

Исследования возможностей отечественной технологии КМОП КНИ 180 нм для создания радиочастотных приемо-передающих БИС космического назначения

*Н.А. Усачев^{1,2}, В.В. Елесин^{1,2}, Г.Н. Назарова^{1,2}, Д.И. Сотсков^{1,2},
А.Ю. Никифоров^{1,2}, Г.В. Чуков^{1,2}, И.О. Метелкин^{1,2}, Н.М. Жидков²,
В.А. Дмитриев³, А.В. Селецкий^{3,4}, Н.А. Шелепин^{3,4}*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия

²АО «ЭНПО Специализированные электронные системы»,
г. Москва, Россия

³АО «Научно-исследовательский институт молекулярной
электроники», г. Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

nausach@spels.ru

Технология КМОП КНИ перспективна для создания широкой номенклатуры радиочастотных аналого-цифровых приемо-передающих БИС, в том числе для производства аппаратуры космического назначения.

Представлены результаты проектирования и исследований радиочастотных элементов библиотеки и набора функциональных блоков для отечественной технологии КМОП КНИ 180 нм. Библиотека элементов включает радиочастотные *n*-канальные МОП-транзисторы с частотой единичного усиления не менее 30 ГГц, МОП-варикапы, катушки индуктивности, конденсаторы, резисторы. Набор радиочастотных функциональных блоков включает усилители, генераторы, смесители, переключатели сигналов, делители частоты с рабочими частотами от 0,1 до 4 ГГц. Стойкость функциональных блоков к дозовому воздействию ионизирующего излучения составляет не менее $3 \cdot 10^5$ ед., тиристорный эффект и катастрофические отказы отсутствуют при воздействии тяжелых заряженных частиц с линейными потерями энергии до 80 МэВ·см²/мг.

Результаты исследований подтверждают возможность создания приемо-передающих БИС космического применения с рабочими частотами до 3 ГГц по отечественной технологии КМОП КНИ 180 нм.

Ключевые слова: КМОП КНИ; радиочастота; характеристика; функциональный блок; приемопередатчик; радиационная стойкость; БИС.

Для цитирования: Исследования возможностей отечественной технологии КМОП КНИ 180 нм для создания радиочастотных приемо-передающих БИС космического назначения / Н.А. Усачев, В.В. Елесин, Г.Н. Назарова и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 6. – С. 546–558. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-6-546-558

Capabilities of the Domestic 180-nm CMOS SOI Technology to Design Radio Frequency Transceiver ICs for Space Applications

N.A. Usachev^{1,2}, V.V. Elesin^{1,2}, G.N. Nazarova^{1,2}, D.I. Sotskov^{1,2},
A.Yu. Nikiforov^{1,2}, G.V. Chukov^{1,2}, I.O. Metelkin^{1,2}, N.M. Zhidkov²,
V.A. Dmitriev³, A.V. Seletskiy^{3,4}, N.A. Shelepin^{3,4}

¹National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²JSC «Specialized Institute of Molecular Electronics», Moscow, Russia

³SC «Research Institute of Molecular Electronics», Moscow, Russia

⁴National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

nausach@spels.ru

The CMOS SOI technology is perspective for creating variety nomenclature of radio-frequency (RF) analog-digital transceiver integrated circuits, including hardware.

Testing results of designing and studies for the library RF elements and the set of the functional blocks designed to domestic CMOS SOI 180 nm technology have been presented. The library of the elements includes the RF n-channel MOSFETs with the cut-off frequency up to 30 GHz, MOSFET based varactors, spiral inductors, MIM capacitors, resistors and RF transceiver IP-blocks, such as amplifiers, voltage control oscillators, frequency dividers with the operating frequencies in the range from 0.1 to 4 GHz. The resistance of the IP-blocks hardness to the total ionizing dose exposure is not less than $3 \cdot 10^5$ au. No SEL or catastrophic failures were observed under the impact of heavy charged particles with the linear energy transfer up to 80 MeV·cm²/mg.

The study results have confirmed the possibility to create the transceiver ICs for the space applications with the working frequencies up to 3 GHz 180 nm CMOS SOI technology.

Keywords: CMOS SOI; radio frequency; characterization; IP-block; transceiver; radiation environment; integrated circuit.

For citation: Capabilities of the domestic 180-nm CMOS SOI technology to design radio frequency transceiver ICs for space applications / N.A. Usachev, V.V. Elesin, G.N. Nazarova et al. // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 6. – P. 546–558. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-6-546-558

Введение. Технология КМОП КНИ имеет преимущества перед объемной КМОП-технологией и характеризуется меньшими значениями паразитных емкостей МОП-транзисторов, большей изоляцией соседних элементов, меньшей потребляемой мощностью, отсутствием тиристорного эффекта, меньшими значениями ионизационных токов при импульсном воздействии ионизирующего излучения (ИИ) и одиночных ядерных частиц (ОЯЧ) [1–3]. Все это делает технологию КМОП КНИ перспективной для создания широкой номенклатуры радиочастотных (РЧ) аналого-цифровых приемопередающих БИС, в том числе для производства аппаратуры космического назначения.

Несмотря на положительный зарубежный опыт [3], отечественные технологии КМОП КНИ применяются в основном для создания цифровых и низкочастотных аналого-цифровых БИС [1].

В настоящее время разработана отечественная технология КМОП КНИ с топологической нормой 180 нм [4]. Для создания РЧ приемо-передающих БИС космического применения с рабочими частотами до 3–5 ГГц требуется поэтапно решить следующие задачи:

- исследование РЧ-характеристик элементов стандартной технологической библиотеки, разработка библиотеки РЧ-элементов, необходимых для построения функциональных блоков приемо-передающих БИС, включающей РЧ n -канальные МОП-транзисторы (n -МОП), интегральные катушки индуктивности, МОП-варикапы, линейные МИМ-конденсаторы;
- проектирование и экспериментальные исследования тестовых кристаллов усилительных, генераторных, смесительных, переключательных и других базовых функциональных блоков РЧ приемо-передающих БИС;
- предварительная оценка показателей стойкости функциональных блоков к дозовому воздействию ИИ и чувствительности к воздействию ОЯЧ космического пространства.

Объекты исследований и экспериментальный комплекс. Базовая технология КМОП КНИ 180 нм имеет шесть уровней металлизации и ориентирована на разработку цифровых и аналого-цифровых БИС с напряжением питания ядра 1,8 В [4]. В состав тестовых структур (ТС) для исследования РЧ-характеристик, наряду с элементами стандартной библиотеки, входят новые разработанные элементы: РЧ n -МОП-транзисторы, интегральные катушки индуктивности, МОП-варикапы, линейные МИМ-конденсаторы. Перечень элементов ТС и их основные конструктивно-топологические параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивно-топологические параметры ТС для исследования РЧ-характеристик элементов технологии КМОП КНИ 180 нм

Table 1

The test elements for RF characterization of the 180 nm CMOS SOI technology

Номер ТС	РЧ-элемент	Описание
1	n -МОП-транзистор	A -тип, $L_g = 0,18$ мкм, $w_F = 1,8$ мкм, $n_g = 20 \times 3$, $W = 108$ мкм
2	n -МОП-транзистор	A -тип, $L_g = 0,18$ мкм, $w_F = 1,8$ мкм, $n_g = 20 \times 14$, $W = 504$ мкм
3	Варикап (n -МОП)	A -тип, $L_g = 0,18$ мкм, $w_F = 1,8$ мкм, $n_g = 20 \times 14$, $W = 504$ мкм
4	Варикап (p -МОП)	H -тип, $L_g = 0,18$ мкм, $w_F = 1,8$ мкм, $n_g = 10 \times 28$, $W = 504$ мкм
5	Резистор	поликремний n -типа, $L = 35$ мкм, $W = 40$ мкм, $R_{ном} = 100$ Ом
6	МИМ-конденсатор	$W = 4,7$ мкм, $L = 4,7$ мкм, $n = 200$, $C_{ном} = 4$ пФ
7, 8	Индуктивности	$W = 10$ мкм, $N = 2,5/4,5$, $L_{ном} = 3$ нГн (октагональная) / 7 нГн (квадратная)

Примечание. L_g – длина затвора; w_F – ширина одной секции затвора; n_g – количество секций затвора; W – суммарная ширина затвора; $R_{ном}$, $L_{ном}$, $C_{ном}$ – номинальное значение сопротивления, индуктивности и емкости соответственно; n – количество одиночных конденсаторов; N – количество витков индуктивности; L – длина структуры.

Экспериментальные исследования ТС проводились в диапазоне частот 0,1–26,5 ГГц с использованием автоматизированного аппаратно-программного комплекса на основе СВЧ-зондовой станции Cascade Summit 12000В [5]. Управление комплексом осуществлялось с применением специально разработанного программного обеспечения автоматизации, позволяющего проведение настройки контрольно-измерительной аппаратуры в соответствии с системой параметров объекта исследований, обработки и визуализации результатов измерений [6, 7].

Высокочастотные характеристики активных и пассивных элементов библиотек. Показателями высокочастотных свойств транзистора служат частота единичного усиления F_t и максимальная частота генерации F_{\max} , а шумовых – минимальный коэффициент шума $K_{ш \min}$ [3, 8]. Выражения для определения F_t и F_{\max} имеют вид:

$$F_t = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}, \quad (1)$$

$$F_{\max} = \frac{F_t}{\sqrt{4R_g(g_{ds} + 2\pi F_t C_{gd})}}, \quad (2)$$

где g_m , g_{ds} – соответственно крутизна МОП-транзистора (32 мСм) и выходная проводимость (0,85 мСм), полученные на основе экспериментальных ВАХ ТС №1; C_{gs} , C_{gd} – соответственно емкости затвор–исток (150 фФ) и затвор–сток (40 фФ), полученные на основе частотных зависимостей S -параметров ТС №1; R_g – сопротивление затвора (2,65 Ом).

Согласно оценке с использованием аналитических выражений (1), (2) [8], приближенные значения F_t и F_{\max} n -МОП-транзистора A -типа (ТС №1) составляют 27 и 95 ГГц соответственно.

В результате проведенных измерений S -параметров n -МОП-транзистора A -типа (ТС №1) с последующим исключением влияния элементов топологии, контактных площадок и измерительного тракта [1] значения F_t и F_{\max} составляют не менее 30 и 110 ГГц соответственно (рис.1,а) и в целом согласуются с результатами аналитического расчета в пределах погрешностей определения параметров малосигнальной эквивалентной схемы и измерений. Предварительная оценка шумовых свойств транзистора проводилась для тестового кристалла двухкаскадного РЧ усилителя на n -МОП-транзисторах A -типа (ТС №2). Согласно результатам исследований, представленным на рис.1,б, значение коэффициента шума $K_{ш}$ на частоте 2 ГГц не превышает 4 дБ при значении коэффициента усиления K_y не менее 20 дБ.

Разработка варикапов, необходимых для создания функциональных блоков генераторов, управляемых напряжением, проводилась по методике, описанной в [1]. В результате спроектированы две ТС варикапов на основе n -МОП-транзистора A -типа и p -МОП-транзистора H -типа. Согласно оценке значений диапазона перестройки эффективной емкости $C_{эфф}$ и добротности Q , проведенной на основе результатов зондовых измерений S -параметров ТС варикапов в диапазоне рабочих напряжений 0–3,3 В, максимальное значение $C_{эфф}$ составляет не менее 1,4 пФ (A -тип) и 1,3 пФ (H -тип), а диапазон перекрытия по емкости – не менее 2,1 ед. (A -тип) и 2,2 ед. (H -тип) при типовом значении Q не менее 6,3 ед. (A -тип) и 13,9 ед. (H -тип). Этого достаточно для построения генераторных функциональных блоков с уровнем фазового шума –70...–90 дБн/Гц при отстройке 100 кГц от несущей.

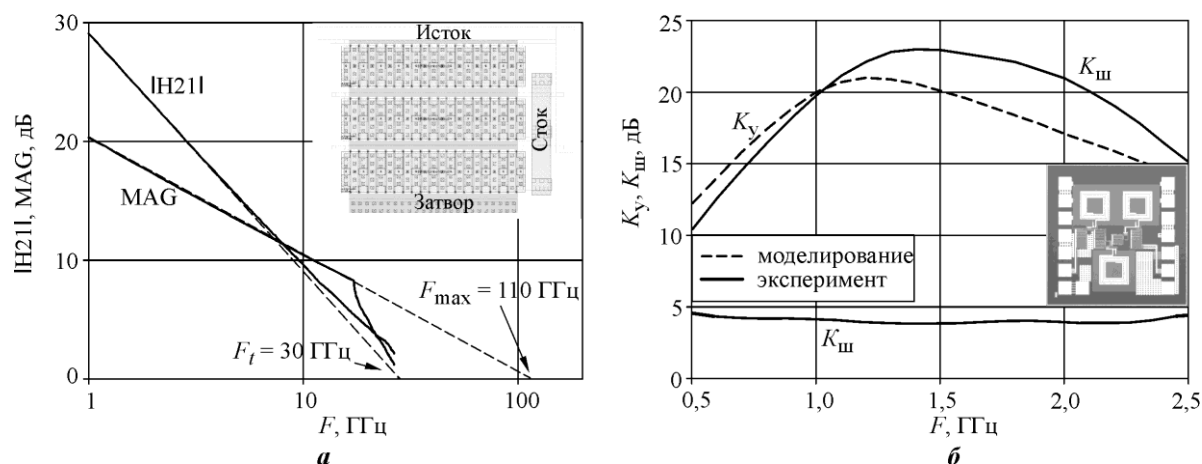


Рис.1. Зависимости модуля коэффициента передачи тока $|H_{21}|$, максимально достижимого коэффициента усиления MAG ТС №1 n -МОП-транзистора A -типа (а) и коэффициентов усиления K_u и шума $K_{ш}$ радиочастотного усилителя (б) от частоты F . На вставках – топология исследуемого транзистора (а) и топология усилителя (б)

Fig.1. Experimental frequency characteristics of the TS-1 of the n -MOS transistor A -type: modulus of the forward current transfer ratio ($|H_{21}|$), maximum available gain (MAG). The insertion shows the topology of the investigated transistor (а), frequency dependences of the gain and the noise factor of the radio-frequency amplifier, the insertion shows the topology of the amplifier (b)

Проектирование и экспериментальные исследования ТС резисторов на основе поликремния n -типа, МИМ-конденсаторов и катушек индуктивности (см. табл. 1) проводились по методикам, описанным в [1, 9]. Экспериментальные значения параметров ТС приведены в табл. 2.

Значения параметров РЧ-элементов для технологии КМОП КНИ 180 нм

Таблица 2

Table 2

Parameters of RF elements of the 180 nm CMOS SOI technology

Параметр	Значение
n-МОП-транзистор A-типа (ТС №1)	
Граничная частота единичного усиления, ГГц	30
Максимальная частота генерации, ГГц	110
Варикапы на основе МОП-структур A-типа (ТС №3) / H-типа (ТС №4)	
Максимальная емкость, пФ	1,4 / 1,3
Коэффициент перекрытия по емкости, ед.	2,1 / 2,2
Добротность, ед.	6,3 / 13,9
МИМ-конденсатор (ТС №6)	
Удельная емкость, фФ/мкм ²	1,0–2,0
Эффективная емкость (ТС №6), пФ	4,5
Добротность (тестовая структура), ед.	27,0
Резисторы на основе поликремния (ТС №5)	
Удельное сопротивление, Ом/□	110
Сопротивление (тестовая структура), Ом	95–100
Граничная частота, ГГц	>26,5
Индуктивности (ТС №7/ ТС №8)	
Эффективная индуктивность, нГн	2,4 / 7,2
Добротность (максимальная), ед.	9,7 / 7,2
Частота саморезонанса, ГГц	14,5 / 9,0

Радиочастотные функциональные блоки. С использованием библиотеки РЧ-элементов проведено проектирование наиболее критичных РЧ функциональных блоков для построения приемо-передающих БИС (рис.2,а): радиочастотного усилителя (РЧУ), генератора, управляемого напряжением (ГУН), предварительного усилителя мощности (ПрУМ), предварительного делителя частоты (ПДЧ), переключателя сигналов (ПС). Проектирование и экспериментальные исследования тестовых кристаллов функциональных блоков проводились по методикам, представленным в [10].

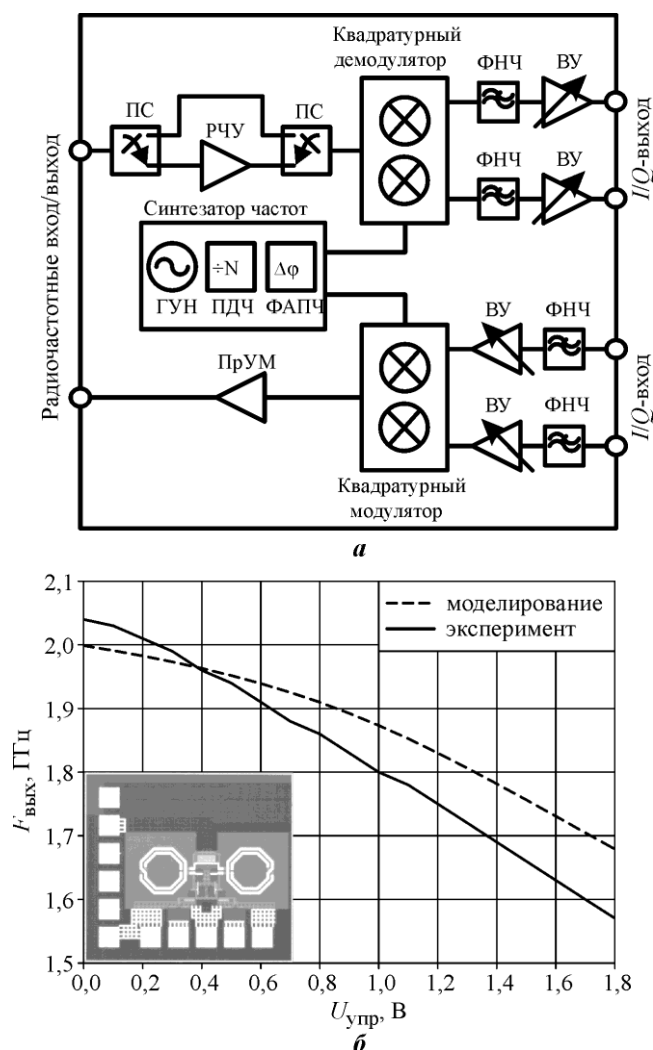


Рис.2. Структурная схема РЧ приемо-передающей БИС (а) и зависимости частоты выходного сигнала ГУН от управляющего напряжения (б) (ФАПЧ – схема фазовой автоподстройки частоты; ФНЧ – фильтр нижних частот; ВУ – видеоусилитель). На вставке – топология ГУН

Fig.2. Structural diagram of RF transceiver LSI (HPF – high pass filter, VA – video amplifier, PLL – phase lock loop) (a), frequency dependences of the VCO output signal from the control voltage, the insertion shows the topology of the VCO (b)

Радиочастотный усилитель. Блок выполнен по двухкаскадной схеме на n -МОП-транзисторах A -типа, включенных по схеме «общий источник». Рабочий режим n -МОП-транзисторов выбран по критерию достижения наименьшего значения коэффициента шума $K_{ш}$. Согласование каскадов РЧУ обеспечено последовательным включением катушки индуктивности номиналом 7 нГн. Исследования РЧУ проводились зондовыми

методами на пластине и в составе специализированной измерительной оснастки. Согласно экспериментальным данным, представленным на рис.1,б, на частоте 2 ГГц коэффициент усиления РЧУ составляет не менее 20 дБ, коэффициент шума – не более 4 дБ, верхняя граница линейности амплитудной характеристики составляет не менее –15 дБм, ток потребления – не более 14 мА при напряжении питания 1,8 В.

Генератор, управляемый напряжением. Блок состоит из генераторного ядра и выходного буферного усилителя. Генераторное ядро выполнено по дифференциальной схеме с перекрестными обратными связями [10, 11] с применением следующих базовых элементов: МОП-варикапов; катушек индуктивности; n -МОП-транзисторов; МИМ-конденсаторов [10, 12]. Выходной буферный усилитель необходим для уменьшения влияния импеданса нагрузки на частоту выходного сигнала и выполнен на n -МОП-транзисторах, включенных по схеме повторителя напряжения. Экспериментальное значение мощности выходного сигнала ГУН во всем диапазоне перестройки частоты 1,58–2,02 ГГц (рис.2,б) составляет не менее 0 дБм при изменении управляющего напряжения в диапазоне 0–1,8 В, уровень фазового шума не превышает –90 дБн/Гц при отстройке 100 кГц, значение тока потребления составляет 25 мА при напряжении питания 1,8 В.

Предварительный усилитель мощности. Блок состоит из двух каскадов на основе n -МОП-транзисторов, включенных по схеме «общий исток», и работает в линейном режиме. Первый каскад обеспечивает усиление входного сигнала, второй каскад формирует требуемый уровень выходной мощности $P_{\text{вых}}$ в нагрузке. Экспериментальное значение выходной мощности в линейном режиме составляет +10 дБм в диапазоне частот 0,8–3 ГГц при потребляемом токе не более 44 мА и напряжении питания 2,5 В. Расчетные и экспериментальные зависимости мощности выходного сигнала от мощности входного сигнала показаны на рис.3,а.

Предварительный делитель частоты на 16/18. Блок включает в себя входной буферный усилитель, предназначенный для формирования дифференциального сигнала с ограниченной амплитудой, достаточной для работы последующего блока, делители частоты на 2 и на 8/9 и выходной буферный усилитель, обеспечивающий работу на заданную нагрузку (в данном случае 50 Ом). Экспериментальные исследования ПДЧ проводились в несимметричном включении по входу. Установлено, что частотные характеристики динамического диапазона («окна чувствительности») для коэффициентов деления, равных 16 и 18, совпадают. Критерием нормального функционирования ПДЧ является наличие на выходе сигнала заданной частоты с уровнем мощности не менее –8 дБм. Согласно результатам экспериментальных исследований диапазон рабочих частот разработанного ПДЧ составляет 0,1–4,0 ГГц при уровнях мощности входного сигнала от –15 до 5 дБм, значение тока потребления равно 27 мА при напряжении питания 2,5 В.

Переключатель сигналов «один в два». Блок состоит из проходных n -МОП-транзисторов, обеспечивающих управление направлением распространения РЧ-сигнала, и двух шунтирующих n -МОП-транзисторов, необходимых для улучшения подавления сигнала в закрытом состоянии [13]. Согласно результатам, представленным на рис.3,б, экспериментальное значение вносимых потерь не превышает 2,3 дБ в диапазоне частот 0,1–3,0 ГГц. Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу составляет не менее 10,3 дБм при токе потребления не более 7 мкА и напряжении питания 1,8 В.

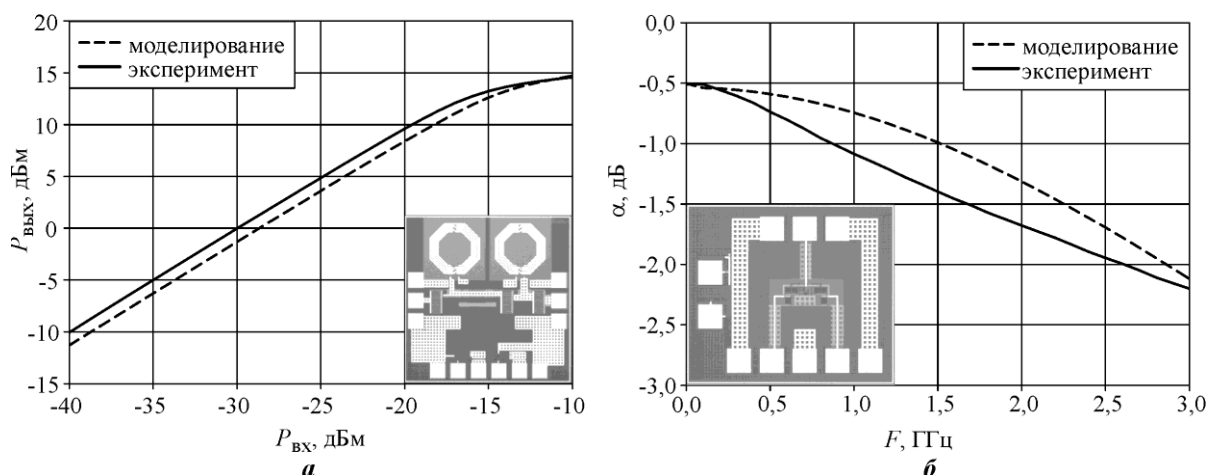


Рис.3. Передаточные характеристики ПрУМ (а) и частотные зависимости вносимых потерь переключателя сигналов «один в два» (б). На вставках – топология ПрУМ (а) и топология переключателей (б)

Fig.3. Transfer characteristics of PrePA, the insertion shows the topology of the PrePA (а), frequency dependences of the insertion loss of the signal switch «one to two», the insertion shows the topology of the switch (b)

Анализ результатов экспериментальных исследований параметров разработанных функциональных блоков показывает, что большинство справочных параметров находится в соответствии с результатами расчетного моделирования с использованием уточненных РЧ-моделей активных и пассивных элементов (табл.3). Выявлено расхождение расчетных и экспериментальных значений коэффициента шума РЧУ, уровня фазовых шумов ГУН, комплексных коэффициентов отражения от входов-выходов усилительных функциональных блоков, что требует коррекции моделей и уточнения шумовых и S -параметров элементов.

Показатели радиационной стойкости функциональных блоков. Оценка показателей радиационной стойкости функциональных блоков РЧУ и ГУН к дозовому воздействию ИИ проводилась по результатам испытаний с использованием установки «Гамма-Панорама МИФИ» [14] по методикам, представленным в работе [15]. Установлено, что стойкость функциональных блоков к дозовому воздействию составляет не менее $3 \cdot 10^5$ ед. При этом увеличение тока потребления ГУН не превышает 10 %, изменение мощности выходного сигнала не превышает 20 % (до максимального значения поглощенной дозы $3 \cdot 10^5$ ед.). Информативными параметрами РЧУ при дозовом воздействии являются ток потребления (увеличение на 60 %), коэффициент усиления (увеличение в 2 раза), коэффициент шума, верхняя граница линейности амплитудной характеристики.

В результате расчетно-экспериментального моделирования показано, что доминирующим эффектом, определяющим дозовую деградацию параметров функциональных блоков РЧУ и ГУН, является сдвиг порогового напряжения транзисторов. Увеличение токов утечки транзисторов не приводит к существенному изменению параметров РЧУ и ГУН.

Определение чувствительности к воздействию ОЯЧ проводилось на циклотроне У400М в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, Россия) [16] с использованием ионов висмута. Установлено, что в функциональных блоках РЧУ и ГУН тиристорный эффект и катастрофические отказы отсутствуют при воздействии ОЯЧ с линейными потерями энергии до $80 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$.

Таблица 3

**Параметры функциональных блоков,
разработанных по технологии КМОП КНИ 180 нм**

Table 3

Functional block's key parameters

Параметр	Значение
РЧУ	
Диапазон рабочих частот, ГГц	1,1–2,1
Коэффициент усиления, дБ	20
Коэффициент шума, дБ	4,0
Ток потребления при напряжении питания 1,8 В, мА	14
Габариты, мм	0,7×0,7
ГУН	
Диапазон выходных частот, ГГц	1,58–2,02
Уровень мощности выходного сигнала, дБм	0
Уровень фазового шума при отстройке 100 кГц, дБн/Гц	–90
Ток потребления при напряжении питания 1,8 В, мА	25,0
Габариты, мм	0,8×0,6
ПрУМ	
Диапазон выходных частот, ГГц	0,8–3,0
Уровень мощности выходного сигнала в линейном режиме, дБм	10
Ток потребления при напряжении питания 2,5 В, мА	44
Габариты, мм	1,35×0,85
ПДЧ	
Коэффициент деления	16/18
Диапазон рабочих частот, ГГц	0,1–4,0
Чувствительность по входу, дБм	от –15 до 5
Выходная мощность на нагрузке 50 Ом, дБм	от 0 до –2
Ток потребления при напряжении питания 2,5 В, мА	27
Габариты, мм	1,35×0,85
ПС «один в два»	
Диапазон частот, ГГц	0,1–3,0
Вносимые потери, дБ	2,3
Подавление сигнала в закрытом состоянии, дБ	32
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу, дБм	10,3
Время переключения, нс	22
Ток потребления при напряжении питания 1,8 В, мкА	7
Габариты, мм	0,96 × 0,83

Закключение. Представленные результаты исследований подтверждают возможность создания приемо-передающих БИС космического применения с рабочими частотами до 3 ГГц по отечественной технологии КМОП КНИ 180 нм.

Литература

1. Investigation of the possibility to develop radiation-hardness LSI's for navigational purposes according to the 0.35- μ m domestic CMOS SOI technology / *Elesin V.V., Nazarova G.N., Chukov G.V. et al.* // Russian Microelectronics. – 2012. – Vol. 41. – No. 4. – P. 266–277.

2. **Marshall A., Natarajan S.** SOI design, analog, memory and digital techniques. – Kluwer Academic Publishers, 2003. – P. 393.
3. **Shahidi G.** SOI technology for the GHz Era // IBM J. Res. Develop. – 2002. – Vol. 46. – No. 2-3. – P. 121–132.
4. **Андреев Д., Ковалева О., Концев Д.** Сверхвысокочастотные характеристики транзисторов, изготовленных по технологии кремний на изоляторе с длиной канала 180 нм // Наноиндустрия. – 2016. – №7 (69). – С. 94–100.
5. Комплекс методических и аппаратно-программных средств для тестирования и оценки показателей радиационной стойкости некорпусированных изделий ТСВЧЭ / **К.М. Амбуркин, В.В. Елесин, Г.В. Чуков и др.** // Междунар. форум «Микроэлектроника 2016» (г. Алушта, 26–30 сент. 2016 г.). – 2016. – С. 374–379.
6. **Елесин В.В., Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чуков Г.В.** Комплекс методических, аппаратных и программных средств для автоматизированных исследований параметров полупроводниковых СВЧ ИС в условиях испытаний на радиационную стойкость // Спецтехника и связь. – 2011. – №4-5. – С. 28–32.
7. **Gromov D.V., Polevich S.A., Elesin V.V.** Test and measurement system for microwave semiconductor devices and IC investigation on radiation hardness // CriMiCo-2009: Conf. Proc. – 2009. – P. 730–731.
8. **Rogers J., Plett C.** Radio frequency integrated circuit design. – 2nd ed. – Norwood, MA: Artech House, 2010. – 513 p.
9. **Elesin V.V., Nazarova G.N., Usachev N.A.** Design of passive elements for monolithic silicon-germanium microwave ICs tolerant to ionizing radiation // Russian Microelectronics. – 2010. – P. 134–141.
10. The circuit and functional blocks for radiation-hard transceiver LSICs in SOI CMOS / **G.N. Nazarova, V.V. Elesin, A.Yu. Nikiforov et al.** // Russian Microelectronics. – 2016. – Vol. 45. – No. 1. – P. 68–76.
11. **Rohde U.L., Kumar A., Bock G.** The design of modern microwave oscillators for wireless applications theory and optimization. – J. Wiley & Sons, 2005. – 543 p.
12. Development perspectives for radiation-hard SHF transmit/receive LSI's for applications of SOI CMOS technology / **G.N. Nazarova, V.V. Elesin, A.Yu. Nikiforov et al.** // CriMiCo-2014: Conf. Proc. – 2014. – P. 856–857.
13. **Елесин В.В., Назарова Г.Н.** Оптимизация параметров СВЧ переключателей для монолитных фазовращателей и аттенуаторов // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 2010. – №1 (224). – С. 7–11.
14. The new gamma irradiation facility at the National Research Nuclear University MEPhI / **A.S. Artamonov, A.A. Sangalov, A.Y. Nikiforov et al.** // IEEE Radiation Effects Data Workshop. – 2014. – P. 258–261.
15. System-on-chip: specifics of radiation behavior and estimation of radiation hardness / **O.A. Kalashnikov, P.V. Nekrasov, A.Yu. Nikiforov et al.** // Russian Microelectronics. – 2016. – Vol. 45. – No. 1. – P. 33–40.
16. Ion beam diagnostics for SEE testing at U400M FLNR JINR cyclotron / **V.A. Skuratov, Y.G. Teterev, V.B. Zager et al.** // Proc. of RADECS-2012. – 2012.

Поступила 24.04.2017 г.; принята к публикации 12.09.2017 г.

Усачев Николай Александрович – кандидат технических наук, инженер Института экстремальной прикладной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31), научный сотрудник АО «ЭНПО Специализированные электронные системы» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31), nausach@spels.ru

Елесин Вадим Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31), начальник отдела АО «ЭНПО Специализированные электронные системы» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31).

Назарова Галина Николаевна – инженер Института экстремальной прикладной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31), старший научный сотрудник АО

«ЭНПО Специализированные электронные системы» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31), gnnaz@spels.ru

Сотсков Денис Иванович – инженер Института экстремальной прикладной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31), младший научный сотрудник АО «ЭНПО Специализированные электронные системы» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31).

Никифоров Александр Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31), руководитель экспертно-аналитической группы АО «ЭНПО Специализированные электронные системы» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31).

Чуков Георгий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31), ведущий научный сотрудник АО «ЭНПО Специализированные электронные системы» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31).

Метелкин Игорь Олегович – инженер Института экстремальной прикладной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31), младший научный сотрудник АО «ЭНПО Специализированные электронные системы» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31).

Жидков Никита Михайлович – инженер АО «ЭНПО Специализированные электронные системы» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31).

Дмитриев Владислав Анатольевич – ведущий инженер АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1).

Селецкий Андрей Валерьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1), старший преподаватель кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1).

Шелепин Николай Алексеевич – доктор технических наук, первый заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1), профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1).

References

1. Elesin V.V., Nazarova G.N., Chukov G.V., Kabal'nov Yu.A., Titarenko A.A. Investigation of the possibility to develop radiation-hardness LSIs for navigational purposes according to the 0.35- μ m domestic CMOS SOI technology. *Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 4, pp. 266–277.
2. Marshall A., Natarajan S. SOI Design, Analog, Memory and Digital techniques. *Kluwer Academic Publishers*, 2003, p. 393.
3. Shahidi G. SOI technology for the GHz Era. *IBM J. Res. Develop.*, 2002, vol. 46, no. 2-3, pp. 121–132.

4. Andreev D., Kovaleva O., Kopcev D. Sverhvysochastotnye harakteristiki tranzistorov, izgotovlennyy po tekhnologii kremnij na izolyatore s dlinoj kanala 180 nm [Ultrahigh-frequency characteristics of transistors manufactured using silicon technology on an insulator with a channel length of 180 nm]. *Nanoindustrialiya – Nanoindustry*, 2016, no. 7 (69), pp. 94–100. (in Russian).
5. Amburkin K.M., Elesin V.V., Chukov G.V., Nazarova G.N., Usachev N.A., Metelkin I.O., Kalashnikov O.A., Nikiforov A.YU., Telec V.A., Artamonov A.S., Sangalov A.A., Egorov A.N. Kompleks metodicheskikh i apparatno-programmnykh sredstv dlya testirovaniya i ocenki pokazatelej radiacionnoj stojkosti nekorpusirovannykh izdelij TSVCHE [Test and measurement system for radiation hardness characterization of microwave semiconductor devices and ICs on wafer]. *Mezhdunarodnaya konferenciya «Mikroelektronika 2016»* [International conference «Microelectronics 2016»]. 2016, pp. 374–379. (in Russian).
6. Elesin V.V., Nikiforov A.YU., Telec V.A., Chukov G.V. Kompleks metodicheskikh, apparatnykh i programmnykh sredstv dlya avtomatizirovannykh issledovaniy parametrov poluprovodnikovyykh SVCH IS v usloviyakh ispytaniy na radiacionnuyu stojkost'. *Spektekhnika i svyaz' – Special equipment and communication*, 2011, no.4-5, pp. 28–32. (in Russian).
7. Gromov D.V., Polevich S.A., Elesin V.V. Test and measurement system for microwave semiconductor devices and IC investigation on radiation hardness. *CriMiCo – 2009. Conf. Proc.*, 2009, pp. 730–731.
8. Rogers J., Plett C. *Radio Frequency Integrated Circuit Design*. 2nd ed. Norwood, MA: Artech House, 2010. 513 p.
9. Elesin V. V., Nazarova G. N., Usachev N. A. Design of Passive Elements for Monolithic Silicon–Germanium Microwave ICs Tolerant to Ionizing Radiation. *Russian Microelectronics*, 2010, pp. 134–141.
10. Nazarova G. N., Elesin V. V., Nikiforov A. Yu., Kuznetsov A. G., Usachev N. A., Amburkin D. M. / The Circuit and Functional Blocks for Radiation-Hard Transceiver LSICs in SOI CMOS. *Russian Microelectronics*, 2016, vol. 45, no. 1, pp.68–76.
11. Rohde U. L., Kumar A., Bock G. *The design of modern microwave oscillators for wireless applications theory and optimization*. J. Wiley & Sons, 2005. 543 p.
12. Nazarova G.N., Elesin V.V., Nikiforov A.Yu., Kuznetsov A.G., Usachev N.A., Chukov G.V. Development perspectives for radiation-hard SHF transmit/receive LSI's for applications of SOI CMOS technology. *24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2014). Conf. Proc.*, 2014, pp.856–857.
13. Elesin V.V., Nazarova G.N. Optimizatsiya parametrov SVCH pereklyuchatelej dlya monolitnykh fazovrashchatelej i atenyuatorov. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory – Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices*, 2010, no.1 (224), pp. 7–11. (in Russian).
14. Artamonov A.S., Sangalov A.A., Nikiforov A.Y., Telets V.A., Boychenko D.V. The new gamma irradiation facility at the National Research Nuclear University MEPhI. *IEEE Radiation Effects Data Workshop*. pp. 258–261.
15. Kalashnikov O.A., Nekrasov P.V., Nikiforov A.Yu., Telets V.A., Chukov G.V., Elesin V.V. / System-on-Chip: Specifics of Radiation Behavior and Estimation of Radiation Hardness. *Russian Microelectronics*, 2016, vol. 45, no. 1, pp. 33–40.
16. Skuratov V.A., Teterev Y.G., Zager V.B., Krylov A.I., Kalagin I.V., Gulbekyan G.G., Anashin V.S. Ion Beam Diagnostics for SEE Testing at U400M FLNR JINR Cyclotron. *Proceedings of RADECS-2012*, 2012.

Submitted 24.04.2017; accepted 12.09.2017.

Usachev Nikolay A. – Cand. Sci. (Eng.), engineer, Institute of Extreme Applied Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31), researcher, JSC «ENPO Specialized Electronic Systems» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31), nausach@spels.ru

Elesin Vadim V. – Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Electronics Department, National Research Nuclear University MEPhI (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31), head of department, JSC «ENPO Specialized Electronic Systems» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31).

Nazarova Galina N. – engineer, Institute of Extreme Applied Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31), senior

researcher, JSC «ENPO Specialized Electronic Systems» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31).

Sotskov Denis I. – engineer, Institute of Extreme Applied Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31), researcher assistant, JSC «ENPO Specialized Electronic Systems» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31).

Nikiforov Alexander Y. – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronics Department, National Research Nuclear University MEPhI (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31), head of the expert-analytical group, JSC «ENPO Specialized Electronic Systems» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31).

Chukov George V. – Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Electronics Department, National Research Nuclear University MEPhI (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31), leading researcher, JSC «ENPO Specialized Electronic Systems» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31).

Metelkin Igor O. – engineer, Institute of Extreme Applied Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31), research assistant, JSC «ENPO Specialized Electronic Systems» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31).

Zhidkov Nikita M. – engineer, JSC «ENPO Specialized Electronic Systems» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye sh., 31).

Dmitriev Vladislav A. – Senior Engineer, SC «Molecular Electronics Research Institute» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, 1-y Zapadny proezd 12/1).

Seletskij Andrey V. – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, SC «Molecular Electronics Research Institute» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, 1-y Zapadny proezd 12/1), assistant professor of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1).

Shelepin Nikolay A. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., First Deputy General Director, SC «Molecular Electronics Research Institute» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, 1-y Zapadny proezd 12/1), professor of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1).