

УДК: 621.382

Денис И. Сотсков¹, Алексей В. Зубаков², Николай А. Усачев³, Никита М. Жидков⁴,
Александр Г. Кузнецов⁵, Александр В. Ермаков⁶, Александр Ю. Никифоров⁷

¹⁻⁷Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

¹⁻⁶Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

¹e-mail: disotkov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2047-2008>

²e-mail: avzub@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0005-3188-1415>

³e-mail: nausach@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0926-2134>

⁴e-mail: nmzhv@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1989-1186>

⁵e-mail: agkuz@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2139-7548>

⁶e-mail: avermakov@mephi.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6673-7494>

⁷e-mail: aynikiforov1@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2427-663X>

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ СВЧ БИБЛИОТЕКА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕЙ ДОВЕРЕННОЙ ЭКБ*

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.3.07>

Аннотация. Представлены результаты проектирования специализированной СВЧ библиотеки базовых элементов, предназначенной для использования в рамках отечественного КМОП технологического процесса с проектной нормой 180 нм. Библиотека включает в своем составе набор радиочастотных МОП-транзисторов для усилительного и ключевого применения, варикапы на основе МОП-структур трех типов, спиральные катушки индуктивности, МДМ-конденсаторы и прочие элементы. Библиотека предназначена для использования совместно с САПР Cadence Virtuoso IC и ориентирована на создание комплекта усилительных, генераторных и преобразовательных СВЧ сложно-функциональных блоков, а также блоков управления фазой и амплитудой сигнала приемопередающей ЭКБ. С использованием представленной библиотеки спроектирован тестовый кристалл, предназначенный для проведения исследований зондовыми методами и содержащий 13 типов базовых элементов и вспомогательные структуры для СВЧ-характеризации отечественного КМОП технологического процесса 180 нм.

Ключевые слова: КМОП, базовый элемент, приемопередатчик, СВЧ, комплект средств проектирования, САПР, характеристика.

Для цитирования: СОТСКОВ, Денис И. и др. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ СВЧ БИБЛИОТЕКА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕЙ ДОВЕРЕННОЙ ЭКБ. *Безопасность информационных технологий*, [S.l.], т. 30, № 3, с. 104–115, 2023. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1533>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.3.07>.

***Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код (шифр) научной темы «FSWU-2022-0019», рег. № НИОКТР 122121600004-3). Авторы выражают благодарность А.Ю. Резнику (АО «Микрон») за поддержку и ценные рекомендации.

Denis I. Sotсков¹, Alexey V. Zubakov², Nikolay A. Usachev³, Nikita M. Zhidkov⁴
Alexander G. Kuznetsov⁵, Alexander V. Ermakov⁶, Alexander Y. Nikiforov⁷

¹⁻⁷National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia

¹⁻⁶Specialized Electronic Systems,

Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia

¹e-mail: disotkov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2047-2008>

²e-mail: avzub@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0005-3188-1415>

³e-mail: nausach@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0926-2134>

⁴e-mail: nmzhv@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1989-1186>

⁵e-mail: agkuz@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2139-7548>

⁶e-mail: avermakov@mephi.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6673-7494>

⁷e-mail: aynikiforov1@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2427-663X>

The Specialized RF Elements Library for Trusted Transceiver VLSI Design*

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.3.07>

Abstract. Results of designing the specialized RF elements library intended for use in the CMOS 180 nm process are presented. The RF library includes a set of RF MOSFETs for amplifiers and switches design, three types of varactors based on the MOS-structure, spiral inductors, MIM-capacitors and other elements. The RF library is intended for use in combination with CAD Cadence Virtuoso IC and is focused on designing a set of amplifiers, frequency oscillators and convertors, controlled attenuators and phase shifters microwave IP-blocks of the transceiver VLSI. A test chip is developed with using the presented RF library, focused on conducting research by probe methods and containing 13 types of basic elements and specialized structures for the RF characterization of the domestic CMOS 180 nm process.

Keywords: CMOS, integrated element, transceiver, microwave, process design kit, CAD system, characterization.

For citation: SOTSKOV, Denis I. et al. The Specialized RF Elements Library for Trusted Transceiver VLSI Design. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 30, no. 3, p. 104–115, 2023. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1533>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.3.07>.

**Acknowledgement.* This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (code of the scientific topic "FSWU-2022-0019", project registration number 122121600004-3). The authors express their gratitude to A.Y. Reznik (JSC "Mikron") for helpful discussion and support the project.

Введение

Разработка отечественной высокоинтегрированной приемопередающей ЭКБ систем связи, навигации, интернета вещей и др., в т.ч. предназначенной для функционирования в составе критической инфраструктуры, является актуальной задачей. Из существующих отечественных кремниевых технологических процессов (ТП), доступных в режиме контрактного производства, наиболее востребованным является ТП КМОП 180 нм, активно ведутся разработки в рамках ТП КМОП 90 нм. Успешные примеры радиочастотных приемопередающих СБИС, выполненных в рамках ТП КМОП 180 нм, для навигационных приемников [1], приемопередатчиков считывателей систем цифровой маркировки и радиочастотной идентификации [2], приемопередатчиков систем беспроводной связи и передачи данных [3] указывают на потенциальную возможность применения ТП КМОП уровня 180 нм для создания СБИС с рабочими частотами до 3 ГГц.

Между тем, оперативное проектирование указанных радиочастотных СБИС предполагает применение библиотеки СВЧ базовых элементов (БЭ), представляющей собой информационную систему, предназначенную для организации и хранения упорядоченного набора моделей СВЧ БЭ, и обеспечения доступа к ним с использованием программных средств систем автоматизированного проектирования (САПР). В состав типовой библиотеки ТП КМОП должны входить следующие СВЧ БЭ: МОП-транзисторы для усилительного применения, МОП-транзисторы для ключевого применения, варикапы на основе МОП-структуры, спиральные катушки индуктивности, конденсаторы на основе структуры «металл-диэлектрик-металл» (МДМ-конденсаторы), микрополосковые линии передачи и другие элементы [4–5].

В настоящей работе представлены результаты проектирования специализированной СВЧ библиотеки БЭ, отсутствующей в составе комплекта средств проектирования (КСП) отечественного ТП КМОП 180 нм.

1. Состав специализированной СВЧ библиотеки

Проектирование библиотеки СВЧ БЭ осуществлялось средствами САПР Cadence Virtuoso IC. Состав библиотеки СВЧ БЭ приведен в табл. 1. Для расчета параметров спиральных катушек индуктивности, микрополосковых линий передачи и встречно-штыревых МДМ-конденсаторов применялось средство электромагнитного анализа Momentum компании Keysight Tech.

Таблица 1. Состав библиотеки СВЧ базовых элементов

Наименование библиотеки	CMOS180_rf_lib	
Наименование категории и её состав	<i>RFNMOS_AMP</i>	Набор радиочастотных n-канальных МОП-транзисторов для усилительного применения
	<i>RFNMOS_SW</i>	Набор радиочастотных n-канальных МОП-транзисторов для ключевого применения
	<i>VARICAPS</i>	Набор варикапов на основе МОП-структуры
	<i>INDUCTORS</i>	Набор спиральных индуктивностей
	<i>CAPACITORS</i>	Набор МДМ-конденсаторов
	<i>OTHER</i>	Набор низкоомных резисторов, микрополосковые линии передачи, СВЧ контактные площадки

2. Радиочастотные МОП-транзисторы для усилительного применения

Радиочастотные МОП-транзисторы являются активными элементами усилительных (малошумящие усилители, усилители мощности и др.), генераторных (генераторы, управляемые напряжением) и СВЧ сложно-функциональных блоков (IP-блоков), а также преобразователей частоты (активные смесители частот, делители частоты и др.). Основными электрическими параметрами МОП-транзистора для усилительного применения, характеризующими его радиочастотные свойства (радиочастотные параметры), являются [6–7]: максимальный достижимый/стабильный коэффициент усиления по мощности (MAG/MSG), граничная частота единичного усиления (f_T), максимальная частота генерации (f_{MAX}) и минимальный коэффициент шума ($K_{ШМИН}$). Как правило, n-канальные МОП-транзисторы с наименьшей толщиной подзатворного окисла и минимально-допустимой длиной канала (L_G) позволяют обеспечить наилучшие значения радиочастотных параметров [7–8], и в этой связи, широко используются в качестве активных элементов для усилительного применения.

Значительное влияние паразитных элементов топологии (сопротивлений выводов затвора, стока, истока, а также паразитных емкостей) на радиочастотные параметры МОП-транзистора делает нежелательным применение его стандартной топологии, ориентированной на разработку аналоговых и цифровых IP-блоков, для построения радиочастотных транзисторов с суммарной шириной затвора (W_G) десятки-сотни мкм, применяемых в СВЧ IP-блоках.

В настоящей работе при разработке библиотеки были использованы следующие конструктивно-топологические решения, позволяющие снизить деградацию радиочастотных параметров МОП-транзистора для усилительного применения за счет снижения значений паразитных элементов топологии [9, 10]:

- топология МОП-транзистора вида «круглый стол» – модульная конфигурация, базовой ячейкой которой является одиночный транзистор со значением суммарной ширины затвора в 6 раз меньшим значения W_G всего транзистора. Законченная топология МОП-транзистора вида «круглый стол» формируется посредством объединения 6-ти одиночных транзисторов кольцевым способом (см. рис. 1,а). Топология

радиочастотного МОП-транзистора с W_G более 200 мкм строится посредством объединения нескольких ячеек вида «круглый стол» (см. рис. 1,б);

– многозатворная структура одиночного транзистора с шириной одной секции затвора (W_F) составляющей единицы мкм и многоконтактные выходы затвора, стока и истока для уменьшения их эффективного сопротивления;

– p^+ охранное кольцо вокруг каждого одиночного транзистора для снижения его чувствительности к помехам через подложку / снижения уровня вносимых им помех.

Расчетные частотные зависимости коэффициента передачи $|H_{21}|$ и MSG типового радиочастотного МОП-транзистора для усилительного применения показаны на рис. 2.

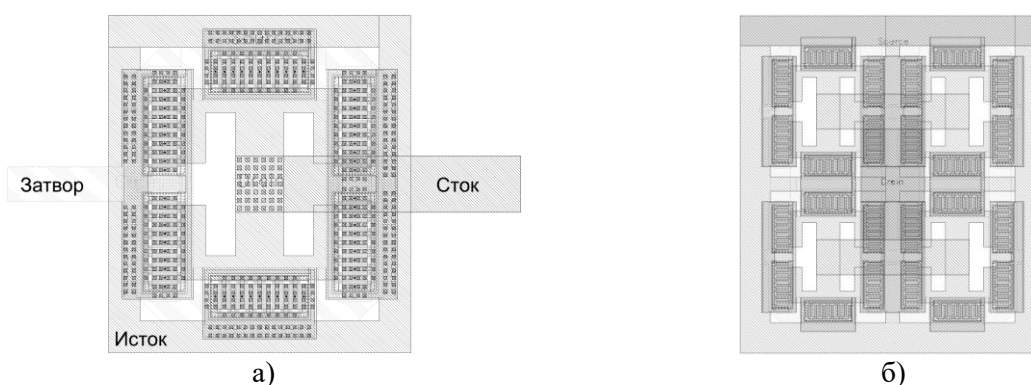


Рис. 1. Внешний вид топологии радиочастотного МОП-транзистора для усилительного применения: $W_G = 120$ мкм (а), $W_G = 480$ мкм (б)

Fig. 1. Layout of the RF MOSFET for amplifiers design: $W_G = 120$ μm (a), $W_G = 480$ μm (b)

В связи с наличием в ТП КМОП 180 нм технологической возможности создания глубокого изолирующего n -кармана (от англ. «deep n-well»), дополнительно в состав библиотеки были включены n -канальные МОП-транзисторы для усилительного применения, размещенные в изолированном кармане p -типа, что позволяет существенно снизить чувствительность транзистора к помехам через подложку и выровнять электрические характеристики транзисторов, расположенных в различных частях полупроводникового кристалла.

3. Радиочастотные МОП-транзисторы для ключевого применения

Радиочастотные МОП-транзисторы являются переключательным элементом таких СВЧ IP-блоков как переключатели сигналов, управляемые аттенюаторы и фазовращатели, пассивные смесители частот и др. Основными радиочастотными параметрами МОП-транзистора при его использовании в качестве переключателя сигналов являются вносимые (прямые) потери ($\alpha_{\text{откр}}$), потери запираения ($\alpha_{\text{закр}}$) и верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу ($P_{\text{лин}}$) [11]. В связи с более высоким значением

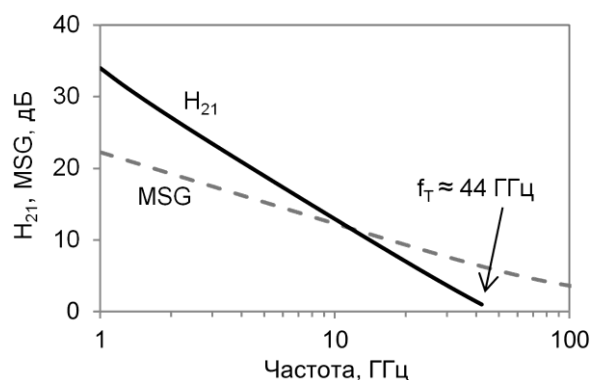


Рис. 2. Расчетные частотные зависимости коэффициента передачи $|H_{21}|$ и MSG МОП-транзистора для усилительного применения ($L_G = 0,18$ мкм, $W_G = 120$ мкм)

Fig. 2. RF MOSFET (for amplifiers design) $|H_{21}|$ and MSG simulated frequency dependences ($L_G = 0.18$ μm , $W_G = 120$ μm)

подвижности электронов (по сравнению с дырками) n -канальные МОП-транзисторы в ключевом режиме обладают меньшими в сравнении с p -канальными МОП-транзисторами значениями вносимых потерь и получили большее распространение в качестве переключательного элемента. Значение длины канала L_G МОП-транзистора целесообразно принять равным минимально-допустимому значению для заданного ТП, что обеспечит малое значение последовательного сопротивления открытого канала, а значит и $\alpha_{откр}$.

В настоящей работе при разработке библиотеки были использованы следующие конструктивно-топологические решения [11–13]:

– применение резистора номиналом 10 кОм в цепи затвора МОП-транзистора с целью обеспечения защиты затвора от возможного пробоя, снижения тока утечки, а также снижения значения $\alpha_{откр}$. Между тем, применение данного подхода приводит к уменьшению значения $\alpha_{закр}$;

– увеличение расстояния между параллельными слоями металлизации, расположенными над стоком и истоком, и уменьшение длины данных участков, что позволяет снизить значение паразитной емкости исток-сток, следовательно, увеличить значение $\alpha_{закр}$;

– транзисторы выполнены как в «объемном» исполнении, так и в исполнении с «плавающим телом» и «плавающим» n -карманом для увеличения значения $R_{лин}$.

Внешний вид топологии типового радиочастотного МОП-транзистора для ключевого применения показан на рис. 3. Расчетные частотные зависимости $\alpha_{откр}$ и $\alpha_{закр}$, а также зависимость значения $\alpha_{откр}$ от входной мощности для типового МОП-транзистора из состава библиотеки показаны на рис. 4.

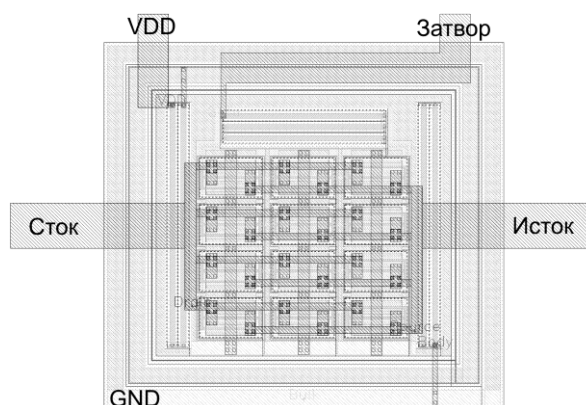


Рис. 3. Внешний вид топологии радиочастотного МОП-транзистора с «плавающим телом» и «плавающим» n -карманом для ключевого применения ($L_G = 0,18$ мкм, $W_G = 180$ мкм)

Fig. 3. Layout of the double-well body floating RF MOSFET for switches design ($L_G = 0.18$ μm , $W_G = 180$ μm)

4. Варикапы на основе МОП-структуры

Варикапы на основе МОП-структуры широко применяются в составе СВЧ IP-блоков генераторов, управляемых напряжением (ГУН), в качестве элемента, обеспечивающего плавную перестройку частоты ГУН под действием внешнего управляющего напряжения. Основными электрическими параметрами варикапа являются диапазон изменения емкости ($\Delta C = C_{мин} \dots C_{макс}$) в заданном диапазоне управляющих напряжений ($U_{упр}$) и добротность (Q) [14, 15].

В настоящей работе при разработке библиотеки использовались типовые конструктивно-топологические варианты, получившие наиболее широкое распространение при построении варикапов на основе МОП-структуры в рамках объемных КМОП технологических процессов [14, 15]:

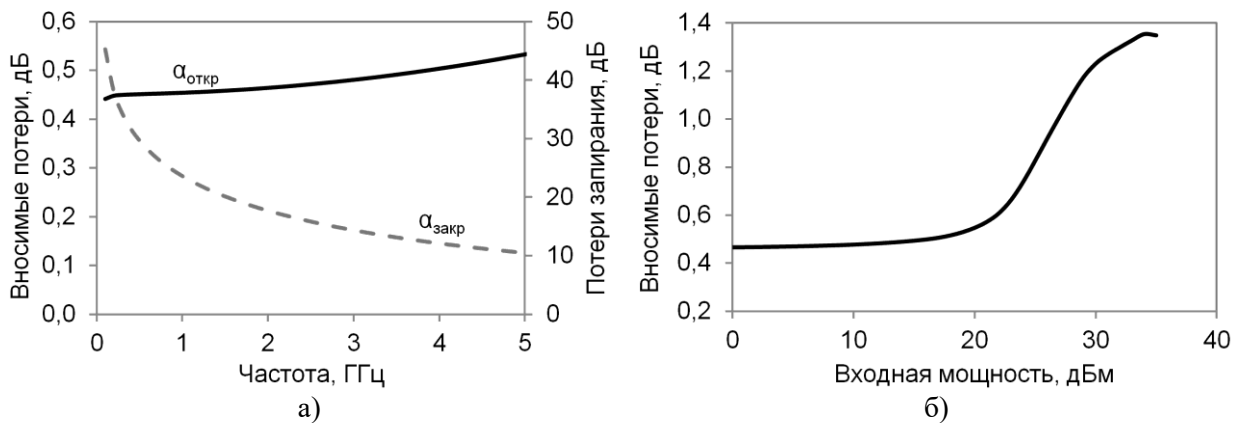


Рис. 4. Расчетные частотные зависимости $\alpha_{откр}$ и $\alpha_{закр}$ (а), а также зависимость значения $\alpha_{откр}$ от входной мощности (б) для МОП-транзистора с «плавающим телом» и «плавающим» n -карманом для ключевого применения ($L_G = 0,18$ мкм, $W_G = 180$ мкм)
 Fig. 4. Double-well body floating RF MOSFET α_{open} and α_{close} simulated frequency dependences (a) and α_{open} input power dependency (b) ($L_G = 0.18$ μm , $W_G = 180$ μm)

– варикап, выполненный на основе p -канального МОП-транзистора, сток, исток и контакт к подложке которого объединены (тип I, рис 5,а). Одним из ключевых преимуществ варикапа данной конструкции являются возможность использования стандартной Spice-модели МОП-транзистора из состава КСП ТП для оценки характеристик варикапа и схем на его основе. Кроме того, может быть использована как спадающая, так и возрастающая ветви вольт-фарадной характеристики (рис. 6,а). Между тем, вольт-фарадная характеристика (ВФХ) варикапа данной конструкции обладает значительной чувствительностью к амплитуде переменного напряжения;

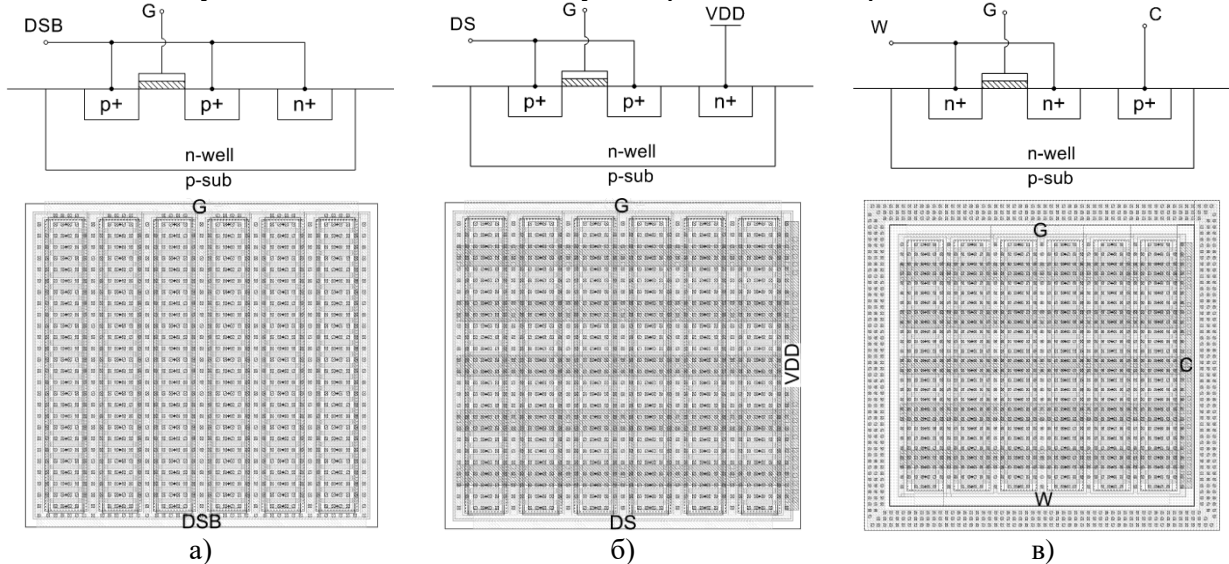


Рис. 5. Упрощенное поперечное сечение и внешний вид топологии варикапа на основе МОП-структуры ($L_G = 0,36$ мкм, $W_G = 300$ мкм): тип I (а), тип II (б), тип III (в)
 Fig. 5. Simplified cross sections and layout of MOS varactor ($L_G = 0.36$ μm , $W_G = 300$ μm): type I (a), type II (b), type III (c)

– варикап, выполненный на основе p -канального МОП-транзистора в режиме инверсии (тип II, рис. 5,б), для которого также возможно использование стандартной Spice-модели МОП-транзистора из состава КСП ТП. ВФХ варикапа данной конструкции

имеет резкий переход с $C_{\text{мин}}$ до $C_{\text{макс}}$ (рис. 6,б) и меньшую чувствительность к амплитуде переменного напряжения;

– варикап, выполненный на основе МОП-структуры в режиме накопления (тип III, рис. 5,в). ВФХ варикапа данной конструкции имеет сравнительно плавный переход с $C_{\text{макс}}$ до $C_{\text{мин}}$ и малую чувствительностью к амплитуде переменного напряжения. Между тем, отсутствует возможность использования стандартной Spice-модели МОП-транзистора из состава КСП ТП для оценки характеристик варикапа и схем на его основе. Spice-модель варикапа данной конструкции, как правило, требует разработки.

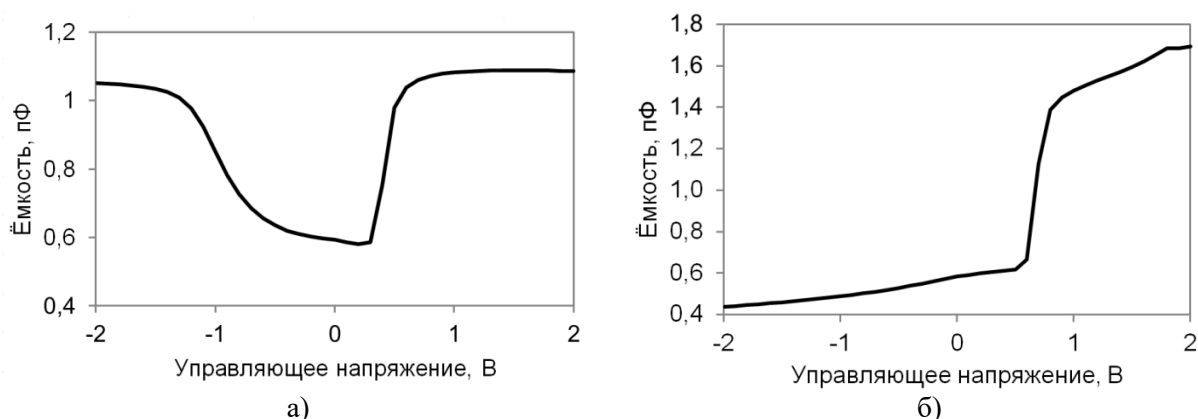


Рис. 6. Расчетная вольт-фарадная характеристика варикапа на основе МОП-структуры ($L_G = 0,36$ мкм, $W_G = 300$ мкм): тип I (а), тип II (б)

Fig. 6. MOS varactor simulated CV-curve ($L_G = 0.36$ μm , $W_G = 300$ μm): type I (a), type II (b)

5. Спиральные катушки индуктивности

Спиральные катушки индуктивности широко применяются в качестве базовых элементов согласующих, селективных и резонансных цепей СВЧ IP-блоков. Основными радиочастотными параметрами интегральной катушки индуктивности являются: значение индуктивности (L), добротность (Q), последовательное сопротивление (R_s), частота саморезонанса (F_{SR}) [16, 17].

В рамках настоящей работы с целью снижения значения сопротивления R_s , снижения потерь в подложке и увеличения значения добротности Q были использованы следующие конструктивно-технологические решения [18]:

- использование нескольких слоев металлизации наибольшей толщины (как правило, для КМОП технологических процессов – несколько верхних слоев металлизации), объединенных переходными отверстиями;
- использование «узорчатого» заземленного экрана под проводящими слоями катушки индуктивности, выполненного в слое поликремния;
- оптимизация значения ширины проводящей линии катушки индуктивности.

На рис. 7 представлены внешний вид топологии и расчётные частотные зависимости добротности Q и значения индуктивности L типовой спиральной катушки индуктивности из состава разработанной библиотеки СВЧ БЭ.

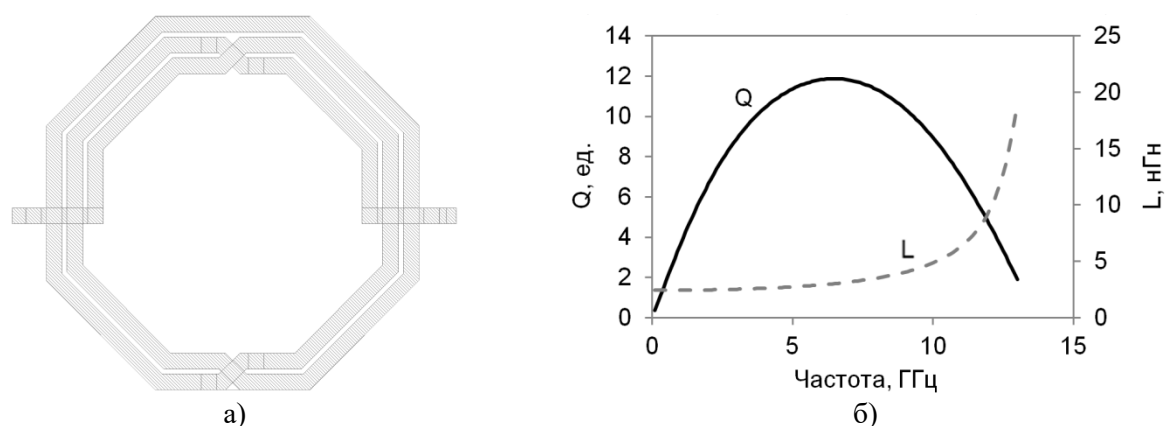


Рис. 7. Упрощенный внешний вид топологии (а) и расчётные частотные зависимости добротности (Q) и значения индуктивности (L) спиральные катушки индуктивности (параметры геометрии: $N = 2,5$, $D = 236$ мкм, $W = 10$ мкм, $S = 3,1$ мкм)

Fig. 7. Simplified layout (a) and Q and L simulated frequency dependences (b) of the spiral inductor (geometry: $N = 2.5$, $D = 236$ μm , $W = 10$ μm , $S = 3.1$ μm)

6. МДМ-конденсаторы

МДМ-конденсаторы наряду с катушками индуктивности, широко применяются в качестве элементов согласующих, селективных и резонансных цепей СВЧ IP-блоков. Основными параметрами конденсатора являются: значение емкости (C), добротность (Q), эквивалентное последовательное сопротивление (R_S), частота последовательного саморезонанса (F_{SR}) [16].

На рис. 8 представлен внешний вид топологии типовых МДМ-конденсаторов плоско-параллельного и встречно-штыревого типов из состава разработанной библиотеки СВЧ БЭ. Особенностью конструктивно-топологической реализации плоско-параллельных конденсаторов является увеличенное число контактов к верхней обкладке с целью минимизации значения R_S . Встречно-штыревые конденсаторы выполнены в 4-х нижних слоях металлизации с использованием конфигурации смешанного типа [19], что обеспечивает сравнительно высокое значение удельной емкости и позволяет использовать встречно-штыревые и плоско-параллельные конденсаторы на единой площади кристалла для увеличения значения общей емкости.

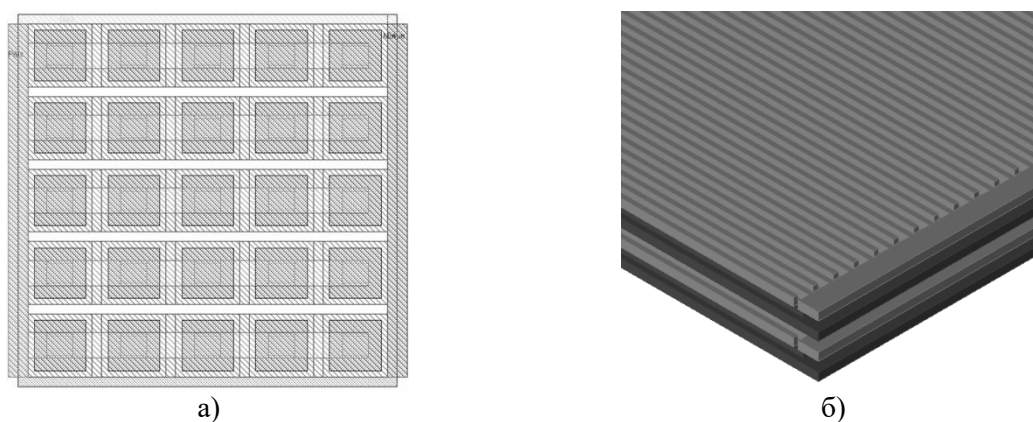


Рис. 8. Упрощенный внешний вид топологии плоско-параллельного (а) и встречно-штыревого (б) МДМ-конденсаторов

Fig. 8. Parallel-plate (a) and interdigital (b) MIM-capacitor simplified layouts

7. Прочие элементы

В состав библиотеки СВЧ БЭ входит также ряд дополнительных элементов:

- набор низкоомных резисторов;
- микрополосковые линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом для передачи СВЧ сигнала в согласованную нагрузку с наименьшими потерями;
- экранированные (с целью снижения потерь) контактные площадки, необходимые для сопряжения изделия с контрольно-измерительным оборудованием, корпусом, другими изделиями.

Значения основных параметров типовых СВЧ БЭ из состава разработанной библиотеки обобщены в табл. 2.

8. Тестовый кристалл для СВЧ-характеризации

С использованием представленной библиотеки СВЧ БЭ, спроектирован тестовый кристалл (ТК) с габаритными размерами $2,05 \times 1,25$ мкм², ориентированный на проведение исследований зондовыми методами и содержащий БЭ (13 типов) и вспомогательные структуры (3 типа, в т.ч. необходимых для проведения процедуры деэMBEDDING) для СВЧ-характеризации отечественного КМОП ТП с проектной нормой 180 нм. Внешний вид топологии ТК показан на рис. 9.

Заключение

Представлены результаты разработки библиотеки СВЧ базовых элементов для отечественного КМОП технологического процесса с проектной нормой 180 нм, которая позволит упростить и ускорить процесс разработки отечественной высокоинтегрированной приемопередающей ЭКБ систем связи, навигации, интернета вещей и др. с рабочими частотами до 3...5 ГГц, в т.ч. предназначенной для функционирования в составе критической инфраструктуры.

Разработанная библиотека базовых элементов включает в своем составе набор радиочастотных МОП-транзисторов для усилительного и ключевого применения, варикапы на основе МОП-структур, спиральные катушки индуктивности, МДМ-конденсаторы и прочие элементы, топология которых оптимизирована для применения в СВЧ диапазоне.

Спроектирован тестовый кристалл, ориентированный на проведение исследований зондовыми методами, который включает в своем составе 13 типов базовых элементов и предназначен для проведения СВЧ-характеризации отечественного КМОП технологического процесса 180 нм.

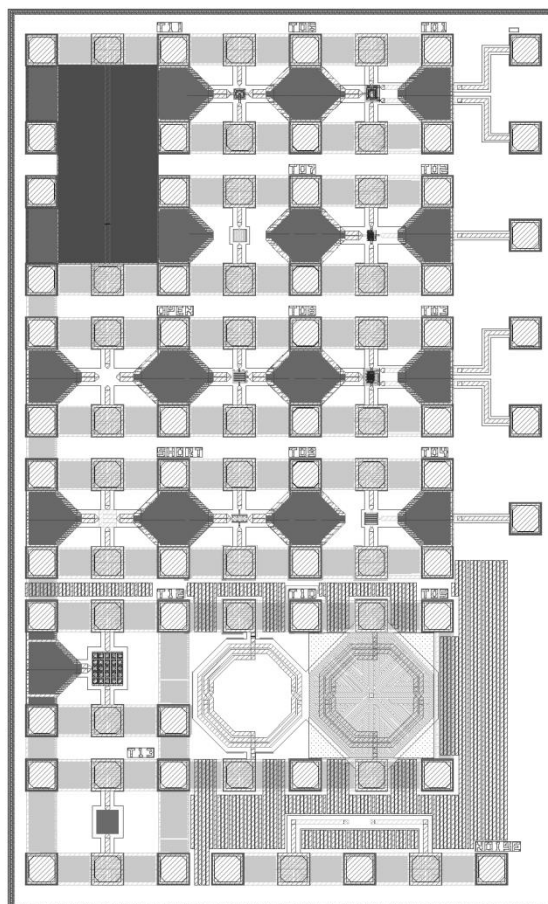


Рис. 9. Внешний вид топологии ТК
Fig. 9. Test chip layout

Таблица 2. Основные параметры СВЧ базовых элементов

Наименование параметра, единица измерения	Обозначение	Расчетное значение	Номер пункта примеч.
<i>n</i> -канальный МОП-транзистор для усилительного применения ($W_G = 120$ мкм, $L_G = 0,18$ мкм)			
Максимальный коэффициент усиления по мощности, дБ	MSG	19,7 / 19,8	1, 2 / 3
Частота единичного усиления, ГГц	f_T	44 / 44	2 / 3
<i>n</i> -канальный МОП-транзистор для ключевого применения ($W_G = 180$ мкм, $L_G = 0,18$ мкм)			
Вносимые потери, дБ	$\alpha_{откр}$	0,46 / 0,46	1, 2 / 4
Потери запираания, дБ	$\alpha_{закр}$	24,3 / 18,6	1, 2 / 4
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу, дБм	$P_{лин}$	11 / > 30	1, 2 / 4
Варикап на основе <i>p</i> -канального МОП-транзистора ($W_G = 300$ мкм, $L_G = 0,36$ мкм)			
Диапазон управляющих напряжений, В	$U_{упр}$	0 - 1,8/ 0 - 1,8	1, 5 / 6
Диапазон изменения емкости, пФ	ΔC	0,58 - 1,09/ 0,58 - 1,68	1, 5 / 6
МДМ-конденсатор ($W_{эфф} = 50$ мкм, $L_{эфф} = 50$ мкм)			
Емкость, пФ	C	2,17 / 1,42	1, 7 / 8
Удельная емкость, фФ/мкм ²	$C_{уд}$	0,87 / 0,57	1, 7 / 8
Спиральная катушка индуктивности ($N = 2,5$, $D = 236$ мкм, $W = 10$ мкм, $S = 3,1$ мкм)			
Индуктивность, нГн	L	2,45	1, 9
Добротность (максимальная), ед.	Q	11,9	9
Частота саморезонанса, ГГц	F_{SR}	16,9	9
Низкоомный резистор ($W = 30$ мкм, $L = 13,48$ мкм)			
Удельное сопротивление, Ом/ мкм ²	$R_{уд}$	114	–
Температурный коэффициент сопротивления, 10 ⁻³ /К	TKC	0,22	–
Микрополосковая линия передачи ($W = 10$ мкм, $L = 450$ мкм)			
Волновое сопротивление, Ом	Z_0	52	1
Коэффициент затухания, дБ/мм	α	0,36	1

Примечания:

- 1 – значение приведено для $F = 1,8$ ГГц;
- 2 – значение приведено для транзистора в объемном исполнении;
- 3 – значение приведено для транзистора в «изолированном исполнении»;
- 4 – значение приведено для транзистора с «плавающим телом» и «плавающим» *n*-карманом;
- 5 – значение приведено для МОП-структуры с объединенными стоком, истоком и подложкой;
- 6 – значение приведено для МОП-структуры в режиме инверсии;
- 7 – значение приведено для конденсатора плоско-параллельного типа;
- 8 – значение приведено для конденсатора встречно-штыревого типа;
- 9 – значение приведено для индуктивности октагональной, симметричной конструкции без экрана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Gramegna G., Mattos P.G., Losi M., Das S., Franciotta M., Bellantone N.G., Vaiana M., Mandara V., Paparo M. A 56 mW 23 mm² single-chip 180 nm CMOS GPS receiver with 27.2 mW 4.1 mm² radio. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 41, no. 3, 2006, p. 540–551. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2005.864136>.
2. Kim J., Yun S., Oh W., Kil M., Cho S. A true single SoC for UHF mobile RFID reader. *IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*. 2011, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CICC.2011.6055391>.
3. Kluge W., Poegel F., Roller H., Lange M., Ferchland T., Dathe L., Eggert D. A Fully Integrated 2.4-GHz IEEE 802.15.4-Compliant Transceiver for ZigBee™ Applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 41, no. 12, p. 2767–2775, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2006.884802>.
4. Усачев Н.А., Елесин В.В., Назарова Г.Н. и др. Исследования возможностей отечественной технологии КМОП КНИ 180 нм для создания радиочастотных приемо-передающих БИС космического назначения. *Изв. вузов. Электроника*. 2017, т. 22, № 6, с. 546–558. DOI: <http://dx.doi.org/10.214151/1561-5405-2017-22-6-546-558>.
5. Elesin V.V., Nazarova G.N., Chukov G.V. et al. Investigation of the possibility to develop radiation-hardness LSIs for navigational purposes according to the 0.35- μ m domestic CMOS SOI technology. *Russ Microelectron* 41, 266–277 (2012). DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063739712040063>.
6. Kwangseok Han, Jeong-hu Han, Minkyu Je and Hyungcheol Shin. RF Characteristics of 0.18- μ m CMOS Transistors, in *Journal of the Korean Physical Society*. Vol. 40, no. 1, 2002, p. 45–48. URL: <https://iranarze.ir/wp-content/uploads/2015/08/4130-RF-Characteristics-CMOS.pdf> (дата обращения: 01.08.2023).
7. Woerlee P.H. et al. RF-CMOS performance trends. *IEEE Transactions on Electron Devices*. Vol. 48, no. 8, 2001, p. 1776–1782. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/16.936707>.
8. Morifuji E. et al. Future perspective and scaling down roadmap for RF CMOS. 1999 Symposium on VLSI Technology. *Digest of Technical Papers (IEEE Cat. No.99CH36325)*. 1999, p. 163–164. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/VLSIT.1999.799394>.
9. Heydari B., Bohsali M., Adabi E. and Niknejad A.M. Millimeter-Wave Devices and Circuit Blocks up to 104 GHz in 90 nm CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 42, no. 12, 2007, p. 2893–2903. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2007.908743>.
10. Tiemeijer L.F. et al. A record high 150 GHz f_{max} realized at 0.18 μ m gate length in an industrial RF-CMOS technology, *International Electron Devices Meeting. Technical Digest (Cat. No.01CH37224)*, USA. 2001, p. 10.4.1–10.4.4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEDM.2001.979471>.
11. Li X.J. and Zhang Y.P. Flipping the CMOS Switch, in *IEEE Microwave Magazine*. Vol. 11, no. 1, 2010, p. 86–96. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MMM.2009.935203>.
12. Poh A. and Zhang Y.P. Design and Analysis of Transmit/Receive Switch in Triple-Well CMOS for MIMO Wireless Systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 55, no. 3, 2007, p. 458–466. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2006.890510>.
13. Li Q. and Zhang Y.P. CMOS T/R Switch Design: Towards Ultra-Wideband and Higher Frequency. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 42, no. 3, 2007, p. 563–570. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2006.891442>.
14. Bunch R.L. and Raman S. Large-signal analysis of MOS varactors in CMOS Gm LC VCOs. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 38, no. 8, 2003, p. 1325–1332. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2003.814416>.
15. Ainspan H. and Plouchart J.-O. A comparison of MOS varactors in fully-integrated CMOS LC VCO's at 5 and 7 GHz, *Proceedings of the 26th European Solid-State Circuits Conference*. 2000, p. 447–450. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1471306> (дата обращения: 01.08.2023).
16. Bahl I.J. *Lumped Elements for RF and Microwave Circuits*, Artech, 2003. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9100836> (дата обращения: 01.08.2023).
17. Pan S.J., Li L.W., Yin W.Y. Performance trends of on-chip spiral inductors for RFICs, *Progress In Electromagnetics Research*. Vol. 45, 2004, p. 123–151. URL: <https://studylib.net/doc/18298460/performance-trends-of-on-chip-spiral-inductors-for-rfics> (дата обращения: 01.08.2023).
18. Chen Ji and Juin Jei Liou. On-Chip Spiral Inductors for RF Applications: An Overview, *Journal of Semiconductor Technology and Science*. Vol. 4, no. 3, 2004, p. 149–167. URL: https://www.researchgate.net/publication/228865439_On-Chip_Spiral_Inductors_for_RF_Applications_An_Overview (дата обращения: 01.08.2023).
19. Feng Xiaoxing, Zhang Xing, Ge Binjie, Wang Xin'an. An RF power amplifier with inter-metal-shuffled capacitor for inter-stage matching in a digital CMOS process, *Journal of Semiconductors*. Vol. 30, no. 6, 2009, p. 065001-1–065001-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1674-4926/30/6/065001>.

REFERENCES:

- [1] Gramegna G., Mattos P.G., Losi M., Das S., Franciotta M., Bellantone N.G., Vaiana M., Mandara V., Paparo M. A 56 mW 23 mm² single-chip 180 nm CMOS GPS receiver with 27.2 mW 4.1 mm² radio. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 41, no. 3, 2006, p. 540–551. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2005.864136>.
- [2] Kim J., Yun S., Oh W., Kil M., Cho S. A true single SoC for UHF mobile RFID reader. *IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*. 2011, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CICC.2011.6055391>.
- [3] Kluge W., Poegel F., Roller H., Lange M., Ferchland T., Dathe L., Eggert D. A Fully Integrated 2.4-GHz IEEE 802.15.4-Compliant Transceiver for ZigBee™ Applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 41, no. 12, p. 2767–2775, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2006.884802>.
- [4] Usachev N.A., Elesin V.V., Nazarova G.N. et al. Capabilities of the domestic 180-nm CMOS SOI Technology to design radio frequency transceiver ICs for space applications. *Proceedings of Universities. Electronics*. 2017, vol. 22, no. 6, p. 546–558. DOI: <http://dx.doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-6-546-558>.
- [5] Elesin, V.V., Nazarova, G.N., Chukov, G.V. et al. Investigation of the possibility to develop radiation-hardness LSIs for navigational purposes according to the 0.35- μ m domestic CMOS SOI technology. *Russ Microelectron* 41, 266–277 (2012). DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063739712040063>.
- [6] Kwangseok Han, Jeong-hu Han, Minkyu Je and Hyungcheol Shin. RF Characteristics of 0.18- μ m CMOS Transistors, in *Journal of the Korean Physical Society*. Vol. 40, no. 1, 2002, p. 45–48. URL: <https://iranarze.ir/wp-content/uploads/2015/08/4130-RF-Characteristics-CMOS.pdf> (accessed: 01.08.2023).
- [7] Woerlee P.H. et al. RF-CMOS performance trends. *IEEE Transactions on Electron Devices*. Vol. 48, no. 8, 2001, p. 1776–1782. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/16.936707>.
- [8] Morifuji E. et al. Future perspective and scaling down roadmap for RF CMOS. 1999 Symposium on VLSI Technology. Digest of Technical Papers (IEEE Cat. No.99CH36325). 1999, p. 163–164. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/VLSIT.1999.799394>.
- [9] Heydari B., Bohsali M., Adabi E. and Niknejad A.M. Millimeter-Wave Devices and Circuit Blocks up to 104 GHz in 90 nm CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 42, no. 12, 2007, p. 2893–2903. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2007.908743>.
- [10] Tiemeijer L.F. et al. A record high 150 GHz f_{max} realized at 0.18 μ m gate length in an industrial RF-CMOS technology, *International Electron Devices Meeting. Technical Digest (Cat. No.01CH37224)*, USA. 2001, p. 10.4.1–10.4.4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEDM.2001.979471>.
- [11] Li X.J. and Zhang Y.P. Flipping the CMOS Switch, in *IEEE Microwave Magazine*. Vol. 11, no. 1, 2010, p. 86–96. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MMM.2009.935203>.
- [12] Poh A. and Zhang Y.P. Design and Analysis of Transmit/Receive Switch in Triple-Well CMOS for MIMO Wireless Systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 55, no. 3, 2007, p. 458–466. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2006.890510>.
- [13] Li Q. and Zhang Y.P. CMOS T/R Switch Design: Towards Ultra-Wideband and Higher Frequency. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 42, no. 3, 2007, p. 563–570. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2006.891442>.
- [14] Bunch R.L. and Raman S. Large-signal analysis of MOS varactors in CMOS Gm LC VCOs. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Vol. 38, no. 8, 2003, p. 1325–1332. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2003.814416>.
- [15] Ainspan H. and Plouchart J.-O. A comparison of MOS varactors in fully-integrated CMOS LC VCO's at 5 and 7 GHz, *Proceedings of the 26th European Solid-State Circuits Conference*. 2000, p. 447–450. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1471306> (accessed: 01.08.2023).
- [16] Bahl I.J. *Lumped Elements for RF and Microwave Circuits*, Artech, 2003. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9100836> (accessed: 01.08.2023).
- [17] Pan S.J., Li L.W., Yin W.Y. Performance trends of on-chip spiral inductors for RFICs, *Progress In Electromagnetics Research*. Vol. 45, 2004, p. 123–151. URL: <https://studylib.net/doc/18298460/performance-trends-of-on-chip-spiral-inductors-for-rfics> (accessed: 01.08.2023).
- [18] Chen Ji and Juin Jei Liou. On-Chip Spiral Inductors for RF Applications: An Overview, *Journal of Semiconductor Technology and Science*. Vol. 4, no. 3, 2004, p. 149–167. URL: https://www.researchgate.net/publication/228865439_On-Chip_Spiral_Inductors_for_RF_Applications_An_Overview (accessed: 01.08.2023).
- [19] Feng Xiaoxing, Zhang Xing, Ge Binjie, Wang Xin'an. An RF power amplifier with inter-metal-shuffled capacitor for inter-stage matching in a digital CMOS process, *Journal of Semiconductors*. Vol. 30, no. 6, 2009, p. 065001-1–065001-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1674-4926/30/6/065001>.

*Поступила в редакцию – 18 августа 2023 г. Окончательный вариант – 30 августа 2023 г.
Received – August 18, 2023. The final version – August 30, 2023.*