

УДК 621.382:029/64

К. т. н. В. П. ПОПОВ, к. т. н. В. П. СИДОРЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ

E-mail: popov_v@imd.org.ua

МАЛОШУМЯЩИЕ УСИЛИТЕЛИ НА ОСНОВЕ SiGe-HBT ДЛЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены принципы построения интегральных схем малошумящих усилителей (МШУ) на основе кремний-германиевых гетеропереходных биполярных транзисторов (SiGe HBT) для сверхширокополосных (СШП) систем. СШП-системы диапазона 0,5–10,6 ГГц применяются в области связи, радаров медицинского назначения и системах обеспечения безопасности. Предложенные СШП МШУ выполнены по безындуктивным электрическим схемам или схемам с минимальным числом индуктивностей. Проведено исследование и расчеты двух вариантов СШП МШУ. Диапазон рабочих частот — от 0,5 до 11 ГГц.

Ключевые слова: сверхширокополосные (СШП) системы, СШП-радары медицинского назначения, малошумящие усилители, кремний-германиевый гетеропереходный биполярный транзистор (SiGe-HBT), резистивные обратные связи.

Сверхширокополосные (СШП) системы активно развиваются в течение последних 10–15 лет из-за их уникальных возможностей по увеличению объема передаваемой и принимаемой информации. В соответствии с определением Федеральной комиссии связи США (FCC) [1–4] к СШП отнесены системы (сигналы), обладающие одним из следующих свойств:

1) ширина спектра излучаемых сигналов $f_b - f_n$ не менее 500 МГц (f_b и f_n — верхняя и нижняя граничные частоты спектра сигнала на уровне –10 дБ от максимального значения);

2) отношение ширины спектра $f_b - f_n$ (по уровню –10 дБ) к средней частоте спектра $(f_b + f_n)/2$ не менее 0,2.

Относительная ширина спектра $B_f = 2(f_b - f_n)/(f_b + f_n)$ для различных сигналов (рис. 1) имеет следующие значения:

узкополосные (УП)	$B_f < 0,01$;
широкополосные (ШП)	$0,01 < B_f < 0,2$;
СШП	$B_f > 0,2$.

Большинство радиотехнических систем в настоящее время используют УП- и ШП-сигналы, однако область применения СШП-сигналов и систем расширяется. Основное применение СШП-сигналов находят в системах высокоскоростной и низкоскоростной связи (стандарты IEEE-Std 802.15.3a, 802.15.4a) [4] и в радиолокационной технике (радары) медицинского применения [5–7] и обеспечения безопасности — сканирование багажа, обнаружение людей под завалами и препятствиями и др. [3, 8]. В соответствии со стандартами FCC уровни излучения СШП-сигналов должны быть ограничены ниже порога шумов УП- и ШП-сигналов (–41,3 дБм/МГц или

75 нВт/МГц), как показано на рис. 1. Это позволяет избежать или уменьшить нежелательную интерференцию с сигналами обычных УП- и ШП-систем, а также делает возможным безлицензионное применение СШП-систем наряду с обычными системами в диапазоне частот 3,1–10,6 ГГц.

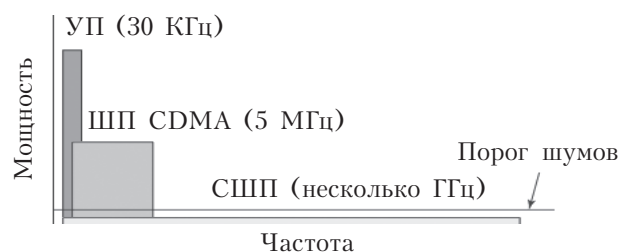


Рис. 1. Спектры узкополосного (УП), широкополосного, сверхширокополосного сигналов

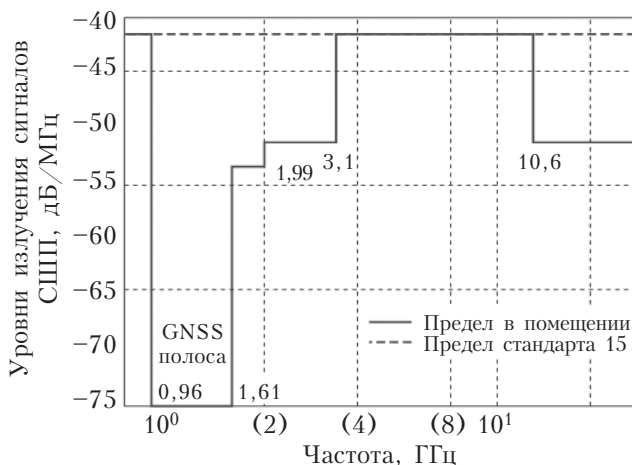


Рис. 2. Допустимые уровни излучения сигналов СШП-систем для помещений

Стандарты FCC регламентируют уровни излучения СШП-сигналов для разных применений. Например, на **рис. 2** показана маска предельных уровней излучения СШП-систем связи для помещений (indoor). Минимальные уровни излучения СШП-сигналов допускаются в диапазоне частот 0,96–1,61 ГГц, где действуют глобальные навигационные спутниковые системы GNSS (GLONASS/GPS/GALILEO/COMPASS).

Маски предельных уровней излучения СШП-сигналов имеются и для других систем — для работы вне помещений (outdoor), для радаров различного применения (медицина, наблюдение за объектами за стенами, завалами), для автомобильных радаров диапазона 22–29 ГГц.

Диапазон применения СШП-систем в коммерческих и военных целях чрезвычайно многообразен. Большие их преимущества во многих применениях по сравнению с обычными УП- и ШП-системами дают основания предположить, что они имеют большую перспективу развития.

Структурные схемы аналоговой части СШП-приемопередатчиков значительно более просты, чем обычные УП- и ШП-системы (**рис. 3**).

Длительность и форма СШП-импульсов, формируемых передатчиком, определяют форму и ширину спектра сигнала. Длительность импульсов порядка 1–2 нс с огибающей, близкой к гауссовой кривой, заполнение импульса синусоидальными колебаниями или разнополярными видеоимпульсами, а также вид модуляции зависят от типа СШП-системы. В приемнике после фильтрации, усиления малошумящим усилителем (**МШУ**) и корреляционной обработки выходные данные поступают на цифровой процессор. Реализация СШП-приемопередатчика (трансивера) или отдельных его элементов в виде интегральной микросхемы может быть осуществлена на основе радиочастотной (**РЧ**) КМОП- или БиКМОП-технологии [9]. Пример реализации СШП МШУ на основе 0,18 мкм РЧ КМОП-технологии приведен в [10]. Диапазон рабочих частот данного МШУ равен 1,0–11,6 ГГц, максимальный коэффициент усиления 13 дБ, коэффициент шума 3,6–4,8 дБ. МШУ содержит две индуктивности 3,6 и 1,84 нГн.

Многие работы посвящены решению задачи разработки СШП МШУ на основе SiGe-HBT

[11–15], т. к. они имеют более низкий коэффициент шума и минимальную площадь кристалла МШУ. В настоящей статье представлены результаты разработки двух вариантов СШП МШУ с резистивными обратными связями диапазона 0,5–11 ГГц на основе технологии кремний-германиевых гетеропереходных биполярных транзисторов (SiGe-HBT), которая является составной частью современных БиКМОП-технологий.

СШП МШУ с резистивными обратными связями

При разработке СШП МШУ ставятся задачи получения:

- 1) полосы пропускания 5–10 ГГц в диапазоне 0,5–11 ГГц в зависимости от основного применения МШУ;
- 2) коэффициента усиления 12–20 дБ;
- 3) минимального коэффициента шума;
- 4) согласования входного и выходного импедансов в рабочей полосе частот, максимально близкого к 50 Ом (минимальные значения параметров S_{11} , S_{22} матрицы рассеяния);
- 5) минимальной потребляемой мощности;
- 6) минимальной площади кристалла микросхемы.

Используются также другие критерии качества МШУ, например параметры $IP3$ и P_{-1dB} , характеризующие нелинейные искажения.

Минимальная площадь кристалла при использовании современных технологий обеспечивается выбором безындуктивных электрических схем или схем с минимальным количеством индуктивностей, поскольку спиральные индуктивности занимают основную площадь на кристалле и требуют экранировки от подложки. Это относится как к SiGe-HBT, так и к РЧ КМОП [10] МШУ.

В СШП МШУ1, МШУ2 на основе SiGe-HBT, рассмотренных в данной работе, необходимая полоса пропускания достигается применением резистивных отрицательных обратных связей (**ООС**) с частотно-корректирующими емкостными или индуктивными элементами.

При проектировании МШУ использовалась технология SiGe-HBT уровня 0,5 мкм (ширина эмиттера) с граничной частотой транзисторов $f_T=47$ ГГц.

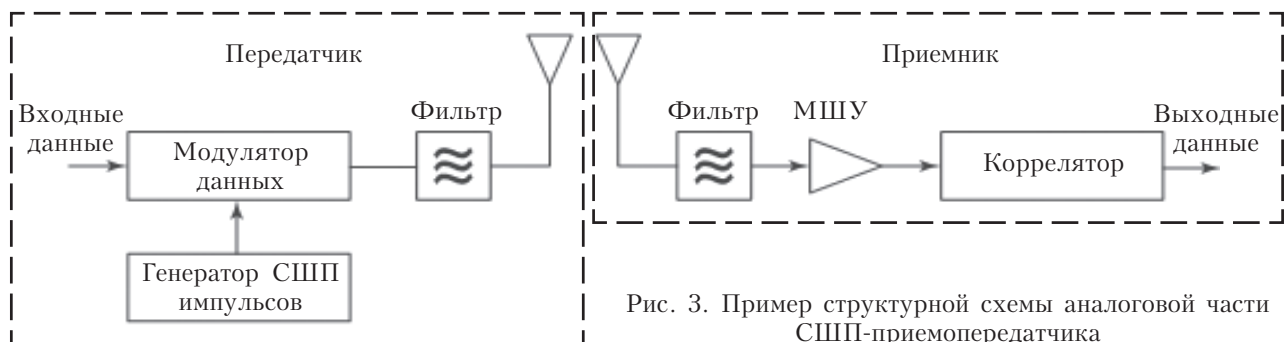


Рис. 3. Пример структурной схемы аналоговой части СШП-приемопередатчика

Расчет параметров проводился с использованием SPICE-модели Гуммеля—Пуна (SPICE Gummel—Poon, SPG) для SiGe-HBT. Данная модель характеризуется системой из 60 параметров, но нами использовались 27, и это позволяло достаточно точно моделировать характеристики постоянного тока и частотные характеристики МШУ.

МШУ1 диапазона частот 0,5—5 ГГц

Схема СШП МШУ диапазона частот 0,5—5 ГГц, обозначенного МШУ1, приведена на **рис. 4**. Транзисторы Q1, Q2 образуют каскодный усилитель с резистивно-индуктивной нагрузкой (R3, L1) и цепями последовательной (R4, C3) и параллельной (R5, R6, Q3) обратной связи. Индуктивность L1 и конденсатор C3 выполняют функции частотной коррекции, расширяя полосу пропускания в области высоких частот. Транзистор Q3 в диодном режиме и резистор R6 позволяют выбрать оптимальные параметры резистора R5.

Режим работы каскодного усилителя задается цепями ООС (Q2) и делителя напряжения R1, R2 (Q1). При напряжении питания $V_{cc}=3,3$ В ток транзистора Q3 и резистора R5 делится на базовый ток Q2 (57,8 мкА) и ток резистора R6 (188 мкА), который уменьшает сопротивление диода Q3 по переменному току и стабилизирует режим каскодного усилителя и параметры МШУ1 при изменении напряжения питания V_{cc} . Диод Q3 выполняет также сдвиг уровня постоянного напряжения на 0,843 В между стоком транзистора Q1 и резистором R5.

Транзистор Q4 и резистор R7 образуют эмиттерный повторитель, режим работы которого выбран таким образом, чтобы обеспечить широкополосное согласование с нагрузкой 50 Ом.

Для уменьшения базового сопротивления транзисторов и оптимизации топологии в СШП МШУ1 (и в МШУ2 тоже) принята секционная кон-

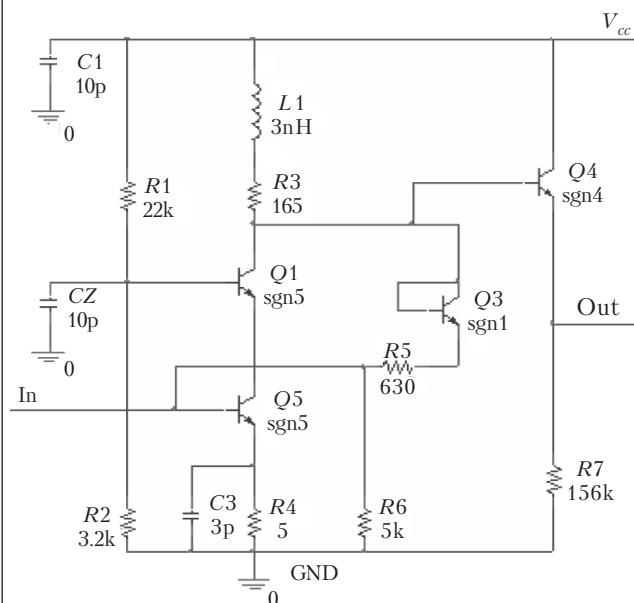


Рис. 4. Схема МШУ1 с резистивными ООС

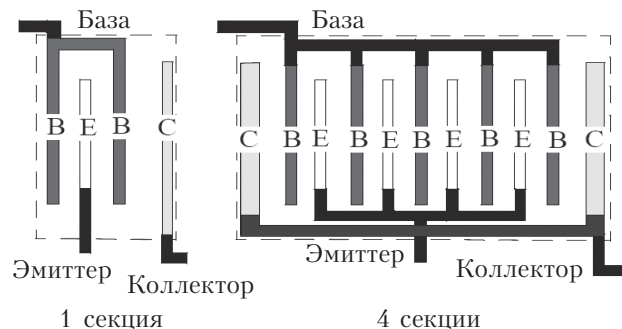


Рис. 5. Структура одно- и четырехсекционного SiGe-HBT

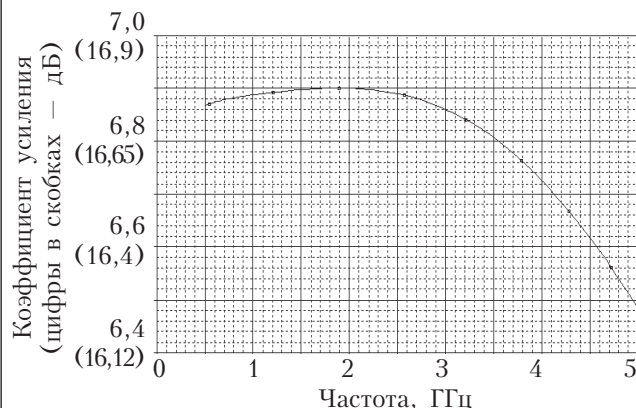


Рис. 6. АЧХ коэффициента усиления МШУ1 с неравномерностью 0,54 дБ

рукция с симметричным расположением областей базы относительно областей эмиттеров. На **рис. 5** приведено изображение структуры односекционного и четырехсекционного транзисторов. Размер эмиттера одной секции равен $0,5 \times 10$ мкм². На схеме **рис. 4** указано количество секций каждого из транзисторов (sgn – SiGe, n-эмиттер).

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коэффициента усиления (КУ) МШУ1 приведена на **рис. 6**. Неравномерность АЧХ в указанном диапазоне составляет 0,54 дБ с максимальным КУ 16,78 дБ на частоте 2 ГГц.

Входной импеданс (входное сопротивление) МШУ1 зависит от КУ, входного тока транзистора Q2 и сопротивления R5 в цепи обратной связи. АЧХ входного тока при входном напряжении 10 мВ и входного сопротивления МШУ1 показаны на **рис. 7**. Оптимальное согласование с сопротивлением источника сигнала 50 Ом получается на частоте 1,8 ГГц. Согласование по величинам параметров S_{11} , S_{22} матрицы рассеяния, которые через параметры сопротивлений источника сигнала и нагрузки R_S , R_L и входного, выходного сопротивлений Z_{IN} , Z_{OUT} выражаются как

$$S_{11} = \frac{Z_{IN} - R_S}{Z_{IN} + R_S}, \quad (1)$$

$$S_{22} = \frac{Z_{OUT} - R_L}{Z_{OUT} + R_L}. \quad (2)$$

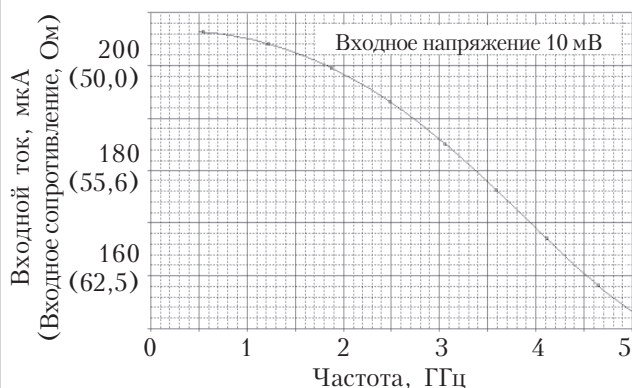


Рис. 7. АЧХ входного тока (входного сопротивления) МШУ1

Максимальные значения $S_{11}(\text{дБ}) = 20 \lg S_{11}$ МШУ1 на частотах 0,5 и 5 ГГц составят $-36,7$ и $-17,56$ дБ, что вполне приемлемо.

Выходное сопротивление R_{OUT} МШУ1 определяется режимом работы транзистора $Q4$ — током эмиттера и проводимостью $g_m = \Phi_T / I_E$ (Φ_T — температурный потенциал, I_E — ток эмиттера), которые прямо зависят от сопротивления нагрузки эмиттера $R7$. Расчет частотной характеристики R_{OUT} проводился по формуле

$$R_{OUT} = \frac{V_{OUT}(R_{L2}) - V_{OUT}(R_{L1})}{I_{OUT}(R_{L1}) - I_{OUT}(R_{L2})} = \frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta I_{OUT}} \quad (3)$$

с предварительным расчетом АЧХ выходных напряжений и токов V_{OUT} , I_{OUT} при двух значениях сопротивления нагрузки R_L , например 50 и 100 Ом.

Результаты расчетов R_{OUT} и $S_{22}(\text{дБ}) = 20 \lg S_{22}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры МШУ1

Частота, f , ГГц	R_{OUT} , Ом	S_{22} , дБ
1,0	48,7	-37,6
1,5	50,4	-48,2
2,0	52,81	-31,3
3,0	60,07	-20,3
4,0	76,64	-13,5
5,0	83	-12,1

Основные компоненты, влияющие на коэффициент шума МШУ1 входят в формулу

$$NF = 1 + \frac{(r_{b2} + 1/g_{m2} + R_4)}{R_s} + 2g_{m2}R_s \left(\frac{f}{f_T} \right)^2 + \frac{g_{m2}}{2\beta_0 R_s} (R_s + r_{b2})^2, \quad (4)$$

где r_{b2} , g_{m2} , β_0 — базовое сопротивление, проводимость и коэффициент усиления тока транзистора $Q2$ соответственно.

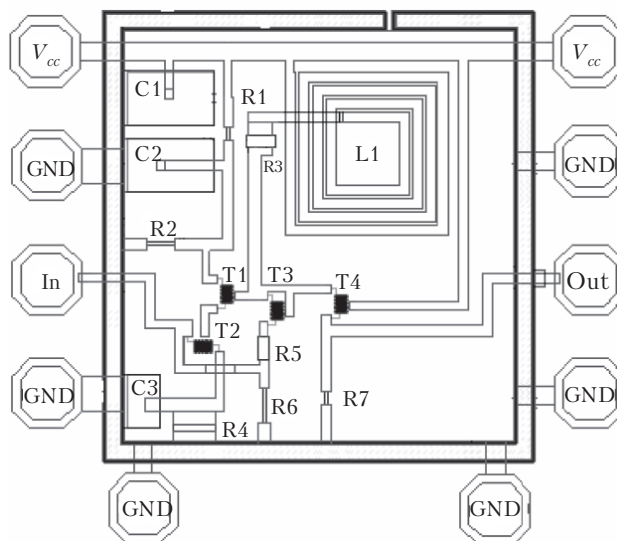


Рис. 8. Топологическая схема кристалла МШУ1

Коэффициент шума МШУ1 в частотном диапазоне 0,5–5 ГГц не превышает 2 дБ.

Во многих странах, в том числе и в Европе, СШП-диапазон разбит на два поддиапазона: 3,1–4,8 и 6–10,6 ГГц, т. к. полоса 5,2–5,8 ГГц предназначена для работы систем связи стандартов IEEE 802.11a/п и других. МШУ1 может быть использован в СШП-системах диапазона 0,5–5 ГГц, а также в GNSS диапазона 1,1–1,6 ГГц и системах связи диапазона 2–3 ГГц.

На рис. 8 показана топологическая схема размещения элементов МШУ1 на кристалле на основе технологии SiGe2-RF (Atmel, Германия), с минимальной шириной эмиттера 0,5 мкм [16]. Максимальную площадь занимает корректирующая индуктивность $L1$ (третий слой металла) с внешними размерами 196×196 мкм². В конденсаторах с удельной емкостью 1,1 фФ/мкм² используется структура «металл — диэлектрик — металл» (МДМ) на основе слоев металла 2 и 2а. В качестве резисторов использован p^+ -легированный поликремний с поверхностным сопротивлением 150 Ом/□. Площадь активной части кристалла без контактных площадок равна $0,518 \times 0,536$ мм².

МШУ диапазона частот 0,5–11 ГГц

Схема СШП МШУ диапазона 0,5–11 ГГц, обозначенного МШУ2, выполнена на двух каскадах усиления и приведена на рис. 9. Данная схема подобна варианту 2 в [14] за исключением того, что в ней отсутствует индуктивность между каскадами. Первый каскад на транзисторах $Q1$ с общим эмиттером и $Q2$ с общим коллектором содержит резистивные цепи ООС — параллельную на резисторе $R3$ и последовательную с резистором $R2$. Второй каскад на транзисторе $Q4$ с общим эмиттером также содержит две цепи ООС — параллельную с элементами $Q3$, $R5$ и последовательную ($R6$). Конденсаторы $C2$, $C3$ выполняют функцию частотной кор-

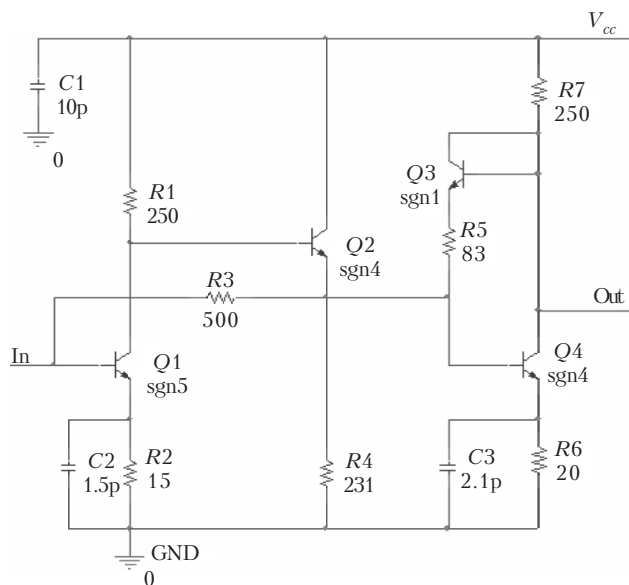


Рис. 9. Схема МШУ2 с резистивными ООС диапазона 0,5–11 ГГц

рекции. Схема МШУ2 не содержит переходных конденсаторов и может быть использована от самых низких частот. Транзистор Q3 в диодном включении смещает уровень постоянного напряжения в цепи ООС на 0,866 В. При токе диода Q3 0,54 мА его сопротивление на переменном токе $R_e = 1/g_m$ равно 48,5 Ом и оказывает влияние на параметры цепи ООС, коэффициент усиления и выходное сопротивление МШУ2.

Отсутствие индуктивностей и минимальное количество конденсаторов позволяет получить минимальную площадь кристалла.

АЧХ коэффициента усиления МШУ2 приведена на рис. 10. Неравномерность АЧХ в этом диапазоне не превышает 2,5 дБ с максимальным КУ 19,86 дБ на частоте 5 ГГц.

Согласование входного импеданса с сопротивлением источника сигнала $R_s = 50$ Ом зависит от КУ первого каскада, входного тока транзистора Q1 и сопротивления R3 в цепи ООС. АЧХ входного тока при входном напряжении 10 мВ и входного сопротивления МШУ2 показаны на

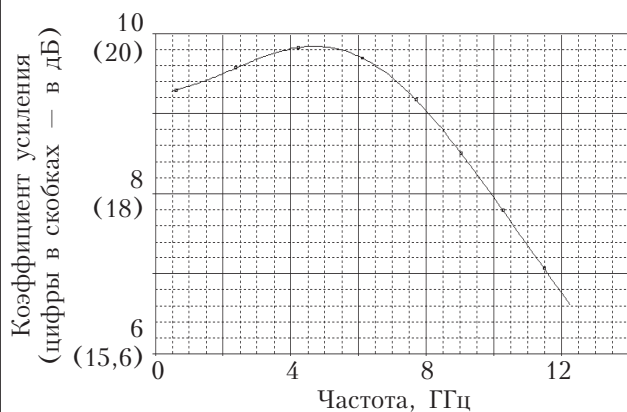


Рис. 10. АЧХ МШУ2 с неравномерностью 2,5 дБ

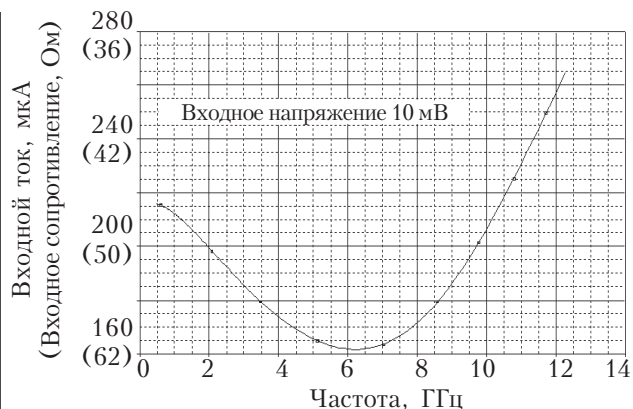


Рис. 11. АЧХ входного тока (входного сопротивления) МШУ2

рис. 11. Оптимальное согласование с сопротивлением источника сигнала 50 Ом получается на частотах 2 и 9,7 ГГц. Максимальная величина S_{11} (дБ) $= 20 \lg S_{11}$ МШУ2 на частоте 6,3 ГГц составляет -19,5 дБ, т. е. согласование по входу обеспечивается во всем диапазоне частот.

В отличие от предыдущей схемы выходное сопротивление R_{OUT} МШУ2 определяется параметрами цепи ООС (Q3, R5) и сопротивлением нагрузки R7 выходного каскада. Эти параметры были оптимизированы с целью получения $R_{OUT} = 50$ Ом на частоте 5 ГГц.

Результаты расчетов R_{OUT} и S_{22} (дБ) $= 20 \lg S_{22}$ МШУ2 по методике, приведенной для МШУ1, даны в табл. 2.

Таблица 2

Частота, f , ГГц	R_{OUT} , Ом	S_{22} , дБ
0,5	76	-13,7
2,0	70,12	-15,52
3,0	63,63	-18,42
5,0	50,23	-52,78
7,0	41,6	-20,75
9,0	38,35	-17,6
11,0	38,33	-17,6

Так же как в каскодном усилителе МШУ1, коэффициент шума МШУ2 зависит в основном от параметров входного транзистора Q1: базового сопротивления r_{b1} , проводимости g_{m2} , коэффициента усиления тока β_0 . Существует оптимальное значение тока эмиттера (коллектора) SiGe-HBT в пределах 5–9 мА, соответствующее минимальному коэффициенту шума. В данной схеме эмиттерный ток Q1 равен 5,7 мА. Коэффициент шума МШУ2 следует ожидать в пределах 2,8–3,2 дБ в полосе частот.

Эмиттерные токи транзисторов Q2, Q4 равны, соответственно, 4,3 и 5,1 мА, а общий ток потребления равен 15,1 мА при напряжении питания $V_{cc} = 3,3$ В.

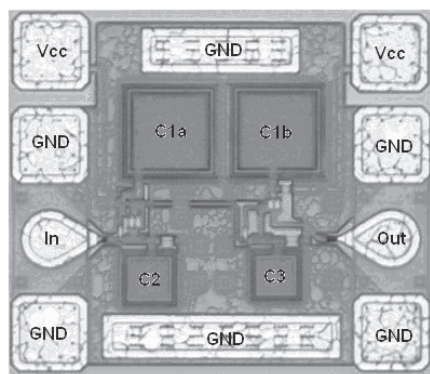


Рис. 12. Топологическая схема кристалла МШУ2

Топологическая схема кристалла МШУ2 представлена на рис. 12 [14].

Топологическая реализация МШУ2, так же как и МШУ1, возможна, например, на основе технологии SiGe₂-RF с минимальной шириной эмиттера 0,5 мкм. Отсутствие индуктивностей существенно уменьшает размер кристалла до 0,44×0,38 мм².

Таким образом, предложенные МШУ на основе SiGe HBT для СШП-систем имеют следующие характеристики: полоса пропускания МШУ1 0,5–5 ГГц, МШУ2 0,5–11 ГГц, коэффициент усиления, соответственно, 16,78 и 19,86 дБ. Реализация этих МШУ в виде интегральных схем возможна на основе SiGe HBT-технологий уровней 0,50, 0,25 или 0,13 мкм методом фаундри [9]. Фаундри-услуги предоставляют многие предприятия (фабрики кристаллов) Европы и Азии, например, фирмы Atmel и INP, Германия [16, 17].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. FCC 02-48, ET Docket 98-153, First Report and Order, April 2002.
2. FCC 04-285, ET Docket 98-153, Second Report and Order and Second Memorandum Opinion and Order, December 2004.
3. Nekoogar F. Ultra-wideband communications: fundamentals and application // Pretic Hall, 2005.
4. Fernandes J. R., Wentzloff D. Recent advances in IR-UWB transceivers: an overview // ISCAS'10. — 2010. — P. 3284–3287.
5. Immoreev I., Teh-Ho Tao. UWB Radar for Patient Monitoring // IEEE A&E System Magazine. — 2008. — November — P. 11–18.
6. <http://uwbgroup.org/rus/>.
7. Aardal O., Hammerstad J. Medical radar literature overview, FFI-rapport. — 2010/00958. — P. 7–28.
8. Иммерев И. Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // Радиотехника и электроника. — 2009. — Т. 54. — № 1. — С. 5–31. [Immoreev I. Ya. Radiotekhnika i elektronika. 2009. Vol. 54. N 1. P. 5]
9. Попов В. П., Вербицкий В. Г., Сидоренко В. П., Евтух А. А. Современные кремниевые технологии создания СВЧ интегральных микросхем диапазона 1–100 ГГц // Техника и приборы СВЧ. — 2009. — № 2. — С. 20–25. [Popov V. P., Verbitskii V. G., Sidorenko V. P., Evtuh A. A. Tekhnika i Pribory SVCh. 2009. N 2. P. 20]
10. Montana J.M. J. An Ultra-Wide-Band 1.0-11.6GHz LNA in 0.18μm CMOS. — www.weble.ups.es/~jornet/JmJornet-UWB LNA
11. Lee J., Cressler J. D. Analysis and design of an ultra-wideband low-noise amplifier using resistive feedback in SiGe

HBT technology // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. — 2006. — Vol. 54, N 3. — P. 1262–1268.

12. Desheng Ma, Dai F. F., Jaeger R. C., Irvin J. D. An X- and Ku-Band Wideband Recursive Receiver MMIC with Gain-Reuse // IEEE J. of Solid-State Circuits. — 2011. — Vol. 46, N 3. — P. 562–571.

13. Diddi V., Srivastava K. V., Biswas A. A 6 mW Low Noise Amplifier for 3.1-10.6 GHz UWB Application. — www.ncc.org.in/download.php?f=NCC2011/1569358369.pdf.

14. Dederer J., Trasser A., Schumacher H. Compact SiGe HBT low noise amplifiers for 3.1-10.6 GHz ultra-wideband applications. — http://vts-ulm.de/docs/2009/6747/vts_6747_9299.pdf.

15. Howard D. C., Poh J., Mukerjee T. S., Cressler J. D. A 3-20 GHz SiGe HBT ultra-wideband LNA with gain and return loss control for multiband wireless applications — <http://www.jazzsemi.com/publications/>.

16. Schueppen A., Berntgen J., Maier P. et al. An 80 GHz SiGe production technology // III-V Review. — 2001. — Vol. 14. — August. — P. 42–46.

17. <http://www.ihp-ffo.de/14.98.html>

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.02 2012 г.

Popov V.P., Sidorenko V.P. **SiGe HBT low noise amplifiers for ultra-wideband systems.**

Key words: ultra-wideband systems (UWB), medical UWB radars, low-noise amplifiers, silicon-germanium heterojunction bipolar transistor (SiGe HBT), resistive feedback.

This paper presents the principles of design of integrated circuits low-noise amplifiers (LNA) based on silicon-germanium heterojunction bipolar transistors (SiGe HBT) for ultra-wideband (UWB) systems. UWB systems range 0,5–10,6 GHz are used in communications, radars of medical applications and safety systems. The proposed UWB LNA implemented by inductorless or minimum number of inductors schemes. In this paper researched and designed two variants of UWB LNA 0,5–11 GHz frequency range.

Ukraine, Kiev, Institute of Microdevices of NASU.

Попов В.П., Сидоренко В.П., **Малешумливі підсилювачі на основі SiGe HBT для надширокопосмугових систем.**

Ключові слова: надширокопосмугові (НШС) системи, НШС-радары медичного призначення, малешумливі підсилювачі, кремній-германієвий гетероперехідний біполярний транзистор, резистивні зворотні зв'язки.

Розглянуто принципи побудови інтегральних схем малешумливих підсилювачів (МШП) на основі кремній-германієвих гетероперехідних біполярних транзисторів (SiGe HBT) для надширокопосмугових (НШС) систем. НШС-системи діапазону 0,5–10,6 ГГц застосовуються в галузі зв'язку, радарх медичного призначення та системах забезпечення безпеки. Запропоновані НШС МШП виконані за безіндуктивними електричними схемами або схемами з мінімальним числом індуктивностей. Проведено дослідження і розрахунки двох варіантів НШС МШП. Діапазон робочих частот — від 0,5 ГГц до 11 ГГц.

Україна, м. Київ, НДІ мікроприладів НТК «ІМК» НАНУ.