Шоттки для применения в монолитных интегральных схемах СВЧ / А. В. Дроздов, Д. С. Данилов, И. В. Юнусов, Г. Г. Гошин // Докл. ТУСУР. 2018. Т. 21, № 1. С. 28–31. doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-28-31
19. Drobotun N., Drozdov A. Broadband Microwave Frequency Doublers with Improved Harmonic Suppression Based on Quasi-Vertical GaAs Schottky Diodes // Proc. of the Electronic Design Innovation Conf. EDICON 2017, Shanghai, China, 25–27 Apr. 2017. P. 1–4.
20. Drozdov A. A 20 to 60 GHz Frequency Doubler MMIC Using a Quasi-Vertical GaAs Schottky Diodes // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 14–16 March 2018. P. 1–4.
21. MM1-1467L GaAs MMIC double balanced mixer Marki Microwave. URL: <https://www.markimicrowave.com/mixers/mm1-1467l.aspx> (дата обращения 20.05.2023)

Информация об авторах

Данилов Даниил Сергеевич – инженер по специальности "Радиотехника" (2015), аспирант кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Руководитель группы разработки монолитно-интегральных систем департамента информационно-измерительных систем АО «НПФ "Микран"». Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – СВЧ-микроэлектроника; измерительная техника на СВЧ.
Адрес: ТУСУР, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия
E-mail: danilov.ds@micran.ru

Дроздов Алексей Викторович – кандидат технических наук (2018), ведущий инженер ООО "РадиоГигабит", инженер АО «НПФ "Микран"», Томск, Россия. Автор более 10 научных работ. Сфера научных интересов – СВЧ-микроэлектроника; измерительная техника СВЧ.
Адрес: ООО "РадиоГигабит", ул. Ошарская, д. 95, к. 2, Нижний Новгород, 603105, Россия
E-mail: Alexey.drozdov@radiogigabit.com

Батоев Цырен Мункобатоевич – магистр по направлению "Радиотехника" (2023) кафедры сверхвысоких частот и квантовой радиотехники ТУСУР, инженер группы разработки МИС в отделе СВЧ-схемотехники АО «НПФ "Микран"». Сфера научных интересов – СВЧ-микроэлектроника.
Адрес: ТУСУР, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия
E-mail: batoev.tsm@micran.ru

Ламанов Юрий Александрович – магистр по направлению "Радиотехника" (2023) кафедры сверхвысоких частот и квантовой радиотехники ТУСУР, инженер группы разработки МИС в отделе СВЧ-схемотехники АО «НПФ "Микран"». Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – СВЧ-микроэлектроника; измерительная техника на СВЧ.
Адрес: ТУСУР, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия
E-mail: yury_lamanov@mail.ru

Загородний Андрей Сергеевич – кандидат технических наук (2014), доцент кафедры сверхвысоких частот и квантовой радиотехники ТУСУР, начальник отдела СВЧ-схемотехники АО «НПФ "Микран"». Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – СВЧ-микроэлектроника; измерительная техника СВЧ. Адрес: ТУСУР, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия
E-mail: andreyzag@micran.ru

Малютин Николай Дмитриевич – доктор технических наук (1993), главный научный сотрудник НИИ систем электрической связи, профессор кафедры конструирования деталей и узлов радиоэлектронной аппаратуры ТУСУР. Автор 160 научных работ. Сфера научных интересов – теория связанных полосковых структур; устройства на их основе; измерение параметров материалов, включая нелинейные кристаллы. Адрес: ТУСУР, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия
E-mail: ndm@main.tusur.ru
<http://orcid.org/0000-0003-0317-9096>

References

1. Dotsenko V. V., Maljutin N. D. Development of Radar Equipment, Microwave Measurements and Electronic Component Base: the Main Results of the Implementation of Complex Projects of the Research Institute of Electrical Communications Systems and JSC "Micran". Proc. of TUSUR University. 2017, vol. 20, no. 3, pp. 79–85. doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-79-85 (In Russ.)
2. Khibel' M. *Osnovy vektornogo analiza tsepei* [Fundamentals of Vector Network Analysis]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2009, 504 p. (In Russ.)
3. Rausher K. *Osnovy spektral'nogo analiza – Rhode&Shwartz* [Basics of Spectral Analysis – Rhode&Shwartz]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2006, 226 p. (In Russ.)
4. Pu Y., Huang Z., Pan S., Wang G. A 3 GHz to 10 GHz GaAs Double Balanced Mixer. IEEE ITOEC. 2017, pp. 1083–1086. doi: 10.1109/ITOEC.2017.8122521
5. Sudow M., Andersson K., Nilsson P. A., Rorsman N. A Highly Linear Double Balanced Schottky Diode S-Band Mixer. IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. 2006, vol. 16, no. 6, pp. 336–338. doi: 10.1109/LMWC.2006.875625
6. Kuo C., Kuo C., Kuo C., Maas S., Wang H. Novel Miniature and Broadband Millimeter-Wave Monolithic Star Mixers. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2008, vol. 56, no. 4, pp. 793–802. doi: 10.1109/TMTT.2008.919063
7. Yeom K. W., Ko D. H. A Novel 60-GHz Monolithic Star Mixer using Gate-Drain-Connected pHEMT Diodes. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005, vol. 53, no. 7, pp. 2435–2440. doi: 10.1109/TMTT.2005.850402
8. Maas S. A. *Microwave Mixers*. 2nd ed. Norwood, MA, Artech House, 1993, 384 p.
9. Danilov D. S., Drobotun N. B. Broadband Mixers Based on Schottky Diodes Implemented in GaAs MMIC Technology. Nanoindustry Russia. 2020, no. 13, pp. 435–437. doi: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.435.437 (In Russ.)
10. Drobotun N., Danilov D., Drozdov A. A Decade Bandwidth Mixers Based on Planar Transformers and Quasi-vertical Schottky Diodes Implemented in GaAs MMIC Technology. 2020 50th European Microwave Conf. 2021, pp. 957–960. doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338211
11. Leong Y., Ang K., Lee C. A Derivation of a Class of 3-Port Baluns from Symmetrical 4-Port Networks. Proc. of IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest. Seattle, USA, 2–7 June 2002, pp. 1165–1168. doi: 10.1109/MWSYM.2002.1011855
12. Drozdov A. V., Danilov D. S. Wideband Balun Transformer Based on Marchand Bridges for Use in Integrated Circuits. Scientific Session TUSUR-2015: Proc. of the Allruss. Report. Scientific-Technical Conf. Students, Graduate Students and Young Scientists. Tomsk, B-Spektr, 2013, vol. 2, pp. 13–16. (In Russ.)
13. Tanaka H., Sasaki Y., Hashimoto T. Unbalanced-to-Balanced Converter. US Patent, no. 6.040.745, 21 March, 2000.
14. Cho C., Gupta K. C. A New Design Procedure for Single Layer and Two-Layer Three-Line Baluns. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1998, vol. 46, no. 12, pp. 2514–2519.
15. Kian Sen Ang, Robertson I. D. Analysis and Design of Impedance-Transforming Planar Marchand Baluns. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001, vol. 49, no. 2, pp. 402–406. doi: 10.1109/22.903108
16. Ahn H., Kim B. Toward Integrated Circuit Size Reduction. IEEE Microwave Magazine. 2008, vol. 9, iss. 1, pp. 65–75.
17. Malutin N. D., Andreev A. V., Malyutin G. A., Sharabudinov R. M. Tunable Impedance Transformer Based on Split Strip Lines. Proc. of Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russia, 18–20 April 2019, p. 337.
18. Drozdov A. V., Danilov D. S., Yunusov I. V., Goshin G. G. Modeling of Schottky Barrier Diodes for Use in Monolithic Microwave Integrated Circuits. Proc. of TUSUR University. 2018, vol. 21, no. 1, pp. 28–31. doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-28-31 (In Russ.)
19. Drobotun N., Drozdov A. Broadband Microwave Frequency Doublers with Improved Harmonic Suppression Based on Quasi-Vertical GaAs Schottky Diodes. Proc. of the Electronic Design Innovation Conference EDICON 2017, Shanghai, China, 25–27 April 2017, pp. 1–4.
20. Drozdov A. A 20 to 60 GHz Frequency Doubler MMIC Using a Quasi-Vertical GaAs Schottky Diodes. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 14–16 March 2018, pp. 1–4.

21. MM1-1467L GaAs MMIC Double Balanced Mixer Marki Microwave. Available at: <https://www.markimicrowave.com/mixers/mm1-1467l.aspx> (accessed 20.05.2023)

Information about the authors

Daniil S. Danilov, engineer in Radio Engineering (2015), Postgraduate student of the Department of Design of Components and Parts of Electronic Equipment of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics (TUSUR). Head of the monolithic integrated circuits development group of the Department of Information and Measurement Systems (DIIS) of Micran JSC. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: microwave microelectronics; microwave measuring equipment.
Address: TUSUR, 40, Lenina St., Tomsk 634050, Russia
E-mail: danilov.ds@micran.ru

Alexey V. Drozdov, Cand. Sci. (Eng.) (2018), Leading engineer of RadioGigabit LLC, engineer of Micran JSC. The author of more than 10 scientific publications. Area of expertise: microwave microelectronics; microwave measuring technology.
Address: RadioGigabit LLC, 95/2, Osharskaya St., Nizhnyi Novgorod 603105, Russia
E-mail: Alexey.drozdov@radiogigabit.com

Tsyren M. Batoev, Master's Degree in Radio Engineering (2023) of the Department of Ultrahigh Frequencies and Quantum Radio Engineering of the TUSUR, Engineer of the MMIC Development Group in the Department of Microwave Circuitry of Micran JSC. Area of expertise: microwave microelectronics.
Address: TUSUR, 40, Lenina St., Tomsk 634050, Russia
E-mail: batoev.tsm@micran.ru

Yury A. Lamanov, Master's Degree in Radio Engineering (2023) of the Department of Ultrahigh Frequencies and Quantum Radio Engineering of the TUSUR, Engineer of the MMIC Development Group in the Department of Microwave Circuitry of Micran JSC. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: technologies of manufacturing and control of printed circuit boards.
Address: TUSUR, 40, Lenina St., Tomsk 634050, Russia
E-mail: yury_lamanov@mail.ru

Andrey S. Zagorodny, Cand. Sci. (Eng.) (2014), Associate Professor of the Department of Ultrahigh Frequencies and Quantum Radio Engineering of TUSUR. Head of the Department of Microwave Circuitry of Micran JSC. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: microwave microelectronics; microwave measuring technology.
Address: TUSUR, 40, Lenina St., Tomsk 634050, Russia
E-mail: andreyzag@micran.ru

Nickolay D. Malyutin, Dr Sci. (Eng.) (1993), Chief Supervisor of the Research Institute of Electrical Communication Systems, Professor of the Department of Components and Components Design of Radio-Electronic Equipment of TUSUR. The author of 160 scientific publications. Area of expertise: theory of coupled strip structures; devices based on them; measurement of materials parameters, including non-linear crystals.
Address: TUSUR, 40, Lenina St., Tomsk 634050, Russia
E-mail: ndm@main.tusur.ru
<http://orcid.org/0000-0003-0317-9096>
