

# ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КМОП-СХЕМЫ ДИАПАЗОНА СВЧ: ОПЫТ РАЗРАБОТКИ

Е.Балашов, к.т.н.<sup>1</sup>, А.Коротков, д.т.н.<sup>2</sup>, И.Румянцев<sup>3</sup>

УДК 621.382  
БАК 05.27.00

Применение широко распространенной КМОП-технологии дает возможность создавать высококачественные интегральные СВЧ-схемы при сравнительно невысокой стоимости изготовления. Центром проектирования интегральных схем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) накоплен большой опыт проектирования КМОП ИС диапазона СВЧ преимущественно для систем беспроводной связи. Журнал "ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ" уже знакомил читателей с разработками СПбПУ [1]. В области создания СВЧ-микросхем специалисты СПбПУ сотрудничают с дизайн-центром "СВЧ МИС" АО "ВНИИРА". Среди выполненных проектов – маломощные усилители, генераторы, управляемые напряжением, смесители, фазовращатели и усилители мощности. Рассмотрим особенности построения СВЧ ИС на основе КМОП-технологии и наиболее интересные разработки в области СВЧ ИС, выполненные авторами.

## МАЛОШУМЯЩИЕ УСИЛИТЕЛИ

Маломощные усилители разделяют на две основные группы: узкополосные – с полосами до 10–15% от средней частоты полосы пропускания и широкополосные – с полосами более 20%. В большинстве практических применений в устройствах WLAN, GPS, GSM на частотах 2,4/5,2; 1,5; 0,9/1,8 ГГц, соответственно, узкополосные маломощные усилители реализуются на основе МОП-транзистора с включением по схеме с общим истоком и отрицательной индуктивной последовательной обратной связью по току [2, 3]. Как правило, коэффициент усиления узкополосных усилителей состав-

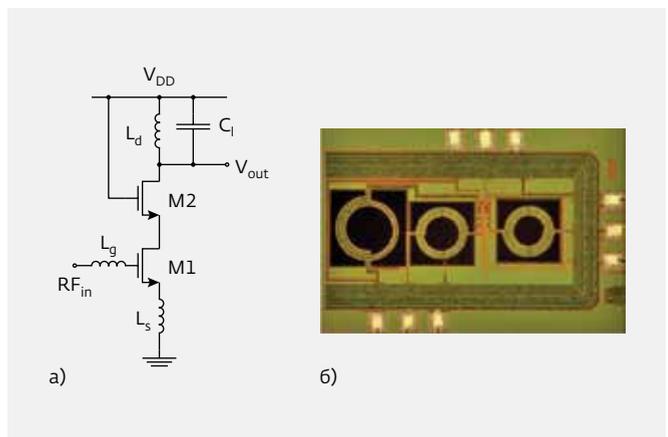
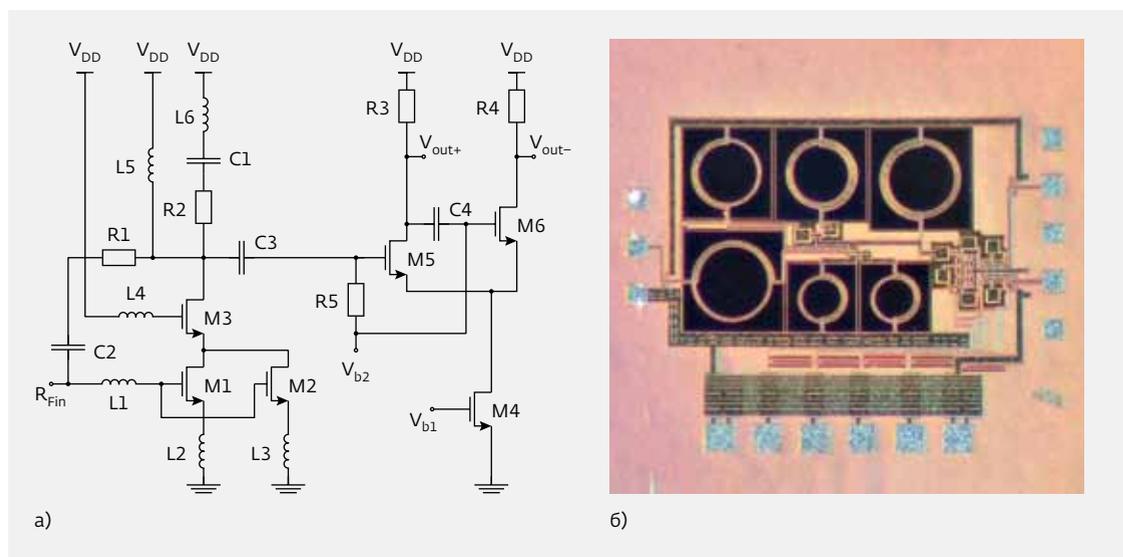


Рис.1. Узкополосный маломощный усилитель: а) принципиальная схема, б) кристалл ИС

<sup>1</sup> СПбПУ, АО "ВНИИРА", balashov\_ev@mail.ru.

<sup>2</sup> СПбПУ, АО "ВНИИРА", korotkov@spbstu.ru.

<sup>3</sup> СПбПУ, rumyancevvan@yandex.ru.



**Рис.2.** Широкополосный малошумящий усилитель: а) принципиальная схема, б) кристалл ИС

ляет около 15 дБ при коэффициенте шума 1,0–3,0 дБ и потребляемой мощности не более 10 мВт.

Разработанный авторами узкополосный усилитель построен по схеме с включением транзистора с общим истоком (ОИ) и отрицательной индуктивной последовательной обратной связью (ОС) по току (рис.1). Данная схема позволяет оптимизировать согласование усилителя по входу как по шумам, так и по мощности. Разработанный усилитель обеспечивает в два раза меньшую потребляемую мощность по сравнению с аналогами.

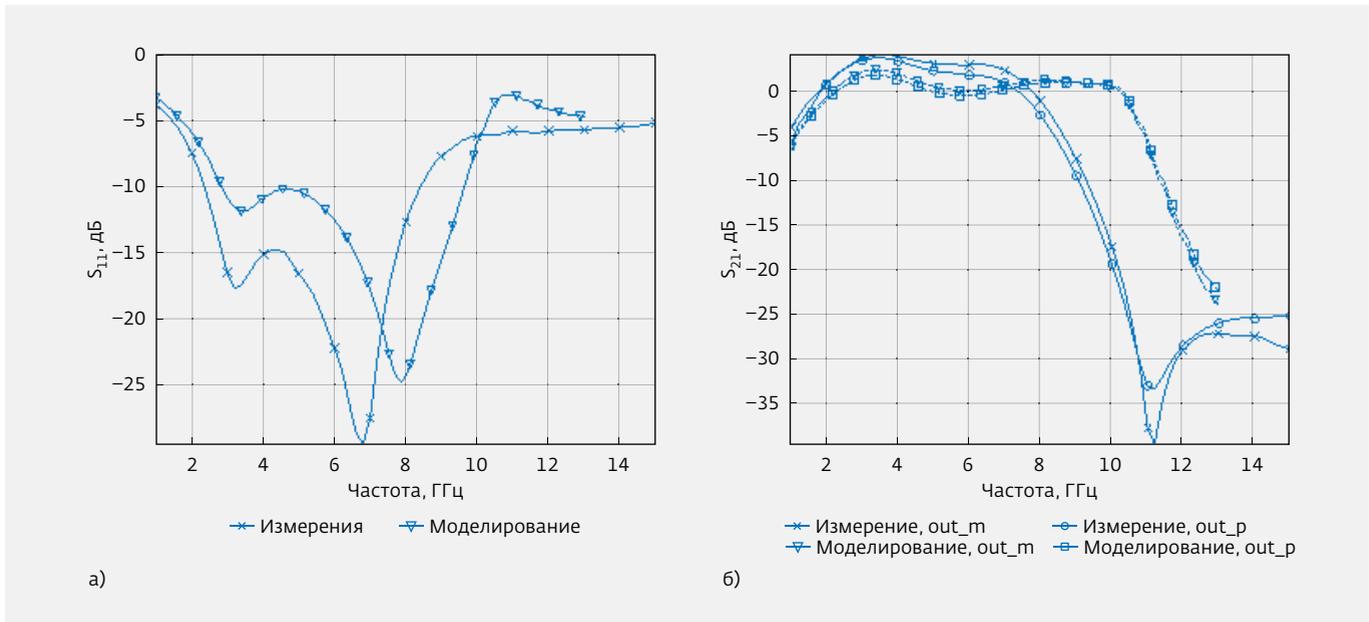
Схема узкополосного малошумящего усилителя была разработана под КМОП-технология с топологическими нормами 180 нм. Площадь кристалла составила 1,5 мм<sup>2</sup>. При измерениях параметров усилителя были получены следующие результаты: модули параметров  $S_{11}$  и  $S_{21}$  составили –30 дБ и 22 дБ, соответственно, при коэффициенте шума 2,9 дБ и потребляемой мощности 4,0 мВт.

Схемы широкополосных малошумящих усилителей строятся с использованием корректирующих обратных связей по току и напряжению для обеспечения режима согласования и выравнивания усиления в широкой полосе частот [4]. Авторами была разработана ИС широкополосного малошумящего усилителя, выполненного по КМОП-технологии с топологическими нормами 180 нм (рис.2). Площадь кристалла составила 1,6 мм<sup>2</sup>.

В ходе разработки была предложена методика синтеза широкополосных малошумящих усилителей на основе численных алгоритмов оптимизации корректирующих цепей, что дало возможность синтезировать усилитель стандарта UWB [5, 6, 7]. В разработанной схеме согласование в широкой полосе частот достигается посредством введения в усилитель на транзисторе с включением по схеме с общим истоком двойной отрицательной обратной связи – последовательной индук-

тивной по току (индуктивности L2 и L3) и параллельной резистивной по напряжению (резистор R1) (см. рис.2). Расширение полосы усиления достигается за счет цепи нагрузки, которая реализована в виде параллельного резонансного контура, образованного паразитными емкостями на стоке транзистора M3 и индуктивностью L5, с дополнительным параллельным включением последовательного резонансного контура (элементы R2, C1, L6). Усилитель является симметрирующим, то есть имеет небалансный вход и балансный выход. Сочетание двух типов обратной связи позволяет значительно расширить полосу частот усилителя за счет расширения полосы согласования.

При проведении экспериментальных исследований ИС широкополосного малошумящего усилителя для обеспечения согласования по выходам к ним были добавлены повторители напряжения с коэффициентом передачи –6,0 дБ. Без схем согласования по выходам усилитель демонстрирует следующие характеристики: коэффициент отражения не более –10 дБ в полосе частот от 3,1 до 10,6 ГГц; максимальное значение модуля коэффициента усиления по напряжению 9,7 дБ; коэф-

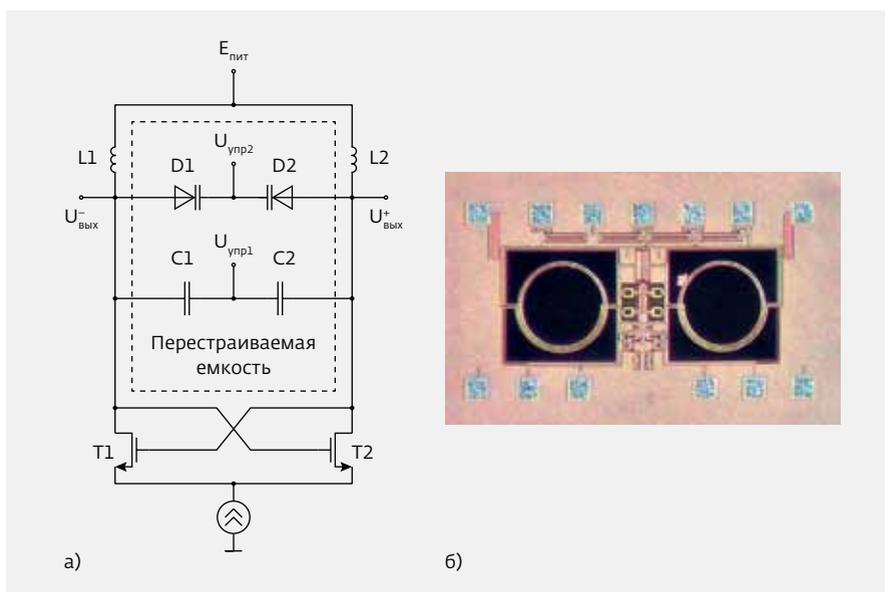


**Рис.3.** Результаты моделирования и эксперимента для широкополосного маломощного усилителя с согласующими схемами по выходам out\_m и out\_p: а) параметр  $S_{11}$ , б) параметр  $S_{21}$

коэффициент шума от 5,4 до 7,0 дБ. Потребляемая мощность составила не более 30 мВт.

В результате экспериментальных исследований и моделирования широкополосного маломощного усилителя со схемами согласования по выходам были получены частотные зависимости модулей параметров  $S_{11}$  и  $S_{21}$  (рис.3). Как видно из графиков, измеренный максимальный коэффициент усиления соста-

вил 4,0 дБ. Полоса частот усиления по результатам эксперимента составила от 2,0 до 7,5 ГГц, а полоса согласования – от 2,4 до 8,4 ГГц. Уменьшение полосы частот можно объяснить влиянием паразитных емкостей схем защиты от электростатического разряда. Измерения проводились с использованием зондовой станции Cascade EP6RF и анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA40.



**Рис.4.** Генератор, управляемый напряжением: а) принципиальная схема, б) кристалл ИС

## ГЕНЕРАТОРЫ, УПРАВЛЯЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЕМ

Для формирования опорного колебания гетеродина в приеме-передающих устройствах используются генераторы, управляемые напряжением (ГУН). Авторами разработана схема ГУН на основе индуктивных трехточечных балансных схем для формирования сетки опорных частот в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4a (рис.4). Кристалл создан на основе КМОП-технологии с топологическими нормами 180 нм. Площадь кристалла составила 0,8 мм<sup>2</sup>.

В разработанной схеме опорное колебание перестраивается с шагом 0,5 ГГц в диапазонах частот 3,5–4,5 ГГц и 6,5–10,0 ГГц. Перекрывание полного диапазона



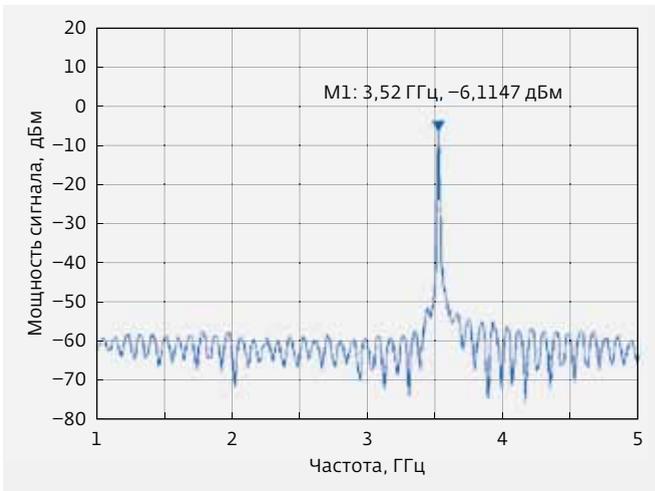


Рис.5. Спектр выходных колебаний ГУН

частот обеспечивается тремя ГУН. Каждый ГУН реализует как дискретную перестройку с шагом 0,5 ГГц, так и точную подстройку частоты. Дискретная перестройка частоты выполняется путем подключения емкостей C1 и C2, а точная подстройка частоты – при помощи варакторов D1 и D2.

Диапазоны перестройки микросхем ГУН составили 3,37–4,59 ГГц, 6,33–8,40 ГГц и 7,87–10,23 ГГц. Потребляемая мощность изменяется от 5,0 до 9,5 мВт в зависимости от поддиапазона частот.

При экспериментальных исследованиях ИС был получен спектр выходного колебания ГУН, полученный с помощью зондовой станции Cascade EP6RF и анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA40 в режиме измерения мощности отраженной волны при минимальном входном воздействии -140 дБм (рис.5). Мощность сигнала ГУН на частоте 3,5 ГГц составила -6 дБм.

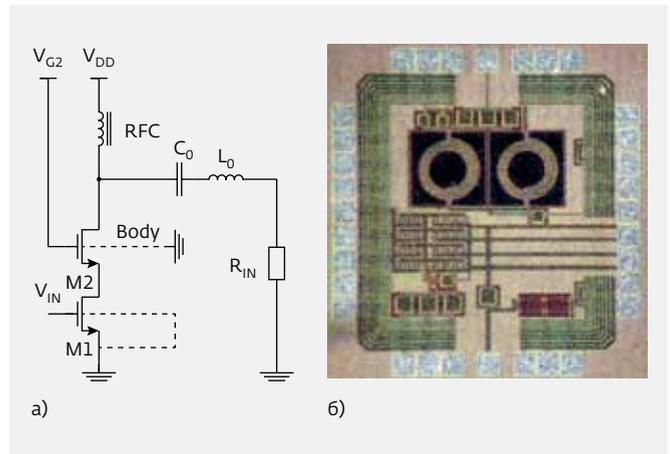


Рис.6. Усилитель мощности: а) принципиальная схема, б) кристалл ИС

### УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Широкое распространение получили ключевые усилители мощности, принцип работы которых заключается в следующем: при достижении входным сигналом соответствующего уровня МОП-транзистор открывается (при этом, ток через транзистор максимальный, а падение напряжения на нем близко к нулю) или закрывается (при этом, ток через транзистор близок к нулю, а падение напряжения максимально). В обоих случаях рассеиваемая мощность близка к нулю, поэтому достижимый коэффициент полезного действия (КПД) в ключевых режимах выше, чем в линейном и квазилинейном режимах.

В [8, 9] описаны результаты разработки усилителей мощности по технологии с топологическими нормами 180 нм. В частности, представлен каскодный усилитель мощности класса E абонентской станции мобильной системы связи стандарта WCDMA со следующими

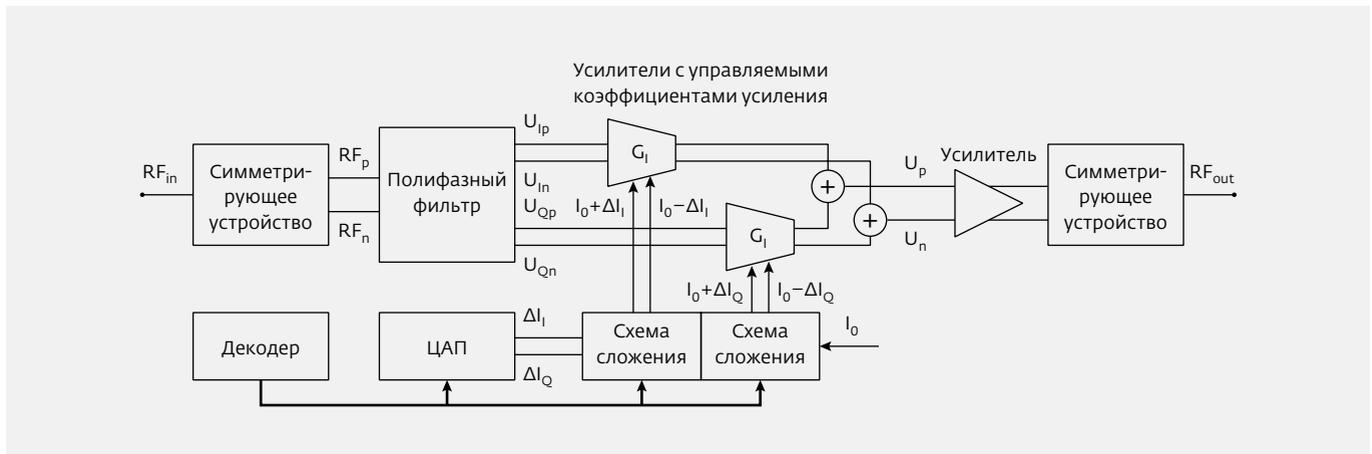


Рис.7. Структурная схема векторного фазовращателя



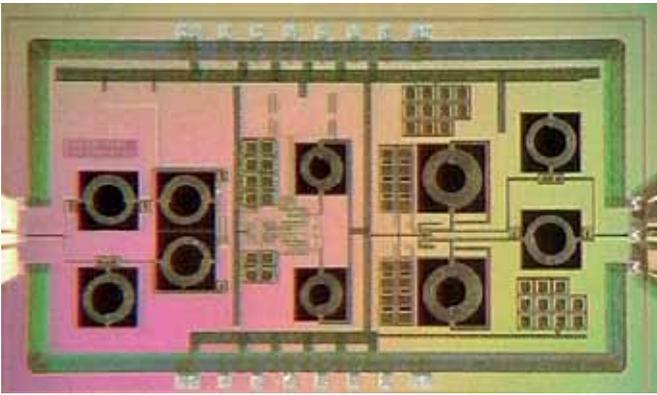


Рис.8. Кристалл векторного фазовращателя

характеристиками: диапазон рабочих частот 1,7–2,0 ГГц, уровень выходной мощности 21,0 дБм, КПД 45% (рис.6). Площадь кристалла составляет 1,8 мм<sup>2</sup>.

Известной особенностью ключевых усилителей мощности является высокий пик-фактор. Как следствие, нагрузочный транзистор усилителя может выходить из строя при больших амплитудах входного сигнала. Для расширения динамического диапазона в разработанном авторами усилителе мощности транзистор М1 выполнен по технологии с нормами 180 нм, что обеспечивает малые паразитные емкости и быстрое переключение. Транзистор М2, работающий в касковом включении, выполнен по технологии с нормами 350 нм и имеет увеличенную толщину подзатворного окисла, что позволило повысить максимально допустимое напряжение в нагрузке.

## ФАЗОВРАЩАТЕЛИ

Фазовращатели с векторной модуляцией обеспечивают меньшую фазовую ошибку и большую разрядность без усложнения схемы и увеличения площади кристалла интегральной схемы. В центре разработаны интегральные схемы фазовращателей, выполненные

по КМОП-технологии с топологическими нормами 180 нм [10].

В разработанном авторами векторном фазовращателе используется симметрирующее устройство, которое формирует высокочастотный дифференциальный сигнал, поступающий на полифазный фильтр (рис.7). Квадратурный дифференциальный сигнал передается на два усилителя с управляемым коэффициентом усиления, величина которого зависит от дифференциальных управляющих сигналов, поступающих со схемы сложения опорного сигнала  $I_0$  и управляющего сигнала для синфазной составляющей  $\Delta I_I$  и квадратурной составляющей  $\Delta I_Q$ . Управляющие сигналы  $\Delta I_I$  и  $\Delta I_Q$  формируются при помощи цифроаналогового преобразователя и декодера. После взвешивания с переменным коэффициентом усиления высокочастотные сигналы складываются, формируя сигнал с заданной фазой.

Площадь кристалла фазовращателя, изготовленного по КМОП-технологии с топологическими нормами 180 нм, составила 6,0 мм<sup>2</sup> (рис.8).

По результатам измерений максимальный коэффициент передачи фазовращателя составил –5,0 дБ в полосе частот 2,4–2,8 ГГц, максимальная фазовая ошибка – не более 7,0 градусов (не более 3,0 градусов при исключении ошибки полифазного фильтра), среднеквадратичная фазовая ошибка – не более 4,0 градусов (не более 1,5 градуса при исключении ошибки полифазного фильтра) (рис.9). Модуляция вносимых потерь не превысила 1,2 дБ, точка компрессии на 1,0 дБ по входу – до 4,0 дБм. Потребляемая мощность – не более 94 мВт.

Измерения проводились с использованием зондовой станции Cascade EP6RF и анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA40. Управляющий сигнал подавался с помощью цифровой платформы NI ELVIS II. Для автоматизации измерений и обработки экспериментальных данных использовался программный пакет LabVIEW.

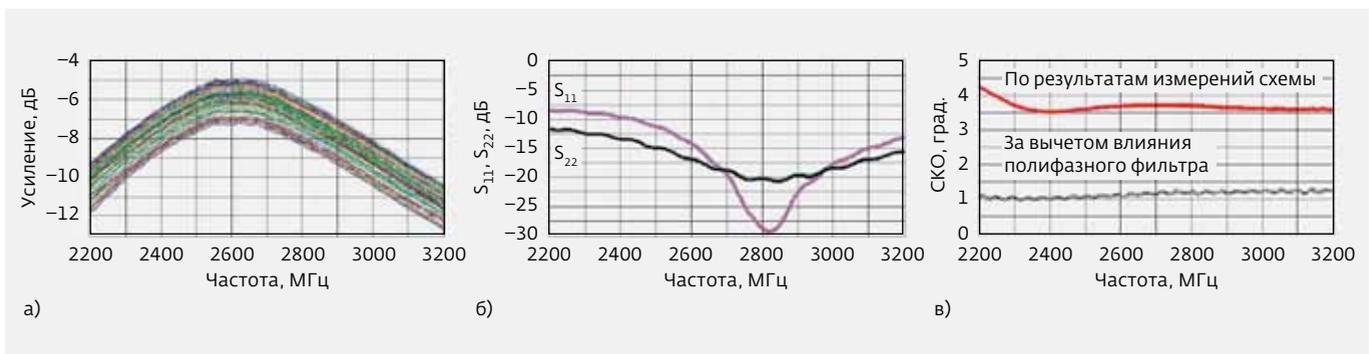


Рис.9. Результаты измерений параметров фазовращателя в зависимости от частоты: а) параметр  $S_{21}$ , б) параметры  $S_{11}$  и  $S_{22}$ , в) среднеквадратичная ошибка



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Коротков А.С., Морозов Д.В., Пилипко М.М., Пятак И.М., Буданов Д.О.** Аналого-цифровые преобразователи для беспроводных систем связи: опыт разработки // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2016. № 2. С. 40–45.
2. **Балашов Е.В., Коротков А.С.** Микроэлектронные малошумящие КМОП-усилители радиочастотного диапазона: применение, схемотехника, тенденции развития // Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. 2007. № 2. С. 3–34.
3. **Балашов Е.В., Коротков А.С.** Высокочастотный малошумящий КМОП-усилитель // Сб. трудов IV Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем". – М.: ИППМ РАН, 2010. С. 565–570.
4. **Балашов Е.В., Коротков А.С.** Сопоставительный анализ широкополосных малошумящих КМОП усилителей радиочастотного диапазона // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 4. С. 300–314.
5. **Balashov E.V., Korotkov A.S.** Dual feedback low noise amplifier for ultra wideband application // Proc. of EUROCON'2009, St. Petersburg, Russia, 18–23 May 2009, pp. 102–107.
6. **Балашов Е.В., Коротков А.С.** Высокочастотный широкополосный усилитель на МОП-транзисторах. Патент на изобретение № 2426220, БИ № 22, 2011.
7. **Балашов Е.В., Коротков А.С.** Симметрирующий малошумящий усилитель для систем сверхширокополосной радиосвязи // Сб. трудов VI Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем". – М.: ИППМ РАН. 2014. № 3. С. 47–52.
8. **Rumyantsev I.A., Korotkov A.S., Hauer J.** Cascode class-E power amplifier in 180/350 nm CMOS for EER system // Proc. of 9th conf. on PhD research in microelectronics and electronics. Villach, Austria, 24–27 June 2013, pp. 309–312.
9. **Rumyantsev I.A.** Efficient amplification techniques for signals with high PAPR // Proc. of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, St. Petersburg, Russia, 2–4 February 2015, pp. 124–127.
10. **Balashov E.V., Rumyantsev I.A.** A fully integrated 6-bit vector-sum phase shifter in 0.18 um CMOS // Proc. of the 11th International Siberian Conference on Control and Communications, Omsk, Russia, 21–23 May 2015, pp. 1–5.

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



## СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ. В 2-х книгах

Белоус А.И., Мерданов М.К., Шведов С.В.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016.  
Книга 1 – 688 с. ISBN 978-5-94836-444-5  
Книга 2 – 728 с. ISBN 978-5-94836-446-9

Впервые в отечественной научно-технической литературе в объеме одной книги детально рассмотрены теоретические основы, физические механизмы и принципы работы всех известных СВЧ-приборов и типовых устройств на их основе.

Энциклопедия состоит из двух книг и содержит 17 глав.

В первой книге последовательно рассматриваются следующие вопросы: теоретические основы радиолокации; основные этапы развития радиолокационной техники и СВЧ-радиосвязи; радары подповерхностного зондирования; антенны и антенные устройства для радиолокации и связи; особенности процесса проектирования микросхем для РЛС; теоретические основы и типовые технические решения как полупроводниковой, так и вакуумной СВЧ-электроники; СВЧ-оружие наземного и космического назначения.

Во второй книге проведен анализ базовых технологий полупроводниковой СВЧ-электроники; рассмотрены специализированные полупроводниковые СВЧ-приборы для РЛС; методы и средства обеспечения надежности РЛС и систем связи; радиофотоника и ее приложения в радиолокационных и телекоммуникационных системах; особенности измерений и анализа СВЧ-устройств; радиационная стойкость СВЧ-устройств; особенности проектирования радиационно-стойкой элементной базы СВЧ-устройств.

Книга может служить универсальным справочным пособием для студентов, преподавателей, ученых и инженеров, специализирующихся в области СВЧ-электроники и ее многочисленных применений.

Цена каждой книги 920 руб.

## КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)