

Анализ возможности использования отечественной 180 нм КМОП технологии для СВЧ применений

А.А. Коколов, Д.В. Ходжиков, Е.А. Шутов, А.В. Помазанов, А.С. Коряковцев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Аннотация: в данной работе представлены результаты разработки и экспериментального исследования тестового кристалла с отдельными СВЧ компонентами, изготовленными по отечественной 180 нм КМОП технологии (АО «Микрон»). На основе полученных данных сделаны выводы о применимости отечественной 180 нм КМОП технологии для разработки СВЧ интегральных схем (ИС) до 6-8 ГГц. Приведены результаты экспериментального исследования СВЧ ИС малошумящего усилителя (МШУ) S-диапазона и дискретного аттенюатора.

Ключевые слова: СВЧ; интегральные схемы; КМОП, МШУ; аттенюатор; S-диапазон

1. Введение

В связи с последними тенденциями, в современных РЛС и телекоммуникациях всё чаще стали использовать интегральные схемы (ИС) СВЧ диапазона, выполненных по кремниевым технологиям (КМОП, КНИ, БиКМОП), по причине их низкой стоимости при массовом производстве и более высокой степени интеграции, по сравнению с технологиями АЗВ5. Так как устройства выполненные на данных технологиях имеют небольшие габариты, низкое потребление, что позволяет проектировать многоканальные СВЧ ИС для приёмо-передающих модулей (ППМ) гражданского и двойного назначения [1-5]. За рубежом кремниевые технологии активно используются для реализации СВЧ ИС для ППМ, в том числе на базе 180 нм КМОП технологии [3]. Для реализации ППМ с более лучшими техническими параметрами на более высоких частотах (например, диапазон К или Ku) выбирают КНИ или БИКМОП технологии, либо КМОП с техпроцессом менее 100 нм [2]. Для разработки СВЧ ИС диапазона частот до 6 ГГц достаточно технологии 180 нм КМОП [3, 5].

Крупнейшим производителем кремниевых ИС в РФ является АО «Микрон», который использует технологические процессы с нормами 180 нм и 90 нм. На основе 90 нм РЧ КМОП технологии в работе [6] были продемонстрированы СВЧ ИС для ППМ с рабочими частотами до 12-15 ГГц (малошумящий и буферный усилители, управляемые фазовращатели и аттенюаторы), а в работе [7] продемонстрирована возможность реализации СВЧ СФ-блоков на базе 180 нм КМОП КНИ технологии.

В данной работе проведен анализ возможности использования 180 нм КМОП техпроцесса (НСMOS8D) для разработки интегральных схем СВЧ диапазона. Для этой цели был изготовлен и экспериментально исследован тестовый кристалл с отдельными элементами, а именно, nМОП-транзисторами, МДМ-конденсаторами и катушками индуктивности. В качестве подтверждения работоспособности техпроцесса НСMOS8D для разработки СВЧ ИС приведены результаты экспериментального исследования МШУ S-диапазона и дискретного аттенюатора диапазона DC-4 ГГц.

2. Исследование элементов 180 нм КМОП технологии

Основой технологического процесса НСMOS8D (АО «Микрон», г. Зеленоград) являются КМОП транзисторы с длиной затвора 180 нм и напряжением питания 1,8 В, а также опционально I/O-транзисторы с напряжением 3,3 В или 5 В. Дополнительно

реализована возможность изготовления МДМ-конденсаторов с разной удельной емкостью ($0,85 \text{ фФ/мкм}^2$ и 2 фФ/мкм^2), различные типы резисторов (N+ и P+ поликремниевые с силицидом и без, диффузионные на основе N+ и P+-области, металлические и др.). Техпроцесс HCMOS8D содержит 6 металлических слоев, из которых 4 нижних слоя имеют толщину $0,5 \text{ мкм}$ и предназначены для соединения элементов. В то время как два верхних слоя металлизации имеют толщину $0,92 \text{ мкм}$ и предназначены для шин питания, распределения тактовых сигналов, а также могут быть использованы для реализации катушек индуктивности и СВЧ линий передачи. В комплекте средств проектирования (КСП), предоставляемом фабрикой, отсутствуют модели катушек индуктивностей, поэтому для их моделирования был разработан ЭМ стек в САПР ADS Momentum.

Далее на основе техпроцесса HCMOS8D был разработан и изготовлен тестовый кристалл, содержащий отдельные элементы: nМОП-транзисторы в усилительном и переключательном режимах, МДМ-конденсаторы и катушки индуктивности. Для исключения влияния контактных площадок и соединительных линий на характеристики исследуемых элементов были заложены тестовые структуры для проведения процедуры деэмбеддинга методом L-2L [8]. Измерения элементов проводились на зондовой станции в диапазоне до 40 ГГц .

На рисунке 1а изображена фотография одного из исследуемых усилительных nМОП-транзисторов с длиной затвора $L = 0,18 \text{ мкм}$ и шириной $W = 4 \times 50 = 200 \text{ мкм}$, включенного по схеме с общим истоком. На рисунке 1б представлено сравнение максимально возможного коэффициента усиления G_{max} в диапазоне частот до 40 ГГц в рабочей точке: $V_{DS} = 1,8 \text{ В}$, $I_{DS} = 25 \text{ мА}$, $V_{GS} = 0,8 \text{ В}$.

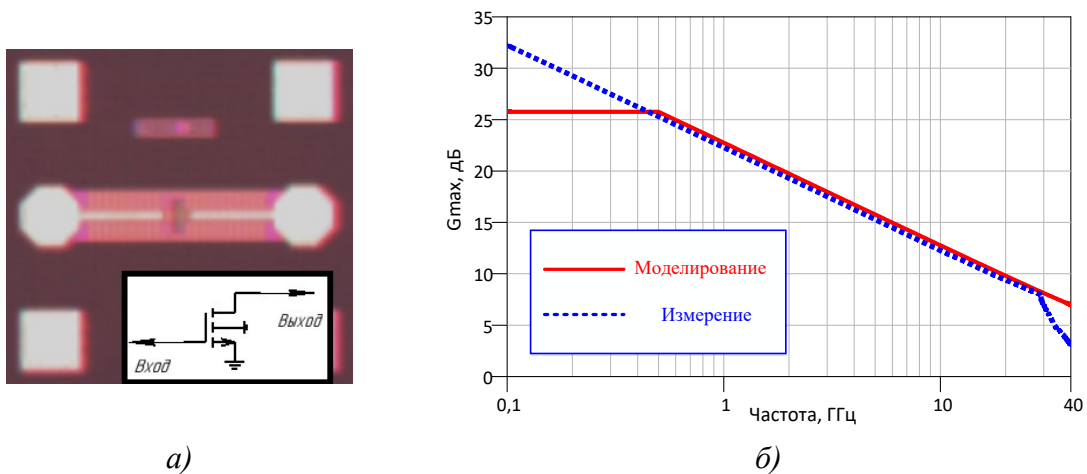


Рисунок 1. Фотография (а), измеренный и смоделированный максимальный коэффициент усиления G_{max} (б) для nМОП-транзистора с шириной затвора $W_g = 50 \times 4 \text{ мкм}$ в рабочей точке $V_{ds} = 1,8 \text{ В}$, $V_{gs} = 0,8 \text{ В}$, $I_{ds} = 25 \text{ мА}$.

В диапазоне частот до 8 ГГц суммарное максимальное среднеквадратичное отклонение (СКО) в различных рабочих точках между измеренными и смоделированными S-параметрами не превышает 30 %. Граничная частота усиления току составляет порядка $f_T \approx 50 \text{ ГГц}$, максимальный коэффициент усиления $G_{max} \approx 12 \text{ дБ}$ на частоте 10 ГГц . Таким образом, с точки зрения усилительных свойств nМОП-транзисторов, отечественная 180 нм КМОП технология может быть использована для разработки СВЧ ИС до $6\text{-}8 \text{ ГГц}$. Однако, в более высокочастотном диапазоне увеличивается СКО между измеренными и смоделированными данными, поэтому модели транзисторов в КСП должны быть уточнены.

Для разработки и моделирования топологий катушек индуктивностей был использован ЭМ анализ. Разработанные катушки были выполнены в верхних слоях

металлизации (М5 и М6) для того, чтобы снизить потери. На рисунке 2а приведена фотография одной из разработанных катушек с номиналом 2,5 нГн (количество витков $N = 4$, ширина линии $W = 11,5$ мкм, расстояние между витками $S = 7$ мкм), а на рисунке 2б – измеренная и смоделированная добротность Q .

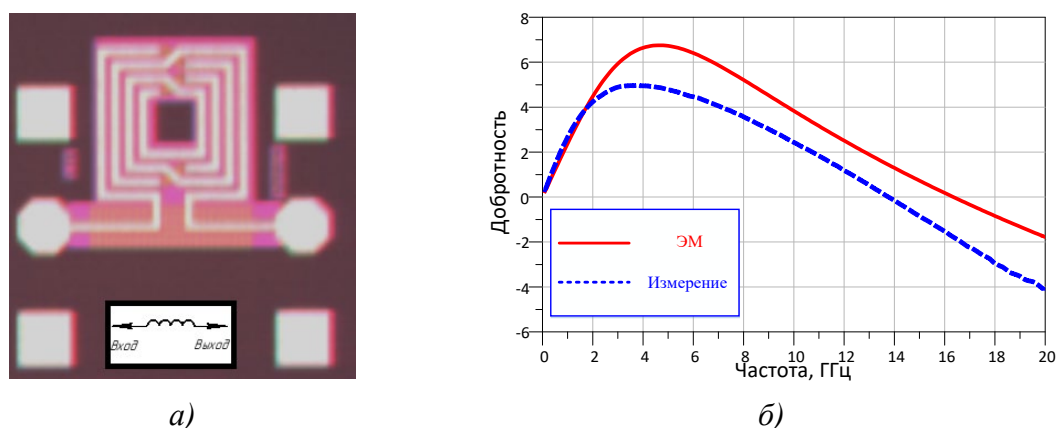


Рисунок 2. Фотография (а), измеренная и смоделированная добротность катушки индуктивности с $W = 11,5$ мкм, $S = 7$ мкм, $N = 4$.

В таблице 1 приведено сравнение измеренных и смоделированных параметров катушек индуктивности для 180 нм КМОП технологии. В качестве основных параметров приведены номинал L , сопротивление R , максимальная добротность Q_{max} , частота $f_{Q_{max}}$, на которой добротность максимальна, а также измеренная частота саморезонанса f_{SRF} .

Таблица 1. Измеренные и смоделированные параметры катушек индуктивностей для 180 нм КМОП технологии

N	S, мкм	L (1 ГГц), нГн		R_{eff} (1 ГГц), Ом		Q_{max}		$f_{Q_{max}}$, ГГц		f_{SRF} , ГГц (изм.)
		Мод.	Изм.	Мод.	Изм.	Мод.	Изм.	Мод.	Изм.	
1	-	0,11	0,13	0,7	0,66	14	8	>20	40	>40
1	-	0,21	0,19	1,2	1,4	16	4,5	>20	40	>40
1	-	0,3	0,28	1,6	2,8	15	4	>20	30	>40
2	5	0,41	0,39	1,9	0,6	12	7,6	>20	3,8	>40
2	3	0,51	0,49	2,1	0,6	11	7,8	>20	3,4	39,5
2	3	0,59	0,61	2,3	2,6	10	5	>20	10	35,8
2	3	0,69	0,79	2,6	6,4	10	4	15	15	32,1
2	5	0,79	0,82	2,9	1,5	9,7	5,7	13,3	3,3	28,8
4	4	2,0	1,99	5,3	3,9	7,4	6,1	5,5	3,1	13,4
4	7	2,5	2,5	6,4	5,8	6,7	4,9	4,5	3,6	13,7
2	4	1,1	1,13	2,0	2,3	11,4	5,5	7,5	4,1	23,8
3	3	2,5	2,5	4,7	4,5	9,3	4,6	4,9	2,5	10,9

3. Экспериментальное исследование СВЧ ИС МШУ и дискретного аттенюатора

Для оценки работоспособности отечественной 180 нм КМОП технологии был разработан комплект СВЧ ИС: 1) МШУ S-диапазона; 2) дискретный 6-битный аттенюатор диапазона DC-4 ГГц. Разработка осуществлялась при помощи моделей транзисторов, предоставленных в КСП от производителя, при этом моделирование согласующих цепей, линий передач и прочих пассивных компонентов производилось в САПР ADS Momentum. Подготовка топологии, физическая и логическая верификация проводились в САПР Cadence.

На рисунке 3 приведены фотографии изготовленных СВЧ ИС МШУ S-диапазона (размеры кристалла $1,4 \times 0,9 \text{ мм}^2$) и дискретного аттенюатора диапазона DC-4 ГГц (размеры – $1,5 \times 0,9 \text{ мм}^2$). Далее было проведено экспериментальное исследование микросхем на зондовой станции.

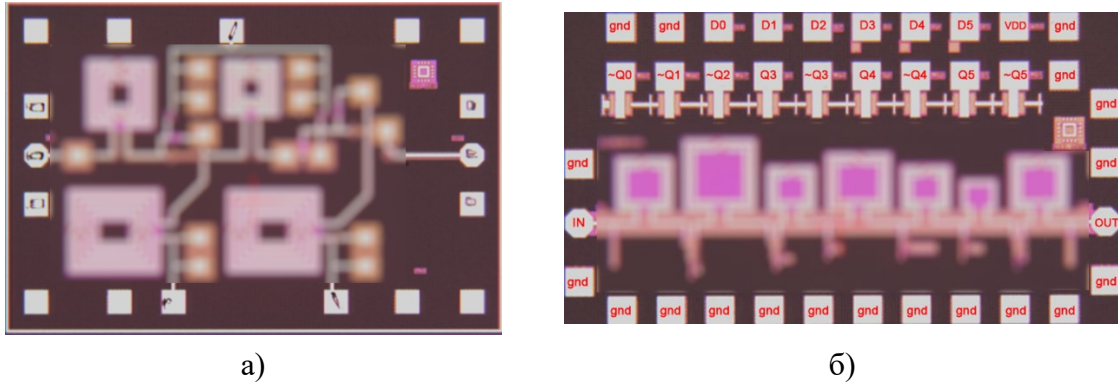


Рисунок 3. Фотографии изготовленных СВЧ ИС на основе отечественной 180 нм КМОП технологии: а) МШУ S-диапазона ($1,4 \times 0,9 \text{ мм}^2$); б) дискретный аттенюатор диапазона DC-4 ГГц ($1,5 \times 0,9 \text{ мм}^2$)

На рисунке 4 приведены измеренные характеристики МШУ в рабочей точке $V_{ds} = 1,8 \text{ В}$, $I_{ds} = 48 \text{ мА}$. Согласно полученным данным коэффициент усиления $|S_{21}|$ составляет $21,5 \pm 1 \text{ дБ}$ в полосе пропускания 2-4 ГГц, при этом коэффициенты отражения не превышают значение минус 10 дБ. Измеренный коэффициент шума NF не превышает 3,5 дБ, а выходная мощность P_{1dB} составляет не менее 10 дБм.

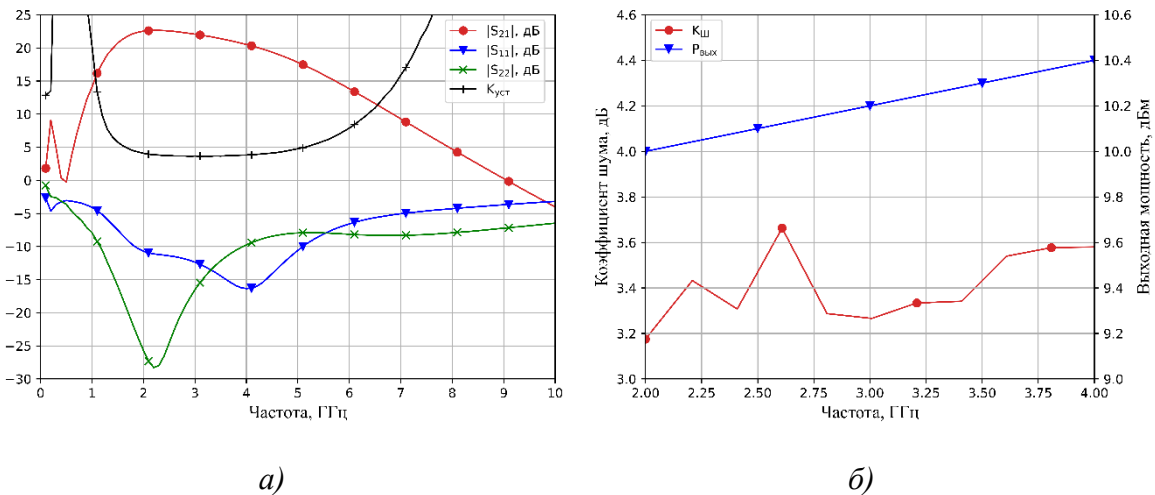


Рисунок 4. Измеренные характеристики СВЧ ИС МШУ S-диапазона на основе 180 нм КМОП технологии: а) S -параметры и коэффициент устойчивости; б) коэффициент шума NF и выходная мощность P_{1dB}

На рисунке 5 приведены измеренные характеристики дискретного 6-битного аттенюатора диапазона DC-4 ГГц. Управление коэффициентом ослабления осуществляется параллельным способом при помощи подачи напряжений управления ($V_{упр} = 1,8/0 \text{ В}$) на соответствующие контактные площадки. Потери в опорном состоянии на 2 ГГц составляют не более минус 4,9 дБ, коэффициенты отражения не превышают значение минус 10 дБ в диапазоне частот DC-4 ГГц, СКО установки амплитуды не превышает 0,5 дБ. Входная мощность IP_{1dB} составляет не менее 10 дБм.

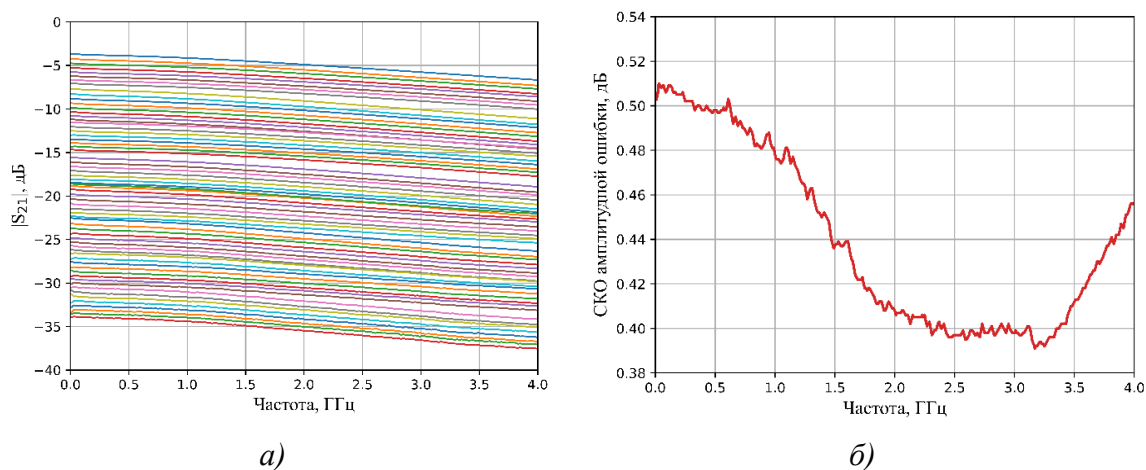


Рисунок 5. Измеренные характеристики дискретного аттенюатора S-диапазона на основе 180 нм КМОП технологии для 64 состояний: а) коэффициент передачи $|S_{21}|$; б) СКО установки амплитуды.

Таким образом, разработанные чипы показывают хорошие параметры, что свидетельствует о возможности использования отечественной 180 нм КМОП технологии для производства как отдельных СВЧ ИС, так и для многофункциональных ИС, в том числе для ППМ.

4. Заключение

Проведен анализ характеристик усилительных транзисторов и катушек индуктивностей, изготовленных по отечественной 180 нм КМОП технологии (АО «Микрон»). Для моделирования катушек индуктивности и линий передач был разработан стек для электромагнитного анализа в САПР ADS Momentum. Результаты экспериментального исследования показали, что отечественная 180 нм КМОП технология пригодна для изготовления СВЧ ИС с рабочими частотами до 6-8 ГГц. Однако для более точного проектирования на частотах выше 4 ГГц необходимо провести работы по уточнению моделей ряда элементов в библиотеке.

Разработан и экспериментально исследован комплект СВЧ ИС на основе отечественной 180 нм КМОП технологии: 1) МШУ S-диапазона (коэффициент усиления $21,5 \pm 1$ дБ, коэффициент шума не более 3,5 дБ); 2) дискретный 6-битный аттенюатор диапазона DC-4 ГГц (потери в опорном состоянии на 2 ГГц составляют не более минус 4,9 дБ, СКО установки амплитуды не более 0,5 дБ).

Разработка интегральных схем выполнялась в рамках государственного задания при финансовой поддержке **Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор FEWM-2025-0004)**. Изготовление ИС осуществлено в ходе участия в прикладной научно-исследовательской работе **«Разработка методики прототипирования электронной компонентой базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW»**, выполняемой НИУ МИЭТ в рамках федерального проекта **«Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности»**.

Список литературы

1. D. Shin and G. M. Rebeiz. A High-Linearity X -Band Four-Element Phased-Array Receiver: CMOS Chip and Packaging // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2011. – Т. 59. – №. 8. – С. 2064-2072.
2. H. Nam, et al. A Full X-Band Phased-Array Transmit/Receive Module Chip in 65-nm CMOS Technology // IEEE Access. – 2020. – Т. 8 – С. 76182-76192.

3. K. Gharibdoust. et al. A fully integrated 0.18-um CMOS transceiver chip for X-band phased-array systems // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Т. 60. – №. 7 – С. 2192-2202.
4. Z. Wang et al. A Fully Integrated S-Band 1-Watt Phased Array T/R IC in 0.13 μ m SOI-CMOS Technology // 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – 2019. – С. 1237-1240.
5. V. Kumar et al. Design of S Band Low Noise Amplifier with on chip Spiral inductors using Indigenous 180nm Digital CMOS process // IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference. – 2018.
6. Л. И. Бабак, П. В. Панасенко, А. А. Коколов и др. Комплект диаграммообразующих СВЧ ИС для приемопередающих модулей X-диапазона с АФАР на основе отечественной 90-нм КМОП-технологии // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13. – №. 99. – С. 421-422.
7. K.-J. Koh and G. Rebeiz, An X- and Ku-band 8-element phased-array receiver in 0.18-um SiGe BiCMOS technology // IEEE J. Solid-State Circuits. – 2008. – Т. 43. – №. 6. – P. 1360–1371.
8. Yen H.T. et al. A Physical De-embedding Method for Silicon-based Device Applications // Progress In Electromagnetics Research Symposium, Beijing, China. – 2009. – С. 1339–1343.