

Э.Ю. Козловский¹, Б.И. Селезнев²

¹ ЗАО "НПП "Планета-Аргалл"

² Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Монолитная интегральная схема двойного балансного смесителя на диодах Шоттки

Представлены результаты разработки и изготовления двойного балансного смесителя на диодах Шоттки, работающего в диапазоне входных частот 25-32 ГГц и выходных частот 2-4 ГГц. Диоды Шоттки реализованы по транзисторной GaAs рНЕМТ технологии. Смесители СВЧ имеют потери преобразования не более 10 дБ при номинальной мощности гетеродина 13 дБмВт.

Ключевые слова: смеситель СВЧ, потери преобразования, рНЕМТ

В основе принципа работы смесителя частоты лежит процесс линейного (без изменения вида и без искажений параметров модуляции сигнала) переноса (преобразования) спектра сигнала из одной области радиочастотного диапазона в другую. Подобная функция находит широкое применение при разработке и создании радиоизмерительной аппаратуры и радиоприемных устройств. Освоение новых, более высокочастотных диапазонов имеет особое значение в связи с широким внедрением техники миллиметрового диапазона в различные области народного хозяйства, обещающие в перспективе ее массовое использование: спутниковая связь и вещание, информационно-вычислительные системы, управление транспортом и безопасность движения, а также при создании новых систем военного назначения и импортозамещении.

Современные радиоэлектронные системы СВЧ диапазона содержат в своем составе большое количество элементов вследствие чего на первое место выходят требования снижения массы и габаритов, повышение надежности функционирования, снижения трудоемкости и себестоимости изделий при серийном производстве. Достижение этих требований обеспечивается реализацией разрабатываемых элементов в виде монолитных интегральных схем (МИС).

Одним из наиболее широко используемых применений смесителя частоты, в частности в приемных устройствах, является преобразование высокочастотного радиочастотного сигнала в сигнал более низкой промежуточной частоты (ПЧ). В зависимости от особенностей применения могут предъявляться различные требования к основным техническим характеристикам смесителя: диапазону рабочих частот, динамическому диапазону, коэффициенту шума, потерям (коэффициенту) преобразования, развязкам между портами, согласованию импедансов.

В данной работе представлены результаты разработки и изготовления МИС смесителя КВЧ см-диапазона длин волн. Достаточно большая номенклатура двойных балансных смесителей для этого диапазона выпускается фирмой Hittite [1], например НМС329LC3В (24-32 ГГц) и НМС329LM3 (26-40 ГГц). Обзор различных типов смесителей, в том числе с указанием номенклатуры изделий отечественного и зарубежного производства широко представлен в [2, 3].

Схемотехнически смеситель реализован в виде диодного кольца, включенного по двойной балансной схеме с использованием широкополосных трансформаторов (направленных ответвителей) на связанных микрополосковых линиях. Сигнал гетеродина задается через мост Маршанда, выполненный на основе четвертьволновых отрезков линий с боковой связью. Подобная конструкция обеспечивает противофазное деление сигнала в широкой полосе частот. Входной СВЧ сигнал задается через мост Ланге, в одно из плеч которого дополнительно включен отрезок микрополосковой линии длиной порядка полуволны с волновым сопротивлением 50 Ом, а во второе плечо включена последовательная LC цепочка в виде микрополосковой линии и тонкопленочного конденсатора. С использованием этих элементов обеспечивается дополнительный фазовый сдвиг сигналов в плечах моста друг относительно друга на 90 градусов, что в совокупности с мостом Ланге обеспечивает противофазное деление сигнала в плечах диодного кольца в требуемой полосе частот. Сигнал промежуточной частоты с помощью микрополоскового сумматора через фильтр нижних частот поступает на выход устройства. Дополнительные цепи согласования между плечами мостов Маршанда и Ланге и диодным кольцом улучшают согласование и уменьшают потери преобразования, препятствуя проникновению сигнала ПЧ на вход устройства, что обеспечивает более эффективное преобразование входного сигнала. Электрическая функциональная схема смесителя представлена на рисунке 1.

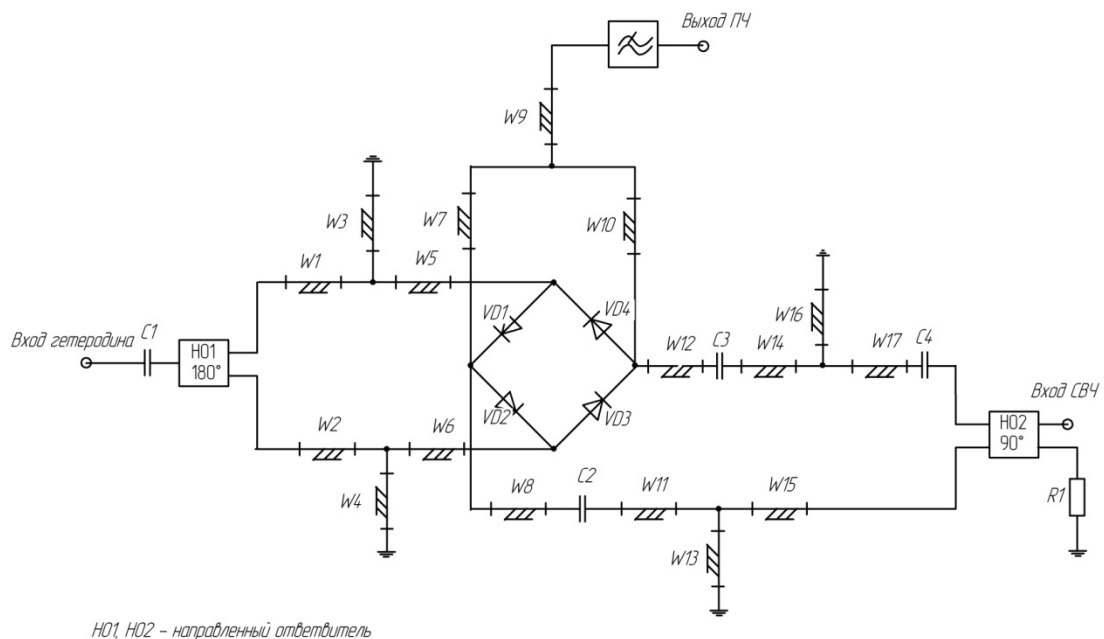


Рисунок 1

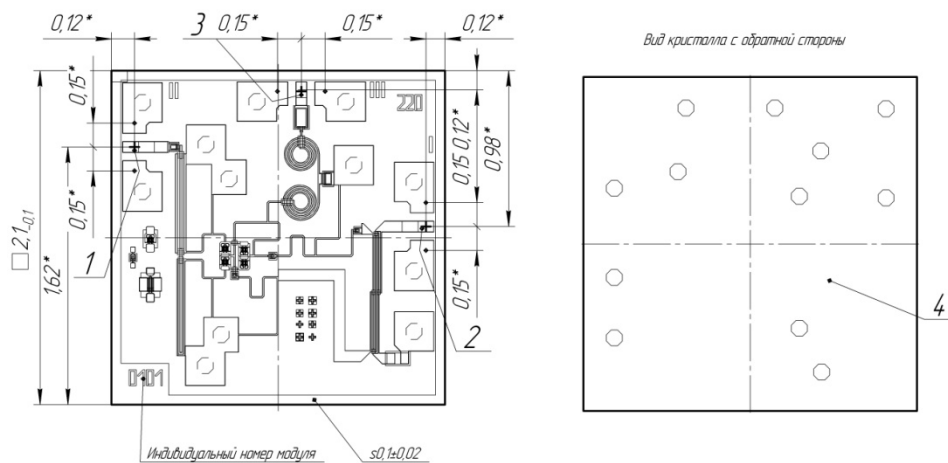
В качестве нелинейных элементов используются диоды с барьером Шоттки, выполненные по транзисторной технологии GaAs pHEMT [4, 5]. Топология каждого диода представляет собой “гребенчатую” структуру в виде двух параллельных ячеек. Конструкция диода и его геометрические характеристики выбирались из соображений получения минимально возможных значений последовательного сопротивления диода R_s и его барьерной емкости C_b , что, по сути, является противоречивым требованием поскольку, варьируя площадь барьера Шоттки (ширину ячейки), указанные элементы

эквивалентной схемы диода изменяются в противоположных направлениях: с уменьшением площади уменьшается емкость, но растет сопротивление. При этом величина R_s напрямую влияет на потери преобразования, а минимизация величины S_b позволяет упростить согласование на высокой частоте, тем самым позволяя расширить рабочую полосу частот смесителя. В качестве компромиссного решения в рамках существующей технологии была выбрана ширина ячейки 20 мкм.

Пассивная часть схемы (СВЧ мосты, микрополосковые линии, индуктивности, конденсаторы и резисторы) реализована по тонкопленочной технологии, интегрированной с операциями формирования активных элементов. Заземление элементов на лицевой стороне кристалла выполнено с использованием металлизированных сквозных отверстий, формируемых химико-динамическим травлением подложки GaAs по рисунку маски фоторезиста, полученной в результате двухстороннего совмещения лицевой и обратной стороны утоненной пластины. Металлизация контактных площадок и обратной стороны кристалла выполнена гальваническим осаждением золота толщиной 2,5-3,5 мкм.

Использование гетероструктур рНЕМТ при реализации смесителя делает возможным (в перспективе) реализацию на одном чипе одновременно смесителя и усилителя ПЧ, что объективно будет способствовать уменьшению массы и габаритов разрабатываемых изделий.

Конструктивно смеситель представляет собой кристалл с геометрическими размерами 2,1x2,1x0,12 мм. Внешний вид кристалла с указанием габаритных и присоединительных размеров представлен на рисунке 2.



№ контактной площадки	Назначение
1	Вход гетерайдина
2	Вход СВЧ
3	Выход ПЧ
4	Общий

Рисунок 2

Измерение СВЧ параметров разработанного смесителя выполнялось с использованием зондовой станции Cascade Microtech M150 и векторного анализатора

электрических цепей ZVA40 (Rohde & Schwarz). Основные параметры смесителя представлены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование параметра, единица измерения	Буквен- ное обозна- чение	Норма параметра		
		не менее	номинал	не более
Рабочий диапазон частот входного сигнала, ГГц	$\Delta f_{вх}$	–	25 – 32	–
Рабочий диапазон частот выходного сигнала (ПЧ), ГГц	$\Delta f_{вых}$	–	2 – 4	–
Потери преобразования, дБ	$\alpha_{прб}$	–	–	10
Развязка между каналами сигнала и гетеродина, дБ	$\alpha_{кан.с.г.}$	22	–	–
Развязка между каналами гетеродина и ПЧ, дБ	$\alpha_{кан.г.пч.}$	25	–	–
Развязка между каналами сигнала и ПЧ, дБ	$\alpha_{кан.с.пч.}$	15	–	–

Номинальный режим измерения параметров: мощность гетеродина $P_g=13$ дБмВт, мощность СВЧ сигнала $P_c=-10$ дБмВт. При уменьшении мощности гетеродина до 8-10 дБмВт наблюдается ухудшение потерь преобразования на 0,5-1,0 дБ. Типовая зависимость потерь преобразования в диапазоне частот 10-40 ГГц представлена на рисунке 3.

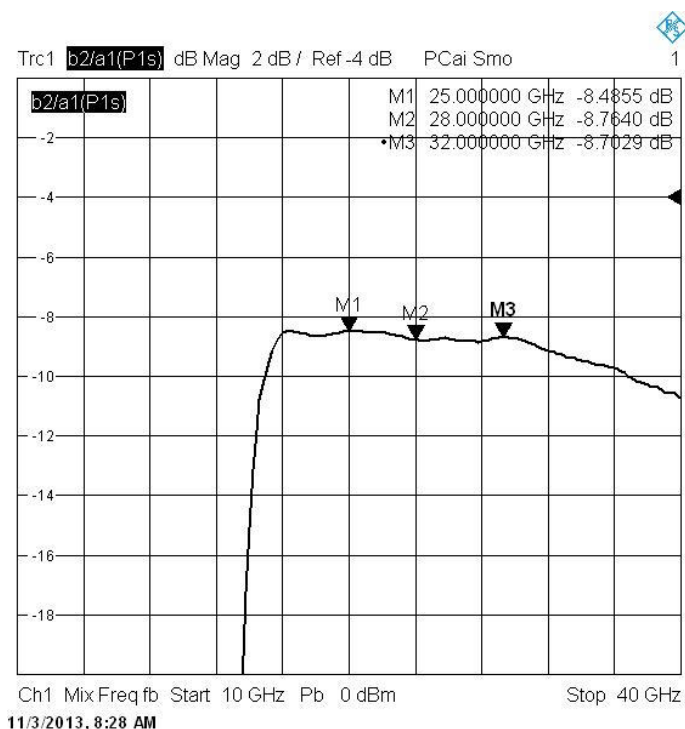


Рисунок 3

Маркерами M1, M2 и M3 на рисунке отмечены частоты 25, 28 и 32 ГГц соответственно, что соответствует диапазону частот, в котором нормированы параметры смесителя.

Коэффициент стоячей волны по напряжению для входа гетеродина и входа СВЧ сигнала составляет не более 2,5 ед.

Динамический диапазон разработанного смесителя характеризуется уровнем компрессии потерь преобразования $P_{1дБ}$, который составляет величину не менее 7дБВт и точкой пересечения интермодуляционных искажений третьего порядка IP3 с величиной порядка 15 дБВт.

Из полученных результатов видно, что выбранные конструктивно-технологические решения позволяют реализовать МИС двойных балансных смесителей КВЧ см-диапазона длин волн. Более того, принимая во внимание фактическую рабочую полосу разработанного смесителя 22-40 ГГц с потерями преобразования не более 12 дБ, можно утверждать о возможности использования подобных конструкций для разработки смесителей миллиметрового диапазона.

Библиографический список

1. Сайт компании Hittite [Электронный ресурс]. Режим доступа свободный: <http://www.hittite.com>.
2. Карпов Ю. Смесители, преобразователи, умножители и делители частоты СВЧ-диапазона отечественного производства / Ю. Карпов // – Компоненты и технологии. – 2008. – №9. – С. 22-27.
3. Белов Л. Преобразователи частоты. Современные ВЧ-компоненты / Л. Белов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2004. – Вып. 2. – С. 44-50.
4. Козловский Э.Ю. Особенности технологии изготовления и оптимизация конструкции маломощного рНЕМТ транзистора СВЧ диапазона / Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев, Н.Н. Иванов // Вестник Новгородского государственного университета. – Серия: Технические науки. – 2010. – № 60. – С. 69-73.
5. Козловский Э.Ю. СВЧ МИС МШУ на основе наногетероструктур GaAs рНЕМТ / Э.Ю. Козловский, А.М. Осипов, Б.И. Селезнев // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2013. – №1, 2. – С. 134-137.