

Кремниевые СВЧ смесители на основе диодов Шоттки в монолитном и гибридном исполнении

Будяков А. С., Вагин А. В., Васильев А. Г., Мельничук С. А., Савченко Е. М.

Рассмотрены различные варианты построения СВЧ смесителей на основе кремниевых диодов Шоттки в монолитном и гибридном исполнении. Приведены результаты моделирования и измерения широкополосных СВЧ смесителей на основе технологии LTCC и кремниевого технологического процесса.

Введение

Современные средства радиолокации, измерительной техники, систем широкополосной и сверхширокополосной связи требуют обширной номенклатуры СВЧ смесителей с широкой мгновенной полосой рабочих частот. Основными параметрами, которыми характеризуются пассивные смесители, являются: диапазон рабочих частот по входу сигнала радиочастоты, гетеродина и выходу промежуточной частоты; потери преобразования; развязка между входами; точка компрессии коэффициента преобразования на 1 дБ; необходимый уровень мощности сигнала гетеродина. Современные СВЧ смесители реализуются в виде монолитной интегральной схемы (МИС) [1] или гибридной интегральной схемы (ГИС) [2].

Далее обсуждаются преимущества и недостатки указанных вариантов реализации, а также результаты разработки МИС и ГИС СВЧ смесителей на основе кремниевых диодов Шоттки.

Основные тенденции в развитии СВЧ смесителей

Существующие отечественные образцы широкополосных пассивных СВЧ смесителей выполняются, как правило, в виде модулей с использованием технологии однослойных поликорковых плат, что обуславливает их большие габариты ввиду отсутствия возможности вертикальной интеграции. Трёхмерная интеграция может быть реализована с использованием технологии многослойных плат на основе керамики с высокой (НТСС) или низкой (LTCC) температурой обжига [3]. Принципиальным недостатком давно известной технологии НТСС является использование тугоплавких металлов с высоким удельным сопротивлением, что не позволяет создавать на её основе качественные пассивные СВЧ устройства. В относительно недавно появившейся технологии LTCC применяются керамические листы с низкими значениями тангенса угла диэлектрических потерь и проводники из хорошо проводящих металлов (серебро, золото, платина). Толщина изоляционных керамических листов может изменяться в широких пределах (43-216 мкм), что позволяет задавать волновые сопротивления линий в широких пределах и строить на их основе разнообразные широкополосные пассивные цепи преобразования импеданса и симметрирующие устройства.

При построении МИС широкополосных СВЧ смесителей на основе полупроводниковых технологий отсутствует возможность изменения толщины диэлектрических слоёв в широких пределах, что не позволяет реализовать некоторые варианты широкополосных симметрирующих устройств. В случае применения стандартной кремниевой технологии возникают дополнительные проблемы, связанные с большими потерями в низкоомной

подложке и тонких слоях алюминиевой металлизации. Однако применение стандартной кремниевой технологии для построения СВЧ смесителей является перспективным, так как позволяет создавать малогабаритные высокоинтегрированные микросхемы. Например, такие МИС могут содержать встроенные маломощные усилители, переключатели, усилитель сигнала гетеродина и т. п. [4].

В диапазоне частот от 1 ГГц до 8 ГГц наибольшее распространение нашли двойные балансные пассивные СВЧ смесители на основе диодов Шоттки [1, 2]. К достоинствам таких смесителей можно отнести возможность работы с большими уровнями сигналов и хорошую изоляцию входов. Значительным преимуществом пассивных смесителей является принципиально более высокий динамический диапазон в сравнении с активными смесителями. В пассивном смесителе ограничение динамического диапазона сверху (точка компрессии на 1 дБ) определяется мощностью гетеродина, а снизу (коэффициент шума) – потерями на преобразование, т. к. с повышением мощности гетеродина потери на преобразование снижаются, а точка компрессии на 1 дБ растёт, то условия для расширения динамического диапазона снизу и сверху совпадают. Таким образом, повышение мощности гетеродина приводит к расширению динамического диапазона пассивного СВЧ смесителя. Точка компрессии коэффициента преобразования на 1 дБ двойного балансного смесителя примерно на 3 дБ меньше мощности сигнала гетеродина. Подача и съём напряжений с диодов осуществляются с помощью симметрирующих устройств (СУ), которые выполняют функцию согласования импеданса и преобразования несимметричного выхода источника сигнала в симметричный. Основные параметры пассивного смесителя в значительной мере определяются характеристиками симметрирующих устройств [5, 6]. Выбор диодов определяется компромиссом между полосой пропускания и потерями преобразования. Противоречие заключается в том, что при уменьшении площади перехода диода снижается проходная ёмкость (расширяется диапазон рабочих частот), но повышается последовательное сопротивление (что приводит к увеличению потерь преобразования).

СВЧ ГИС смесителя по технологии LTCC

При проектировании ГИС пассивного смесителя были использованы СУ Гуанелла (TR1, TR3 на рис. 1, рис. 2) или, как его еще принято называть, последовательно-параллельный трансформатор на линиях [7]. Данное СУ представляет собой две пары связанных линий, включённых по входу параллельно, а по выходу последовательно, что обеспечивает коэффициент трансформации сопротивлений 1:4. Обычно СУ Гуанелла применяются в сочетании с ферритовым сердечником [7], что ограничивает их применение в рамках планарных технологий. В ряде зарубежных публикаций [8-9] была показана возможность использования таких СУ без ферритовых сердечников, что делает их перспективными для построения ГИС СВЧ смесителей.

Для выделения сигнала промежуточной частоты использован отвод от середины сумматора мощности на связанных полосковых линиях (рис. 1 - TR2). В отсутствие сигнала гетеродина разность токов $i_1 - i_2$ равна нулю и сигнал на выходе смесителя отсутствует. При подаче достаточно большого для отпираания пары последовательно включённых диодов сигнала гетеродина появляется разность токов $i_1 - i_2$. В зависимости от полярности напряжения гетеродина выполняется неравенство $i_1 \ll i_2$ (положительная полярность $U_{\text{гет}}$) или $i_1 \gg i_2$ (отрицательная полярность $U_{\text{гет}}$), в результате чего выходной ток $i_{\text{вых}}$ изменяется в соответствии с функцией Хевисайда, а в спектре выходного напряжения возникают составляющие с частотами $m f_{\text{рч}} \pm n f_{\text{гет}}$, где m, n - целые числа.

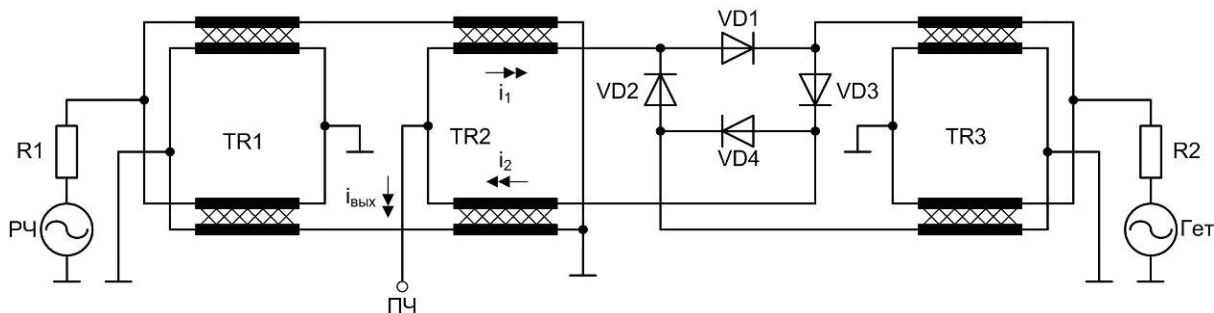


Рис. 1

Схема двойного балансного смесителя на основе СУ Гуанелла

Путём параметрического синтеза с использованием САПР электромагнитного моделирования была разработана топология СУ Гуанелла (рис. 2). Основные параметры в диапазоне частот 1-5 ГГц следующие: разбаланс по фазе не более 1 градуса, разбаланс по амплитуде не более 6 дБ, вносимые потери не более 0,6 дБ.

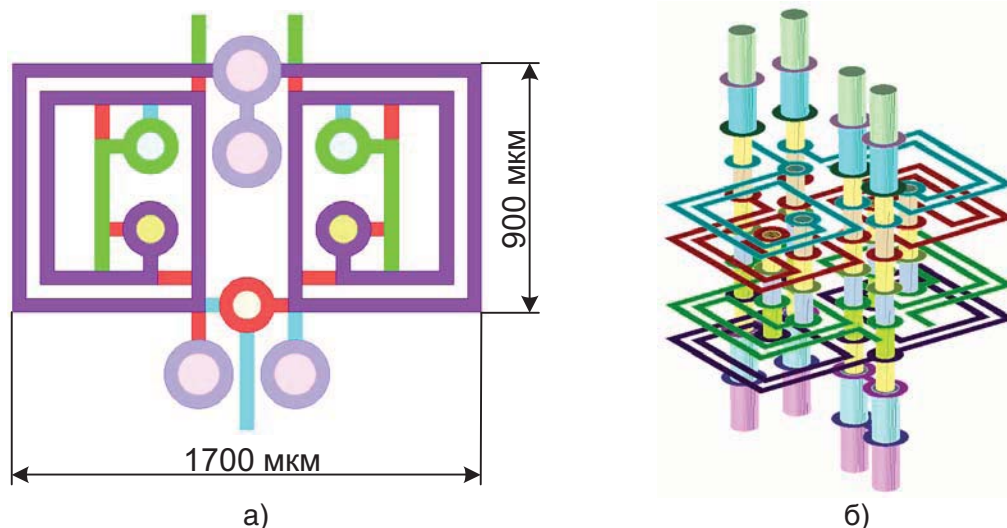


Рис. 2

Внешние размеры (а) и трёхмерная модель (б) СУ Гуанелла на основе технологии LTCC

На основе СУ (рис. 2) путём коммутации обмоток спроектировано устройство выделения сигнала промежуточной частоты. Расположение выводов ГИС смесителя выбрано в соответствии с зарубежными аналогами [2]. Подложка ГИС смесителя состоит из 10 керамических слоёв, внешние габариты LTCC ГИС смесителя составили 7x5x1,2 мм (ДШВ). Результаты моделирования ГИС смесителя методом гармонического баланса при мощности гетеродина 16 дБм приведены в таблице 1. Для сравнения представлены параметры аналогичного смесителя MCA1T-42MH+ от компании Mini-circuits (США) [2].

По результатам моделирования разработанная ГИС смесителя обладает коэффициентом преобразования около -6,5 дБ, КСВ на уровне 2 и изоляцией от сигнала гетеродина более 20 дБ в диапазоне частот 1-5 ГГц.

Основные параметры разработанного смесителя и МСА1Т-42МН+ [2]

Наим. параметра и ед. изм.	LTCC См.	МСА1-42МН+
Потери преобразования, дБ	5,5 - 10	5,2 - 10
Диапазон рабочих частот по входу, ГГц	1,5 - 6	0,8 - 4,3
Диапазон рабочих частот по выходу, МГц	0 - 2,5	0 - 1,7
Точка компрессии коэффициента преобразования на 1 дБ, дБм	11,5	9
Изоляция Гет-РЧ, дБ	30	28
Изоляция Гет-ПЧ, дБ	20	17
Изоляция РЧ-ПЧ, дБ	13	11
КСВ по входу РЧ	< 3	< 5
КСВ по выходу ПЧ	< 2,6	< 3.4

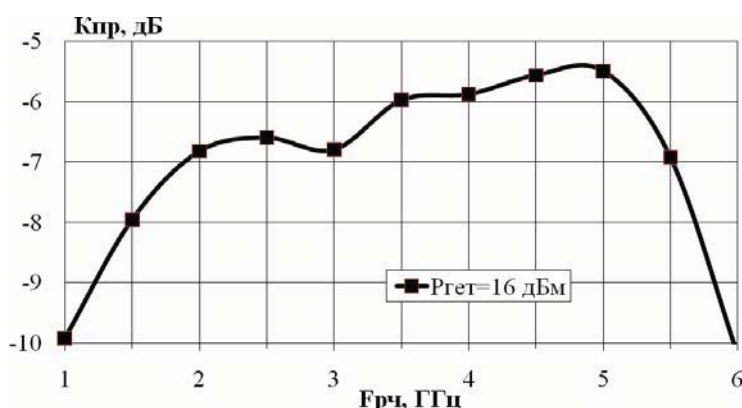


Рис. 3

Коэффициент преобразования модели СВЧ ГИС смесителя на основе СУ Гуанелла с диодами 10x10 мкм

СВЧ МИС смесителя по кремниевой технологии

СВЧ МИС пассивного смесителя на основе диодов Шоттки разработана в рамках стандартной кремниевой технологии. Основные параметры подложки следующие: удельное сопротивление подложки 25 Ом·см, толщина изолирующего оксида под верхним слоем металлизации 4 мкм, количество уровней металлизации - 3.

В качестве симметрирующих устройств применены трансформаторы с отводом от середины на основе двух вложенных катушек индуктивности с боковой магнитной связью. Для обеспечения малых значений разбаланса по амплитуде и фазе обмотки трансформаторов были выполнены симметрично на одном уровне металлизации. Второй уровень металлизации был использован только для организации пересекающихся связей. Размер использованных диодов Шоттки 10x100 мкм. Топология разработанного кристалла СВЧ смесителя приведена на рис. 4.

Для проведения измерений кристалл СВЧ МИС смесителя был установлен в стандартный металлокерамический корпус QLCC 6/8-1 для поверхностного монтажа с размерами 5x5 мм. Монтаж кристалла выполнен проволокой диаметром 35 мкм. Снижение паразитной индуктивности по цепи заземления обеспечивается параллельным включением множества монтажных проволок по периметру кристалла. Размер кристалла составляет 1,8x1 мм².

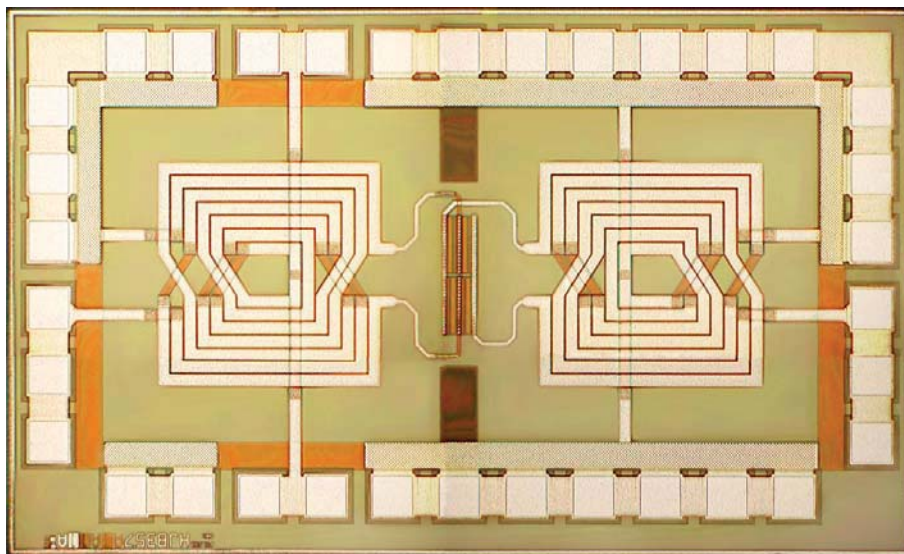


Рис. 4

Топология кристалла МИС пассивного смесителя

В таблице 2 и на рис. 5 приведены результаты измерений основных характеристик МИС пассивного СВЧ смесителя в измерительной оснастке. Точка компрессии коэффициента преобразования на 1 дБ, приведённая к входу по результатам измерений, составляет +12 дБм на частоте 3,5 ГГц при мощности на входе гетеродина +16 дБм.

Таблица 2

Основные параметры кремниевой СВЧ МИС смесителя и GaAs СВЧ МИС смесителя HMC128G8 [1]

Наим. параметра и ед. изм.	Si См.	HMC128G8
Потери преобразования, дБ	8,2 - 10	8,5 - 10
Диапазон рабочих частот по входу, ГГц	1,8 - 4,7	1,8 - 5
Диапазон рабочих частот по выходу, МГц	1900	2000
Точка компрессии коэффициента преобразования на 1 дБ, дБм	12	10
Изоляция Гет-РЧ, дБ	34	39
Изоляция Гет-ПЧ, дБ	30	30
Изоляция РЧ-ПЧ, дБ	15	7
КСВ по входу РЧ	< 3,0	< 4,4
КСВ по выходу ПЧ	< 2,1	< 2,0

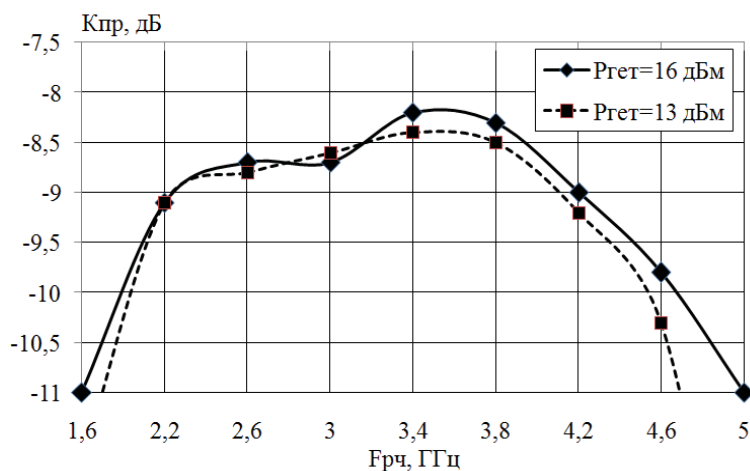


Рис. 5

Частотная зависимость коэффициента преобразования от входной частоты для МИС СВЧ смесителя

По результатам измерений разработанная СВЧ МИС смесителя обладает коэффициентом преобразования около -9 дБ, КСВ на уровне 2,5 и изоляцией от сигнала гетеродина более 20 дБ в диапазоне частот 1,6-5 ГГц.

Заключение

При построении СВЧ смесителей в диапазоне частот до 5 ГГц с использованием кремниевых диодов Шоттки использование технологии LTCC для реализации симметрирующих устройств позволяет обеспечить потери преобразования на уровне 6-7 дБ, в то время как потери аналогичных интегральных микросхем в монолитном исполнении на кремниевой подложке составляют 9-11 дБ. Преимуществом кремниевых СВЧ МИС смесителей являются существенно меньшие габариты и стоимость. Перспективным направлением является интеграция в состав МИС (ГИС) смесителя вспомогательных усилителей и электронных ключей, которые позволят расширить функциональные возможности конечного изделия.

Литература

1. Техническое описание микросхем HMC175MS8, HMC128G8, Website: www.hittite.com
2. Техническое описание микросхем MCA1-60MH+, RMS-42MH+, MCA1T-42MH+, Website: www.minicircuits.com
3. Комор В. П., Лукьянов А. В., Егоров Г. Н., Воропаев В. П. РУК на конструирование многослойных модулей на основе низкотемпературной совместнообжигаемой керамики Green Tape™, LTCC. - Ростов-на-Дону, ФГУП РНИИРС, 2007.
4. Техническое описание микросхем Max9984, Max2039, Website: www.maxim-ic.com
5. Мельничук С. А., Будяков А. С., Савченко Е. М. Обзор СВЧ симметрирующих устройств на основе технологии LTCC // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. - М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2009, с. 60-62.
6. Савченко Е. М., Будяков А. С., Вагин А. В. Анализ основных направлений построения кремниевых интегральных СВЧ преобразователей частоты в монолитном исполнении. // Материалы XVI координационного научно-технического семинара по СВЧ технике. - Нижегородская обл., п. Хахалы, 8-10 сентября 2009 г., с. 94-96.
7. Заенцев В. В., Катушкина В. М., Лондон С. Е., Модель З. И. Устройства сложения и распределения мощностей высокочастотных колебаний / Под ред. З. И. Моделя. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.
8. Yeong J. Yoon, Yicheng Lu. Design and Characterization of Multilayer Spiral Transmission-Line Baluns. // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol. 47, no. 9, September 1999.
9. J. Horn, G. Boeck. Integrated Transmission Line Transformer // IEEE MTT-S Digest - 2004.