

Интегральные схемы СВЧ широкополосных усилителей в частотных диапазонах от L до Ka на основе CMOS и BiCMOS технологий

Л.И. Бабак¹, А.А.Коколов¹, Ф.И. Шеерман¹, А.С. Коряковцев¹, Д.А.Конкин¹, И.М.Добуш¹,
А.В. Помазанов¹, Е.А. Шутов¹, Ю.В. Светличный^{1,2}

¹НИИ микроэлектронных систем при ТУСУР

²ООО «ЛЭМЗ-Т»

Аннотация: рассматриваются разработка и экспериментальные характеристики четырех ИС СВЧ широкополосных малошумящих и буферных усилителей, работающих в частотных диапазонах от L до Ka. ИС выполнены на основе SiGe BiCMOS технологий с использованием полевых CMOS или биполярных гетеропереходных HBT транзисторов.

Ключевые слова: SiGe BiCMOS, СВЧ, интегральная схема, широкополосный усилитель, транзистор, CMOS, HBT.

1. Введение

В настоящее время в мире наблюдается тенденция все более широкого применения технологий на основе кремния Si (CMOS) и соединения кремний-германий SiGe (BiCMOS) для изготовления СВЧ интегральные схем (ИС) [1, 2]. Технологии Si CMOS используют только полевые CMOS транзисторы, технологии SiGe BiCMOS позволяют реализовать также гетеропереходные биполярные транзисторы (HBT), обладающие лучшими частотными свойствами и более низким коэффициентом шума. По сравнению с монолитными СВЧ ИС на базе материалов GaAs и GaN кремниевые ИС позволяют одновременно выполнить функции обработки аналоговых и цифровых сигналов в одном кристалле, т.е. реализовать концепцию "система на кристалле" (СнК); имеют меньшие размеры компонентов, в связи с чем допускают более плотную упаковку; потребляют гораздо меньшую мощность и дешевле; приемо-передатчики (ППМ) на базе СнК более технологичны и надежны [1, 2]. Указанные качества CMOS и BiCMOS ИС особенно ценны в таких перспективных применениях, как системы связи 5G, интернет вещей и т.д. При необходимости получения низкого коэффициента шума на входе CMOS/BiCMOS приемника используется малошумящий GaAs усилитель, а для обеспечения высокого уровня выходного сигнала CMOS/BiCMOS передатчика на его выходе включается GaAs или GaN усилитель мощности.

В настоящей статье рассматриваются разработка и экспериментальные характеристики четырех ИС широкополосных транзисторных усилителей (ТУ), работающих в частотных диапазонах от L до Ka. Все усилители предназначены для работы в СВЧ несимметричном 50-Ом тракте и выполнены на основе SiGe BiCMOS технологий. Два из них используют только полевые CMOS транзисторы и являются прототипами для разработок подобных усилителей на основе отечественных радиочастотных CMOS технологий.

2. Проектирование ИС широкополосных усилителей

Проектирование ИС усилителей включает ряд этапов: 1) выбор технологического процесса и типов транзисторов; 2) разработка принципиальной схемы; 3) электромагнитное (ЭМ) моделирование отдельных элементов усилителя,

схемотехническое моделирование и уточнение (оптимизация) параметров всех элементов ТУ; 4) разработка топологии и окончательное ЭМ моделирование усилителя.

Выбор техпроцесса и типов транзисторов осуществляется на основе оценки достижимых параметров усилительных элементов и сопоставления с требованиями, предъявляемыми к характеристикам ТУ. На этапе разработки принципиальной схемы усилителей, помимо традиционных подходов (поиск и анализ схемотехнических решений, имеющих в литературе, использование упрощенных инженерных методик расчета, многократное моделирование и оптимизация схемы ТУ), применялись также методы синтеза как схем отдельных пассивных цепей (согласующе-корректирующих цепей – СКЦ, цепей обратной связи – ОС), так и полной схемы устройства. Указанные методы синтеза основаны на двух основных подходах: 1) использование интерактивной "визуальной" методики проектирования СВЧ ТУ [3]; 2) автоматический синтез пассивных цепей и полной схемы СВЧ ТУ на базе генетического алгоритма [4].

Первоначальное схемотехническое моделирование и оптимизация схем усилителей выполнялись при помощи САПР Advanced Design System компании Keysight Technologies, при этом использовалась библиотека элементов для применяемого техпроцесса изготовления ИС. Топологии катушек индуктивности были предварительно спроектированы, и при моделировании катушки характеризовались параметрами рассеяния, полученными в результате ЭМ анализа. Разработка полной топологии и окончательное моделирование ТУ выполнялись в САПР Cadence компании Cadence Design Systems. При моделировании учитывались паразитные параметры проводников, площадок и других соединительных элементов, в том числе при разводке цепей по разным слоям металлизации ИС.

Характеристики изготовленных ИС измерялись непосредственно на полупроводниковой пластине с помощью зондовой станции Cascade Microtech Summit 11K, а также измерительных приборов компаний Rohde&Schwarz и Keysight.

3. ИС EAB2400C – широкополосный буферный усилитель диапазона 1–5 ГГц на основе CMOS транзисторов

ИС EAB2400C представляет собой широкополосный буферный усилитель (gain block). Она выполнена на основе 0,25 мкм SiGe BiCMOS технологии с использованием только полевых CMOS-транзисторов. Так как ИС перекрывает L-, S- диапазоны и частично C-диапазон, она является универсальной и может использоваться в приемниках и приеме-передатчиках разного назначения в различных частотных поддиапазонах, а также в широкополосной СВЧ аппаратуре. При снижении требований к согласованию на входе и выходе ИС EAB2400C может использоваться вплоть до частоты 7 ГГц.

Усилитель состоит из двух каскадов, каждый из них содержит цепь отрицательной ОС для выравнивания коэффициента усиления и обеспечения согласования. На входе и выходе усилителя, а также между каскадами используются также широкополосные СКЦ, одновременно реализующие подачу питания на транзисторы и развязку по постоянному току. Для разработки принципиальной схемы ТУ использовалась методика синтеза на основе генетического алгоритма [4]. Процесс проектирования ИС усилителя с помощью программы Geneamp описан в [5].

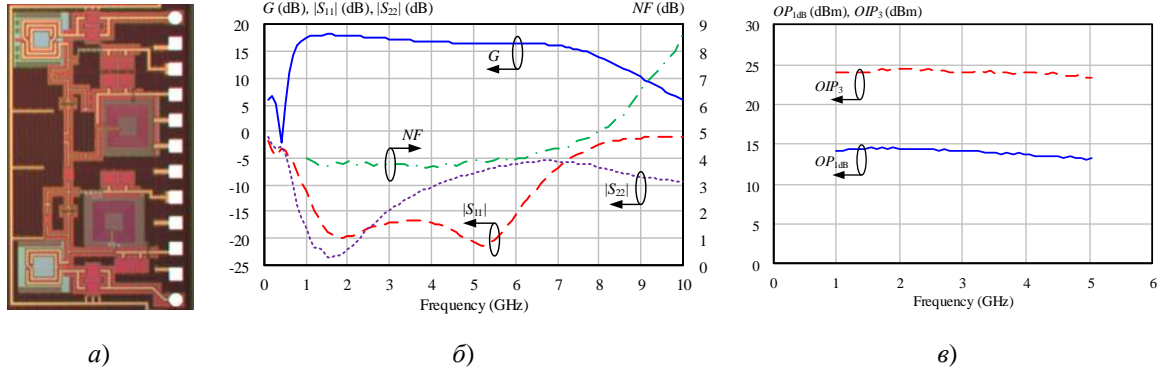


Рисунок 1. ИС EAB2400С буферного усилителя диапазона 1-5 ГГц: а) фотография топологии (площадь 1,8 мм²); б) измеренные характеристики G , NF , $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$; в) измеренные характеристики OP_{1dB} и OIP_3

На рисунке 1а показана фотография кристалла ИС EAB2400С. На рисунке 1б,в представлены частотные зависимости коэффициента усиления G , коэффициента шума NF , коэффициентов отражения на входе $|S_{11}|$ и выходе $|S_{22}|$, а также выходной мощности OP_{1dB} при компрессии 1 дБ и точки пересечения 3-го порядка OIP_3 , характеризующей нелинейные свойства усилителя. В полосе 1–5 ГГц коэффициент усиления составляет около 17 дБ, коэффициент шума не превышает 4 дБ, выходная мощность не менее 13 дБм, величина OIP_3 не менее 23,4 дБ.

4. ИС EAB5500С – буферный усилитель диапазона 8–12 ГГц на основе CMOS транзисторов

ИС EAB5500С буферного усилителя X-диапазона выполнена на основе 0,13 мкм SiGe BiCMOS технологии тоже с использованием только CMOS-транзисторов. ИС может использоваться в радиолокационной аппаратуре – например, в составе кор-чипа или управляющей многофункциональной ИС типа "система на кристалле" для АФАР. При ослаблении требований к согласованию может работать в диапазоне частот 6–18 ГГц.

Буферный усилитель состоит из одного каскада по каскодной схеме с отрицательной ОС, на входе и выходе применены СКЦ. На рисунке 2 представлены фотография кристалла ИС, измеренные частотные зависимости S -параметров и выходной мощности P_{1dB} при двух значениях потребляемого тока - 33 мА и 35 мА. В полосе частот 8-12 ГГц ИС EAB5500С обеспечивает коэффициент усиления около 10 дБ, выходную мощность P_{1dB} не менее 10,7 дБм и коэффициент шума около 4,5 дБ.

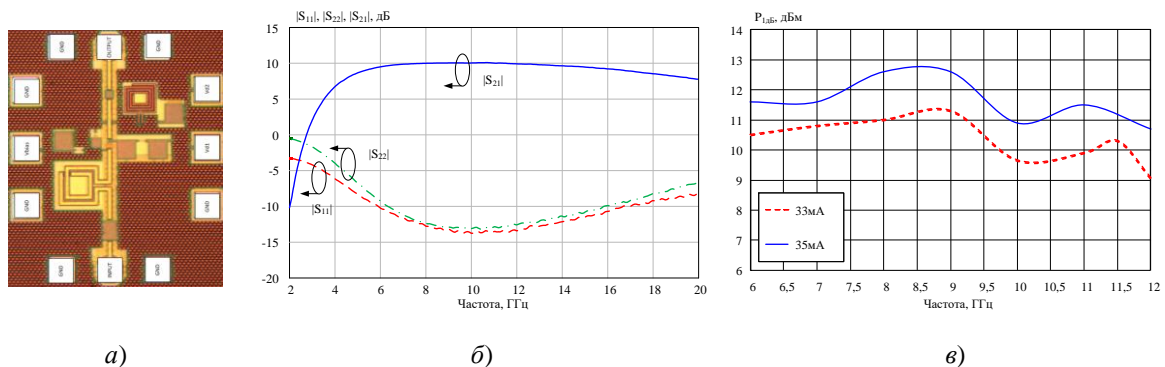
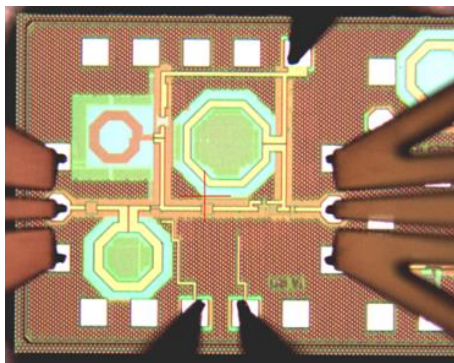


Рисунок 2. ИС EAB5500С буферного усилителя диапазона 8-12 ГГц: а) фотография топологии (0,8x0,65 мм²); б) измеренные S -параметры; в) измеренная выходная мощность P_{1dB} при двух значениях потребляемого тока

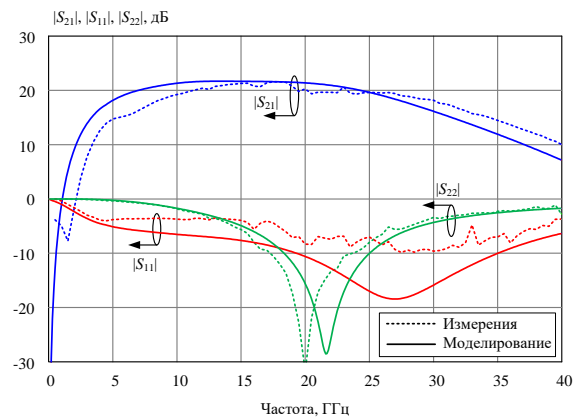
5. ИС EAL7700H – широкополосный мал шумящий усилитель диапазона 18 – 25 ГГц на основе HBT транзисторов

ИС EAL7700H представляет собой широкополосный мал шумящий усилитель с полосой пропускания 18–25 ГГц, выполненный на основе 0,25 мкм SiGe BiCMOS технологии с использованием биполярных HBT-транзисторов. Может использоваться в радиочастотном тракте приемников К- и Ка-диапазонов, в том числе в системах 5G, а также в широкополосной СВЧ аппаратуре. При ослаблении требований к коэффициентам отражения на входе и выходе до -5 дБ ИС может работать в более широком частотном диапазоне 15-30 ГГц, а при отсутствии указанных требований – даже в полосе 6-32 ГГц.

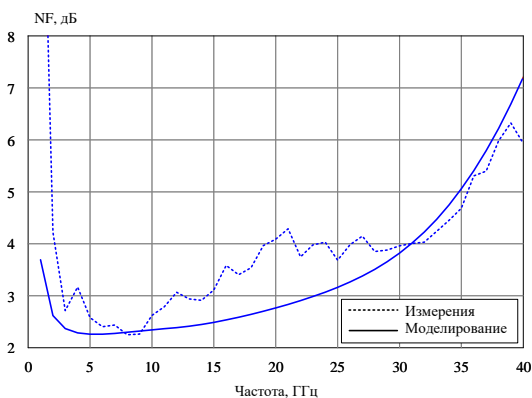
Усилитель включает два каскада, первый из них по схеме с общим эмиттером, а второй – по каскодной схеме с отрицательной ОС. На входе, выходе усилителя и между каскадами применяются СКЦ. Фотография чипа, измеренные частотные и смоделированные зависимости S -параметров, коэффициента шума, а также выходной мощности $P_{1дБ}$ и $P_{3дБ}$ при компрессии усиления соответственно на 1 дБ и 3 дБ показаны на рисунке 3. В полосе 18–25 ГГц коэффициент усиления близок к 23 дБ, коэффициент шума около 3,7 дБ, выходная мощность $P_{1дБ}$ не менее 5,7 дБм.



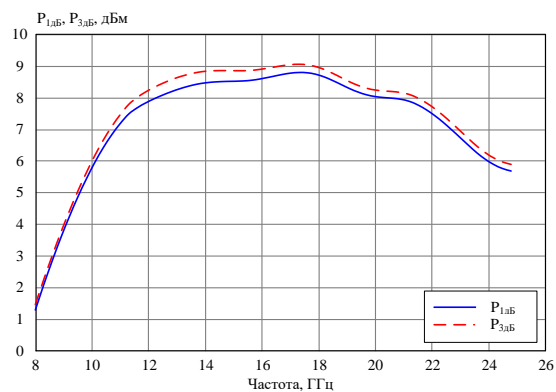
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3. ИС EAL7700H мал шумящего усилителя диапазона 18-25 ГГц: а) фотография топологии (0,9x0,85 мм²); б) измеренные S -параметры; в) измеренный коэффициент шума; г) характеристики выходной мощности $P_{1дБ}$ и $P_{3дБ}$

6. ИС ЕАВ0800Н – сверхширокополосный буферный усилитель (драйвер оптического модулятора) диапазона DC–35 ГГц на основе НВТ транзисторов

ИС ЕАВ0800Н – буферный усилитель с полосой DC–35 ГГц, выполненный на основе 0,25 мкм SiGe BiCMOS технологии на НВТ-транзисторах. Может использоваться в системах обработки сверхширокополосных сигналов, приемопередатчиках, измерительном оборудовании и др. Возможно также применение в качестве ИС драйвера для усиления СВЧ сигнала, возбуждающего оптический модулятор (например, типа Маха-Цендера) в оптоэлектронных (радиофотонных) системах со скоростью передачи данных до 30-35 Гбит/с.

Усилитель состоит из двух каскадов, первый по схеме с общим эмиттером с отрицательной ОС, второй - по каскодной схеме. На рисунке 4 показаны фотография кристалла ИС, измеренные частотные зависимости S-параметров и выходной мощности $P_{1дБ}$ и $P_{3дБ}$. На частотах до 25 ГГц ИС обеспечивает коэффициент усиления порядка 20 дБ и выходную мощность $P_{1дБ}$ не менее 3 дБм.

Измеренные параметры разработанных ИС широкополосных малошумящих и буферных усилителей сведены в таблицу.

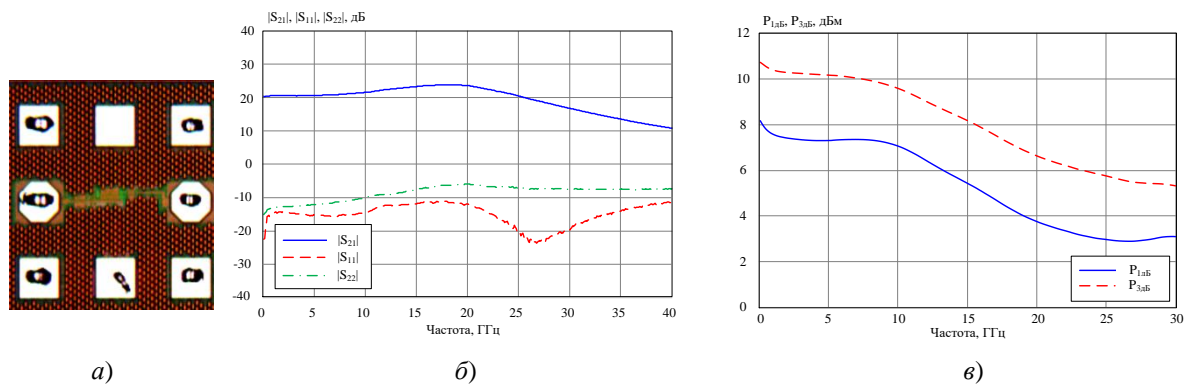


Рисунок 4. ИС ЕАВ0800Н буферного усилителя диапазона DC–35 ГГц: а) фотография топологии (0,38x0,38 мм²); б) измеренные S- параметры; в) характеристики выходной мощности $P_{1дБ}$ и $P_{3дБ}$

Таблица 1. Измеренные параметры ИС широкополосных усилителей

Обозначение	ЕАВ2400С		ЕАВ5500С		ЕАЛ7700Н		ЕАВ0800Н	
Δf , ГГц	1–5	1–7	8–12	6–18	18–25	15–30	DC–35	DC–12
$ S_{21} $, дБ	17,5±0,5	18..16,5	10,0±0,1	8,9..10,0	22..23,5	20..23,5	22..15	20,5±0,5
$ S_{11} $, дБ	-11..-22	-8..-22	-13..-14	-9,5..-14	-7..-10	-5,5..-10	-10,5	-12
$ S_{22} $, дБ	-8..-23	-5,5..-23	-12..-13	-8,5..-13	-8..-25	-4,5..-25	-15..-7,5	-13..-10
NF, дБ	3,6..4,0	3,6..4,4	3,7..4,6	-	3,7..3,8	3,3..4	6..7 (1–24 Гц)	
$P_{1дБ}$, дБм	14,6..13,2	-	12,7..10,6	-	5,7..8,7	5,7..8,7	8,0..3,0	8,0..6,5
V_p , В	+3		+3,0;+1,0		+3,0		+5	
I_p , мА	60		35		24		34	
Габариты, мм ²	1,8		0,8×0,65		0,9×0,85		0,38×0,38	

7. Заключение

В статье представлены результаты разработки и экспериментального исследования четырех ИС широкополосных малошумящих и буферных усилителей, которые в совокупности перекрывают полосу частот от постоянного тока до 35 ГГц и, в частности, работают в СВЧ диапазонах L, S, C, X, Ku, K и Ka. ИС выполнены на основе 0,25 мкм и 0,13 мкм SiGe BiCMOS технологий с использованием только

полевых CMOS или только биполярных HBT транзисторов. По сравнению с СВЧ ИС на базе материалов GaAs и GaN кремниевые Si CMOS и SiGe BiCMOS ИС обладают рядом преимуществ, в частности, имеют меньшую потребляемую мощность, габариты и стоимость, обеспечивают более высокую степень интеграции.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке **Министерства науки и высшего образования РФ. Уникальный идентификатор 8.3423.2017/4.6.**

Список литературы

1. Dunn, J.S. Foundation of RF CMOS and SiGe BiCMOS technologies / J.S. Dunn [at al.] // IBM Journal of Research and Development — 2003. — Vol.47. — No 2/3 — P. 101–137.
2. Cressler J.D., Niu G. Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar Transistors — London-Boston, Artech House, 2003. — 589 P.
3. Babak, L.I. Design of multistage low-noise amplifiers using «visual» CAD Tools / L.I. Babak [at al.] // IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – Baltimore, USA. – June 2011. - P. 1-4.
4. Babak L.I. A new genetic-algorithm-based technique for low noise amplifier synthesis / L.I. Babak [at al.] // European Microwave Week 2012. — Amsterdam, The Netherlands. — Oct. 2012. — P. 520-523.
5. Dobush, I.M. Automated synthesis and measurement of broadband 1–5 GHz CMOS buffer amplifier / I.M. Dobush [at al.] // Proc. Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – 2017. – P. 1–4.