

С.А. Тихонов, А.В. Маеричев, А.А. Артеменко, А.А. Мальцев
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Каскадный малошумящий усилитель диапазона 60 ГГц, выполненный по технологии КМОП 90 нм

В статье представлены результаты разработки микросхемы блока малошумящего усилителя (МШУ) по технологии КМОП 90 нм, предназначенного для диапазона частот 57-64 ГГц. Разработка проведена в САПР компании Cadence с использованием технологической библиотеки элементов интегральных микросхем фабрики TSMC (Тайвань). Разработанный блок МШУ может быть использован при проектировании приемников современных систем радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн. Коэффициент усиления разработанного блока МШУ составляет 18.1 дБ, коэффициент шума - 5.2 дБ, точка компрессии на 1 дБ (по входу) - -17.8 дБм. Мощность, потребляемая микросхемой, составляет 12.5 мВт, площадь микросхемы без учета контактных площадок - 0.45 мм².

Ключевые слова: малошумящий усилитель, КМОП, миллиметровый диапазон длин волн, линия передачи

В связи с растущей потребностью в передаче все больших объемов информации широкое распространение получают системы радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн. За счет использования широкой полосы рабочих частот такие системы обеспечивают скорость передачи данных до нескольких гигабит в секунду.

Для реализации современных систем радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн необходима разработка приемопередатчиков, выполненных в виде интегральных микросхем, что обеспечивает миниатюрность пользовательских устройств. При этом выбор технологии для реализации микросхем обуславливается в основном соображениями низкой себестоимости массового производства при обеспечении заданных технических характеристик. В связи с этим в качестве основного кандидата для создания современных СВЧ приемопередатчиков многими исследователями рассматривается стандартная КМОП технология, широко распространенная и доступная в области микроэлектроники.

В данной работе решается задача проектирования двухкаскадного малошумящего усилителя в диапазоне частот 60 ГГц, являющегося одним из основных блоков приемников миллиметровых систем связи. Малошумящий усилитель, как первый элемент радиотракта приемника, в значительной степени определяет чувствительность и коэффициент шума приемника в целом. Разработка и моделирование блока МШУ по технологии КМОП 90 нм проводились в системе автоматизированного проектирования (САПР) Cadence IC с использованием технологической библиотеки элементов интегральных схем фабрики TSMC.

Основными характеристиками МШУ являются коэффициент усиления, коэффициент шума, и полоса рабочих частот. В результате анализа имеющихся работ [1]-[4] по исследованию малошумящих усилителей были сформулированы требования на характеристики разрабатываемого усилителя. Коэффициент усиления блока МШУ должен быть более 15 дБ, коэффициент шума не должен превышать 5.5 дБ; а полоса рабочих частот 57-64 ГГц. Кроме того, вход и выход устройства должны быть согласованы в требуемом частотном диапазоне к импедансу в 50 Ом.

В данной работе для реализации блока МШУ была выбрана каскодная схема, состоящая из двух последовательных каскадов, с использованием индуктивности в цепи обратной связи транзистора первого каскада. Схема разработанного блока МШУ представлена на Рис. 1. Основным достоинством такой архитектуры является высокий коэффициент усиления, а также возможность минимизации коэффициента шума для заданного входного импеданса. Дополнительным преимуществом каскодной архитектуры является высокая изоляция между входом и выходом устройства, что позволило независимо разработать схемы входного и выходного согласования.

Основной функцией первого каскада МШУ является минимизация коэффициента шума и согласование по входному импедансу в рабочей полосе частот. Известно [2], что ток исток-сток, при котором достигается наименьший коэффициент шума и максимальная граничная частота полевого КМОП транзистора равен $0.15 - 0.2$ мА/мкм. С учетом этого условия были выбраны ширины затворов транзисторов $M1$ и $M2$ первой стадии усилителя $W_{M1} = 27$ мкм и $W_{M2} = 60$ мкм, управляющее напряжение $V_{упр1} = 0.85$ В, а также величина индуктивной нагрузки L_3 , выполненной в виде линии передачи, длиной 130 мкм.

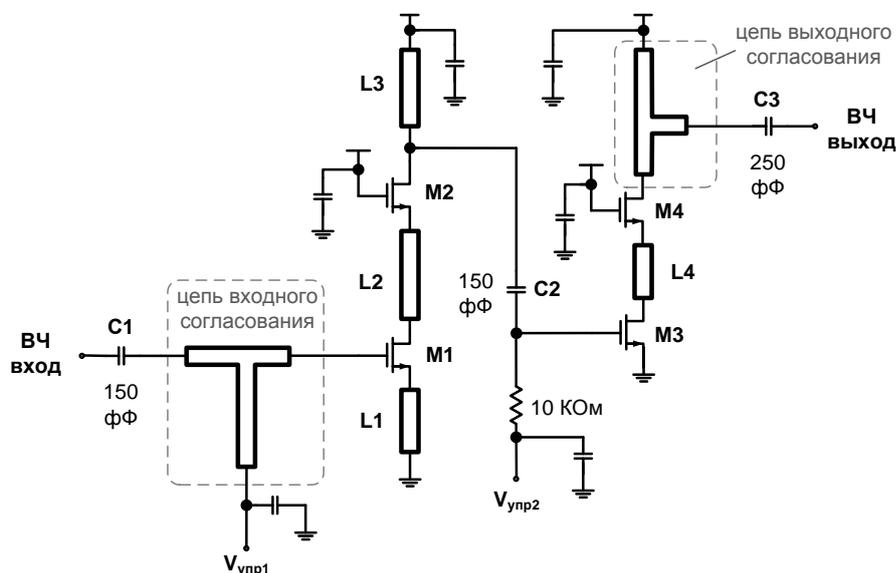


Рис. 1. Каскодная схема разработанного блока МШУ

Входной импеданс МШУ в основном определяется характеристиками транзистора $M1$, а также индуктивностью линии L_1 , которая представляет собой отрицательную обратную связь в цепи истока транзистора $M1$. Выбор глубины обратной связи, зависящей от длины линии L_1 , определяется условием минимизации коэффициента шума. В результате моделирования было определено, что минимум коэффициента шума достигается при длине линии 80 мкм. Для минимизации коэффициента отражения по входу усилителя используется цепь входного согласования, выполненная в виде линии передачи с короткозамкнутым шунтирующим шлейфом.

Наличие линии L_2 между транзисторами в $M1$ и $M2$ обусловлено необходимостью устранения негативного влияния паразитных емкостей на стоке транзистора $M1$ и на истоке транзистора $M2$. Без использования такого компенсирующего отрезка линии передачи паразитные емкости приводят к значительному уменьшению ширины полосы пропускания и к увеличению коэффициента шума. Длина линии L_2 по результатам моделирования была выбрана равной 240 мкм.

Характеристики второго каскада МШУ выбирались из условия максимизации коэффициента усиления блока. Ширины затворов транзисторов М3 и М4 равны соответственно 50 мкм и 60 мкм. Нагрузка второго каскада усилителя представляет собой цепь выходного согласования, которая выполнена аналогично цепи входного согласования, как линия передачи с короткозамкнутым шлейфом. Для увеличения ширины полосы пропускания и уменьшения коэффициента шума, также как и в первой стадии усилителя, между транзисторами М3 и М4 добавляется линия передачи L_4 , но длиной 80 мкм.

На входе и выходе схемы МШУ, а также между первым и вторым каскадом усилителя добавлены блокировочные конденсаторы C_1-C_3 , которые необходимы для развязки блоков по постоянному напряжению. Также в схеме используются шунтирующие конденсаторы для заземления СВЧ сигнала в местах схемы, где подается постоянное управляющее напряжение или напряжение питания.

Использование для реализации индуктивностей и цепей входного и выходного согласования линий передачи обусловлено спецификой микросхем миллиметрового диапазона. В этом диапазоне построение точных моделей классических элементов индуктивностей крайне затруднено, поэтому для реализации индуктивностей в ходе работы была спроектирована экранированная микрополосковая линия передачи с характеристическим импедансом 50 Ом. Структура такой линии передачи во многом определяется конфигурацией диэлектрических и металлизированных уровней микросхемы. В частности используемая для разработки блока МШУ микросхема имеет 9 слоев металлизации, пространство между которыми заполнено диэлектриком. Характеристики металла и диэлектрика, расстояния между слоями металлизации, а также толщина слоев микросхемы определяются спецификацией, предоставленной фабрикой-изготовителем (TSMC).

Разработанная линия передачи представляет собой центральный проводник, окруженный справа и слева боковой металлизацией на всех уровнях микросхемы и экранирующим металлом на нижнем уровне (см. Рис. 2). Такая линия передачи защищена от влияния различных сигналов, распространяющихся по соседним линиям передачи, а также является весьма компактной, что позволяет наиболее эффективно использовать площадь микросхемы.

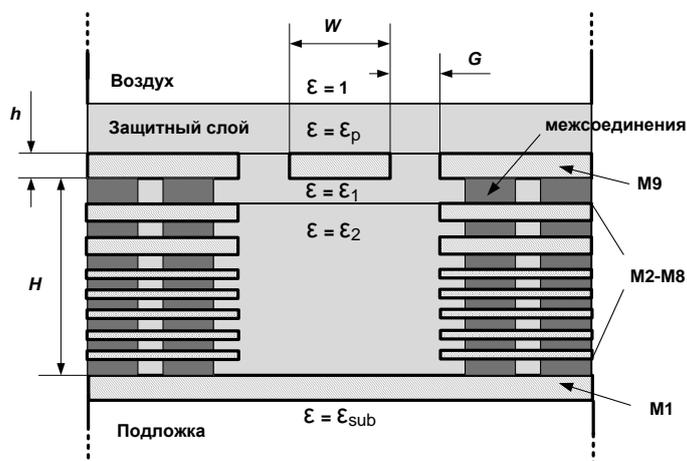


Рис. 2. Экранированная линия передачи

Таблица 1.

Параметры линии	Значение
Постоянная затухания (α), дБ/мм.	0.9
Фазовая постоянная (β), рад/мм.	2.49
Четвертьволновый отрезок, мкм.	633
H, мкм.	6.09
W, мкм.	8
G, мкм.	10
h, мкм.	3.25

Для определения геометрических параметров линии, при которых достигаются заданный характеристический импеданс и наименьшее значение постоянной затухания, было проведено электромагнитное моделирование для различных значений ширины центрального проводника (W) и различных расстояний от центрального проводника до боковой металлизации (G) (см. Рис. 2). В результате были определены параметры и характеристики линии передачи для заданной структуры микросхемы, значения которых приведены в Таблице 1.

Разработка топологии микросхемы проводилась в среде Cadence VirtuosoXL. При создании топологии особое внимание уделялось выполнению требований, касающихся плотности металлизации различных уровней микросхемы, минимальных допустимых расстояний и других ограничений, предъявляемых фабрикой-изготовителем. Созданная топология блока МШУ представлена на Рис. 3.

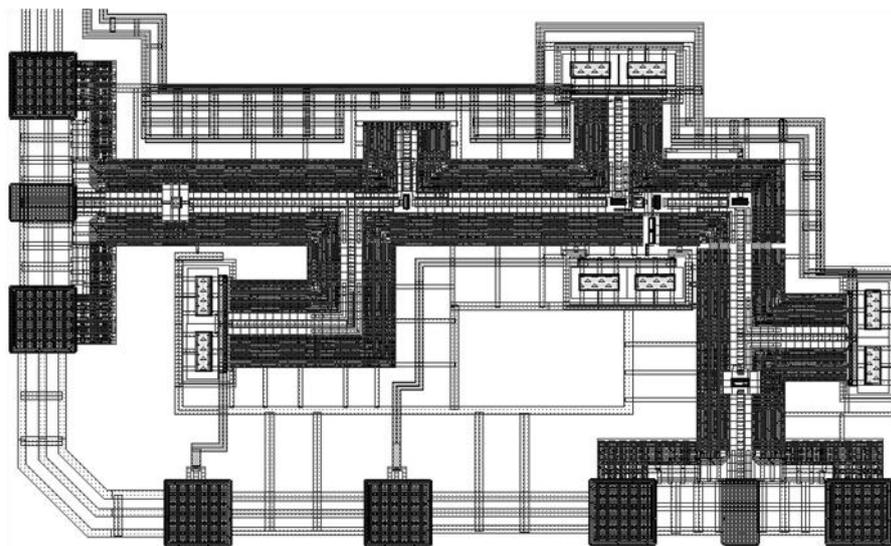


Рис. 3. Общая топология блока МШУ

Финальное моделирование разработанного блока проводилось в среде Cadence SpectreRF. При этом использовались результаты предварительного электромагнитного моделирования линий передачи и согласующих цепей.

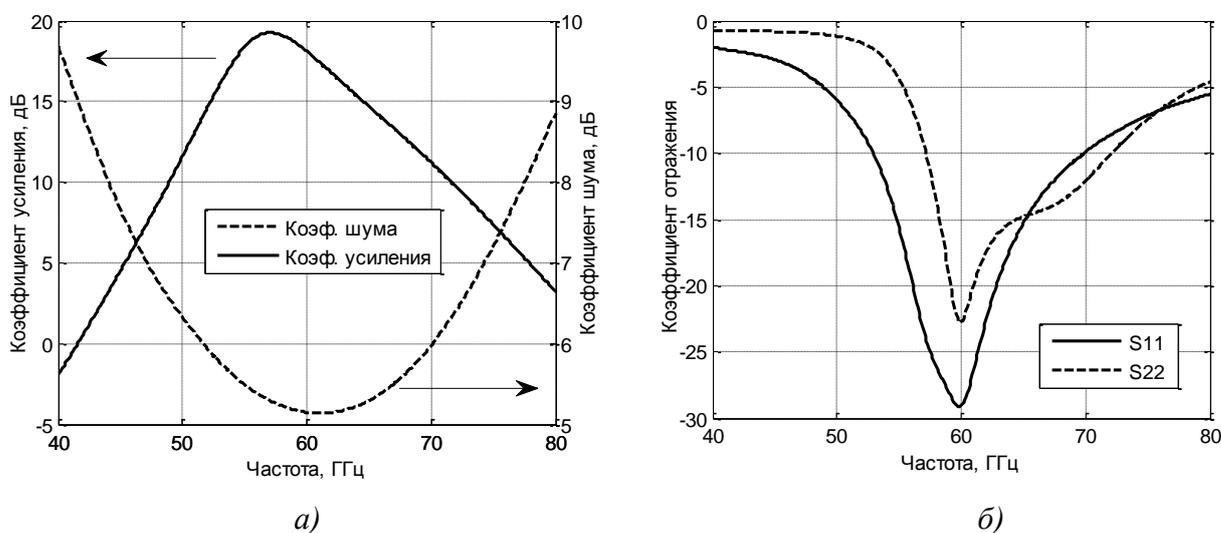


Рис. 4. Характеристики блока МШУ

На Рис. 4 (а) показана зависимость коэффициента шума схемы от частоты входного сигнала. Видно, что минимальный коэффициент шума достигается на частоте 60 ГГц и составляет 5.2 дБ. На том же рисунке показана и зависимость коэффициента усиления схемы от частоты входного сигнала. Из полученных результатов можно наблюдать, что коэффициент усиления на частоте 60 ГГц составляет 18.1 дБ. Зависимости входного (S11) и выходного (S22) коэффициента отражения схемы от частоты приведены на рис. 4 (б). Коэффициент отражения по входу на частоте 60 ГГц составляет -29 дБ, а ширина полосы согласования (по уровню -10 дБ) 53-69 ГГц. Коэффициент отражения по выходу на частоте 60 ГГц составляет -23 дБ, а ширина полосы согласования (по уровню -10 дБ) 57-72 ГГц.

Основные характеристики разработанного блока МШУ, а также характеристики известных аналогичных блоков, разработанных по КМОП технологии с технологическим размером 90 нм, представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Характеристики разработанного блока МШУ

Характеристика	Значение	[2]	[3]	[4]
Коэффициент шума (60 ГГц), дБ	5.2	5.5	4.7	3.8
Коэффициент усиления, (60 ГГц) дБ	18.1	14.6	18	13
Ширина полосы согласования по входу (по уровню -10 дБ), ГГц	53-69	50-65	58-68	55-68
Ширина полосы согласования по выходу (по уровню -10 дБ), ГГц	57-72	50-65	59-68	55-72
Точка компрессии 1 дБ, дБм	-17.8	-	-	-
Потребляемая мощность, мВт	12.5	24	28.3	14.4
Занимаемая площадь, мм ²	0.45	0.14	0.64	0.3

В результате работы был спроектирован блок МШУ диапазона 60 ГГц и создана топология соответствующей микросхемы по технологии TSMC КМОП 90 нм. Полученные характеристики блока сравнимы с известными зарубежными аналогами. В дальнейшем планируется изготовление микросхемы, проведение экспериментальных исследований и использование разработанного блока МШУ при проектировании радиочастотной части СВЧ приемников диапазона 57-64 ГГц.

Библиографический список

1. Razavi, B., "Design of Millimeter-Wave CMOS Radios: A Tutorial," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 56, no. 1, pp. 4-16, Jan. 2009.
2. Terry Yao; Gordon, M.Q.; Tang, K. K W; Yau, K. H K; Ming-Ta Yang; Schvan, P.; Voinigescu, S.P., "Algorithmic Design of CMOS LNAs and PAs for 60-GHz Radio," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.42, no. 5, pp. 1044-1057, May 2007.
3. Cetian Wang; Yang Hao; Zhang Haiying; Kai Kang; Tang, Zongxi, "A 60GHz LNA with 4.7dB NF and 18dB gain using interstage impedance matching technique in 90nm CMOS," IEEE International Conference Microwave Technology & Computational Electromagnetics (ICMTCE), pp. 270-273, May 2011.
4. Wei-Tsung Li; Jeng-Han Tsai; Hong-Yuan Yang; Wei-Hung Chou; Shyh-Buu Gea; Hsin-Chia Lu; Tian-Wei Huang, "Parasitic-Insensitive Linearization Methods for 60-GHz 90-nm CMOS LNAs," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, no. 8, pp. 2512-2523, Aug. 2012.