

Конструирование и технологии производства радиоустройств и систем

DOI 10.24412/2221-2574-2025-2-53-58

УДК 621.372.622

ГИБРИДНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА ДВОЙНОГО БАЛАНСНОГО СМЕСИТЕЛЯ В ДИАПАЗОНЕ 7–25 ГГЦ С ПОЛОСОЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЧАСТОТ 0–10 ГГЦ В КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Кириллов Леонид Романович

аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет¹ имени Н.И. Лобачевского (ННГУ); инженер 2 категории АО «НПФ «Техноякс»².

E-mail: leonidkirillov000@gmail.com

Чиликов Александр Александрович

кандидат технических наук, заместитель начальника отдела АО «НПФ «Техноякс»².

E-mail: chilikov_aa@mail.ru

¹Адрес: 603022, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

²Адрес: 105484, Российская Федерация, г. Москва, 16-я Парковая ул., д. 30.

Аннотация: Спроектирована гибридная интегральная схема СВЧ-смесителя в конструкции для поверхностного монтажа с возможностью герметизации. Устройство обладает следующими характеристиками: потери преобразования около 7 дБ; диапазон входного СВЧ сигнала и гетеродина 7–25 ГГц; диапазон ПЧ 0–10 ГГц; изоляция каналов около 25 дБ, габариты 7×7 мм. Для реализации возможности поверхностного монтажа и герметизации ввод-вывод сигналов осуществляется через металлизированные отверстия, переносящие контактные площадки на нижнюю поверхность платы. Проведены трёхмерный электродинамический анализ и оптимизация конструкции ввода-вывода сигналов, топологии посадочного места и конструкции смесителя. Приведено сравнение результатов расчёта с экспериментальными характеристиками устройства. Смеситель выполнен полностью на отечественных материалах и компонентах, а также является аналогом зарубежной микросхемы HMC773ALC.

Ключевые слова: СВЧ-смеситель, гибридная интегральная схема, поверхностный монтаж, двойной балансный смеситель, электродинамический расчёт, нелинейный анализ смесителя.

Введение

Разработка систем и устройств, работающих в диапазоне СВЧ, становится всё более значимой задачей в связи с активным развитием высокоскоростной радиосвязи, радиолокации и радиоизмерительной техники.

Существуют два подхода к построению нелинейных СВЧ-устройств: монолитная технология и гибридная. Монолитная интегральная технология позволяет получать готовое СВЧ-устройство в больших количествах, но из-за высоких затрат производственного процесса имеет слабую экономическую эффективность в случае мелкосерийного производства.

Одними из ключевых устройств радиоэлек-

тронной аппаратуры являются СВЧ-смесители, которые нашли широкое применение в радиоприёмной, радиопередающей и радиоизмерительной аппаратуре [1–5]. В данной работе рассматривается возможность использования гибридной технологии для реализации малогабаритного СВЧ-смесителя, который по удобству использования будет сравним с корпусированной монолитной интегральной схемой.

Предложенный подход к построению СВЧ-устройств решает сразу несколько актуальных проблем: импортозамещение, дорогостоящие разработка, изготовление, а также корпусирование монолитных интегральных схем.

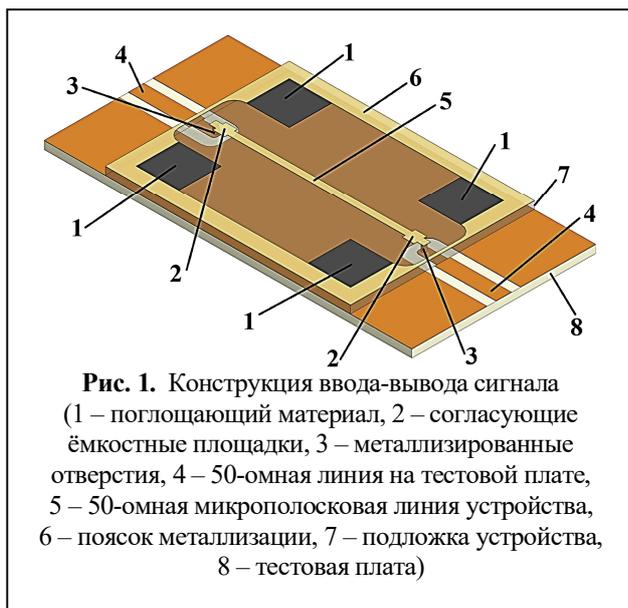


Рис. 1. Конструкция ввода-вывода сигнала (1 – поглощающий материал, 2 – согласующие ёмкостные площадки, 3 – металлизированные отверстия, 4 – 50-омная линия на тестовой плате, 5 – 50-омная микрополосковая линия устройства, 6 – поясок металлизации, 7 – подложка устройства, 8 – тестовая плата)

Проектирование входного элемента конструкции

Ввод-вывод сигналов в смесителе осуществляется через металлизированные отверстия. Вследствие этого, прежде чем перейти к проектированию СВЧ-смесителя, необходимо проанализировать влияние отверстий на прохождение СВЧ-сигнала. Более подробно данный подход описан в литературе [6].

В результате анализа и оптимизации получена конструкция ввода-вывода сигналов, изображённая на рис. 1. Представленная конструкция позволяет эффективно передавать СВЧ-сигнал с одной стороны подложки на другую через отверстие и имеет сплошной металлизированный контур (поясок) по периметру платы, который используется для установки

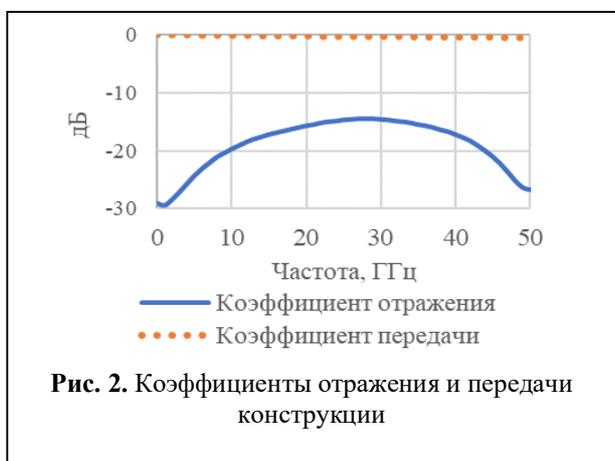


Рис. 2. Коэффициенты отражения и передачи конструкции

герметизирующего металлического экрана.

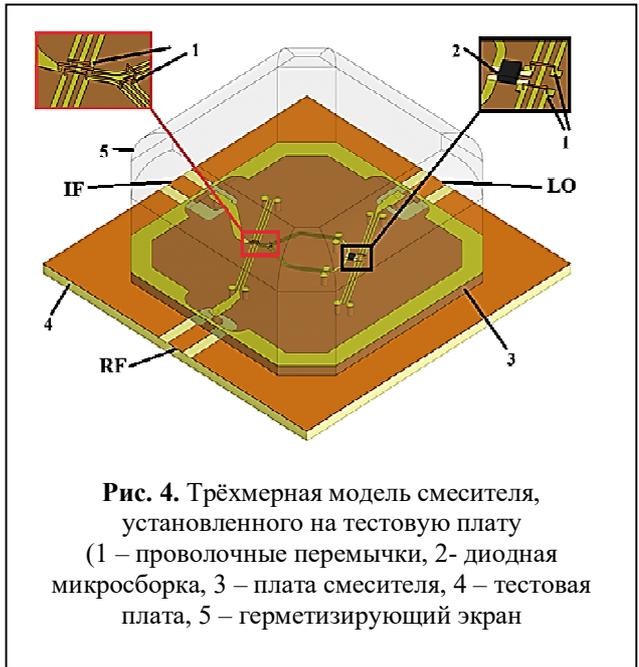
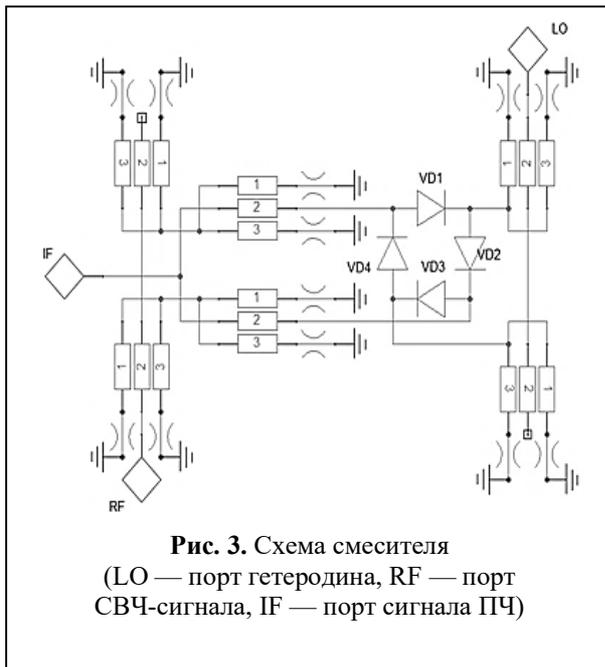
На рис. 2 представлены расчётные коэффициенты отражения и передачи конструкции. С целью уменьшения коэффициента отражения добавлена согласующая ёмкостная площадка для компенсации индуктивности металлизированного отверстия. Для подавления паразитного возбуждения пояaska металлизации, уменьшена его ширина в области прохождения сигнала и добавлен поглощающий материал по углам конструкции.

Коэффициент отражения конструкции составляет менее минус 14 дБ в диапазоне до 50 ГГц. Расчёт произведён с учётом установки устройства на диэлектрическую тестовую плату толщиной 0,254 мм с $\epsilon = 3,6$. Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод о возможности применения приведённого конструктивного решения для построения различных СВЧ-устройств.

Проектирование смесителя

Конструкция двойного балансного смесителя включает два симметрирующих трансформатора на мостах Маршанда для подачи противофазного входного СВЧ-сигнала и гетеродина на плечи диодного моста, а также систему связанных линий для вывода сигнала промежуточной частоты (ПЧ) [7]. Выбранная конструкция имеет относительно широкий диапазон частот входных сигналов и ПЧ, малые потери преобразования и хорошую изоляцию каналов.

Расчёт характеристик смесителя производится методом гармонического баланса в несколько этапов. На первом этапе анализируется и оптимизируется схема смесителя, состоящая из моделей связанных линий, встроенных в библиотеку САПР. На следующем этапе на основе полученных данных создаётся 3D-модель и проводится её трёхмерный электромагнитный анализ и оптимизация. Критерием оптимизации являются требования технического задания. Подробнее методика проектирования отражена в работе [8]. Целью методики является сокращение продолжительности проектирования СВЧ-устройств за



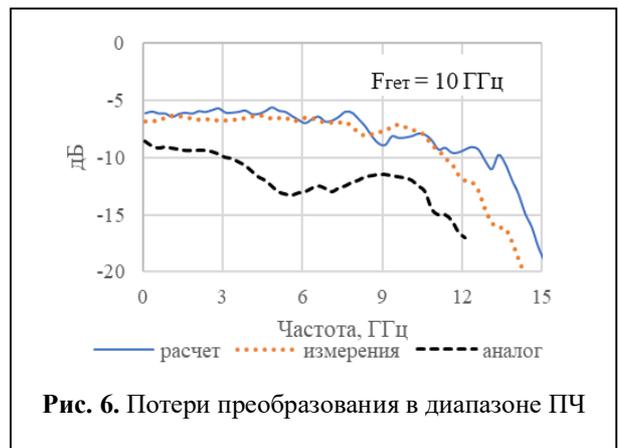
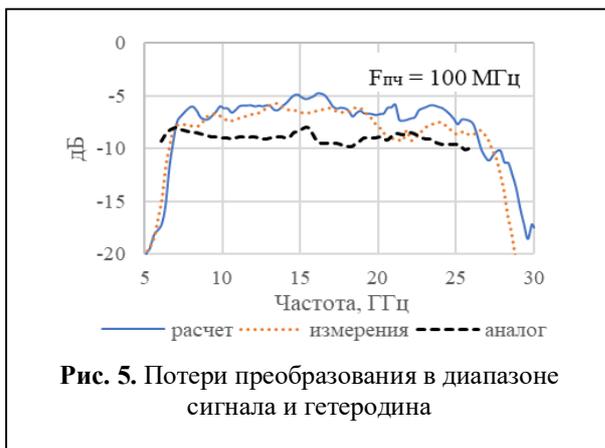
счёт сочетания не затратного по времени анализа схемы и более достоверного, но медленного трёхмерного анализа.

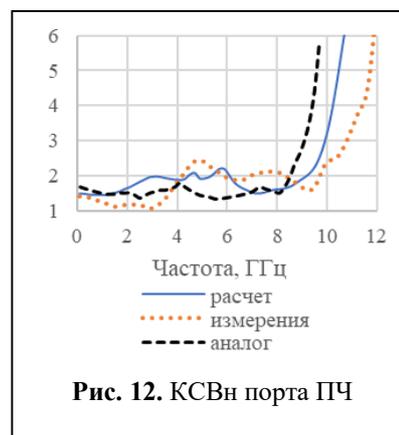
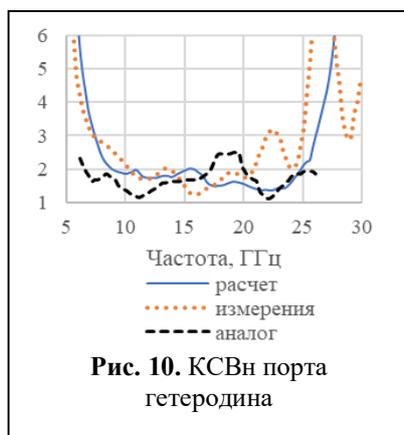
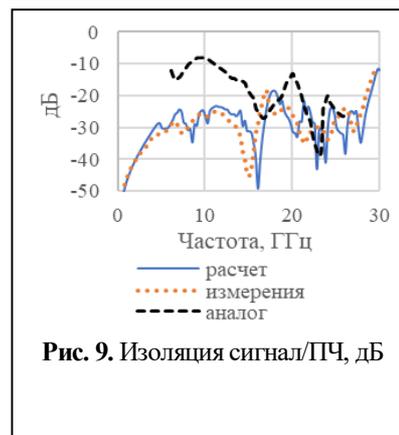
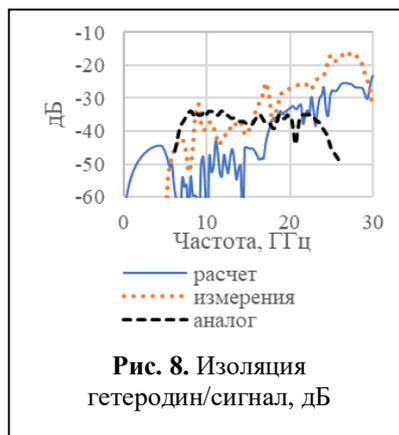
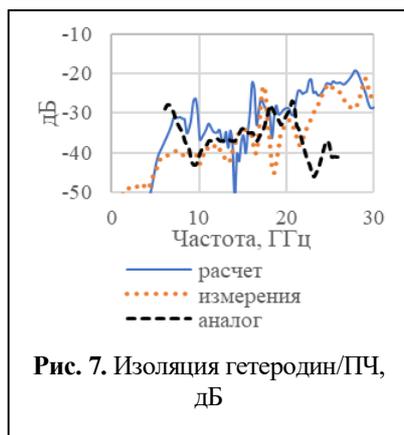
На рис. 3 представлена схема смесителя, состоящая из моделей связанных линий. В ходе оптимизации, критерием которой являлось уменьшение потерь преобразования с сохранением широкого диапазона рабочих частот, определены геометрические параметры элементов топологии для создания трёхмерной модели.

Теоретически расширить диапазон частот можно, уменьшая зазоры и увеличивая ширину связанных линий, тем самым увеличивая коэффициент связи, как это показано в работе [9]. Однако, так как технология изготовления

печатных плат не обладает высокой разрешающей способностью, не удалось уменьшить зазор на столько, чтобы достичь существенных улучшений за счёт увеличения коэффициента связи.

На следующем этапе проводилась оптимизация конструкции с использованием трёхмерного электродинамического анализа. Расчётные характеристики трёхмерной модели смесителя (рис. 4), результаты измерений опытного образца, а также характеристики зарубежного аналога HMC773ALC [10] приведены на рис. 5–12. Характеристики измерены с использованием анализатора цепей ZVA67 от компании Rohde & Schwarz. Экспериментальный образец для проведения измерений был установ-





лен на тестовую плату в корпусе с коаксиальными разъёмами. Расчёты и измерения производились при мощности гетеродина 15 дБм.

Сравнивая характеристики (рис. 5–12), можем наблюдать качественное совпадение результатов расчёта с экспериментом. Отличие результатов измерений от расчётов частично объясняется влиянием коаксиальных разъёмов корпуса, которые не были учтены при моделировании. Таким образом, используя предложенную методику проектирования на основе современных САПР, можно сократить общее время на разработку устройства. Спроектированный смеситель по ряду характеристик превосходит зарубежный аналог (рис. 5–12).

Выводы

Спроектирована гибридная интегральная схема СВЧ-смесителя в конструкции для поверхностного монтажа с возможностью герметизации. Рассчитаны и измерены основные характеристики устройства. Смеситель выполнен

полностью на отечественных материалах и компонентах: подложка из алюмооксидной керамики марки ВК-100-1 толщиной 0,25 мм, диодная микросборка производства АО «НПП «Салют». Устройство по своим техническим характеристикам является аналогом зарубежной микросхемы НМС773АЛС.

Литература

1. *Щитов А.М.* Диодные преобразователи частоты для радиоизмерительной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов: монография / А.М. Щитов [и др.] под ред. А.М. Щитова. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева., 2016. 196 с.
2. *Maas A.* Stephen Nonlinear Microwave and RF. Boston: Artech House, 2003. 570 p.
3. *Чиликов А.А., Щитов А.М.* Особенности проектирования широкополосных диодных смесителей СВЧ // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019, №4. С. 60–69.
4. *Чиликов А.А., Щитов А.М., Панков С.В., Береснева Г.М.* Широкополосные диодные двойные балансные смесители СВЧ // Материалы XX координационного научно-технического семинара по СВЧ-технике. Нижний Новгород. 2019. С. 44–46.

5. Чиликов А.А., Щитов А.М., Панков С.В., Береснева Г.М. ГИС широкополосных диодных балансных смесителей СВЧ // Материалы XX координационного научно-технического семинара по СВЧ-технике, Нижний Новгород, 2019. С. 47–49.

6. Юнусов И.В. Разработка и исследование сверхвысокочастотных гетероструктурных GaAs низкобарьерных диодов и монолитных интегральных схем на их основе: дис. ...канд. техн. наук. Томск, 2017. 151с.

7. Qin L., Zhigon W., Leijun X. A millimeter wave monolithic doubly balanced diode mixer // Journal of Semiconductors. Marth 2010. Vol. 31. No. 3.

8. Чиликов А.А. Моделирование и проектирование сверхширокополосных диодных преобразователей частоты для радиоизмерительной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов: дис. ...канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2021. 146 с.

9. Дроздов А.В. Интегральные широкополосные умножители и смесители СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки: дис. ...канд. техн. наук. Томск, 2018.137с.

10. HMC773ALC3B Data Sheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.microsemiconductor.com/datasheet/46-HMC773ALC3B.pdf> (дата обращения: 15.01.2025).

Поступила 16 января 2025 г.

English

A HYBRID INTEGRATED CIRCUIT OF A DOUBLE BALANCED MIXER IN THE RANGE OF 7–25 GHz WITH THE INTERMEDIATE FREQUENCY BAND OF 0–10 GHz IN A SURFACE-MOUNTED DESIGN

Leonid Romanovich Kirillov — Postgraduate Student, Department of Quantum Radiophysics and Electronics, Lobachevsky State University¹ of Nizhny Novgorod; the 2nd Category Engineer, JSC «Scientific Production Company «Tehnojaks»².

E-mail: leonidkirillov000@gmail.com

Alexandr Alexandrovich Chilikov — PhD in Engineering; Deputy Head of the Department, JSC «Scientific Production Company «Tehnojaks»².

E-mail: chilikov_aa@mail.ru

¹Address: 603022, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23.

²Address: 105484, Russian Federation, Moscow, 16th Park St., 30.

Abstract: A small-sized hybrid integrated circuit of a microwave mixer has been designed. The device has the following characteristics: conversion loss is about 7 dB; RF and LO range is 7-25 GHz; IF range is 0-10 GHz; isolation is about 25 dB, dimensions is 7×7 mm. The signal conductors are transferred to the underside of the mixer substrate through substrate vias to allow surface mounting and installation of a sealing shield. In terms of comfort of use, the device is comparable to a packaged monolithic integrated circuit. A three-dimensional analysis and optimization of the input-output design of signals has been carried out. The presented design is capable of efficiently transmitting a microwave signal from one side of the substrate to the other through substrate vias. The simulated return loss is less than minus 14 dB in the range up to 50 GHz. The proposed solution can be used to design various microwave devices. To make a double balanced mixer, a scheme on Marchand balun was chosen. The design has a relatively wide range of input signals and IF, low conversion losses and good channel isolation. The three-dimensional structure prototype was obtained based on the analysis of a simplified mixer circuit, which consists of models of transmission lines. During optimization, the geometric parameters of the topology elements were determined. These geometric parameters help to achieve low conversion losses with a wide range of operating frequencies. The simulated characteristics of the three-dimensional mixer model and the experimental characteristics of the prototype, are given. The characteristics show a qualitative coincidence of the simulation results with the measurement. The device is made entirely on domestic materials and components. According to its technical characteristics, it is an analog of the foreign chip HMC773ALC. Thus, in terms of import substitution, the designed microwave mixer is important.

Keywords: microwave mixer, hybrid integrated circuit, surface mounting, double balanced mixer, electrodynamic calculation, nonlinear mixer analysis.

References

1. Shchitov A.M. [and others] Diode frequency converters for radio equipment of the microwave and EHF- ranges: monograph. Edited by A.M. Shchitov. Nizhny Novgorod: NNSTU, 2016. 196 p.

2. *Maas A.* Stephen Nonlinear Microwave and RF. Boston: Artech House, 2003. 570 p.
3. *Chilikov A.A., Shhitov A.M.* Features of designing broadband diode VHF mixers. Radio and telecommunication systems, 2019. No. 4. Pp. 60–69.
4. *Chilikov A.A., Shhitov A.M., Pankov S.V., Beresneva G.M.* Broadband diode double balanced microwave mixers. Materials of the XX coordination scientific and technical microwave technology seminar, Nizhny Novgorod, 2019. Pp. 44–46.
5. *Chilikov A.A., Shhitov A.M., Pankov S.V., Beresneva G.M.* HIC of broadband diode balanced microwave mixers. Materials of the XX coordination scientific and technical microwave technology seminar, Nizhny Novgorod, 2019. Pp. 47–49.
6. *Junusov I.V.* Development and research of microwave heterostructural GaAs low-barrier diodes and monolithic integrated circuits based on them: dissertation... PhD of tech. sciences Tomsk, 2017. 157 p.
7. *Qin L., Zhigon W., Leijun X.* A millimeter wave monolithic doubly balanced diode mixer. Journal of Semiconductors. Marth 2010. Vol. 31. No. 3.
8. *Chilikov A.A.* Modeling and designing of ultra-wide-band diode frequency converters for microwave and EHF radio measuring equipment: dissertation... PhD of tech. sciences. Nizhnij Novgorod, 2021. 146 p.
9. *Drozhdov A.V.* Integral broadband multipliers and microwave mixers based On GaAs Schottky diodes: dissertation... PhD of tech. sciences. Tomsk, 2018. 137 p.
10. HMC773ALC3B Data Sheet [Electronic Source]. URL: <https://www.microsemiconductor.com/datasheet/46-HMC773ALC3B.pdf> (Access Date: 15.01.2025).