

Особенности разработки широкополосных смесителей частоты с подавлением зеркального канала в диапазоне частот 9–27 ГГц

Г.А. Углов, Ю.В. Белова

АО «НПП «Салют»
603950, Россия, г. Нижний Новгород,
ул. Ларина, 7

Аннотация – Статья посвящена особенностям разработки двух типов широкополосных смесителей частоты с подавлением зеркального канала в диапазоне частот 9–27 ГГц. Цель исследования – определить оптимальные пути решения проблемы моделирования сложных многофункциональных СВЧ-узлов. В статье рассматривается процесс разработки таких функциональных узлов как усилитель гетеродина, маломощный усилитель и смеситель частоты. Приводятся сравнения расчетных характеристик с результатами измерений изготовленных макетов образцов. Так же уделено внимание технологии изготовления полевых транзисторов, резисторов и конденсаторов находящихся в составе функциональных узлов смесителя частоты. Научная новизна заключается в уникальности разработки изделия, включающего в себя на одном кристалле несколько функциональных узлов. В результате созданы два типа смесителей частоты с подавлением зеркального канала в корпусном исполнении, которые по своим характеристикам могут заменить аналогичные зарубежные изделия фирмы Analog Devices.

Ключевые слова – широкополосный смеситель частот, монолитная интегральная схема, SMD-корпус.

Введение

Смесители являются неотъемлемой частью различных радиоприемных устройств. Благодаря широкому рабочему частотному диапазону их использование становится возможным не только в военной технике, но и в гражданских сферах жизни, например в оборудовании мобильной связи или сети Интернет. Отвечая вызовам времени, современные радиоэлектронные компоненты отечественного производства должны удовлетворять требованиям надежности, быть экономически привлекательными и конкурентоспособными по отношению к зарубежным аналогам. Удовлетворить данные требования к разрабатываемым изделиям возможно за счет применения интегральных технологий с целью уменьшения габаритных размеров, количества операций настройки и упрощения монтажа.

1. Проектирование функциональных узлов

Проведенные исследования характеристик существующих зарубежных аналогов разрабатываемых смесителей определили следующие их схемные решения:

- тип 1: смеситель частоты (преобразование вверх) с выходным усилителем мощности;
- тип 2: усилитель мощности гетеродина, смеситель частоты (преобразование вниз), маломощный усилитель.

При задаче по унификации для расширения области применения и обеспечения конструктивной прочности габаритные размеры топологий узлов рассчитываются с учетом последующего монтажа изделия в герметичный керамический корпус типа SMD.

Проектирование всех узлов схемы на одном кристалле времязатратно, поэтому каждый узел разрабатывается отдельно с последующим применением результатов расчетов в едином проекте.

Для функционального узла смесителя предпочтительно использовать двойную балансную схему. Применение такой схемы позволит добиться следующих результатов:

- низкого уровня коэффициента шума благодаря фазовому подавлению шумов гетеродина;
- высокого подавления четных гармоник гетеродина, что ведет к снижению уровня побочных составляющих преобразования и, следовательно, к повышению помехоустойчивости и расширению динамического диапазона;
- незначительных потерь сигнала в цепи гетеродина благодаря высокой развязке мостовых схем.

Использование двойного балансного смесителя в схемной реализации также позволяет осуществить фазовое подавление приема по зеркальному каналу на частоте f_{3K} и восстановление энергии колебаний зеркальной частоты f_3 на промежуточной частоте $f_{ПЧ}$ без применения входного фильтра, что, в свою очередь, исключает вносимые

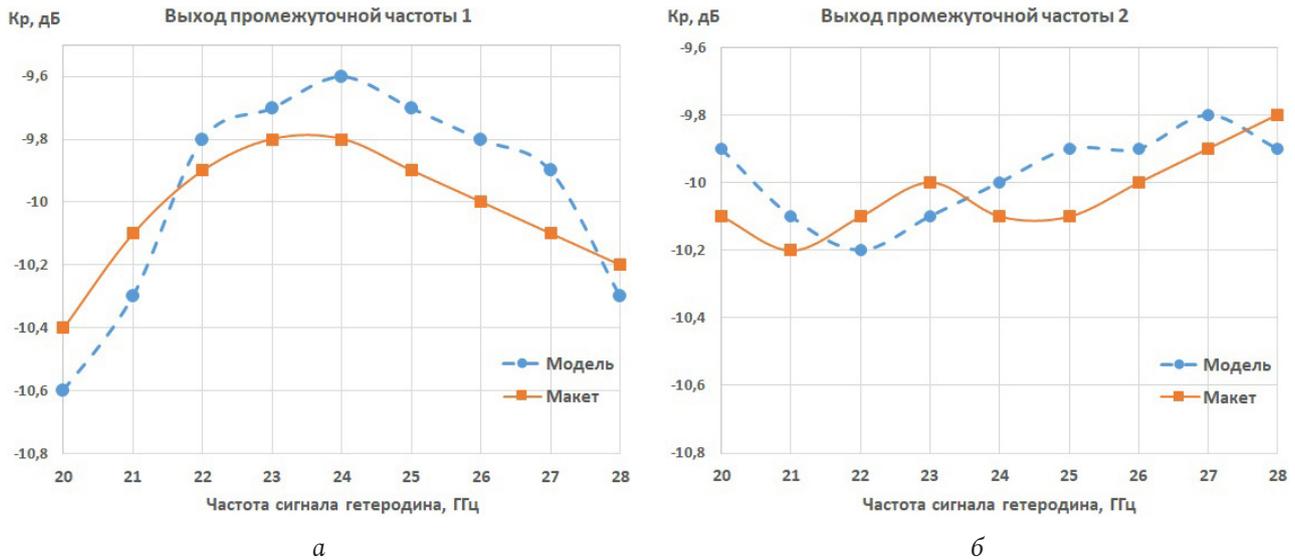


Рис. 1. Потери преобразования функционального узла смесителя 21–27 ГГц ($f_{ПЧ} = 100$ МГц, $P_{гет} = 17$ дБм)
 Fig. 1. Conversion loss of the functional unit of the mixer 21–27 GHz ($f_{ПЧ} = 100$ MHz, $P_{гет} = 17$ dBm)

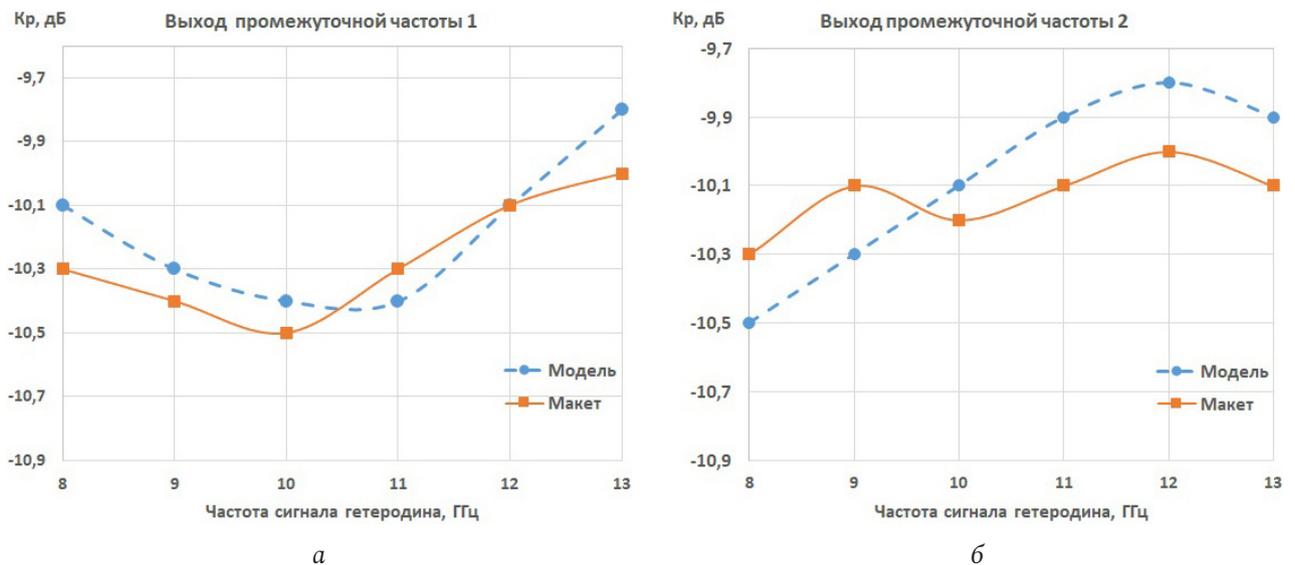


Рис. 2. Потери преобразования функционального узла смесителя 9–12 ГГц ($f_{ПЧ} = 100$ МГц, $P_{гет} = 3$ дБм)
 Fig. 2. Conversion losses of the functional unit of the mixer 9–12 GHz ($f_{ПЧ} = 100$ MHz, $P_{гет} = 3$ dBm)

им потери и обеспечивает более широкую полосу рабочих частот [1].

В качестве нелинейных элементов в схеме смесителей используются полевые транзисторы с барьером Шоттки с шириной затвора 60 мкм в диодном включении, изготовленные по базовой рНЕМТ-технологии АО «НПП «Салют»» [2]. Транзисторы применяются в качестве переключаемых сопротивлений, управление состояниями которых осуществляется посредством подачи сигнала гетеродина на их затворы. Выбранное схемное решение при разработке смесителя позволяет добиться высокого значения величины точки пересечения интермодуляции третьего порядка (ИП₃), определить коэффициент шума только потерями пре-

образования и исключить потребление тока [3]. К недостаткам такого решения стоит отнести повышенные потери преобразования и требование к высокому уровню сигнала гетеродина, которые частично можно скомпенсировать за счет использования усилителя мощности.

Расчетные характеристики моделей смесителей в сравнении с параметрами изготовленных макетов по результатам электромагнитного моделирования, проводимого на GaAs-подложке с толщиной 80 мкм, приведены на рис. 1, 2.

По особенностям построения усилители мощности, используемые в разработанных смесителях, можно разделить на три основных типа: балансные усилители, многокаскадные усилители с

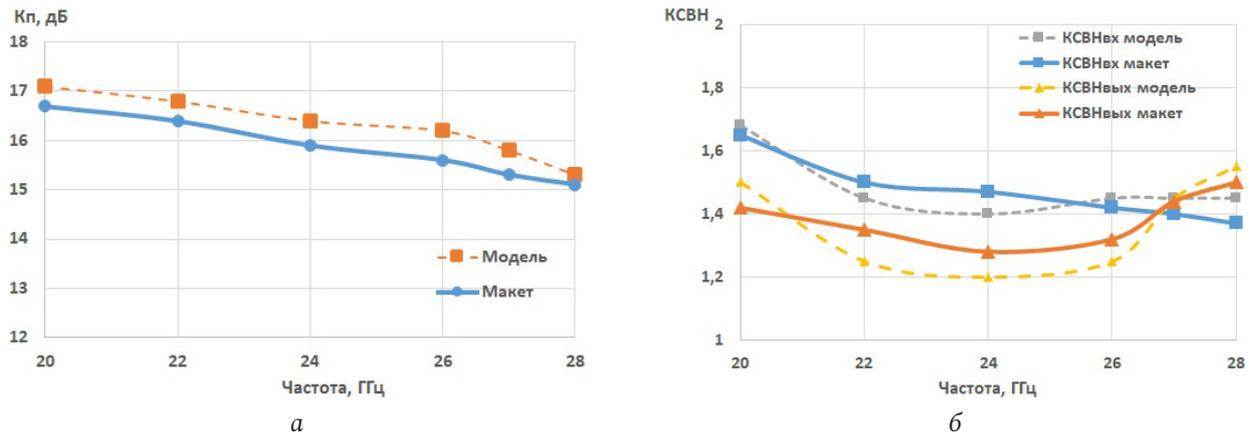


Рис. 3. Характеристики усилителя мощности
Fig. 3. Power amplifier characteristics

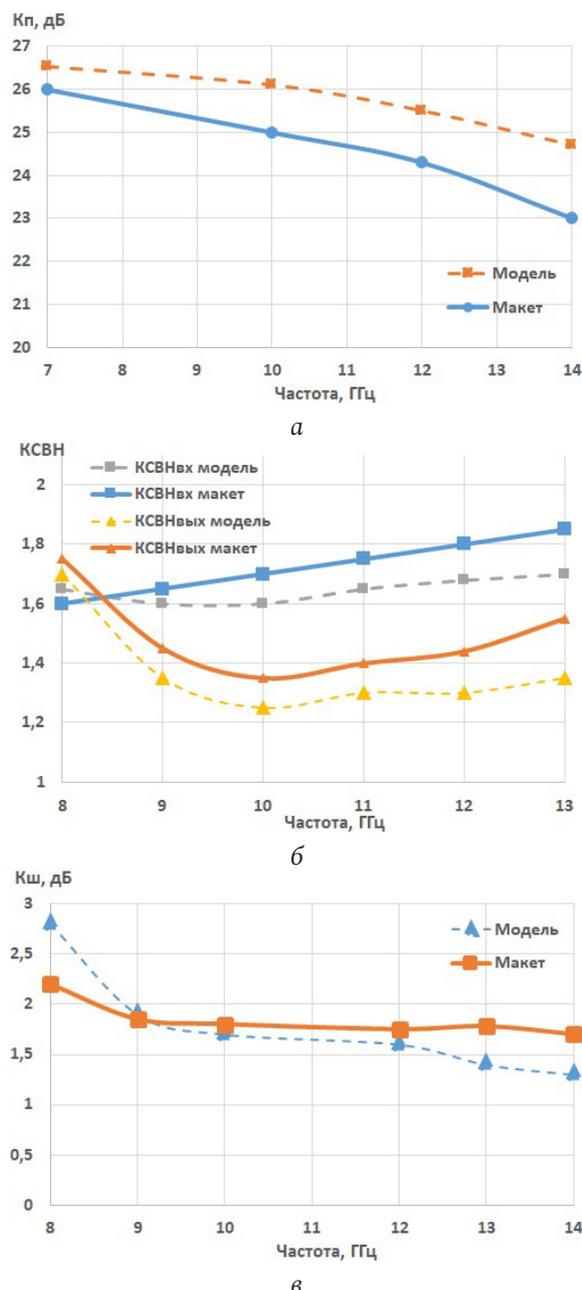


Рис. 4. Характеристики малошумящего усилителя
Fig. 4. Characteristics of a low noise amplifier

непосредственными связями и усилители с распределенным усилением. В качестве приемлемого схемного решения выбрана многокаскадная схема усилителя, обладающая следующими преимуществами: широкая полоса рабочих частот, согласование входа и выхода, малая неравномерность амплитудно-частотной характеристики. Однако недостатком такой схемы является низкий КПД. Усилители с реактивным согласованием, в том числе многокаскадные, являются самыми распространенными представителями ГИС- и МИС-усилителей мощности, в том числе с шириной полосы более одной октавы [4]. Электрические характеристики такой схемы достигаются совершенствованием выходной согласующей цепи, трансформирующей стандартное волновое сопротивление тракта 50 Ом к оптимальному нагружающему импедансу транзистора (или линейки синфазно возбуждаемых транзисторных структур), обеспечивающему на всех частотах диапазона максимальную выходную мощность, или максимальный КПД, или компромисс между этими параметрами. Сравнение результатов моделирования и макетирования усилителя, используемого в составе смесителя частот, приведено на рис. 3–5.

2. Технология изготовления смесителя

Опытные образцы смесителей частоты, включающие в себя на одном кристалле все функциональные узлы, изготавливают на полупроводниковых структурах арсенида галлия типа рНЕМТ. Параметры эпитаксиальной структуры приведены в табл. 1.

Технологический процесс изготовления модулей включает в себя изготовление полевых транзисторов, резисторов и конденсаторов.

Стоки и истоки транзисторов, нижняя обкладка конденсатора и контактные площадки (первый

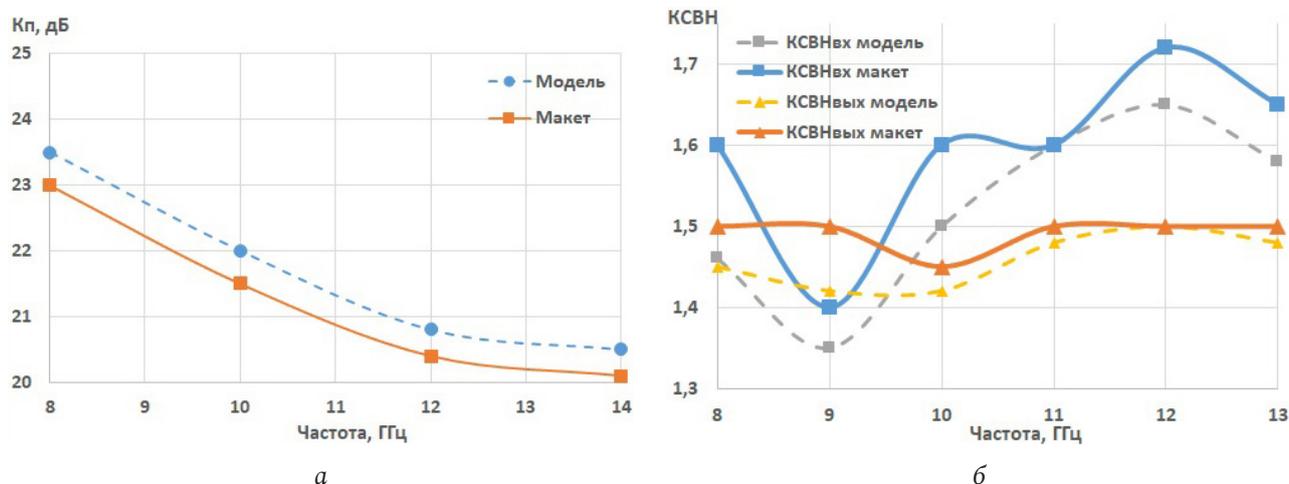


Рис. 5. Характеристики усилителя гетеродина
 Fig. 5. Characteristics of the local oscillator amplifier

Табл. 1. Параметры слоев рНЕМТ структуры
 Table 1. Parameters of the рНЕМТ structure layers

Наименование слоя эпитаксиальной структуры, назначение	Материал	Толщина слоя (точность $\pm 2,5\%$), нм	Тип и диапазон концентрации легирующей примеси (точность $\pm 5\%$)
Контактный 1	$n^+ - \text{GaAs}$	60,0	$6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$
Etch-stop слой	$n^+ - \text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$	3,0	$2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$
Барьерный слой 1	$n - \text{GaAs}$	7,0	$5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Барьерный слой 2	$\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}$	12,0	$5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Дельта-легирование	Si	–	$3,2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$
Спейсерный слой	$\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}$	3,0	–
Сглаживающий слой	GaAs	1,5	–
Канальный слой	$\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}$	12,0	–
Буферные слои	$i - \text{GaAs}$	200	–
Сверхрешетка 10 периодов	$i - \text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}/i\text{-GaAs}$	2,0/2,0	–
Подложка: нелегированный GaAs (100) толщиной 625 ± 25 мкм			

уровень металлизации) формируются с помощью металлической системы золото–германий–никель–золото, напыляемой термическим испарением в вакууме, с последующим вплавлением при температуре 400°C .

Формирование Т-образных затворов транзисторов с проектными нормами $0,1\text{--}0,15$ мкм и верхней частью затвора $0,5\text{--}0,6$ мкм производится с помощью электронной литографии и электронно-лучевым распылением металлической системы титан–алюминий–титан толщиной $0,05\text{--}0,5\text{--}0,1$ мкм соответственно.

Защита активной области транзисторов осуществляется диэлектрической пленкой нитрида кремния (Si_3N_4) толщиной $0,25\text{--}0,3$ мкм, которая одновременно является диэлектриком для конденсаторов.

Для изготовления резисторов используется пленка, получаемая распылением в вакууме сплава силицида вольфрама номиналом 100 Ом/кв или 50 Ом/кв .

Второй уровень металлизации формируется с помощью гальванического осаждения золота толщиной 3 мкм на подслой металлической системы ванадий–золото.

На обратную сторону утоненных до 80 мкм изделий после формирования с помощью локального химического травления полупроводника сквозных отверстий высаживаются химический никель и гальваническое золото толщиной 1 мкм. Далее производится плазмохимическое удаление фоторезиста с лицевой стороны, скрайбирование и разделение на отдельные кристаллы.

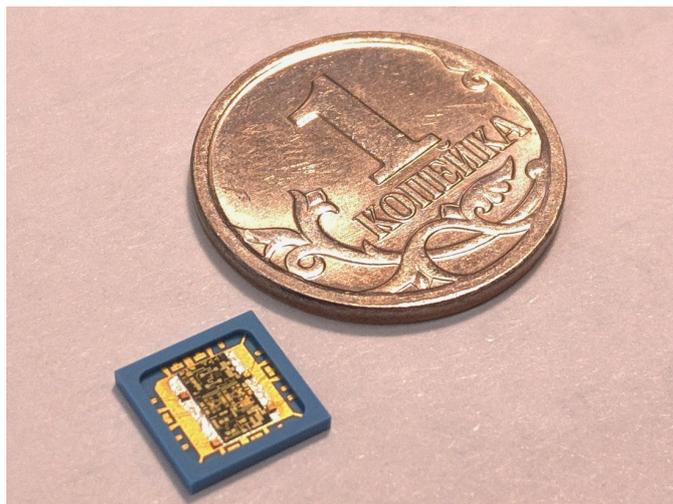


Рис 6. Общий вид изделия
Рис 6. General view of the product

Табл. 2. Электрические параметры разработанных изделий в сравнении с аналогами
Table 2. Electrical parameters of the developed products in comparison with analogues

Наименование параметра, единица измерения	Тип изделия			
	тип 1	HMC815LC5	тип 2	HMC568
Диапазон рабочих частот высокочастотного сигнала и сигнала гетеродина, ГГц	21–27	21–27	9–12	9–12
Диапазон рабочих частот сигнала промежуточной частоты, ГГц	0,01–3,75	0,01–3,75	0,01–3,5	0,01–3,5
Коэффициент преобразования, дБ, не менее	4	7	10	10
Развязка гетеродин-сигнал, дБ, не менее	10	10	40	40
Развязка гетеродин-ПЧ, дБ, не менее	15	15	20	20
Подавление зеркального канала, дБс, не менее	18	20	20	20
Точка пересечения интермодуляции 3-го порядка, дБм, не менее	по выходу		по входу	
	19	27	-5	-1
Коэффициент шума, дБ, не более	-	-	3	2

3. Результаты изготовления смесителя

Разработанные смесители (рис. 6) изготовлены по монолитно-интегральной технологии на основе GaAs. Конструктивно изделие представляет собой герметичный металлокерамический корпус типа SMD, способный выдержать нагрузки линейного ускорения до 3000 g, пониженное атмосферное давление до 10^{-6} мм рт. ст., воздействие специальных сред, имеющих в своем составе гелий и аргон, в течение 60 часов, а также устойчивый к воздействию специальных факторов 7.И и 7.К со значениями характеристик $4U_C$ и 2К соответственно.

Сравнение электрических параметров разработанных изделий с ближайшими зарубежными аналогами приведено в табл. 2.

Заключение

Полученные в результате разработки СВЧ-смесители близки по своим характеристикам к зарубежным аналогам HMC815LC5 и HMC568 фирмы Analog Devices и могут быть использованы отечественными предприятиями, в том числе ВПК, работающим по программе импортозамещения.

Список литературы

1. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Л.Г. Гассанов [и др.]. М.: Радио и связь, 1988. 288 с.
2. Дюков Д.И., Чеченин Ю.И., Крицкий Н.С. Разработка преобразователей частоты в монолитном исполнении на основе базовой технологии создания GaAs монолитных интегральных схем с диодами Шоттки вертикальной конструкции // Материалы XVIII Координационный научно-технического семинара по СВЧ-технике. Нижегородская обл., п. Хахалы, 2013. С. 52.

3. МИС двойного балансного смесителя для К-, К_A- диапазонов частот на основе диодов Шоттки вертикальной конструкции / А.Ю. Ющенко [и др.] // Материалы Крымской конференции КриМиКо. Украина, Крым, г. Севастополь, 2012. С. 93–94.
4. Сверхширокополосные твердотельные усилители мощности СВЧ-диапазона: Схемотехника, конструкции, технологии. Электроника и микроэлектроника СВЧ / А.А. Кишинский [и др.] // Сборник статей VII Всероссийской конференции. 2018. С. 4–13.

References

1. Gassanov L.G. et al. *Solid-State Microwave Devices in Communication Engineering*. Moscow: Radio i svjaz', 1988, 288 p. (In Russ.)
2. Djukov D.I., Chechenin Ju.I., Kritskij N.S. Development of monolithic frequency converters based on the basic technology for creating GaAs monolithic integrated circuits with vertical Schottky diodes. *Materialy XVIII Koordinatsionnyj nauchno-tehnicheskogo seminara po SVCh-tehnike*. Nizhegorodskaja obl., p. Hahaly, 2013, p. 52. (In Russ.)
3. Juschenko A.Ju. et al. MIS of double balanced mixer for K-, KA- frequency ranges based on Schottky diodes of vertical design. *Materialy Krymskoj konferentsii KriMiKo*. Ukraina, Krym, g. Sevastopol', 2012, pp. 93–94. (In Russ.)
4. Kischinskij A.A. et al. Ultra-wideband solid-state microwave power amplifiers: Circuitry, design, technology. *Electronics and microelectronics microwave. Sbornik statej VII Vserossijskoj konferentsii*, 2018, pp. 4–13. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2020, vol. 23, no. 3, pp. 68–73

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.3.68-73

Received 17 July 2020
Accepted 13 August 2020

Features of the development of broadband frequency mixers with suppression of the mirror channel in the range frequencies 9–27 GHz

Grigoriy A. Uglov, Yulia V. Belova

JSC «RPE «Salute»
7, Larin Street,
Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Abstract – The article is devoted to features of the development two types of broadband frequency mixers with image channel suppression in the frequency range 9–27 GHz. The purpose of the study is to determine the optimal ways to solve the problem of modeling complex multifunctional microwave units. The article discusses the development process of such functional units as the local oscillator amplifier, low-noise amplifier and frequency mixer. Comparisons of the calculated characteristics with the results of measurements of the manufactured models of the samples are given. Attention is also paid to the technology of manufacturing field-effect transistors, resistors and capacitors that are part of the functional units of the frequency mixer. The scientific novelty lies in the uniqueness of the product development, which includes several functional units on one crystal. As a result, two types of frequency mixers with suppression of the mirror channel in a package design have been created, which, in terms of their characteristics, can replace similar foreign products from Analog Devices.

Keywords – broadband frequency mixer, monolithic microwave integrated circuit (MMIC), SMD case.

Информация об авторах

Углов Григорий Алексеевич, инженер конструктор 2 категории АО «НПП «Салют»», г. Нижний Новгород, Россия.

Область научных интересов: СВЧ-микроэлектроника, проектирование полупроводниковых приборов.

E-mail: zugron@yandex.ru

Белова Юлия Васильевна, кандидат технических наук, начальник отдела АО «НПП «Салют»», г. Нижний Новгород, Россия.

Область научных интересов: методы и техника измерений параметров материалов на СВЧ.

E-mail: belovayv@npps salut.ru

Information about the Authors

Grigoriy A. Uglov, design engineer category 2 of JSC «RPE «Salute»», Nizhny Novgorod, Russia.

Research interests: microwave microelectronics, design of semiconductor devices.

E-mail: zugron@yandex.ru

Yulia V. Belova, Candidate of Engineering Sciences, head of a department of JSC «RPE «Salute»», Nizhny Novgorod, Russia.

Research interests: methods and techniques for measuring parameters of materials at microwave frequencies.

E-mail: belovayv@npps salut.ru