

МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ С-Х-КУ-ДИАПАЗОНА С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ 1,5 Вт

В статье представлены результаты разработки и практической реализации широкополосных монокристаллических интегральных СВЧ-усилителей диапазона частот 5–18 ГГц с выходной мощностью 1,5 Вт и 0,9 Вт. Приведены основные принципы моделирования и результаты экспериментального исследования электрических характеристик образцов.

ВВЕДЕНИЕ

Применение в приемопередающих модулях (ППМ) СВЧ-диапазона монокристаллических интегральных схем (МИС) позволяет достичь высокой повторяемости характеристик СВЧ-тракта, повысить надежность, существенно снизить массу и габаритные размеры аппаратуры, уменьшить трудоемкость изготовления и настройки ППМ в серийном производстве. Одним из важнейших элементов СВЧ-тракта ППМ являются, в частности, широкополосные монокристаллические интегральные усилители мощности (УМ). В АО «Микроволновые системы» разработано два типа монокристаллических интегральных усилителей мощности диапазона частот 5–18 ГГц с выходной мощностью 1,5 Вт и 0,9 Вт, которые были изготовлены по GaAs-технологии PP25-21 на рНЕМТ-транзисторах с длиной затвора 0,25 мкм на фабрике «WIN Semiconductors» (Тайвань).

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Разработанные усилители мощности построены по балансной схеме, что позволяет обеспечить устойчивость и хорошее согласование с СВЧ-трактом. Усилитель с выходной мощностью 1,5 Вт (МИС МС120) содержит два транзистора с суммарной шириной затворов 3200 мкм, усилитель с выходной мощностью 0,9 Вт (МИС МС080) — два транзистора с суммарной шириной затворов 2400 мкм. Усилители работают в классе АВ. Напряжение питания стока +8 В. Габаритные размеры кристаллов составляют 3,7×3,1×0,1 мм. Внешний вид образцов МИС представлен на рис. 1.

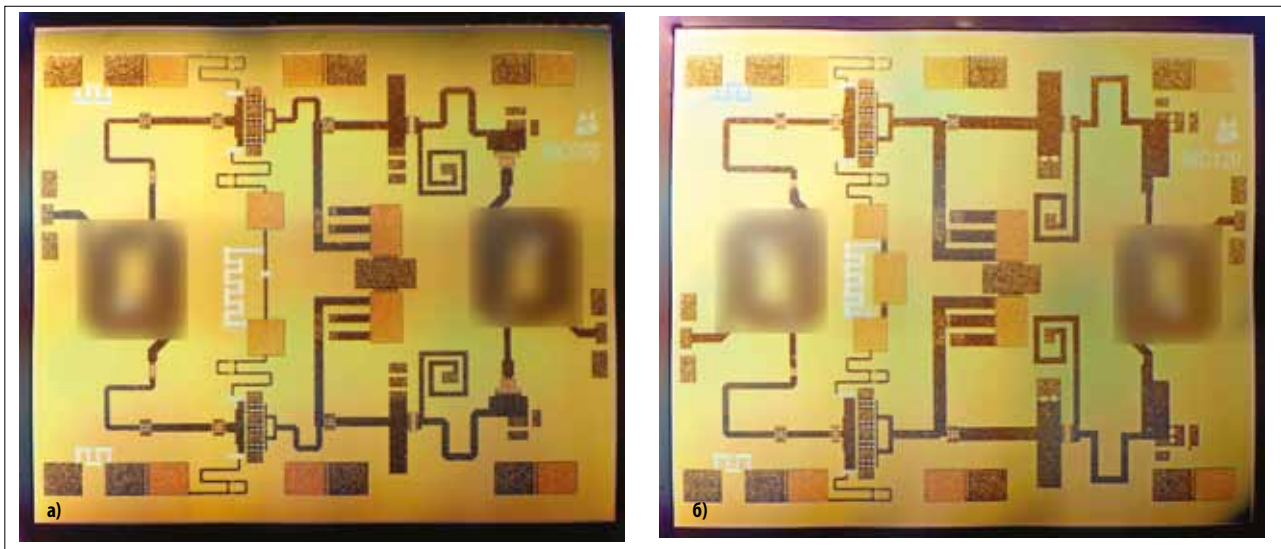
Для проектирования использовался САПР AWR Microwave Office и библиотека моделей базовых элементов, предоставленная фабрикой (PDK v.1.1.4).

В процессе работы над проектом был разработан компактный микрополосковый квадратурный делитель/сумматор

мощности; определены требования к согласующим цепям транзисторов и проведен их синтез, оптимизация и электродинамическое моделирование; уточнены модели базовых элементов, спроектирована топология микросхем.

Расчетные вносимые потери квадратурного моста составили величину 0,17–0,4 дБ в рабочем диапазоне частот при КСВН не более 1,25.

При электродинамическом моделировании фрагментов согласующих цепей была обнаружена некорректность модели базового элемента, представляющего собой межслойный конденсатор, расположенный непосредственно над металлизированным отверстием. В связи с этим были разработаны собственные масштабируемые эквивалентные схемы двух видов такого элемента (однопортовый и двухпортовый). Верификация моделей проводилась с помощью электродинамического моделирования и исполь-



▲ Рис. 1. Внешний вид образцов МИС-усилителей

зования данных измерений S-параметров межслойных конденсаторов, предоставленных фабрикой.

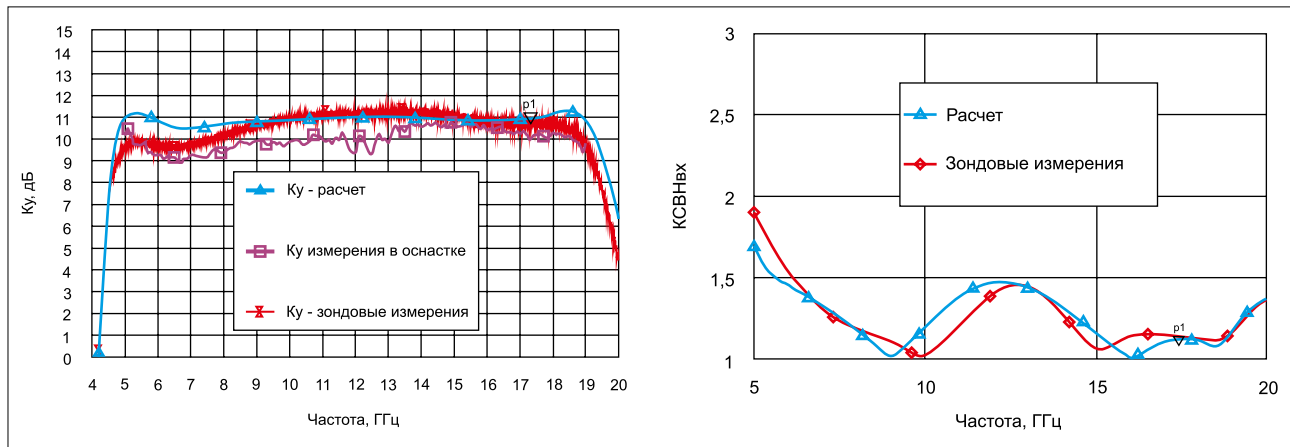
Для проектирования выходных согласующе-трансформирующих цепей (СТЦ) был проведен анализ нагрузочных характеристик нелинейных моделей транзисторов и определены требования к оптимальным нагрузочным импедансам Z_{opt} в рабочем диапазоне частот. Для упрощения процедуры синтеза транзистор может быть представлен в виде эквивалентной параллельной RC-цепи с комплексно-сопряженным импедансом \bar{Z}_{opt} . Задача проектирования выходной

Таблица. Расчетные данные для синтеза выходных СТЦ

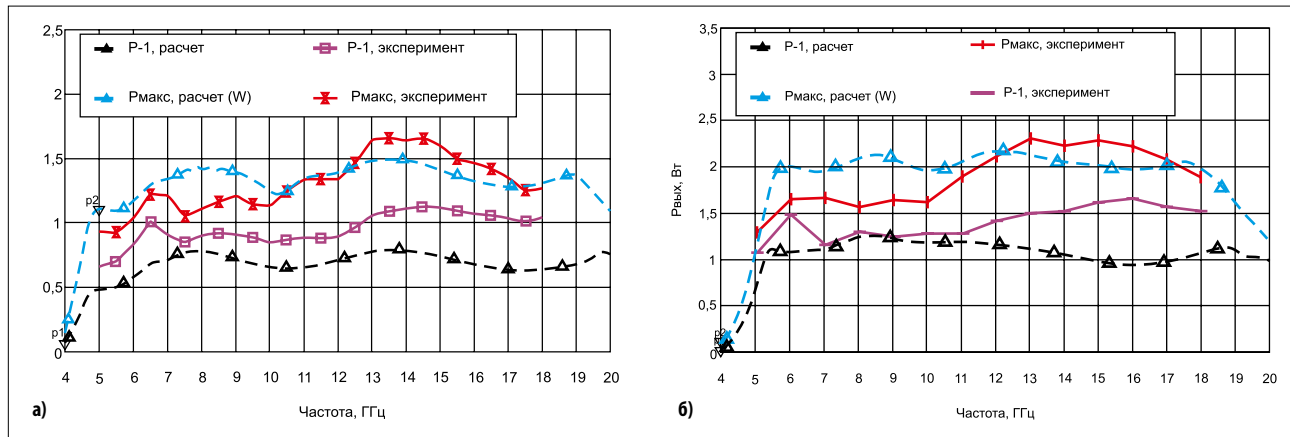
Критерий	Ширина затвора транзистора, мкм	Параметры эквивалентной RC-цепи		Γ _{max}
		R, Ом	C, пФ	
«Pмакс»	1200	31 (5–18 ГГц)	0,3 (5–18 ГГц)	0,15
	1600	23 (5–18 ГГц)	0,4 (5–18 ГГц)	
«P-1»	1200	36 (16–18 ГГц); 40–46 (5–15 ГГц)	0,36 (5–18 ГГц)	0,2–0,3
	1600	27 (16–18 ГГц); 30–35 (5–15 ГГц)	0,48 (5–18 ГГц)	

СТЦ в этом случае сводится к согласованию такой RC-цепи с 50-омной линией передачи. При этом согласно ограничению Боде-Фано [1], чем выше произ-

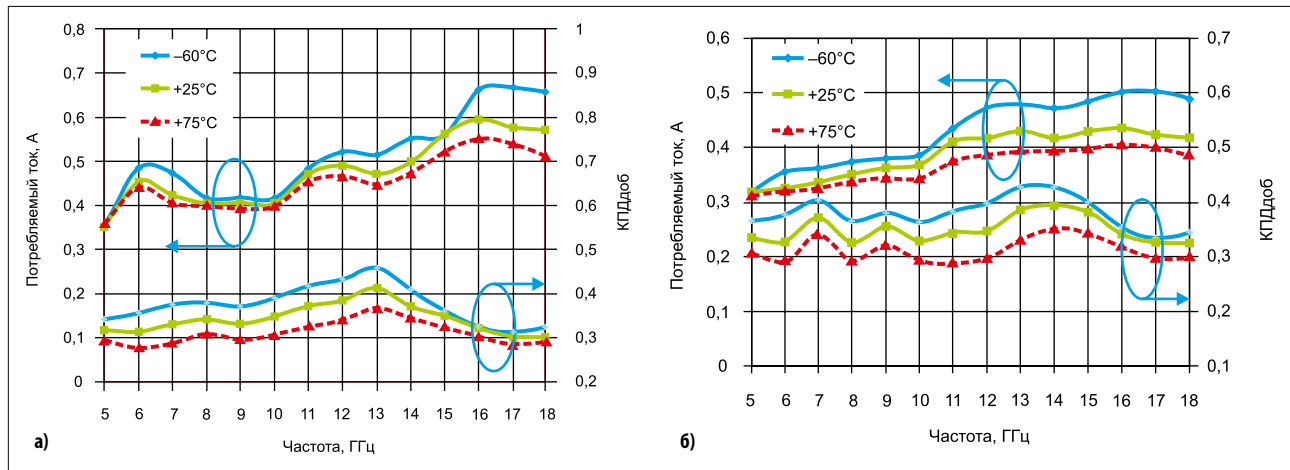
ведение постоянной времени RC-цепи на абсолютную полосу частот, тем хуже согласование. Расчетные данные для получения максимального КПД и мощ-



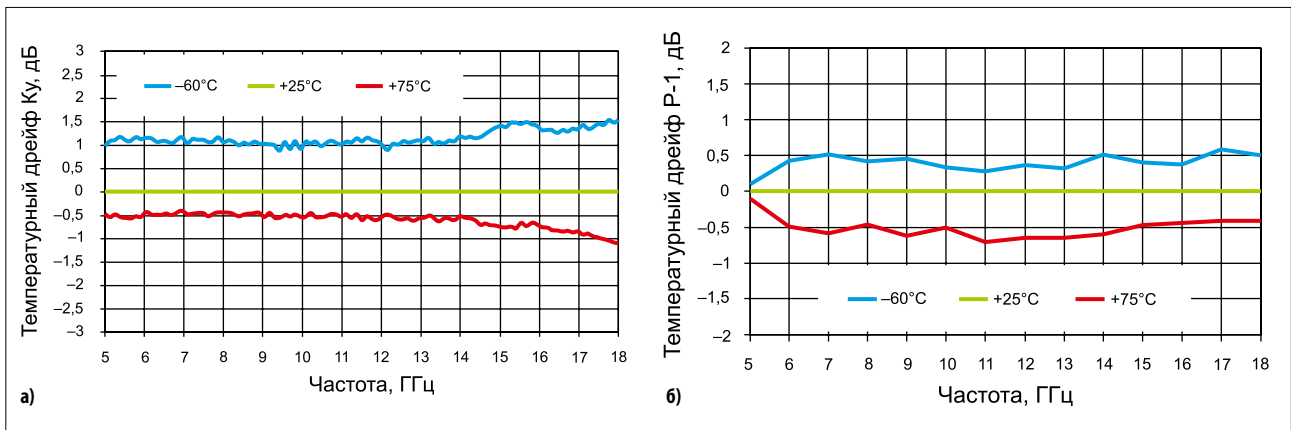
▲ Рис. 2. Малосигнальный коэффициент усиления и KCVNvx МИС МС120, расчет и эксперимент



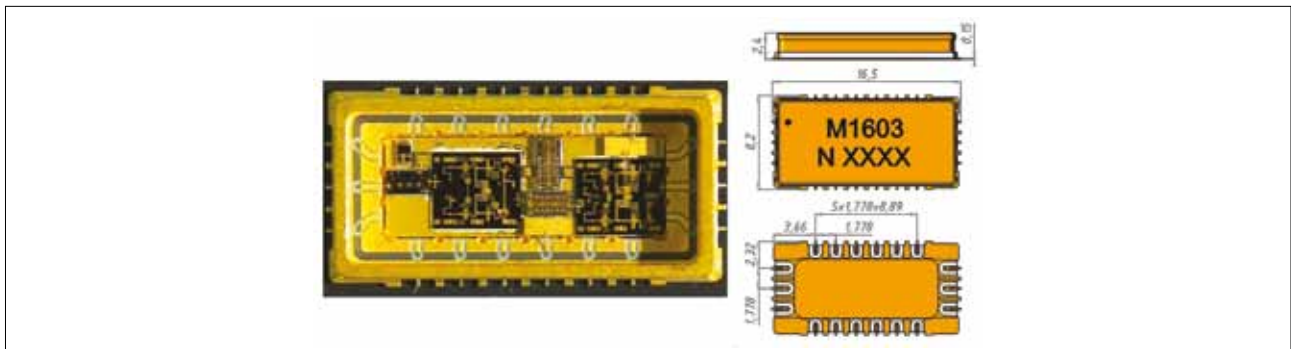
▲ Рис. 3. Выходная мощность МИС МС120 (а) и МС080 (б), расчет и эксперимент. Расчетные характеристики показаны пунктирными линиями



▲ Рис. 4. Ток потребления и КПД по добавленной мощности МИС МС120 (а) и МС080 (б) в диапазоне температур –60...+75 °С



▲ Рис. 5. Типовой температурный дрейф параметров МИС MS120 и MS080



▲ Рис. 6. Конструкция интегрального усилительного модуля в корпусе SMD-монтажа. Диапазон частот 5–18 ГГц, выходная мощность 1,5 Вт

ности в режиме насыщения (критерий « $P_{\text{макс}}$ ») и для получения максимальной мощности в режиме компрессии усиления 1 дБ (критерий « P_{-1} ») приведены в таблице. В результате проведенного синтеза четырехконтурных цепей с использованием моделей базовых элементов были получены коэффициенты отражения $\Gamma_{\text{макс}}$, характеризующие достижимое качество согласования в рабочей полосе частот. Дальнейшее наращивание количества контуров нецелесообразно из-за возрастающих потерь при незначительном улучшении $\Gamma_{\text{макс}}$.

Из данных, приведенных в таблице, видно, что по критерию « P_{-1} » коэффициент отражения $\Gamma_{\text{макс}}$ в 1,5–2 раза выше, чем по критерию « $P_{\text{макс}}$ », и более качественное согласование по критерию « P_{-1} » не достигается. Исходя из этого, оптимизация выходных СТЦ была проведена по компромиссному критерию между « P_{-1} » и « $P_{\text{макс}}$ ». Для транзисторов 1200 мкм и 1600 мкм были получены четырехконтурные, аналогичные по структуре реактивные цепи.

Входные реактивно-диссипативные согласующие цепи оптимизированы для получения максимального коэффициента усиления с минимальной частотной неравномерностью в рабочем диапазоне частот.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Были проведены экспериментальные исследования электрических характеристик МИС в диапазоне рабочих

температур $-60 \dots +75^\circ\text{C}$, режимных зависимостей, динамических характеристик, проведены зондовые измерения малосигнальных S-параметров. Особое внимание было уделено исследованию отсутствия самовозбуждения в рабочем диапазоне температур. Для измерений параметров в нелинейном режиме и в диапазоне рабочих температур микросхемы устанавливали в технологическую оснастку с коаксиальными соединителями. Основные малосигнальные характеристики и частотные характеристики выходной мощности усилителей в сравнении с результатами расчета приведены на рис. 2–3. Отклонение экспериментальных данных от расчетных по малосигнальному коэффициенту усиления составило не более 1 дБ в участке рабочего диапазона частот 5–8 ГГц и не более 0,2 дБ в участке диапазона частот 8–18 ГГц. Отклонение экспериментальных данных от расчетных по КСВН составило не более 10%. На рис. 4–5 приведены частотные характеристики в рабочем диапазоне температур $-60 \dots +75^\circ\text{C}$. КПД по добавленной мощности в режиме насыщения составил 30–40%.

С применением МИС MS080 и MS120 были разработаны два усилительных микромодуля: в рабочем диапазоне частот 5–18 ГГц с выходной мощностью 1,5 Вт (конструкция показана на рис. 6) и с выходной мощностью более 7 Вт, в котором MS120 используется

в качестве предварительного усилителя (модуль M04C). Микромодули выполнены в металлокерамических корпусах SMD-монтажа и фланцевого типа, по конструкции аналогичны представленным в [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования электрических характеристик разработанных МИС показали хорошую точность моделирования. Усилители имеют высокий КПД 30–40%, высокий малосигнальный коэффициент усиления 10 дБ с низкой частотной неравномерностью не более 1 дБ. Выходная мощность усилителей составляет 0,9 и 1,5 Вт. Характеристики обеспечиваются в широкой полосе частот с перекрытием 3,5:1. МИС и микромодули на их основе могут быть использованы при построении приемо-передающих каналов радиоэлектронных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. M. Fano. *Theoretical Limitations on the Broadband Matching of Arbitrary Impedances*//Technical Report No 41, Jan 2, 1948, MIT Research Laboratory of Electronics.
2. Маркинов Е. Г., Радченко А. В. *Сверхширокополосные интегральные усилители мощности в корпусах поверхностного монтажа*//Материалы 26 Международной крымской конференции, Севастополь, Вебер, 2016, стр. 185.