

# ПАССИВНЫЕ СМЕСИТЕЛИ ЧАСТОТ С ПОДАВЛЕНИЕМ ЗЕРКАЛЬНОГО КАНАЛА

В статье представлены результаты разработки пассивных смесителей частот с подавлением зеркального канала в диапазоне 4–23 ГГц. МИС смесителей реализованы в литерном исполнении по базовой технологии АО «НИИПП» на основе диодов с барьером Шоттки вертикальной конструкции.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в России большие усилия брошены на разработку и дальнейшее замещение аналогов ЭКБ иностранного производства. В статье рассмотрены результаты АО «НИИПП» по разработке пассивных смесителей частот с подавлением зеркального канала — аналогов микросхем HMC525LC4, HMC521LC4, HMC522LC4 и HMC523LC4 [1].

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

АО «НИИПП» обладает различными базовыми технологиями изготовления СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) с проектными нормами до 0,15 мкм. При этом для реализации пассивных смесителей наиболее подходящей является технология МИС на основе диодов с барьером Шоттки вертикальной конструкции (SD). Данная технология характеризуется относительно большими проектными нормами активных элементов (3,5–4,5 мкм), что позволяет достичь высокого процента выхода годных МИС, при этом предельные частоты активных элементов составляют более 1 ТГц, что дает возможность получения МИС в широком частотном диапазоне.

МИС СВЧ, выполненные по базовой технологии SD, могут содержать диоды с барьерами Шоттки, катушки индуктивности, МДМ-конденсаторы, тонкопленочные резисторы, микрополосковые делители/сумматоры/трансформаторы и сквозные металлизированные отверстия. Кроме этого, возможно исполнение МИС с балочными выводами для разработки МИС мм-диапазона длин волн finline-конструкции.

Для расширения области применения разработанных смесителей предусматривается их корпусное исполнение — в корпусах типа QFN 4×4 мм для поверхностного монтажа. QFN-корпуса выполняются по базовой технологии LTCC (Low Temperature Co-Fired Ceramic) АО «НИИПП» [2].

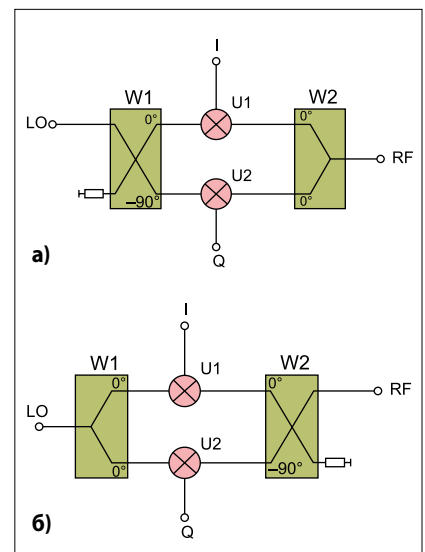
## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При разработке смесителей частот с подавлением зеркального канала можно использовать различные схемы [3, 4]:

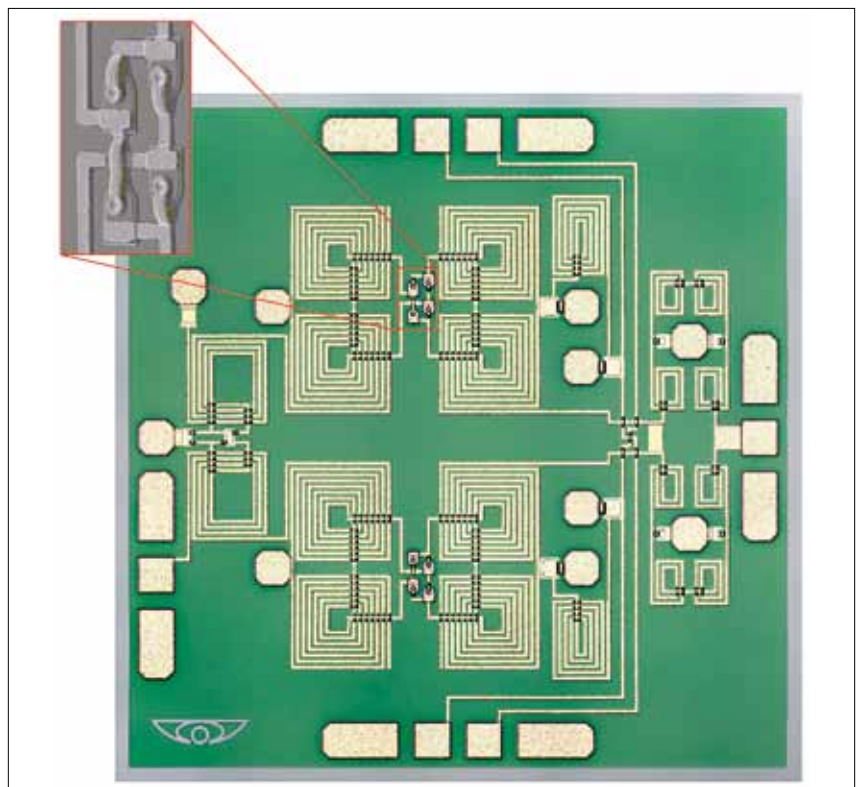
1. С квадратурным делителем на входе гетеродина LO и синфазным делителем на входе сигнала RF (рис. 1а).
2. С квадратурным делителем на входе сигнала RF и синфазным делителем на входе гетеродина LO (рис. 1б).

Для реализации смесителя с наилучшими характеристиками с учетом особенностей технологии МИС целесообразно использовать следующие функциональные узлы:

- квадратурный делитель — мост Ланге (особенности: широкий диапазон частот; хорошая развязка между выходами; хорошее согласование выходов; неидентичность характеристик при делении/суммировании) [5];



▲ Рис. 1. Структурные схемы смесителей частот с подавлением зеркального канала



▲ Рис. 2. Фотография МИС M43256-1

• синфазный делитель — делитель Вилкинсона (особенности: приемлемый диапазон частот; хорошая развязка между выходами; хорошее согласование выходов; практически полная идентичность характеристик при делении/суммировании) [6];

• смеситель (U1 и U2) — двойной балансный смеситель с мостами Маршанда, построенный по кольцевой схеме (особенности: широкий диапазон частот; хорошая развязка между каналами; слабая зависимость характери-

стик от мощности гетеродина  $P_{LO}$  при  $P_{LO} > 10$  дБм) [7].

С учетом перечисленных особенностей функциональных узлов наилучшие параметры смесителя достигаются при использовании структурной схемы, представленной на рис. 1а, за счет того, что разница мощностей сигналов на выходах I и Q, а соответственно, и подавление зеркального канала [8] определяются идентичностью каналов делителя Вилкинсона на входе сигнала RF и практически не зависят от разницы амплитудно-частотных характеристик каналов квадратурного делителя Ланге на входе LO.

В диапазоне частот 4–23 ГГц были спроектированы и изготовлены 4 литеры МИС смесителя: M43256–1 (4–8,5 ГГц); M43256–2 (8,5–13,5 ГГц); M43256–3 (11–16 ГГц) и M43256–4 (15–23 ГГц). Для унификации применяемых типоразмеров корпусов все МИС разрабатывались одного размера  $2 \times 2$  мм, что позволило использовать один тип корпуса  $4 \times 4$  мм для всех литер. На рис. 2 представлена фотография МИС смесителя M43256–1.

На рис. 3 и 4 показаны СВЧ-характеристики данных смесителей при мощности гетеродина 17 дБм.

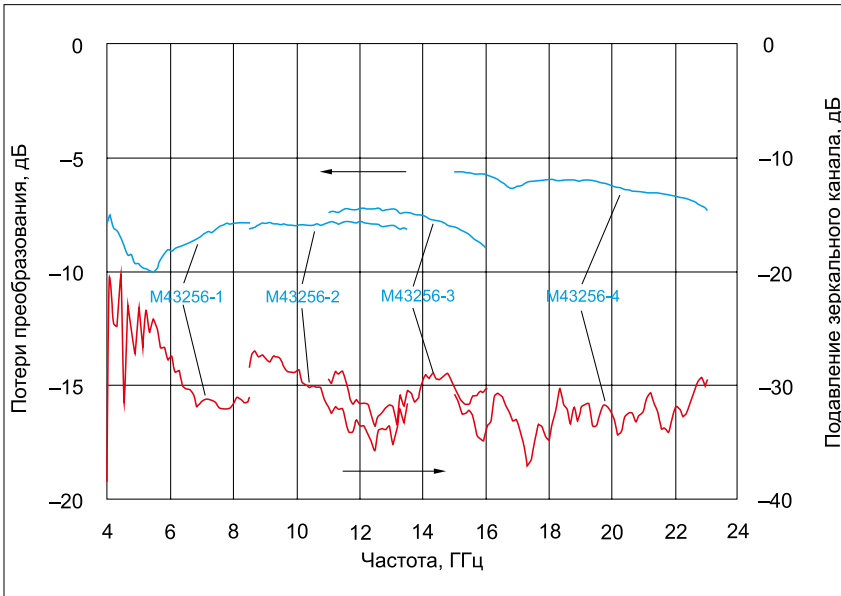
Разработанные смесители характеризуются следующими основными параметрами:

- диапазон рабочих температур:  $-60 \dots +85$  °C;
- мощность гетеродина: 15–17 дБм;
- потери преобразования, не более: 10 дБ;
- развязка между каналами, не менее: 40 дБ;
- подавление зеркального канала, не менее: 20 дБ.

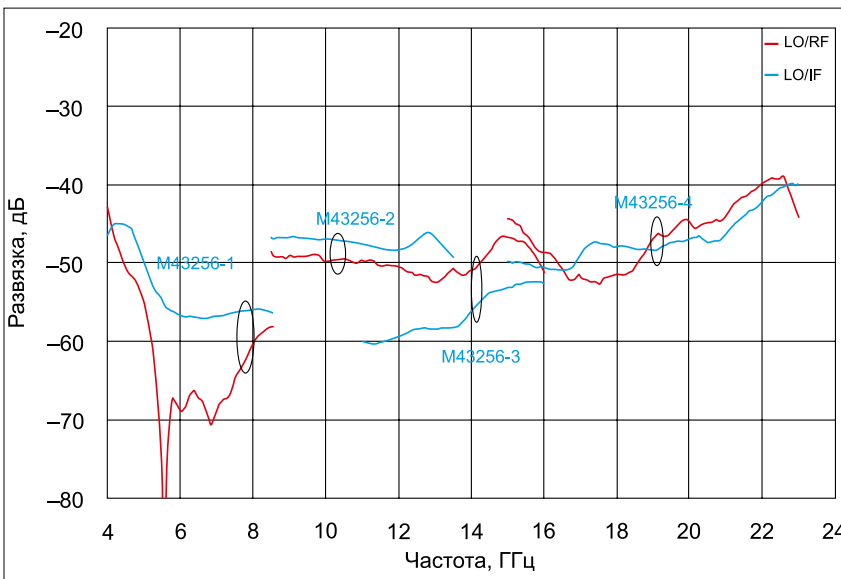
В таблице представлены основные характеристики разработанных смесителей и характеристики зарубежных аналогов.

В настоящее время проводится корпусирование и характеризация смесителей, а также коррекция смесителей M43256–1 и M43256–4 для улучшения их параметров.

Для измерения СВЧ-характеристик корпусированных МИС на предприятии используются контактирующие устройства (КУ) [2], работающие в диапазоне



▲ Рис. 3. Потери преобразования и подавление зеркального канала смесителей M43256 (режим преобразования «вниз» с внешним квадратурным сумматором,  $f_{IF} = 100$  МГц)



▲ Рис. 4. Развязка смесителей M43256

Таблица. Параметры смесителей

	Диапазон частот RF и LO, ГГц	Диапазон частот IF, ГГц	Потери преобразования, дБ, не более (типичное значение)	Развязка LO/RF, дБ, не менее (типичное значение)	Развязка LO/IF, дБ, не менее (типичное значение)	Подавление зеркального канала, дБ, не менее (типичное значение)
HMCS25LC4	4–8,5	0–3,5	11 (8)	33 (45)	14 (20)	20 (35)
M43256-1			10 (9)	33 (45)	40 (45)	20 (30)
HMCS21LC4	8,5–13,5	0–3,5	10 (8)	35 (45)	18 (22)	20 (30)
M43256-2			9 (8)	44 (47)	40 (45)	25 (30)
HMCS22LC4	11–16	0–3,5	10 (7,5)	40 (45)	18 (22)	17 (25)
M43256-3			9 (8)	42 (46)	40 (45)	27 (30)
HMCS23	15–23	0–3,5	13 (10)	40 (45)	17 (22)	19 (25)
M43256-4			7 (8)	40 (45)	40 (45)	27 (30)



▲ Рис. 5. Фотография модернизированного контактирующего устройства

частот 0–50 ГГц, на рис. 5 представлена фотография модернизированного КУ.

Модернизация прижимного механизма КУ позволила значительно повысить стабильность и повторяемость измерений, а также изменять силу прижима измеряемой микросхемы к контактным площадкам СВЧ-платы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе базовых технологий АО «НИИПП» были созданы пассивные смесители частот с подавлением зеркального канала в кристалльном исполнении и для поверхностного монтажа. Для достижения представленных результатов был проведен комплекс работ, включающий разработку топологий МИС, изготовление фотошаблонов, МИС и корпусов, подготовку программ и методик испытаний, разработку испытательной и измерительной оснастки. В настоящее время начинаются испытания смесителей. Образцы изделий будут доступны к концу 2020 года. Серийный выпуск изделий запланирован на начало 2021 года. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. [www.analog.com](http://www.analog.com)
2. Юценко А., Усюкевич А., Айзенштат Г., Федотова Ф., Пласкеев А., Кеврух С. Широкополосные СВЧ-переключатели для поверхностного монтажа // СВЧ-электроника. 2018. № 3.
3. [www.markimicrowave.com/blog/iq-image-reject-and-single-sideband-mixers/](http://www.markimicrowave.com/blog/iq-image-reject-and-single-sideband-mixers/)
4. [www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-mixer/image-rejection-mixer.php](http://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-mixer/image-rejection-mixer.php)
5. Ciamulski T. Accuracy of Electromagnetic Analysis for a MMIC Lange Coupler. *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2009.*
6. Kaushik K., Khatri R. K., Vyas H. P. Design & Modeling of Power Combiner/Divider for MMIC/MIC Applications. *Janesh Conference: National Conference on Recent Advancements in Microwave Technique and Applications (Microwave-2006), 2006.*
7. Lin C.-M., Lin C.-H. An Ultra-Broadband Doubly Balanced Monolithic Ring Mixer for Ku- to Ka-band Applications // *IEEE microwave and wireless components letters. 2007. Vol. 17. No. 10.*
8. IQ, image reject & single sideband Mixer Primer. Marki Microwave. [www.markimicrowave.com](http://www.markimicrowave.com)