

УДК 621.3.049.77

ОПТИМИЗАЦИЯ СВЧ-САМОСОВМЕЩЕННЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР НА ЧИСТОМ КРЕМНИИ И МАЛОШУМЯЩЕГО ШИРОКОПОЛОСНОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ ИС С ЭЛЕМЕНТАМИ МЭМС

Часть 2*

В. Д. Вернер, д-р физ.-мат. наук; *Н. М. Луканов*, д-р техн. наук;

А. Н. Сауров, чл.-кор. РАН

ФГУ НПК "Технологический центр" МИЭТ, Москва, Россия

П. В. Метельков

МИЭТ, Москва, Россия

Проведена оптимизация работы СВЧ-малошумящего широкополосного усилителя для радиопередающих ИС на чистом кремнии с рабочей частотой $F = 5,2$ ГГц, используя биполярные СВЧ-самосовмещенные транзисторные структуры и элементы МЭМС. Усилитель имеет минимальное значение уровня шума 1,8 дБ, усиление по мощности 18,2 дБ, величину точки компрессии по входу -21 дБм и ток потребления 13 мА при напряжении питания 3 В.

Ключевые слова: малошумящий широкополосный усилитель, чистый кремний, рабочая частота 5,2 ГГц, биполярные СВЧ-самосовмещенные транзисторные структуры, оптимизация параметров.

Ранее, в предыдущей публикации [1], мы рассматривали параметры биполярных СВЧ-самосовмещенных транзисторных структур (ССТС) на чистом кремнии в зависимости от частоты. На основе параметров ССТС и элементов МЭМС выбрана принципиальная электрическая схема малошумящего широкополосного усилителя (МШУ) для радиопередающих ИС с рабочей частотой $F = 5,2$ ГГц.

Параметры ИС сопоставлялись с параметрами зарубежного усилителя, приведенными в работе [2]. Этот усилитель имел дифференциальную каскодную структуру с резонансной нагрузкой. При $F = 4,7$ (5,2) ГГц уровень шума составил 3,2 (5,0) дБ, усиление по мощности 24 (18) дБ, величина точки компрессии по входу равнялась -13 дБ, ток потребления 18 мА при напряжении питания 3 В. В скобках даны значения параметров усилителя при $F = 5,2$ ГГц.

В последнее время большое развитие получили СВЧ- и микроволновые системы обработки информации в общем корпусе (SoP). Для трехмерной интеграции в этом случае требуются не только ССТС с ультратонкими слоями на тонких (≈ 100 мкм) подложках кремния, но и функциональные интегрированные устройства (ФИУ), а также высококачественные пассивные элементы (ВПЭ), реализация которых обычно затруднена в системах на кристалле (SoC). При комплексной интеграции ИС с шариковыми вы-

водами, а также ВПЭ и ФИУ как с шариковыми, так и специальными выводами на одной базовой плате возможно обеспечить оптимальное согласование по важнейшим параметрам интегрированной СВЧ-антенны, емкостей, индуктивностей, фильтров, резонаторов, генераторов частот, смесителей, полосковых линий передачи сигнала, датчиков давления, акселерометров, усилителей низкой частоты (НЧ) и др. элементов.

Так, в перспективном варианте SoP на общей многослойной плате удастся интегрировать различные элементы с гибкой системой многоуровневой металлизации из пленок жидкокристаллического полимера (LCP) с нанесенной фольгой из Cu. Последнее позволяет создавать высокоэффективные СВЧ- и микроволновые многокристалльные модули (МКМ) с рабочей частотой от 5 ГГц на Si до 60 ГГц на SiGe [3].

В первых отечественных вариантах МКМ для супер-ЭВМ "Эльбрус-2" на основе МКБИС и МШУ на основе ССТС использовались различные конструктивно-технологические базы и процессы, применимые и сейчас для изготовления радиочастотных (РЧ) схем (рис. 1, а—д):

- базис создания МКМ (рис. 1, а) на основе пластин кремния с системой шин металлизации и балочными выводами из утолщенных пленок Cu(Au) с тонким барьерным слоем Mo(Ti) и с отверстиями для установки кристаллов ИС [4];

- базис создания МКМ (рис. 1, б) на основе пластин кремния с системой шин металлизации

* Часть 1 — см. 2011. № 1. С. 78—84.

для установки кристаллов ИС, ФИУ и ВПЭ, имеющих выступающие балочные выводы из утолщенных пленок Cu(Au) [4];

- основной вариант создания МКБИС (рис. 1, *в*) на базовой плате, используя ИС, ФИУ и ВПЭ с полосковыми выводами из фольги Al, предварительно нанесенной на гибкую полиимидную пленку. Метод применим для создания СВЧ-системы контроля кристаллов ИС с узкими полосковыми выводами [4];

- процессы для формирования НЧ МШУ на полевых транзисторах с затвором на $p-n^+$ -переходе, ФИУ—ПЗУ с диэлектрической изоляцией, ВЧ-линейных ИС на самосовмещенных сверхтонких ТС и ультратонких ССТС с поликремнием [4, 5];

- процессы обработки пластин кремния различной ориентации (111, 110, 100) в целях разделения их на кристаллы путем скрайбирования и травления кремния в органических растворах;

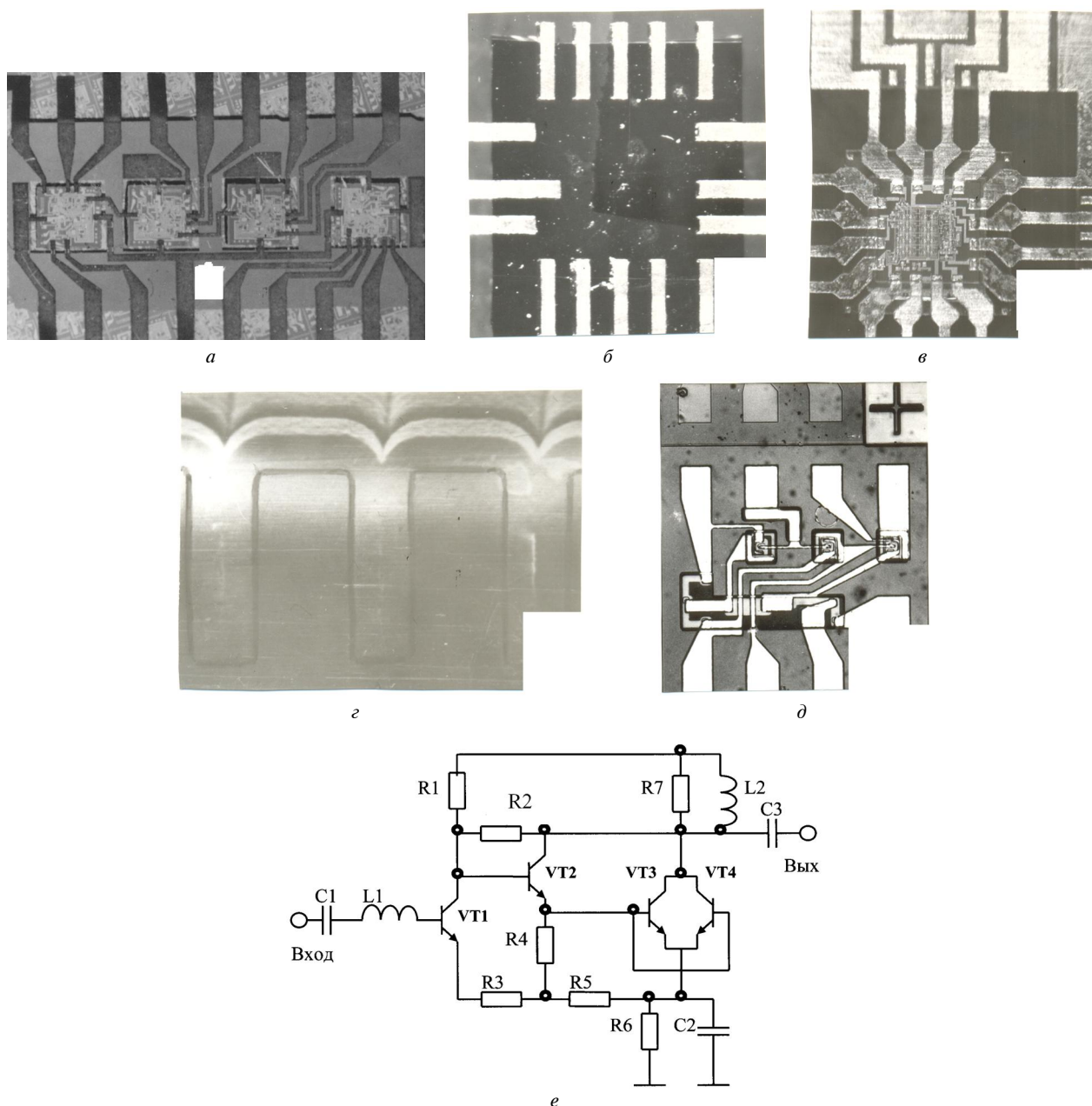


Рис. 1. Входящие пассивные элементы и электрическая схема МШУ:

a — МКМ с кристаллами ИС; *б* — кристалл с выступающими балочными выводами; *в* — кристалл ИС с выводами Al на полиимидной пленке; *г* — микрофотография сечения ВПЭ щелевого типа; *д* — микрофотография ВЧ-каскадного усилителя; *е* — электрическая схема разрабатываемого МШУ

методы самоформирования и селективного травления для получения отверстий, локальных углублений и глубоких щелей с вертикальными стенками при использовании двухстороннего проекционного совмещения и обработки пластин как на поверхности, так и в объеме [4, 6];

- процессы формирования многоуровневой системы межсоединений с высоким процентом выхода годных с применением межслойных диэлектриков с низкой диэлектрической постоянной на основе низкотемпературных пленок плазмохимического диоксида кремния $\text{SiO}_2\text{ПХ}$, осаждаемых путем двухкратного отдельного нанесения и двухкратной фотолитографии [4, 7];

- процессы формирования двухуровневой самосовмещенной металлизации и межслойного диэлектрика на основе полиимида при изготовлении сверхтонких ССТС с точно локализованными вертикальными пассивными областями базы, играющими также роль своеобразного токового зеркала [8];

- процессы формирования трехмерных ССТС, ФИУ, ВПЭ на основе узких и глубоких щелей (рис. 1, *з*), полученных анизотропным реактивно-ионным травлением (АРИТ) кремния. Создание в этих щелях тонких и ультратонких диэлектрических слоев, вертикальных p - n^+ -диффузионных переходов; селективное заполнение щелей поликремнием, различными металлами или диэлектриками, в том числе оксинитридом Si, легированного Ge [9];

- процессы формирования для элементов памяти и емкостей высококачественных ультратонких слоев диэлектрика с малыми токами утечки на различных металлических и полупроводящих слоях в кремнии (см. рис. 1, *з*) с применением импульсно-плазменного напыления с лазерным поджигом [10];

- процессы создания датчиков давления на основе биполярных сверхтонких ССТС с "пинч"-резисторами и ВПЭ, используя тонкие мембраны, полученные путем селективного химического или АРИТ вытравливания кремния [11];

- процессы формирования ССТС и ФИУ (линейный ВЧ-усилитель, рис. 1, *д* в [5]) с применением боковой диэлектрической изоляции на основе пиролитического $\text{SiO}_2\text{П}$ или плазмохимического диоксида кремния $\text{SiO}_2\text{ПХ}$ в сочетании с селективной эпитаксией кремния [12, 13].

Цель настоящей работы — оптимизация параметров монолитного МШУ (на основе биполярных ССТС на чистом Si и ВПЭ) для радиочастотных систем в корпусе, используя разработанные технологические процессы, математическое моделирование, схемотехнические программы и параметры нелинейной модели Гумеля—Пуна для ССТС. Поставленная цель была

достигнута при анализе работы МШУ для радиопередающих ИС с рабочей частотой 5,2 ГГц и оценке параметров ИС для различных вариантов работы с акцентом на оптимизацию коэффициента шума $K_{ш}$, коэффициента усиления K_y и тока потребления $I_{п}$. Исследованы зависимости выходной мощности $P_{вых}$ и K_y МШУ в функции от входной мощности $P_{вх}$ для различных дискретных значений F , а также абсолютной мощности интермодуляционных искажений 3-го порядка (ИМИ-3) на выходе МШУ (для дискретных значений $P_{вх}$) и S -параметров от F в диапазоне 1—10 ГГц.

На рис. 1, *е* дана электрическая принципиальная схема МШУ с внутренними контактными площадками для измерения на СВЧ-зондах. Схема была оптимизирована на рабочую частоту 5,2 ГГц на базе биполярных вертикально интегрированных ССТС с $f_T = 50$ ГГц, используя линии согласования между внутренними контактными площадками и дополнительные элементы согласования $C1, L1$ на входе, $L2, C3$ — на выходе. ВПЭ для МШУ формируются по технологиям тонких пленок, диффузионных и диэлектрических слоев в узких щелях и новых процессов техники МЭМС. Планарные резисторы создаются на основе пленок поликремния с поверхностным сопротивлением 100 и 1500 Ом/□, легированных ионами с различной дозой, и с контактной металлизацией на основе нижнего барьерного металла. Низкоомные резисторы с поверхностным сопротивлением 50 Ом/□ могут формироваться на основе пленок NiCr, TaN. Интегрированные спиральные индуктивности с высокой добротностью $Q \geq 30$ выполняются на основе утолщенного (5—10 мкм) слоя верхнего металла путем электрохимического осаждения Cu (или Au) в щелевых областях кремния (или полиимида) с подслоем барьерного металла и при последующем вытравливании кремния (полиимида). Емкости создаются как на основе планарных и щелевых структур с p - n^+ -вертикальными переходами база—эмиттер (удельная емкость 5—10 фФ/мкм²), так и на основе структур металл—диэлектрик—металл. В последнем варианте используется нижний барьерный слой металла с полированной поверхностью (W, Mo, TaN, TiN) — тонкий слой плазмохимического, магнетронного или импульсно-плазменного изолятора (SiN, AlN, Al₂O₃, ZrO₂) и верхний двойной слой металла (Mo—Au), (TiN—Au), (TaN—Cu).

Результаты расчетов параметров МШУ от частоты для трех вариантов I, II и III работы МШУ (рис. 2, *а—в*) с акцентом на оптимизацию его $K_{ш}$, K_y и $I_{п}$ с указанием значений номиналов (активных и реактивных) сопротивлений для этих вариантов работы схемы МШУ приведены в таблице.

Значения активных и реактивных сопротивлений элементов схемы для трех вариантов I, II и III работы МШУ

Обозначение параметра	Единицы измерения	Значение параметра вар. I	Значение параметра вар. II	Значение параметра вар. III
R1	Ом	303	204,3	668,4
R2	кОм	3,4	3,632	0,627
R3	кОм	5,076	4,408	3,626
R4	Ом	0	6,3	20
R5	Ом	128,5	116,4	229,7
R6	Ом	59	24,7	48,2
R7	Ом	∞	7430	348,4
L1	нГн	0,58	0,82	2,16
L2	нГн	17,7	9,6	1,24
C1	пФ	100	1044	1520
C2	пФ	100	1890	3000
C3	пФ	37	310	350

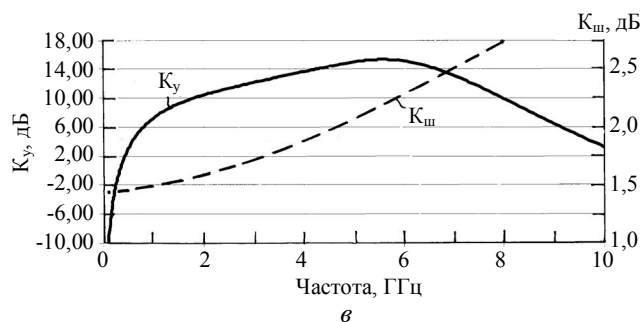
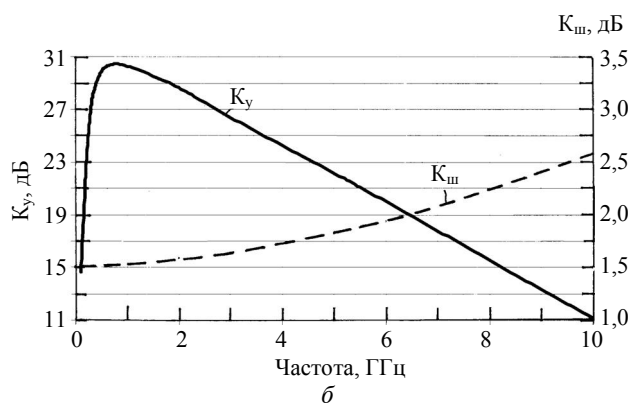
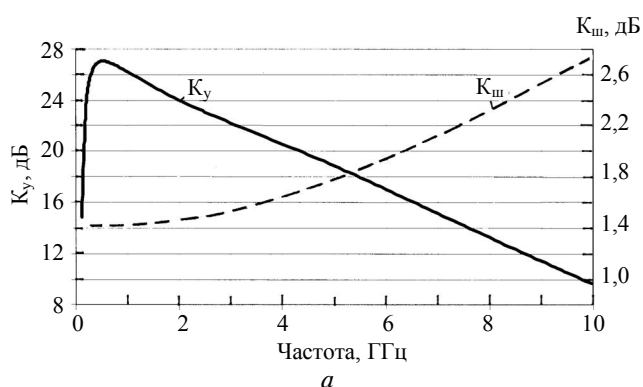


Рис. 2. Зависимости K_y и $K_{ш}$ в функции от частоты F : а — для варианта I работы МШУ; б — для варианта II работы МШУ; в — для варианта III работы МШУ

В варианте I работы МШУ наибольший весовой приоритет при математической оптимизации отнесен к характеристике коэффициента шума $K_{ш}$. Результаты оптимизации представлены на рис. 2, а. При напряжении питания $U_{п} = 3$ В расчетное значение тока потребления $I_{п} = 12,93$ мА, K_y уменьшается от 18,8 до 17 дБ в полосе частот от 5 до 6 ГГц, а $K_{ш}$ возрастает от 1,8 до 1,96 дБ в этой же полосе частот. В указанном диапазоне частот наблюдается практически линейный характер зависимости K_y в функции от частоты. Для реализации ВПЭ с указанными номиналами требуются существующие технологические процессы с обеспечением более жестких норм.

В варианте II работы МШУ наибольший весовой приоритет при математической оптимизации был отнесен к характеристике коэффициента усиления K_y . Результаты оптимизации представлены на рис. 2, б. При напряжении питания 3 В расчетное значение $I_{п} = 29,6$ мА, K_y уменьшается от 22 до 20 дБ в полосе частот от 5 до 6 ГГц, а $K_{ш}$ возрастает от 1,81 до 1,96 дБ в той же полосе частот. При этом значительно увеличивается ток потребления, по сравнению с предыдущим вариантом. Изменение $K_{ш}$ практически остается прежним.

Для варианта III результаты исследований работы МШУ даны на рис. 2, в. В этом случае наибольший весовой приоритет при математической оптимизации был отнесен к неравномерности коэффициента усиления K_y в полосе частот (5–6) ГГц. При напряжении питания 3 В получили: $I_{п} = 12,7$ мА, K_y изменяется мало от 15,35 до 15,45 дБ в полосе частот от 5 до 6 ГГц, но $K_{ш}$ возрастает от 2,1 до 2,3 дБ в той же полосе частот.

Анализ полученных результатов показал, что вычисления, направленные на улучшение неравномерности K_y МШУ, приводят к получению значений $K_{ш}$, превышающих величины, достигнутые в двух предшествующих оптимизациях. Кроме того, в двух последних вариантах необходимы емкости с высокими значениями номиналов, что существенно усложняет процесс реализации.

Таким образом, приемлемая схема МШУ получается для варианта I работы МШУ (см. рис. 2, а). В этом случае, кроме наименьшего значения $K_{ш}$, схема обладает относительно высоким значением K_y и наименьшим током потребления. Для реализации этого варианта требуется изготовление индуктивностей $L1 = 0,58$ нГн и $L2 = 17,7$ нГн (при $R7 = \infty$, $R4 = 0$) с высокой добротностью и емкостей $C1$, $C2 = 100$ пФ и $C3 = 37$ пФ с малыми токами утечки.

Результаты исследований работы МШУ в режимах, относящихся как к линейной, так и к нелинейной областям, приведены ниже.

На рис. 3 даны зависимости значений абсолютной мощности интермодуляционных искажений 3-го порядка (ИМИ-3) на выходе МШУ в функции частоты F для различных дискретных значений входной мощности $P_{вх}$ от -20 до -50 дБм.

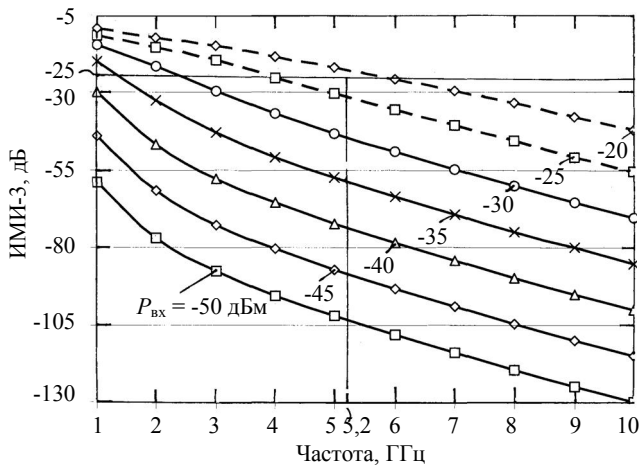


Рис. 3. Зависимости ИМИ-3 на выходе МШУ в функции от частоты F для дискретных значений входной мощности $P_{вх}$ от -20 до -50 дБм

Как видно из рис. 3, данное семейство кривых показывает, что наблюдаются оба режима работы МШУ. Принято считать, что если значение мощности спектральных составляющих ИМИ 3-го порядка на выходе усилителя не превышает значений, равных -25 дБ относительно фундаментальной частоты, то усилитель работает в линейной области. Эти зависимости позволяют оценить динамический диапазон $P_{вх}$ для достижения требуемого линейного режима работы усилителя. Общим параметром, являющимся границей раздела линейной и нелинейной областей, считается точка компрессии по уровню 1 дБ и обозначается $P_{1дБ}$. Из рис. 3 видно, что при $F = 5,2$ ГГц величина ИМИ-3 не превышает -25 дБ при значении $P_{вх} \approx -21$ дБм, что характеризует работу анализируемого МШУ в линейной области. Отметим, что этот усилитель не имеет в отличие от зарубежного аналога [2] резонансного выхода.

Дополнительную информацию (рис. 4, а, б) о характере переходной области между линейными и нелинейными режимами работы МШУ можно получить по результатам исследований зависимостей выходной мощности $P_{вых}$ и коэффициента усиления K_y МШУ в функции от входной мощности $P_{вх}$ для различных дискретных значений частоты F .

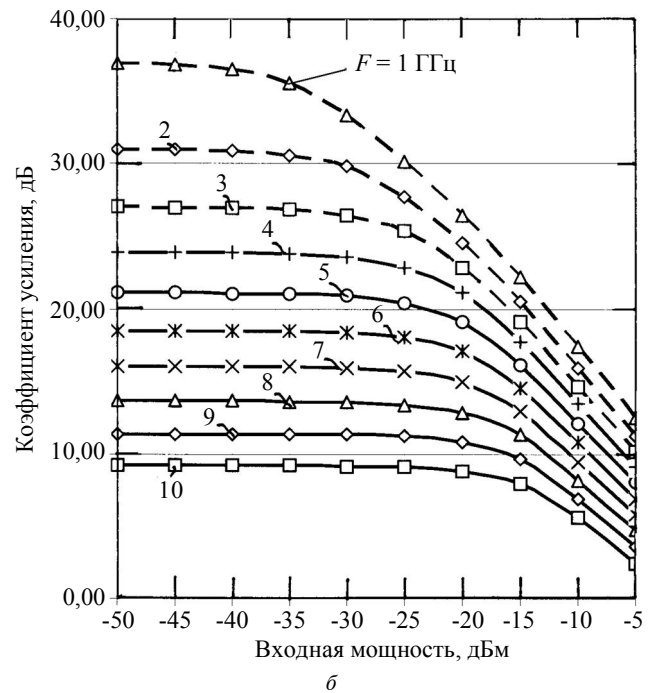
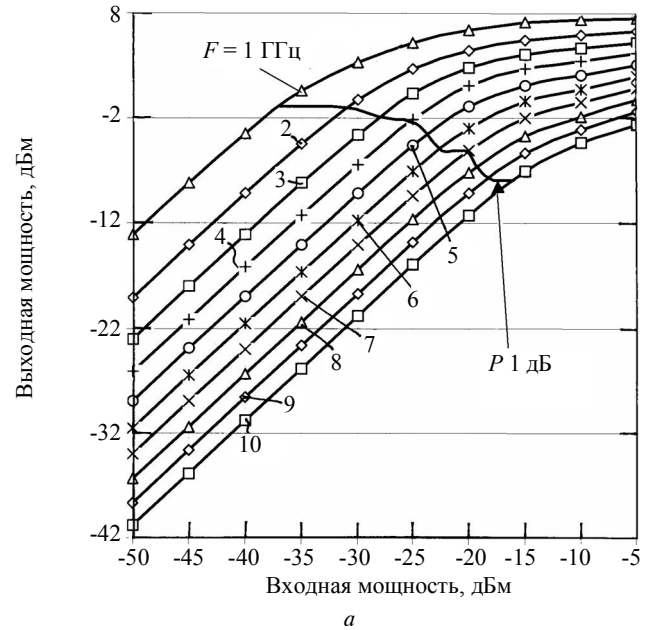


Рис. 4. Зависимости выходной мощности $P_{вых}$ (а) и коэффициента усиления K_y (б) МШУ в функции от $P_{вх}$ для дискретных значений частоты F

Как видно из рис. 4, а, представленные значения для $P_{вых}$ МШУ в функции от $P_{вх}$ для дискретных значений частот F от 1 до 10 ГГц охватывают широкий диапазон, при котором усилитель может работать как в линейном режиме, так и в нелинейном. Показана граница раздела линейной и нелинейной областей $P_{1дБ}$.

На рис. 4, б показаны зависимости коэффициента усиления K_y МШУ в функции от $P_{вх}$ для разных дискретных значений частот F , позволяющие вычислить величину $P_{1дБ}$ из условия изменения K_y на 1 дБ.

На рис. 5, а, б приведены рассчитанные действительные и мнимые значения S-параметров рассеяния исследуемого МШУ в функции от частоты.

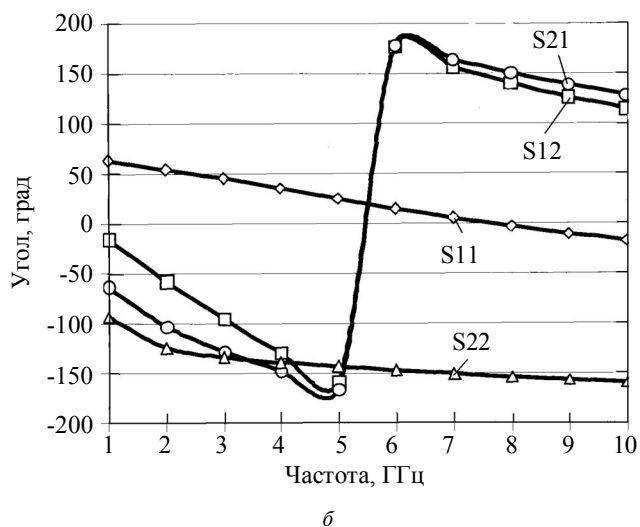
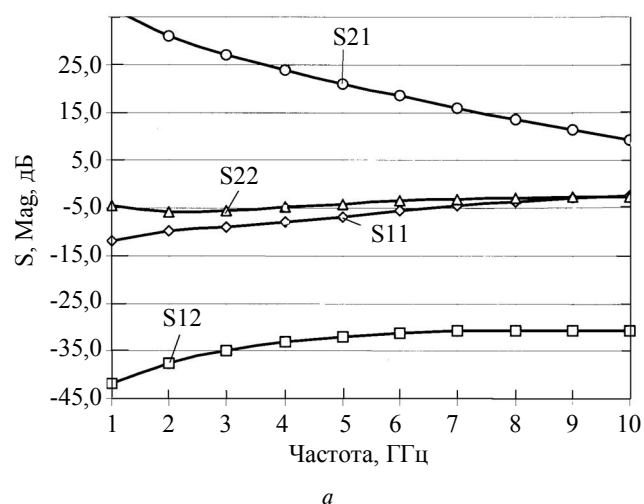


Рис. 5. Зависимости действительной части (а) и мнимой части (б) S-параметров МШУ в функции от частоты F

Из рис. 5, а видно, что для МШУ параметр S_{21} , характеризующий коэффициент усиления схемы, уменьшается от 38 до 8 дБ в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц. В частности, для рабочей частоты 5,2 ГГц модуль этого параметра составляет 20 дБ. Параметр S_{12} , определяющий развязку входа с выходом, составляет -32 дБ.

Из рис. 5, б видно, что значения параметров S_{11} и S_{22} монотонны, что говорит о возможности согласования импедансов МШУ с нагрузками по входу и выходу. Рис. 5, а, б подтверждают пригодность разработанной схемы для реализации монолитного МШУ с элементами МЭМС.

Заключение

Таким образом, оптимизированная схема МШУ является согласованным усилителем для применения в 50-омных трактах СВЧ. Она обладает приемлемыми значениями абсолютной мощности интермодуляционных искажений на выходе 3-го порядка (ИМИ-3) в частотном диапазоне 4–6 ГГц. Величина ИМИ-3 не превышает -25 дБ при $P_{вх} \approx -21$ дБм на частоте $F = 5,2$ ГГц, что характеризует работу этого МШУ в линейной области. При напряжении питания 3 В схема имеет: $I_{п} \approx 13$ мА, K_y падает от величины 18,8 до 17 дБ, при этом $K_{ш}$ возрастает с 1,8 до 1,96 дБ в полосе частот от 5 до 6 ГГц. Относительно малое значение $K_{ш} = 1,8$ дБ при рабочей частоте 5,2 ГГц (в сравнении с данными [2]) связано с включением транзисторов по схеме с общим эмиттером, согласованием входных и выходных трактов, обеспечением в ССТС малых эффективных значений сопротивлений r_b, r_e, r_k , высоких значений $h_{21э}, f_T$ и f_{max} , оптимизированных значений отношения длины к ширине эмиттера для каждого транзистора ИС и толщины составных областей боковой диэлектрической изоляции ультратонких переходов эмиттер–база [1]. Выбранная схема МШУ обладает хорошими совокупными показателями и может быть использована для дальнейшей отработки конструкции и технологии изготовления ССТС, ФИУ и ВПЭ для серийного производства радиочастотных ИС по комбинированной технологии на одном кристалле чистого Si как без применения сложных процессов легирования Ge или ионами Ge^+ , так и с их использованием для дальнейшего повышения рабочей частоты гигабитных систем обработки информации.

В части 3 статьи авторов под таким же названием будут даны конструктивно-топологические и структурно-технологические особенности изготовления ССТС на чистом кремнии с $f_T = 50$ ГГц и МШУ с рабочей частотой 5,2 ГГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернер В. Д., Луканов Н. М., Сауров А. Н., Метельков П. В. Оптимизация СВЧ-самосовмещенных транзисторных структур на чистом кремнии и малошумящего широкополосного усилителя для радио-передающих ИС с элементами МЭМС (часть 1)// Оборонный комплекс — научно-техническому профессу России. — М.: ФГУП "ВИМИ", 2011. № 1. С. 78—84.
2. Italia A., Ragonese E., Girlando G. A 5-GHz monolithic silicon bipolar down-converter with a 3.2-dB noise figure// IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium. (U.S.A., Pennsylvania, June (7—13), 2003). 2003. P. 453—456.
3. Lim K., Pinel S., Davis M. et al. RF-System-On-Package (SOP) for Wireless Communic// IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Mar. 2003. P. 88—99.
4. Луканов Н. М. Некоторые малоизвестные моменты из истории отдела 22 НИИМЭ// Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 1998. Вып. 1 (152). С. 49—57.
5. Луканова Н. Н., Луканов Н. М. Конструктивно-топологическое проектирование самосовмещающихся субмикронных сверхтонкослойных транзисторных структур с улучшенными параметрами: Сб. науч. тр. МИЭТ "Физика, технология и схемотехника СБИС". — М.: МИЭТ. Зеленоград, 1989. С. 80—93.
6. Сауров А. Н. Методы самоформирования в микроэлектронике// Известия вузов. Электроника. — М.: МИЭТ, 1997. № 5. С. 41—47.
7. Сулимин А. Д., Луканов Н. М., Осташкин Л. П., Неустроев С. А., Яковенко В. Г. Исследование некоторых свойств системы Si—SiO₂, получаемой плазмохимическим осаждением двуокиси кремния// Физика и химия обработки материалов. — М.: Академия наук СССР, 1975. № 2. С. 57—60.
8. Луканов Н. М. Способ изготовления транзисторных структур// А. с. 749287 СССР. Оpubл. 12.03.80 (приоритет 03.11.78).
9. Луканов Н. М. Способ изготовления самосовмещенных транзисторных структур с диэлектрической изоляцией// А. с. 1132734 СССР. Оpubл. 01.09.84 (приоритет 05.08.83).
10. Луканов Н. М., Савельев А. А., Суханов В. С. и др. Способ изготовления элемента памяти// А. с. 1515945 СССР. Оpubл. 15.06.89 (приоритет от 29.02.88).
11. Луканов Н. М., Лебедев В. В., Никулин В. Б., Сторожук Г. А. Полупроводниковый тензорезистор// А. с. 544310 СССР. Оpubл. 28.10.76 (приоритет от 01.06.73).
12. Луканов Н. М., Лебедев В. В., Любушкин Е. Н., Шварц К.-Г.М., Щербинин А. А. Способ изготовления активных элементов интегральных схем// А. с. 439863 СССР. Оpubл. 19.04.74 (приоритет от 13.07.70).
13. Вернер В. Д., Луканов Н. М., Меликов Р. Б. Способ изготовления структур интегральных схем с боковой диэлектрической изоляцией элементов// А. с. 1294231 СССР. Оpubл. 01.11.86 (приоритет от 22.07.85).

OPTIMIZATION OF SHF SELF-ALIGNED TRANSISTOR STRUCTURES BASED ON PURE SILICON AND OF LOW-NOISE WIDEBAND AMPLIFIER FOR RADIO FREQUENCY ICs WITH MEMS COMPONENTS

Part 2*

V. D. Verner, N. M. Lukanov, A. N. Saurov
SMC "Technological Center" of MIET (TU), Moscow, Russia

P. V. Metelkov
MIET (TU), Moscow, Russia

A monolithic SHF low-noise wideband amplifier (LNA) for radio frequency ICs with 5.2 GHz on pure silicon was designed, using bipolar self-aligned transistor structure (SSATS). The LNA exhibits a noise figure as low as 1.8 dB, the 18.2 dB power gain, an input compression point of minus 21 dBm and a current consumption only 13 mA at a supply power 3 V.

Keywords: low-noise wideband amplifier (LNA), pure silicon, radio frequency ICs with 5.2 GHz, SHF self-aligned transistor structure (SSATS), optimization of parameters.

* Part 1 — 2011. № 1. P. 78—84.

Вернер Виталий Дмитриевич, председатель научно-технического совета.

Тел. (499) 734-45-21. E-mail: tc@tcen.ru

Луканов Николай Михайлович, ведущий научный сотрудник.

Тел. (499) 720-87-79. E-mail: N. Loukanov@tcen.ru

Сауров Александр Николаевич, директор.

Тел. (499) 734-45-21. E-mail: tc@tcen.ru

Метельков Павел Вячеславович, ведущий инженер.

Тел. (499) 732-63-09. E-mail: pavel_metelkov@mail.ru

Статья поступила в редакцию в декабре 2010 г.