

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА СТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ БИС НАВИГАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КМОП КНИ ТЕХНОЛОГИИ С НОРМАМИ 0.35 мкм

© 2012 г. В. В. Елесин^{1,2}, Г. Н. Назарова^{1,2}, Г. В. Чуков^{1,2}, Ю. А. Кабальнов³, А. А. Титаренко³

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”*

² *ОАО “ЭНПО Специализированные электронные системы”*

³ *ФГУП “ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова”*

E-mail: vveles@spels.ru

Поступила в редакцию 16.12.2011 г.

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований высокочастотных и шумовых свойств КНИ МОП-транзисторов и пассивных элементов отечественной “цифровой” КМОП КНИ-технологии с нормами 0.35 мкм. Разработаны новые элементы, отсутствующие в составе библиотеки и необходимые для построения монолитных СВЧ функциональных блоков. Приведены результаты проектирования и экспериментальных исследований кристаллов генераторного, усилительного и смесительного функциональных блоков с рабочими частотами 1.2–1.65 ГГц. На основе анализа результатов расчетно-экспериментального моделирования подтверждена принципиальная возможность создания на отечественной КМОП КНИ-технологии радиационно-стойкой монолитной БИС радиоприемного устройства спутниковой навигации с частотами 1.2–1.6 ГГц и уровнями стойкости до 10^{12} ед./с и 10^6 ед.

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование структур “кремний-на-изоляторе” (КНИ) обеспечивает высокую радиационную стойкость БИС к импульсному воздействию, что определяется существенным снижением ионизационных токов, исключением эффекта “защелкивания”, подавлением паразитных связей между соседними элементами [1]. С другой стороны малые паразитные емкости, свойственные КНИ-транзисторам по сравнению с приборами, выполненными по объемной КМОП-технологии, а также высокая изоляция между элементами делает КНИ-технологии привлекательной для разработки БИС СВЧ-диапазона. Важной областью применения СВЧ КМОП КНИ БИС может стать аппаратура спутниковой навигации стандартов ГЛОНАСС и GPS в частотном диапазоне 1.20–1.65 ГГц [2, 3].

Ряд зарубежных кремниевых фабрик располагает КМОП КНИ технологическими процессами, позволяющими разработку аналого-цифровых БИС СВЧ-диапазона [4–6]. До последнего времени имеющиеся отечественные КМОП КНИ-технологии применялись исключительно для разработки цифровых или низкочастотных аналого-цифровых БИС [7, 8]. В этой связи исследование СВЧ-характеристик отечественной КМОП КНИ-технологии с проектными нормами 0.35 мкм для разработки радиационно-стойкой БИС-радиоприемного устройства навигационного назначения является весьма актуальной задачей.

Ключевые этапы решения этой задачи:

- предварительное исследование высокочастотных и шумовых свойств КНИ МОП-транзисторов из состава стандартной “цифровой” библиотеки;
- разработка новых элементов библиотеки, таких как интегральные катушки индуктивности и варикапы, отсутствующих в составе библиотеки, но необходимых для построения функциональных блоков радиоприемного устройства;
- проектирование и изготовление тестовых кристаллов генераторного, усилительного и смесительного функциональных блоков с рабочими частотами 1.2–1.65 ГГц из состава СВЧ-тракта радиоприемного устройства;
- проведение экспериментального исследования характеристик этих кристаллов и определение предварительных уровней стойкости к дозовому и импульсному воздействию ионизирующего излучения.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Базовым технологическим процессом для настоящего исследования являлась отечественная КМОП-технология на основе структур “кремний на изоляторе” с проектными нормами 0.35 мкм. Исходно предназначенная для разработки цифровых БИС с напряжением питания 3.3 В, техно-

Таблица 1. Тестовые структуры для исследования СВЧ-характеристик КМОП КНИ-технологии

№	Тестовая структура	Описание
1	<i>n</i> -МОП-транзистор	$L = 0.35$ мкм, $W = 400$ мкм, <i>A</i> -тип
2	МШУ на <i>n</i> -МОП-транзисторе	$L = 0.35$ мкм, $W = 1000$ мкм, <i>A</i> -тип, режим: $U_{си} = 2.5$ В, $U_{зи} = 1.0$ В
3	Варикап на <i>p</i> -МОП-транзисторе в области обеднения	$L = 1.0$ мкм, $W = 500$ мкм, <i>H</i> -тип, режим: $U_c = U_i = 0$ В, $U_k = 3$ В, $U = 0-3$ В
4	Варикап на <i>p</i> -МОП-транзисторе в области насыщения	$L = 0.35$ мкм, $W = 500$ мкм, <i>H</i> -тип, режим: $U_c = U_i = U_k = 1.5$ В, $U = 0-3$ В
5	Диффузионный резистор	$R = 100$ Ом, $L = 60$ мкм, $W = 45$ мкм
6	ММ-конденсатор	$C = 1.2$ пФ, $L = 140$ мкм, $W = 65$ мкм
7–11	Набор интегральных катушек спиральных индуктивностей	$L = 1-14$ нГн

логия имеет два уровня поликремния и четыре уровня металлизации.

Расчетно-экспериментальное моделирование СВЧ и шумовых свойств КНИ МОП-транзисторов, конденсаторов и резисторов проводилось с использованием элементов из стандартной библиотеки. Параллельно были разработаны новые недостающие для построения СВЧ-функциональных блоков элементы библиотеки, такие как интегральные катушки индуктивности и варикапы. Тестовые структуры, сформированные для исследования стандартных и новых элементов, перечислены в табл. 1.

Экспериментальные исследования тестовых структур проводились в диапазоне частот 0.1–20 ГГц средствами СВЧ зондовой станции Summit 12000В, векторного анализатора цепей E8361А и анализатора параметров полупроводниковых приборов 4156С. Математическое исключение контактных площадок из результатов измерений тестовых структур осуществлялось посредством процедуры “деембеддинга” с применением структур “open” и “short” [9].

3. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ И ШУМОВЫЕ СВОЙСТВА КНИ МОП ТРАНЗИСТОРОВ

Базовый элемент КМОП КНИ-библиотеки – *n*-канальный МОП (*n*-МОП) транзистор. Показателями высокочастотных свойств транзистора служат частота единичного усиления (F_t) и максимальная частота генерации (F_{\max}), а шумовых свойств – минимальный коэффициент шума ($K_{ш\min}$). Для предварительной оценки F_t и F_{\max} проведено зондовое измерение *S*-параметров ТС № 1 КНИ *n*-МОП-транзистора, внешний вид которой показан на рис. 1а, структурная схема стенда для зондовых исследований – на рис. 1б. Результаты экспериментального и расчетного моделирования частотных зависимостей *S*-параметров *n*-МОП-транзистора показаны на рис. 1в, 1г. По предварительной оценке при напряжениях

$U_{зи} = 1.0$ В и $U_{си} = 2.5$ В значения F_t и F_{\max} составляют не менее 15 ГГц и 90 ГГц соответственно, что подтверждает возможность реализации усилительных и генераторных БИС навигационного частотного диапазона. Обнаруженное существенное различие в измеренных и расчетных *S*-параметрах тестовых структур *n*-МОП-транзистора указывает на необходимость уточнения параметров SPICE модели.

Один из кратчайших путей исследования шумовых свойств транзистора – определение матрицы шумовых параметров, что является сложной технической задачей [10]. Предварительная оценка шумовых свойств сделана на основе исследования коэффициента шума ($K_{ш}$) тестовые структуры маломощного усилителя, реализованного на *n*-МОП-транзисторе (тестовая структура № 2, табл. 1).

Тестовая структура маломощного усилителя представляла собой КНИ *n*-МОП-транзистор, разваренный в измерительную оснастку проволоками определенной длины, играющими роль согласующих индуктивностей (см. рис. 1д). Подбор длины проволок в цепях затвора, истока и стока осуществлялся расчетно-экспериментально по наилучшему согласованию (минимум КСВН) по входу/выходу. Режим транзистора при исследовании $K_{ш}$ соответствовал значениям

$$U_{зи} = 1.0 \text{ В}, U_{си} = 2.5 \text{ В и } I_c = 18 \text{ мА.}$$

Согласно результатам измерений, представленным на рис. 1д, на частоте 1.5 ГГц значение $K_{ш}$ составляет 2.2 дБ при величине коэффициента усиления (K_y) 12 дБ. Это свидетельствует в пользу возможности построения по данной технологии усилительных блоков с K_y более 20 дБ и $K_{ш}$ не более 2 дБ, но требует экспериментального определения параметров шумовой модели и/или последующего уточнения параметров SPICE модели *n*-МОП-транзистора по традиционной методике.

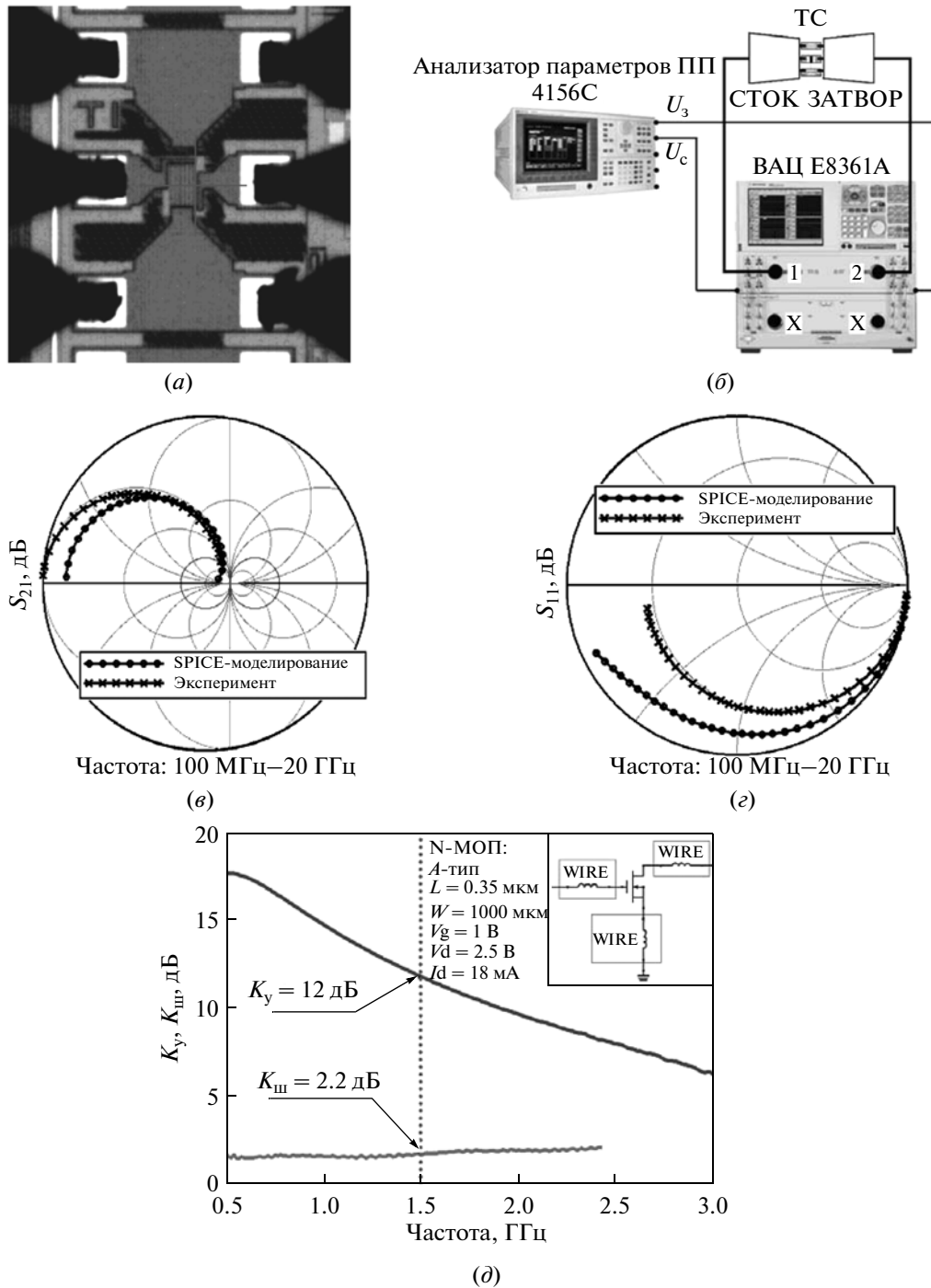


Рис. 1. Фотография тестового кристалла тестовой структуры № 1 КНИ *n*-МОП-транзистора с подведенными зондами (а), схема стенда для зондовых исследований (б); результаты расчетно-экспериментального моделирования S -параметров транзистора после процедуры математического исключения контактных площадок: S_{21} (в), S_{11} (г); результаты экспериментальных исследований СВЧ-параметров тестовой структуры МШУ на КНИ-транзисторе (д).

4. ПРИБОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОП КНИ ТРАНЗИСТОРА

Расчетное моделирование высокочастотных характеристик *n*-МОП-транзистора и оценка значений F_t и $F_{\text{макс}}$ осуществлялось с применением

приборно-технологического моделирования средствами TCAD.

На рис. 2а представлен внешний вид структуры транзистора для моделирования [11], основные параметры которой приведены в табл. 2.

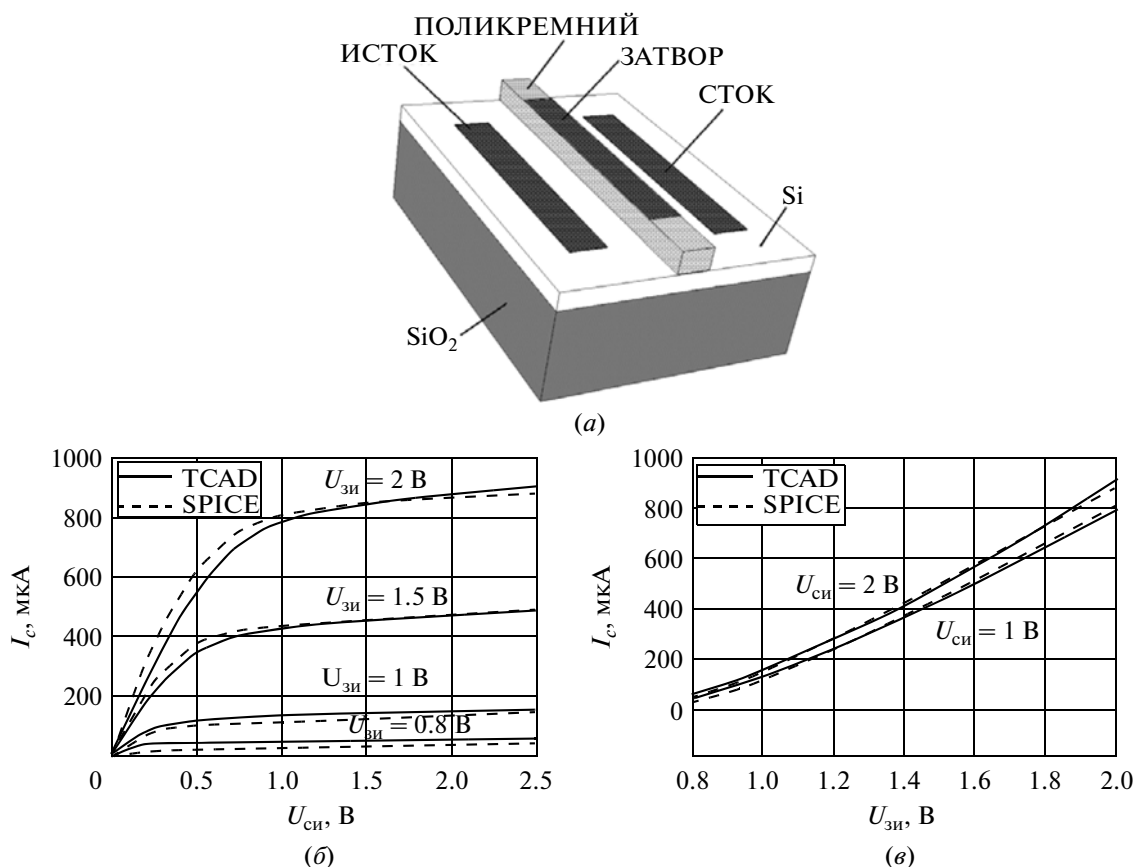


Рис. 2. Структура n -МОП КНИ-транзистора (а); ВАХ-транзистора: (б) – выходная, (в) – проходная.

На рис. 2б, 2в приведены выходные и проходные ВАХ транзистора, полученные путем моделирования в TCAD и расчета по SPICE модели, хорошо согласующиеся между собой.

Важным элементом радиочастотных схем являются транзисторы с большой шириной затвора (до сотен мкм), для построения которых исполь-

зуются составные транзисторы с параллельным соединением нескольких параметризованных элементарных транзисторов с малой шириной. Моделирование транзисторной структуры проводилось в два этапа. На первом этапе средствами TCAD рассчитывались S -параметры одного элементарного транзистора. На втором этапе с помо-

Таблица 2. Основные параметры структуры КНИ МОП-транзистора

Параметр	Значение
Толщина подзатворного окисла, Å	70
Глубина залегания стока/истока, мкм	0.25
Концентрация примеси в канале, см^{-3}	4.3×10^{17}
Концентрация примеси в стоковой и истоковой областях, см^{-3}	3.5×10^{18}
Концентрация примеси в поликремниевом затворе, см^{-3}	3.8×10^{19}
Толщина слоя кремния, мкм	0.2
Толщина скрытого окисла, мкм	0.2
Длина затвора транзистора, мкм	0.35
Ширина затвора транзистора, мкм	4.0
Площадь области стока/истока транзистора, мкм^2	4.8
Периметр области стока/истока транзистора, мкм	10.4

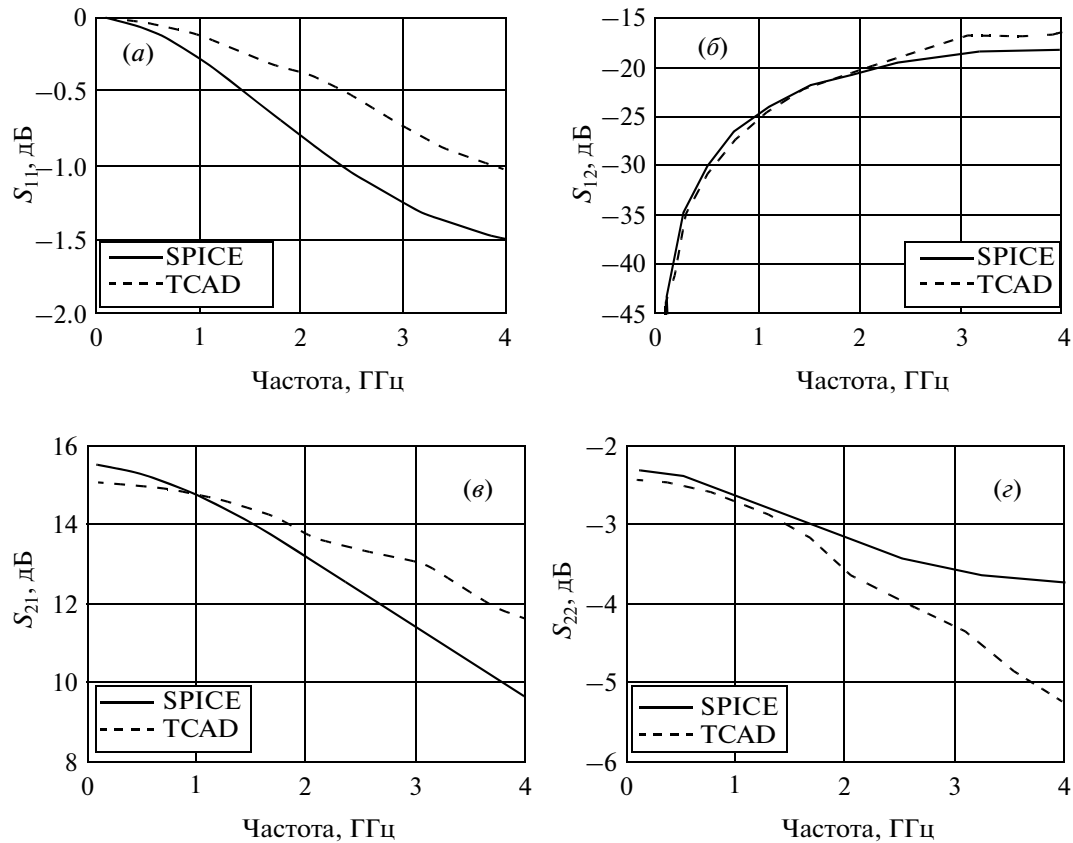


Рис. 3. Результаты расчета S -параметров составного n -МОП КНИ-транзистора.

стью САПР Advanced Design System (ADS) проводилось моделирование составного транзистора. На рис. 3 приведены частотные зависимости S -параметров составного транзистора шириной 400 мкм, полученные путем моделирования в TCAD и расчета по SPICE модели.

Незначительные расхождения, не превышающие 1–2 дБ, объясняются тем, что при моделировании в САПР ADS параллельного соединения нескольких элементарных транзисторов не учитывается взаимодействие между ними.

Оценка значений F_t и F_{\max} производилась двумя способами: на основе S -параметров, рассчитанных с помощью TCAD для транзисторов с различной длиной канала, и по аналитическим соотношениям [12]:

$$F_t = \frac{V_s}{2\pi L}, \quad (1)$$

$$F_{\max} = \frac{F_t}{2\sqrt{r + F_{\tau_3}}}, \quad (2)$$

где V_s – скорость насыщения для электрона в канале (6×10^4 м/с), r – отношение входного и выходного сопротивлений (4×10^{-3}), τ_3 – постоянная времени, определяемая сопротивлением за-

творы и емкостью между стоком и затвором (1.3 пс), L – длина затвора.

Результаты расчета F_t и F_{\max} по S -параметрам (см. рис. 4) хорошо согласуются с аналитическими зависимостями. Для транзистора с длиной канала 0.35 мкм значение F_{\max} , полученное на основе S -параметров, составляет 90 ГГц, что близко к аналитической оценке.

Созданная в настоящей работе модель трехмерной структуры МОП КНИ-транзистора позволяет проводить адекватные расчеты ВАХ и S -параметров на частотах до 4 ГГц. Согласно проведенной оценке значения частоты единичного усиления F_t составляет ~20 ГГц, а максимальная частота генерации F_{\max} – 90 ГГц. Полученные зависимости хорошо согласуются с результатами расчетов по выражениям (1) и (2), а также с экспериментальными результатами, представленными в разделе 3.

5. МОП ВАРИКАПЫ

Перестройка частоты в блоке гетеродина радиоприемного устройства обеспечивается посредством элемента с плавно перестраиваемой емкостью – варикапа, отсутствующего в стандартной КНИ-библиотеке.

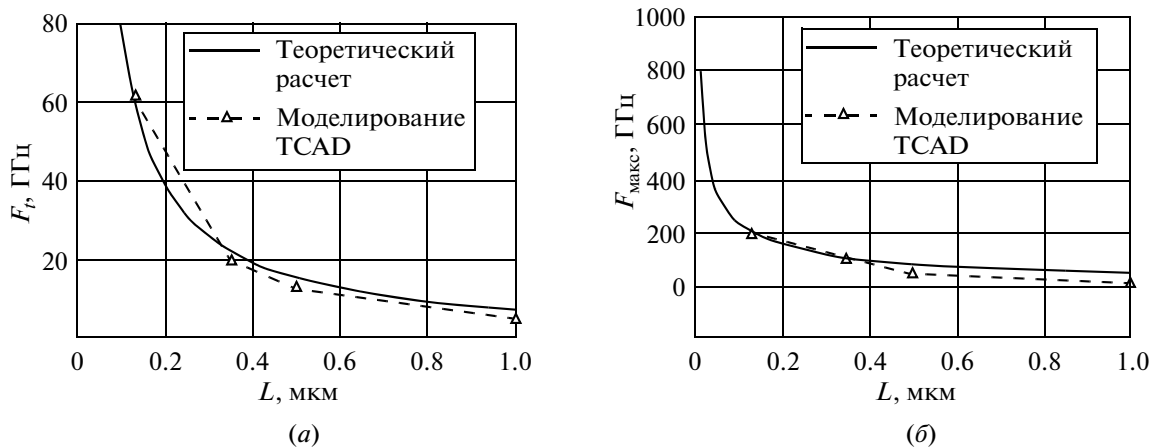


Рис. 4. Зависимость частоты F_T (а) и F_{max} (б) от длины канала L .

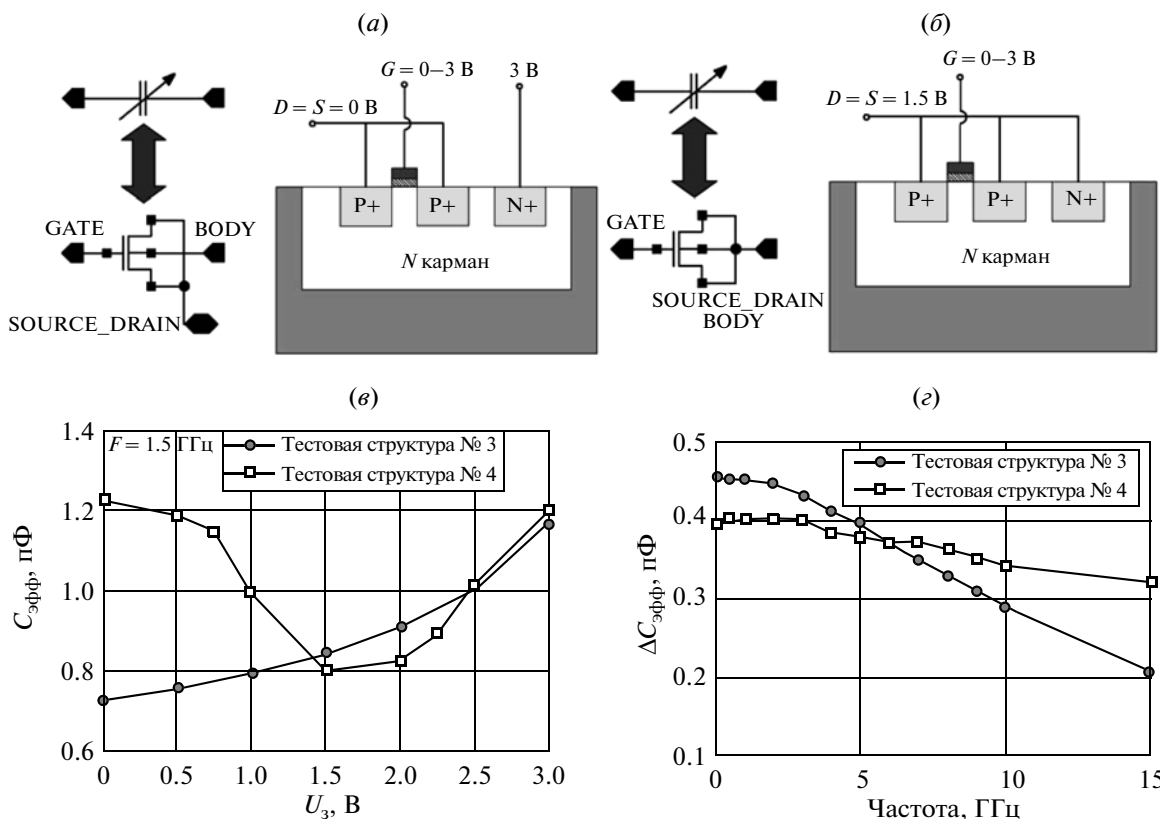


Рис. 5. Конструкции p -МОП КНИ-варикапов тестовых структур № 3 (а), № 4 (б) и результаты их экспериментальных исследований (в), (г).

Исследование возможности реализации варикапа в рамках КМОП КНИ-процесса проводилось в несколько этапов. Сначала был проведен анализ различных конструкций [13], а затем разработано два варианта тестовых структур варикапа на основе стандартного p -МОП-транзистора H -типа, показанные на рис. 5а, 5б. Геометрические параметры тестовых структур варикапов приведены в табл. 1. В

тестовой структуре № 3 p -МОП-транзистор находится в режиме обеднения. Подобная конструкция обеспечивает высокую линейность перестройки, но имеет повышенную чувствительность к шумам подложки. В тестовой структуре № 4 выводы стока, истока и кармана транзистора объединены, перестройка емкости может быть

Таблица 3. Сравнение основных параметров тестовой структуры p -МОП варикапов

№ тестовой структуры	C_{\min} , пФ	C_{\max} , пФ	$\Delta C_{\text{эфф}}$, пФ	$R_{\text{эфф}}$, Ом	Q , ед.	$F_{\text{гр}}$, ГГц*
3	0.73	1.17	0.44	21	7	6
4	0.81	1.22	0.41	14	10	15

Примечание: * частота, при которой $\Delta C_{\text{эфф}}$ снижается на 20%.

использована как в режиме обеднения, так и насыщения, между тем перестроечная характеристика варикапа имеет сильную нелинейность. Управление емкостью тестовых структур варикапов осуществляется изменением напряжения на затворе в диапазоне $0 \dots +3$ В.

Оценка значений диапазона перестройки эффективной емкости ($C_{\text{эфф}}$) и добротности Q проведена на основе результатов зондовых измерений S -параметров тестовой структуры варикапов. Значения основных параметров тестовых структур приведены в табл. 3, а на рис. 5в, 5г представлены зависимости $C_{\text{эфф}}$ и $\Delta C_{\text{эфф}}$ от управляющего напряжения на частоте 1.5 ГГц, согласно которым диапазон перестройки емкости $\Delta C_{\text{эфф}}$ тестовой структуры p -МОП варикапов составляет не менее 40% при значении Q не менее 7 ед., что достаточно для построения генератора, управляемого напряжением, для блока гетеродина радиоприемного устройства.

6. R, C, L ЭЛЕМЕНТЫ

Интегральные пассивные элементы, такие как резисторы с низким удельным сопротивлением, МИМ-конденсаторы и спиральные индуктивности с высокой добротностью и линейностью в широком диапазоне частот широко применяются для построения согласующих, селективных и резонаторных цепей в усилительных, генераторных и смесительных блоках СВЧ БИС [14, 15]. Проведено экспериментальное исследование высокочастотных параметров тестовых структур резисторов, конденсаторов и катушек индуктивностей (см. табл. 1), реализованных по КНИ-технологии.

Конденсаторы. МИМ-конденсатор (тестовая структура № 6) с расчетным номиналом 1.2 пФ выполнен в трех нижних слоях металла и одном слое поликремния. Сравнение частотных зависимостей $C_{\text{эфф}}$ и сопротивления $R_{\text{эфф}}$, полученных на основе измеренных S -параметров, для трех образцов тестовых структур № 6 вместе с результатами расчета приведены на рис. 6а, 6б. Согласно представленным результатам эффективное измеренное значение емкости конденсатора составляет 1.30–1.35 пФ, что соответствует значению удельной емкости МИМ-конденсаторов 0.14–

0.15 фФ/мкм². Для сравнения типовое значение удельной емкости МИМ-конденсаторов в зарубежных радиочастотных технологиях составляет не менее 1 фФ/мкм².

Поскольку расхождение результатов расчета по идеальной модели конденсатора с результатами измерений $C_{\text{эфф}}$ не превышает 10%, при проектировании СВЧ БИС допустимо использовать идеальную модель конденсатора. Рабочий диапазон частот МИМ-конденсатора ограничен сверху значением 12 ГГц из-за резкого роста сопротивления $R_{\text{эфф}}$.

Обнаружен неожиданно большой разброс (от 0.2 до 1.5 Ом) значений последовательного сопротивления конденсатора в диапазоне частот до 12 ГГц, что приводит к неопределенности со значением добротности Q . Не исключено, что указанный эффект обусловлен разбросом эффективного сопротивления контакта измерительный зонд – контактная площадка тестовой структуры и требует дополнительного исследования.

Резисторы. Тестовая структура № 5 резистора с сопротивлением порядка 100 Ом рассчитана на рабочие токи единицы–десятки мА.

Сравнительный анализ результатов измерений и расчетов S -параметров трех образцов тестовой структуры № 5 резистора, приведенных на рис. 6в, показывает удовлетворительное соответствие расчетного (100 Ом) и экспериментальных (103–107 Ом) значений сопротивления. Несмотря на большую площадь резистора (60 мкм × 45 мкм) фазовый набег не превышает 3 градусов на 20 ГГц, что допускает применение идеальной модели резистора без учета таких паразитных элементов как емкость подложки.

Катушки индуктивности. Отсутствующие в стандартной библиотеке интегральные катушки с эффективной индуктивностью $L_{\text{эфф}}$ 1–15 нГн и добротностью Q 3–20 ед., необходимы для построения блоков радиоприемного устройства диапазона 1.2–1.6 ГГц.

Предварительная оценка реализуемых значений $L_{\text{эфф}}$ и Q проведено посредством зондовых исследований S -параметров разработанной тестовой структурой, содержащей две спиральные катушки со значением индуктивности около 12 нГн, имеющих одинаковую топологию. Внеш-

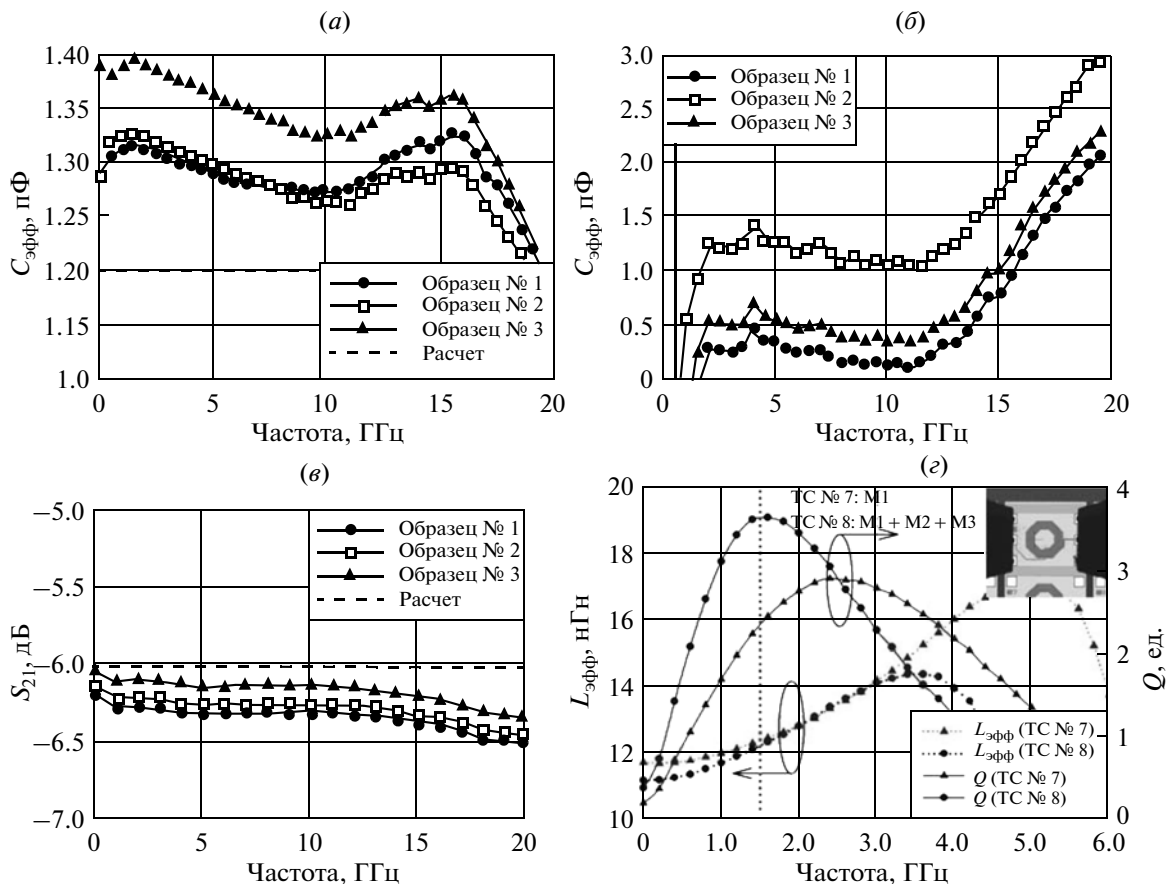


Рис. 6. Сравнительные результаты расчетно-экспериментального моделирования зависимостей $C_{\text{эфф}}$ (а), $R_{\text{эфф}}$ (б) трех образцов тестовых структур МИМ конденсатора и S_{21} трех образцов тестовых структур резистора (в). Результаты экспериментальных исследований СВЧ-параметров тестовых структур однослойной и многослойной интегральных индуктивностей (д).

ний вид катушек показан на вставке рис. 6г. Первая катушка тестовой структурой № 7 выполнена в одном слое верхнего металла, а вторая — тестовая структура № 8 — в трех слоях металла, соединенных перемычками.

Частотные зависимости индуктивности $L_{\text{эфф}}$ и добротности Q , полученные расчетным путем из S -параметров после процедуры МИКП, показаны на рис. 6г. Максимальное значение Q катушки тестовой структурой № 7 составляет 3 ед., а значение Q многослойной катушки не превышает 4 ед., что связано с высокими потерями в низкоомной кремниевой подложке [14]. При этом эффективное сопротивление многослойной катушки тестовой структуры № 8 в два раза меньше, чем у однослойной. Наблюдается снижение частоты собственного резонанса на 1.5 ГГц для многослойной катушки из-за дополнительных паразитных емкостей. По предварительной оценке, для реализации интегральных катушек с $L_{\text{эфф}}$ более 3нГн и Q более 10 ед. потребуются использование техники экранирования подложки [15].

Дополнительно проведено исследование набора тестовых структур индуктивностей различного номинала (см. табл. 1), выполненных в трех верхних слоях металла, соединенных перемычками. Трехмерная электромагнитная модель индуктивности тестовой структуры № 10 и внешний вид кристалла с установленными измерительными зондами показан на рис. 7. На основе измеренных S -параметров рассчитаны основные характеристики тестовых структур индуктивностей, представленные в табл. 4.

7. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ СВЧ-ТРАКТА

Разработанная библиотека СВЧ-элементов прошла апробацию в составе спроектированных в ходе работы тестовых структур генераторного, усилительного и смесительного функциональных блоков из состава СВЧ-тракта навигационного радиоприемного устройства.

Тестовая структура генератора, управляемого напряжением, состоит из ядра и буферного уси-

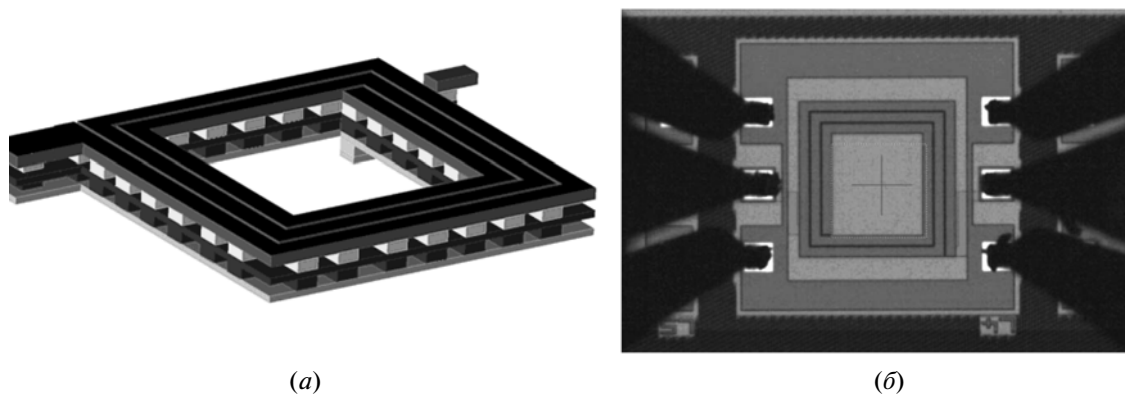


Рис. 7. Электромагнитная модель катушки индуктивности (а) и внешний вид кристалла с установленными зондами (тестовая структура № 10) (б).

лителя. Ядро генератора, управляемого напряжением, построено по классической дифференциальной схеме с отрицательным сопротивлением на базе LC -резонатора, определяющего частоту генерации, и дифференциального усилителя [16]. Роль индуктивного элемента резонатора выполняют спиральные катушки, размещенные в слоях металлизации кристалла, а перестройка частоты генерации осуществляется посредством управляющего напряжения, подаваемого на разработанные в ходе данной работы варикапы. Дифференциальный усилитель с перекрестной обратной связью на КНИ МОП-транзисторах, компенсирующий потери в LC -резонаторе, обеспечивает низкий уровень четных гармоник. Буферный усилитель, представляющий собой повторитель напряжения, уменьшает влияние нагрузки на характеристики генератора, управляемого напряжением и увеличивает уровень выходной мощности. Экспериментальные значения параметров генератора, управляемого напряжением при напряжении питания 3.3 В и изменении управляющего напряжения в диапазоне 0–3.3 В представлены в табл. 5.

Тестовая структура однокаскадного усилителя на n -МОП-транзисторах, содержит входные и выходные согласующие цепи (интегральные индуктивности) и блокировочные конденсаторы.

Тестовая структура смесителя построен по дифференциальной схеме, состоит из смесительного ядра на ячейке Гильберта и входного усилителя

[17], построенного по схеме дифференциального каскада, предназначенного для уменьшения $K_{ш}$ и преобразования входного несимметричного сигнала в дифференциальный. Несимметричный СВЧ-вход имеет сопротивление 50 Ом, а дифференциальный вход гетеродина – 100 Ом. Экспериментальные значения параметров смесителя при напряжении питания 3.3 В и при частотах $F_{рч} = 1250$ МГц, $F_{ГЕТ} = 1415$ МГц, $P_{ГЕТ} = +10$ дБм и $F_{ПЧ} = 165$ МГц представлены в табл. 5.

8. ПОКАЗАТЕЛИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Определение уровней радиационной стойкости функциональных блоков СВЧ-тракта радиоприемного устройства проводилось на базе испытательного центра ОАО “ЭНПО СПЭЛС” с использованием моделирующей установки “АРСА”, лазерного имитатора “РАДОН-5” (импульсное воздействие ИИ), ускорителя электронов “У-31/33” в режиме тормозного гамма-излучения и рентгеновского имитатора “РЕИМ-М” (дозовое воздействие ИИ) [18]. Предельный уровень импульсного воздействия составил 5×10^{12} ед./с, а дозового – 1.2×10^6 ед. Нормативное значение отклонения параметров-критериев от исходного значения при испытаниях полагалось равным 20%.

В ходе исследования стойкости КНИ-функциональных блоков к импульсному воздействию

Таблица 4. Сравнение параметров тестовой структуры спиральных индуктивностей

№ тестовой структуры	$L_{эфф}$ (1.5 ГГц), нГн	$R_{эфф}$, Ом	$Q_{макс}$, ед.	$F_{рез}$, ГГц
9	1.07	1.2	6.8	15.5
10	2.96	2.3	5.7	9.7
11	13.9	13.2	3.8	4.0

Таблица 5. Экспериментальные значения параметров генератора, управляемого напряжением и смесителя

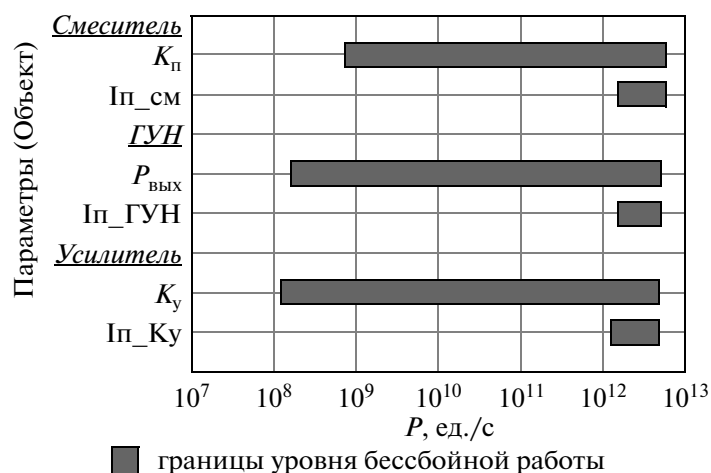
Генератор, управляемого напряжением		Смеситель	
Параметр	Измеренное значение	Параметр	Измеренное значение
Частота выходного сигнала, МГц	1440...1570	Коэффициент преобразования, дБ	+0.5
Выходная мощность, дБм	+1...+3	Линейность по входу, дБм	-13
Уровень 3 гармоника, дБн	-25...-30	Коэффициент шума, дБ	9
Фазовый шум (100 кГц), дБн/Гц	-93	КСВН по входу гетеродина	2.5
Ток потребления, мА	29...32	Ток потребления, мА	27

Таблица 6. Результаты испытаний СВЧ-тестовых блоков к дозовому воздействию ИИ

Тестовый функциональный блок	Контролируемые параметры (облучение до уровня 1.2×10^6 ед., норма – отклонение значения параметра на 20%)	Параметр-критерий Уровень стойкости	
		Группа “нестойкие”	Группа “стойкие”
ГУН	Ток потребления $I_{п}$, выходная мощность $P_{вых}$, выходная частота $F_{вых}$, уровень третьей гармоники P_3 , фазовый шум P_N .	$P_{вых}$ не менее 10^6 ед.	Выход параметров за норму не выявлен не менее 10^6 ед.
Усилитель	Ток потребления $I_{п}$, линейность по входу $P_{1дБ_{вх}}$ и выходу $P_{1дБ_{вых}}$, коэффициент усиления K_y , коэффициент шума $K_{ш}$.	$P_{1дБ_{вых}}$ не менее 240×10^3 ед.	
Смеситель	Ток потребления $I_{п}$, верхняя граница линейности амплитудной характеристики $P_{1дБ}$ коэффициент преобразования $K_{п}$, коэффициент шума $K_{ш}$.	$P_{1дБ}$ не менее 360×10^3 ед.	

проводился контроль тиристорного эффекта и катастрофических отказов, импульсной реакции тока потребления $I_{п}$, уровня выходной мощности $P_{вых}$ (генератора, управляемого напряжением), коэффициента усиления K_y (усилитель) и коэффициента преобразования $K_{п}$ (смеситель).

Тиристорный эффект и катастрофические отказы не обнаружены при импульсном воздействии ИИ до уровня 5×10^{12} ед./с ни у одного из исследованных функциональных блоков. На рис. 8 представлена диаграмма, позволяющая оценить уровни бессбойной работы генератора, управ-

**Рис. 8.** Показатели стойкости СВЧ-блоков к импульсному воздействию ИИ.

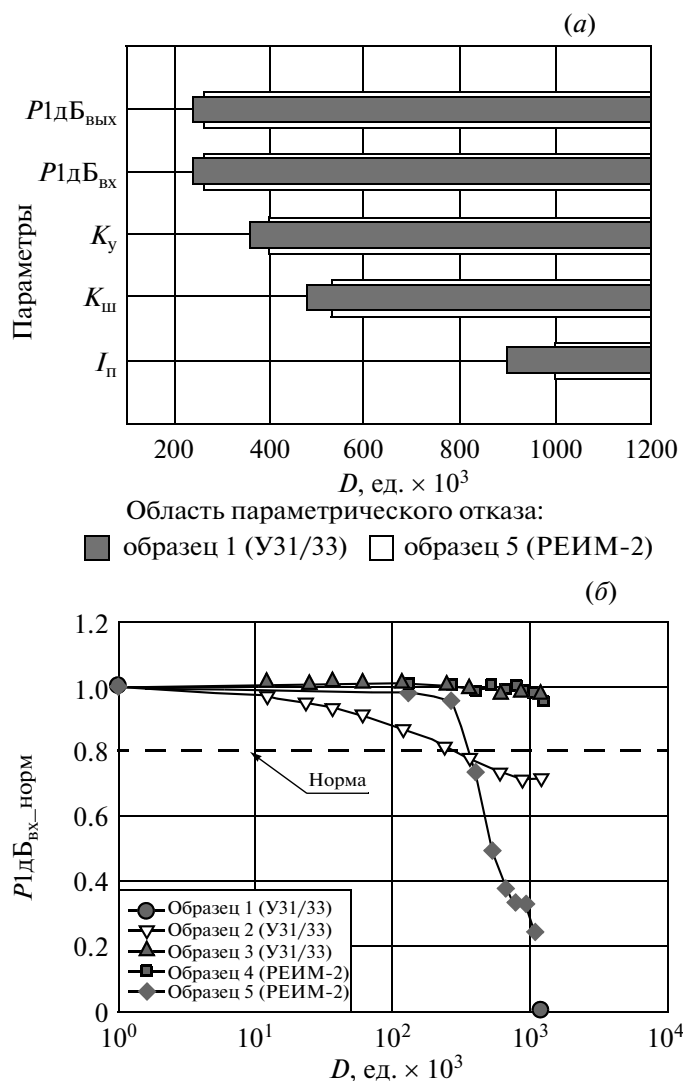


Рис. 9. Показатели стойкости образцов СВЧ-усилителя из группы “нестойкие” (а) и экспериментальные зависимости нормированного значения верхней границы линейности выходной амплитудной характеристики $P_{ВЫХ}$ 1 дБ от поглощенной дозы (б).

ляемого напряжением, усилителя и смесителя, расположенные в диапазоне $1 \times 10^8 - 1 \times 10^9$ ед./с и определить параметры-критерии стойкости: $K_{п}$ для смесителя, $P_{ВЫХ}$ для генератора, управляемого напряжением и K_y для усилителя. Установлено, что время потери работоспособности функциональных блоков не превышает 140 мкс.

Перечень параметров-критериев, контролируемых при исследовании стойкости СВЧ-тестовых функциональных блоков к дозовому воздействию ИИ, представлены в табл. 6 вместе с уровнями стойкости. Для трех образцов генератора, управляемого напряжением выявлен наиболее критичный параметр – $P_{ВЫХ}$. Деградация других контролируемых параметров не выявлена – их изменение находится в пределах погрешности измерений. Предварительно, уровень стойкости СВЧ-генератора, управляемого напряжением со-

ставляет не менее 10^6 ед. Исследование дозовой деградации характеристик пяти образцов усилителя и трех образцов смесителя выявило значительный разброс уровней стойкости между исследованными образцами, позволяющий условно разделить их на две группы: “нестойкие” и “стойкие”. Параметром-критерием, определяющим стойкость образцов усилителя и смесителя из группы “нестойкие”, является верхняя граница линейности амплитудной характеристики ($P1дБ_{ВЫХ}$). Согласно диаграмме, приведенной на рис. 9а, уровень параметрического отказа образцов усилителя из группы “нестойкие” составляет 240×10^3 ед., а соответствующие зависимости $P1дБ_{ВЫХ}$ усилителя от поглощенной дозы приведены на рис. 9б. Согласно табл. 6 уровень стойкости образцов СВЧ-блоков усилителя и смесителя из “стойкой” группы составляет не менее 10^6 ед.

Таблица 7. Значения СВЧ-параметров элементов КНИ КМОП-процесса 0.35 мкм

Активные элементы	
Транзистор	$L = 0.35$ мкм, $W = 400$ мкм, A -тип
Предварительное значение F_f , ГГц	15–20
Предварительное значение F_{\max} , ГГц	90
Коэффициент шума $K_{ш}$, дБ	2.2
Варикапы	p -МОП-транзистор H -тип
C_{\max}/C_{\min}	1.5
Добротность Q (2 ГГц)	10
$F_{гр}$, ГГц	15
Пассивные элементы	
МІМ-конденсаторы	3 слоя металла, слой поликремния
Удельная емкость, фФ/мкм ²	0.15
$F_{гр}$, ГГц	12
Резисторы	Поликремниевые и диффузионные
$F_{гр}$, ГГц	15
Индуктивности	4 слоя металла толщиной 0.6–1 мкм
Проводимость подложки, Ом см ²	5–10
Максимальная добротность Q , ед. (1 нГц)	7
Максимальная добротность Q , ед. (10 нГц)	4

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате предварительного исследования высокочастотных и шумовых свойств КНИ n -МОП-транзисторов из библиотеки отечественной КНИ КМОП-технологии с проектными нормами 0.35 мкм установлено, что значения частоты единичного усиления и максимальной частоты генерации составляют 15–20 и 90 ГГц соответственно, что подтверждает возможность реализации усилительных, смесительных и генераторных ИС с рабочим диапазоном частот 1.2–1.65 ГГц. Остаются открытыми вопросы расчетно-экспериментального определения параметров шумовой модели для уточнения параметров SPICE-модели n -МОП-транзистора, а также исследование практической возможности разработки СВЧ ИС-диапазона частот 2–5 ГГц.

Разработан набор новых элементов библиотеки: интегральные катушки индуктивности и варикапы, необходимых для построения СВЧ-функциональных блоков радиоприемного устройства. Для интегральных спиральных индуктивностей номиналом 12 нГц добротность не превышает 3.6. Установлено, что для реализации катушек с $Q > 5$ может потребоваться экранирование подложки. Предложена конструкция варикапа с диапазоном перестройки емкости не менее 40% при добротности 7, что достаточно для построения функциональных блоков генератора,

управляемого напряжением, с требуемыми характеристиками.

Значения СВЧ-параметров отечественной КМОП КНИ-технологии с проектными нормами 0.35 мкм, полученные в результате расчетно-экспериментальных исследований, представлены в табл. 7.

Спроектированы и изготовлены тестовые кристаллы генераторного, усилительного и смесительного функциональных блоков, входящих в СВЧ-тракт навигационного радиоприемного устройства. Экспериментально установлено, что тестовые кристаллы генератора, управляемого напряжением и смесителя функционально работоспособны в диапазоне частот 1.2–1.65 ГГц, а значения параметров близки к расчетным.

Проведена экспериментальная оценка уровней стойкости разработанных функциональных блоков к дозовому и импульсному воздействию ИИ. Тиристорный эффект и катастрофические отказы не обнаружены до уровня 5×10^{12} ед./с. При дозовом воздействии ИИ установлено, что исследованные образцы усилителей и смесителей можно разделить на две группы: “нестойкие” и “стойкие”. Предварительный уровень стойкости образцов тестовых кристаллов из “стойкой” группы составляет не менее 10^6 ед.

Результаты исследования подтвердили принципиальную возможность разработки радиационно-стойкой монолитной БИС радиоприемного

устройства бортовой аппаратуры спутниковой навигации по отечественной КМОП КНИ-технологии с проектными нормами 0.35 мкм.

Авторы выражают признательность А.Ю. Никифорову, В.А. Тельцу и Д.В. Громову из ИЭПЭ НИЯУ МИФИ, Е.М. Савченко из ФГУП “НПП “Пульсар”, В.В. Репину из ФГУП “НИИМА “Прогресс”, Ю.Б. Рогаткину из НИИСИ РАН за ценные замечания и интерес к работе, А.Г. Кузнецову из ОАО “ЭНПО СПЭЛС” за проведение радиационных исследований и В.А. Дмитриеву из ОАО “НИИМЭ и Микрон” за помощь в проведении зондовых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
2. Елесин В.В. Интегральные микросхемы СВЧ-диапазона для измерительно-информационных систем // Датчики и системы. 2010. № 3 (130). С. 61–65.
3. Елесин В.В., Кузнецов А.Г., Чуков Г.В. и др. Показатели радиационной стойкости отечественных радиочастотных КНИ ИС для навигационных систем // Радиационная стойкость электронных систем – “Стойкость-2010”: Доклад на Российской научн. конф., г. Лыткарино, 3–4 июня 2010 г. М.: СПЭЛС-НИИП, 2010.
4. Shahidi G. SOI technology for the GHz Era // IBM J. Res. Develop. 2002. V. 46. № 2/3. P. 121–132.
5. Описание на КНС технологический процесс. http://www.psemi.com/content/ultracmos/ultracmos_process_tech.html
6. Takashi Taya, Shuji Ito, Nobumasa Higemot. RF Circuit Technology that Realizes Wireless LSI Products // Special Issue on Technologies that Support the e-Society. 2004. V. 71. № 4 Oki Technical Review.
7. Описание технологических процессов “НИИМЭ и Микрон”. <http://www.mikron.sitronics.ru/products/micron/technology>.
8. Горбунов М.С., Зебрев Г.И., Осипенко П.Н. и др. Сравнение различных вариантов топологии КНИ МОП-транзисторов для проектирования радиационно-стойких ИС // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2010. Вып. 1. С. 39–43.
9. Чуков Г.В. Способы подключения кристаллов СВЧ блоков к измерительному тракту // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. тр.: НИЯУ МИФИ. 2010. С. 155–159.
10. Chen C.H., Wang Y.L., Bakr M., Zeng Z. Novel noise parameter determination for on-wafer microwave noise measurements // IEEE Trans. Instrumentation & Measurement. 2008. V. 57. Issue 11. P. 2462–2471.
11. Kuo J.B., Ker-Wei Su. CMOS VLSI engineering: Silicon-on-insulator (SOI) // Kluwer Academic Publishers, 1998. P. 460.
12. Зу С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. 456 с.
13. Garcia I.G., Melendez J., Hernandez E. Design and characterization of integrated varactors for RF applications // J. Wiley & Sons. 2006. P. 160.
14. Елесин В.В., Назарова Г.Н., Усачев Н.А Проектирование пассивных элементов для монокристаллических кремний-германиевых СВЧ ИС, устойчивых к воздействию ионизирующих излучений // Микроэлектроника. 2010. Т. 39. № 2. С. 149–157.
15. Bahl I. Lumped element for RF and microwave circuits // Artech house microwave library. 2003.
16. Grebennikov A. RF and microwave transistor oscillator design // John Wiley & Sons, Inc. 2007. P. 441.
17. Maas S. Microwave mixer // A. House, Dedham MA. 1986. P. 335.
18. Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Чумаков А.И. и др. Экспериментальные исследования адекватности лазерного имитационного моделирования объемных ионизационных эффектов в интегральных схемах и полупроводниковых приборах // Микроэлектроника. 2009. Т. 38. № 1. С. 4–20.