2. Пушница И. С., Стрельников С. И., Фазылханов О. Р., Филаретов А. Г. Практика разработки и верификации инструментов проектирования (PDK) СВЧ МИС // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ–2018): материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. 17–18 апр. 2018 г. Омск, 2018.

3. Аникин А. В., Дёмин С. В., Столяров А. А. Проблемы разработки и реализации базовых технологических процессов на технологическом комплексе НИИСИ РАН // Труды НИИСИ РАН. 2014. № 1. С. 4–17.

## УДК 621.372.54

## АКТИВНЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

В. В. Ерохин, К. В. Мурасов, С. А. Завьялов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. В данной статье описывается активный перестраиваемый полосовой фильтр в интегральном исполнении для использования в качестве сложно-функционального (СФ) блока в технологиях типа система-на-кристалле (СнК) или как полноценное самостоятельное устройство. Фильтр разработан в стандартном технологическом процессе БиКМОП кремний-германий (SiGe) 250 нм. Разработаны схемотехническое и топологическое описание, произведены экспериментальные образцы, разработана и произведена оснастка для дальнейших испытаний экспериментальных образцов. Площадь разработанного топологического описания  $0.22 \text{ мм}^2$  (без контактных площадок, которое используется в качестве СФ блока), площадь произведенного экспериментального образца  $0.99 \text{ мм}^2$  (с контактными площадками для испытаний и проверки реальных характеристик фильтра). Произведены многочисленные компьютерные моделирования экстракции топологического описания активного полосового фильтра. В результате моделирования было выявлено, что характеристики разработанного фильтра полностью соответствует техническому заданию: коэффициент усиления по напряжению в полосе пропускания не менее 11.93 дБ, коэффициент нелинейных искажений в полосе пропускания не более 5.82 %, верхняя частота среза перестраивается от 0.5 до 3.0 ГГц. Полосовой фильтр сохраняет рабочие характеристики в температурном диапазоне от  $-40 \degree C$  до  $+85 \degree C$ .

Ключевые слова: кремний-германий, БиКМОП 250 нм, полосовой фильтр, система-на-кристалле, топологическое описание, оснастка.

### DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-120-126

#### **І. В**ВЕДЕНИЕ

Полосовые фильтры являются неотъемлемой частью любых электронных систем. Полосовые фильтры диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) применяют в различной телекоммуникационной аппаратуре, в том числе в аппаратуре спутниковой и мобильной связи, в технологиях беспроводного доступа в интернет, радиолокации, радионавигации и др.

Бурное развитие микроэлектроники позволило значительно снизить массогабаритные размеры и стоимость беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что в свою очередь способствует повсеместному их использованию. В настоящее время БПЛА используются как в военной сфере для ведения боевых действий, разведки, так и в гражданских сферах для доставки грузов, наблюдения за территориями и объектами, в геодезии для картографии, в сельском хозяйстве для наблюдения и обработки полей. Сферы применений БПЛА и их количество растут в геометрической прогрессии. Согласно оценкам аналитиков Euroconsult, к 2025 году в мире будут использоваться порядка 600 тыс. БПЛА. В условиях большой плотности БПЛА, чтобы летательные аппараты не сталкивались друг другом, с птицами и со строениями они должны быть оснащены передовыми технологиями радиолокации. К таким технологиям предъявляются особенные требования, в частности малое потребление мощности, так как энергоресурс летательных аппаратов сильно ограничен. Решениями проблемы энергопотребления является применение энергоэффективных интегральных приемопередатчиков или применение интегральных пассивных радаров. Пассивные радары не излучают сигнала, а только принимают сигнал испускаемый объектом или отраженный от объекта. При отсутствии передатчика дрон сложнее обнаружить, что непременно может быть полезно для использования в военной сфере. Основной регион применения БПЛА с пассивным радаром это городская местность, в которой СВЧ диапазон заполнен сигналами различных бытовых устройств: радио, сигнализация, мобильная связь, Wi-Fi и другие. В любом из перечисленных случаев система радиолокации БПЛА требует наличия полосового фильтра СВЧ диапазона.

### II. Постановка задачи

Задачей данной работы является разработка активного перестраиваемого полосового фильтра, применяемого в качестве СФ блока для сверхширокополосного супергетеродинного приемника дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн. Основные технические требования для разработки фильтра сведены в табл. 1. Кроме параметров, занесенных в табл. 1, для экспериментального образца фильтра необходимо обеспечить согласование по входу и выходу с нагрузкой и источником сигнала 50 Ом.

## ТАБЛИЦА 1 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ФИЛЬТРУ

Параметр	Значение	
Технологический процесс	SiGe БиКМОП 250 нм	
Напряжение питания, В	2.5±10%	
Нижняя частота среза (F1), ГГц	0.1±5%	
Верхняя частота среза (F2), ГГц	Перестраивается от 0.5 до $3.0\pm5\%$	
Амплитуда входного дифференциального сигнала, мВ	8±2	
Коэффициент усиления по напряжению, дБ	Не менее 10	
Коэффициент нелинейных искажений в полосе пропускания, %	Не более 7	
Диапазон рабочих темпераатур, °С	-40+85	

III. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА И ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФИЛЬТРА

На рис. 1 представлена блок-схема разработанного активного перестраиваемого фильтра. Фильтр является полностью дифференциальным и состоит из дифференциальных усилителей (ДУ) и программноконфигурируемых фильтров нижних частот (ФНЧ). ФНЧ программируются двоичным кодом, состоящим из 5 бит (EN\_0 – EN\_4). При изменении управляющего кода, изменяется верхняя частота среза полосового фильтра. При подаче логического «0» на все управляющие входы (EN\_0 – EN\_4), верхняя частота среза фильтра будет равна 3.0 ГГц. При подаче логической «1» на все управляющие входы, верхняя частота среза фильтра будет равна 0.5 ГГц. При перестроении верхней частоты среза, нижняя частота среза остается неизменной и составляет 0.1 ГГц.



Рис. 1. Блок-схема активного перестраиваемого полосового фильтра

На рис. 2 представлена принципиальная схема дифференциального усилителя [1–5]. ДУ состоит из дифференциального каскада, основанного на транзисторах VT2, VT4. Транзисторы VT1, VT3, VT5 являются токовым зеркалом, которое задает ток, проходящий через дифференциальную пару транзисторов. На вход I\_REF подается стандартный опорный ток 130 мкА [6–8]. Резисторы R1, R5 задают ток БЭ транзисторов VT2, VT4, то есть задают их рабочие точки. Резисторы R2, R4 ограничивают максимальный ток потребления дифференциальной пары и задают коэффициент усиления по напряжению каскада. Конденсаторы C1, C2 являются разделительными, но также выполняют функцию фильтров верхних частот (ФВЧ), образуя RC – фильтры с последовательно включенным входным сопротивлением дифференциального каскада [1, 2]. RC – цепочка R3, C3 выполняет функцию обратной связи по току. Введение обратной связи позволяет значительно повысить стабильность всего фильтра, уменьшить нелинейные искажения, увеличить динамический диапазон при этом коэффициент усиления по напряжению уменьшается.



Рис. 2. Принципиальная схема ДУ

Принципиальная схема фильтра нижних частот представлена на рис. З [1–5]. ФНЧ состоит из транзистора VT6, включенного по схеме общий коллектор (OK), сопротивления и емкости эмиттера (транзистора VT6) R2 и C7 соответственно, перестраиваемого RC – фильтра состоящего из резистора R1, конденсаторов C1 – C6, транзисторов VT1 – VT5, выполняющих функцию ключей. Конденсатор C1 ограничивает максимум верхней частоты среза фильтра (3.0 ГГц). При открытых ключах VT1 – VT5 ширина полосы пропускания фильтра будет минимальна (0.1 – 0.5 ГГц), при закрытых ключах – будет максимальна (0.1 – 3.0 ГГц).



Рис. 3. Принципиальная схема ФНЧ

Разработано топологическое описание активного полосового фильтра, представленное на рис. 4. Топологическое описание разработано с учетом топологических норм проектирования технологического процесса кремний-германий БиКМОП 250 нм, а также с учетом согласования полностью дифференциальных схем [9–11]. Размеры топологического описания: ширина 345 мкм, длина 634 мкм. Данное топологическое описание можно использовать в качестве сложно-функционального (СФ) блока в супергетеродинном приемнике и других устройствах, выполняемых в технологическом процессе SiGe БиКМОП 250 нм.



Рис. 4. Топологическое описание разработанного фильтра

Для возможности проведения компьютерного моделирования топологического описания была произведена операция экстракции, то есть формирование схемотехнического описания с учетом всех паразитных сопротивлений, емкостей, индуктивностей, которые неизбежно появляются в процессе разработки топологического описания. Компьютерное моделирование экстракции топологического описания позволит получить характеристики более близкие к реальным, чем при моделировании принципиальной схемы.

## VI. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Чтобы убедиться в работоспособности и соответствии техническим требованиям разработанного активного перестраиваемого полосового фильтра, произведены многочисленные компьютерные моделирования экстракции топологического описания в программном обеспечении Cadence.

На рис. 5 представлены результаты компьютерного моделирования в виде амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) активного полосового фильтра при перестроении верхней частоты среза. Пунктирной линией изображена АЧХ фильтра при верхней частоте среза 3.0 ГГц (при подаче логического «0» на все управляющие входы), сплошной линией при 0.5 ГГц (при подаче логической «1» на все управляющие входы).



Рис. 5. АЧХ активного полосового перестраиваемого фильтра

Чтобы убедиться в работоспособности фильтра в диапазоне температур -40°С...+85°С произведены параметрические анализы, результаты которых занесены в таблицы 2 и 3. В таблицу 2 занесены результаты компьютерных моделирований экстракции топологического описания в виде зависимости коэффициента нелинейных искажений от частоты при различных частотах входного сигнала (с амплитудой 10 мВ) и при разных конфигурациях верхней частоты среза. В таблице 2 символ «–» означает, что частота входного сигнала находится вне полосы пропускания фильтра. В таблицу 3 занесены результаты моделирований в виде зависимости коэффициента усиления по напряжению от частоты входного сигнала при различных температурах и при верхней частоте среза фильтра 0.5 ГГц.

ТАБЛИЦА 2
РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ

Температура, ℃	Частота, МГц	Коэффициент нелинейных искажений, %		
		При верхней частоте среза 3.0 ГГц	При верхней частоте среза 1.5 ГГц	При верхней частоте среза 0.5 ГГц
-40	100	0.64	0.64	0.71
	500	1.46	1.70	2.83
	1000	3.04	5.36	1.39
	1500	4.64	5.73	-
	2000	5.22	5.82	-
	2500	4.17	-	-
	3000	2.84	-	-
+27	100	0.36	0.37	0.44
	500	0.92	1.02	1.21
	1000	1.70	2.31	0.50
	1500	2.10	3.14	-
	2000	2.01	2.04	-
	2500	1.61	-	-
	3000	1.12	-	-
+85	100	0.39	0.39	0.45
	500	0.82	0.90	0.89
	1000	1.11	1.43	0.32
	1500	1.07	1.32	-
	2000	0.85	0.82	-
	2500	0.65	-	-
	3000	0.50	-	-

# ТАБЛИЦА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ

Температура, °С	Частота, МГц	Коэффициент усиления по напряжению, дБ	
-40	100	16.25	
	200	18.67	
	300	19.22	
	400	19.03	
	500	16.41	
+27	100	15.65	
	200	17.72	
	300	18.83	
	400	18.55	
	500	15.77	
+85	100	11.93	
	200	14.35	
	300	14.97	
	400	14.76	
	500	12.08	

## VII. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 5 видно, что верхняя частота среза полосового фильтра может перестраиваться от 0.5 ГГц до 3.0 ГГц, что соответствует техническому заданию.

По результатам компьютерных моделирований экстракции топологического описания, занесенным в таблицу 2, видно, что коэффициент нелинейных искажений при различных частотах входного сигнала, различных температурах окружающей среды и различных комбинаций кода на управляющих входах не превышает 5.82 %, что на 1,18 % меньше максимально допустимого значения.

По результатам, занесенным в таблицу 3 видно, что коэффициент усиления по напряжению при различных температурах, в полосе пропускания не опускается ниже 11.93 дБ, что на 1,93 дБ больше необходимого значения, заданного техническим требованиями к фильтру.

## IV. Экспериментальные образцы и оснастка

По разработанной топологии активного перестраиваемого полосового фильтра были произведены экспериментальные образцы для проверки работоспособности схемы, проверки на соответствие техническим требованиям, исследования технологического разброса. На рис. 6 представлена микрофотография произведенного экспериментального образца. Размеры экспериментального образца: ширина 1.1 мм, длинна 0.9 мм, занимаемая площадь на кристалле 0.99 мм<sup>2</sup>.



Рис. 6. Микрофотография экспериментального образца фильтра

Для испытаний экспериментальных образцов разработана и произведена плата оснастки, фотография которой изображена на рис. 7. Размеры оснастки: длинна 47 мм, ширина 47 мм. На оснастке предусмотрены технологические отверстия для крепления платы к жесткой основе. На плате размещены 6 цифровых выводов и 4 копланарные 50-омные линии передач находящиеся под углом 90°. На цифровые выводы подаются управляющие сигналы EN\_0 – EN\_4 и подключается источник тока 130 мкА. Копланарные 50-омные линии подключаются к высокочастотным дифференциальным входам и выходам фильтра IN\_N, IN\_P и OUT\_N, OUT\_P соответственно. К концам 50-омных линий подключаются высокочастотные SMA разъемы. Остальное место на плате занимает контакт земли (GND). На плате размещены многочисленные металлизированные отверстия для улучшения высокочастотных свойств земляных полигонов. Контакты источника питания (VDD) подключаются через конденсаторы К10-71, второй вывод которых подключается к контакту земли.

Разработан активный перестраиваемый полосовой фильтр в технологическом процессе кремний-германий БиКМОП 250 нм. Разработана принципиальная схема и топологическое описание, произведены экспериментальные образцы и оснастка для испытаний образцов. Размеры экспериментального образца: длина 1.1 мм, ширина 0.9 мм, занимаемая площадь 0.99 мм<sup>2</sup>. Размеры топологического описания, которое можно использовать в качестве СФ блока в сверхширокополосном супергетеродинном приемнике дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн: ширина 345 мкм, длина 634 мкм, занимаемая площадь 0.22 мм<sup>2</sup>.



Рис. 7. Фотография платы оснастки для испытаний экспериментального образца фильтра

### VIII. Выводы и заключение

Коэффициент нелинейных искажений при максимальной амплитуде входного сигнала (10 мВ), при различных температурах, частотах входного сигнала и конфигурациях управляющих кодов не превышает 5.82 %. Это на 1.18 % меньше максимально допустимого значения.

Коэффициент усиления по напряжению фильтра в наихудших условиях не опускается ниже 11.93 дБ, что больше необходимого значения на 1.93 дБ.

### Источник финансирования

Работа выполнена в рамках ФЦП (Федерального целевого проекта) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Уникальный идентификатор работ RFMEFI57417X0164.

### Список литературы

1. Эннс В. И., Кобзев Ю. М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем / под ред. Эннса В.И.: М.: Горячая линия – телеком, 2005. 454 с.

2. Баринов В. В., Круглов Ю. В., Тимошенко А. Г. Телекоммуникационные системы на кристалле. Часть 1 / под ред. Баринова В. В. М. : МИЭТ, 2007. 45 с.

3. Ron Mancini. Op Amps For Everyone // Texas Instruments. 2002. 464 p.

4. Johns D., Martin K. Analog Integrated Circuits Design / Wiley Text Books. 1997.

5. Agarwal Anant, Lang Jefferey H. Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits / Elsevier Inc., 2005. 1009 p.

6. Rodion R. Fakhrutdinov, Sergey A. Zavyalov, Konstantin V. Murasov, Denis A. Koemec. Current Source and Voltage Reference for Broadband Receiver in BiCMOS 130 nm / 14th International Scientific-Technical Conference APEIE, Novisibirsk, October 2–6 2018. Vol. 1, part 3. P. 28–32.

7. Keith Sanborn [et al.]. A Sub-1-V Low-Noise Bandgap Voltage Reference / IEEE J. Solid-State Circuits, Novenber 2007. Vol. 42, no. 11. P. 2466–2481.

8. Sun Na, Sobot Robert. A Low-Power Low-Voltage Bandgap Reference in CMOS / Electrical and Computer Engineering (CCECE), 23rd Canadian Conference on. IEEE, 2010.

9. Williams Jim. Analog Circuit Design: Art, Science and Personalities / Butterworth-Heineman (USA), 1998. 415 p. 10. Alan Hastings. The art of alanlog layout / Prentice hall 2001. 539 p.

11. Clein Dan, Simokura Gregg. CMOS IC Layout: Concepts, Methodologies, and Tools // Elsevier Inc., 2000. 288 p.