

С.А. Тихонов, А.В. Мавричев, А.А. Артеменко, А.А. Мальцев
ННГУ им. Н.И. Лобачевского, кафедра бионики и статистической радиофизики

Разработка и экспериментальное исследование КМОП малошумящего усилителя миллиметрового диапазона длин волн

В статье представлены результаты разработки микросхемы малошумящего усилителя (МШУ) по технологии КМОП 90 нм, предназначенного для использования в устройствах беспроводных систем связи диапазона 57-64 ГГц. По результатам моделирования коэффициент усиления разработанного МШУ составляет 14.5 дБ, коэффициент шума – 4.9 дБ, точка компрессии на 1 дБ (по входу) – -6.7 дБм. Микросхема с МШУ была изготовлена на фабрике TSMC (Тайвань) для проведения экспериментального исследования. По его результатам было получено, что измеренное значение коэффициента усиления составляет 10.5 дБ, ширина полосы согласования по входу (по уровню -10 дБ) 56.6-67.0 ГГц, по выходу 50-67 ГГц, точка компрессии на 1 дБ (по входу) -3 дБм. Мощность, потребляемая микросхемой, составляет 25.5 мВт, а площадь микросхемы без учета контактных площадок - 0.314 мм². Наиболее вероятно, что деградация коэффициента усиления связана с влиянием паразитных элементов в топологии усилителя. Данная гипотеза подтверждена результатами уточненного моделирования с учетом выявленных паразитных элементов, которые хорошо соответствуют результатам измерений. Разработанный МШУ может быть использован при создании радиочастотной части приемника миллиметрового диапазона длин волн.

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

Для удовлетворения требований по увеличению объемов передаваемой информации в настоящее время активно развиваются широкополосные системы радиосвязи, работающие в миллиметровом диапазоне длин волн, и обеспечивающие скорость передачи данных до нескольких гигабит в секунду. Примерами таких систем являются локальные беспроводные сети Wi-Fi, работающие в соответствии с новым стандартом IEEE 802.11ad [1] в диапазоне частот 57-64 ГГц и системы радиорелейной связи миллиметрового диапазона длин волн. В то же самое время появляются и различные радарные приложения этого диапазона, например, системы миллиметрового зрения, применяемые для досмотра пассажиров в аэропортах, или автомобильные радары для автоматического предотвращения столкновений. Поэтому существует необходимость в разработке недорогих приемопередатчиков, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн, и выполненных в виде интегральных микросхем.

В области производства микросхем одной из наиболее активно развивающихся в настоящее время является КМОП технология. Достоинствами этой технологии являются низкая себестоимость при массовом производстве, низкое энергопотребление, а также возможность интеграции цифровых и СВЧ блоков приемопередатчика на одной микросхеме. Однако следует отметить невысокую максимальную выходную мощность

КМОП микросхем и отсутствие точных СВЧ моделей активных и пассивных компонентов, что усложняет практическую разработку.

Ключевым элементом СВЧ части любого приемника является малошумящий усилитель (МШУ), необходимый для усиления слабого входного сигнала и минимизации коэффициента шума всего приемного тракта. Поэтому основными характеристиками МШУ являются коэффициент усиления, коэффициент шума и точка однодецибелной компрессии. В данной статье рассматривается задача разработки микросхемы малошумящего усилителя на основе технологии КМОП с технологической нормой 90 нм для широко используемого сегодня частотного диапазона 57-64 ГГц.

Обычно малошумящие усилители формируют из нескольких последовательных каскадов для увеличения значения коэффициента усиления и минимизации коэффициента шума. В рамках данной работы для проектирования усилителя была выбрана двухкаскадная архитектура. Основным назначением первого каскада является согласование входного импеданса на 50 Ом и минимизация коэффициента шума. Второй каскад усилителя отвечает за коэффициент усиления и выходное согласование по импедансу.

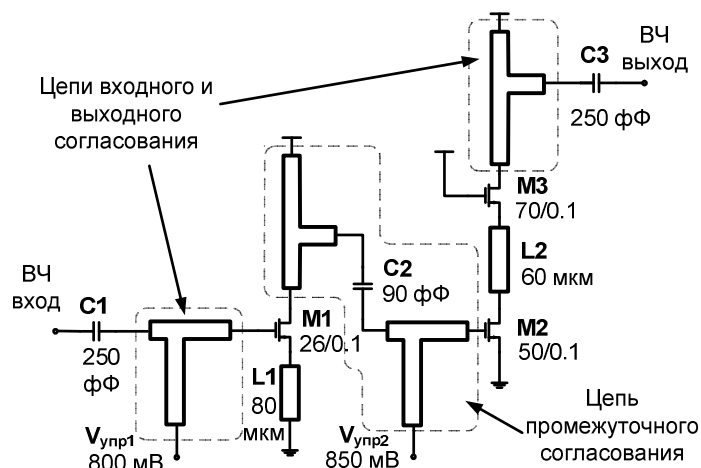


Рисунок 1

Первый каскад усилителя выполнен в виде транзистора М1 (Рис. 1), включенного по схеме с общим истоком. Ширина затвора и напряжение смещения транзистора М1 были выбраны таким образом, чтобы ток исток-сток был равен 0.15-0.2 мА/мкм. Известно, что при таком значении тока через канал транзистора обеспечивается оптимум между минимальным коэффициентом шума и максимальной граничной частотой работы КМОП транзистора [2]. В результате оптимизации в разработанном МШУ ширина затвора транзистора М1 была выбрана равной 26 мкм при напряжении смещения 0.8 В. Преобразование импеданса источника (50 Ом) к комплексному входному импедансу транзистора М1 обеспечено за счет введения в схему линии передачи с короткозамкнутым шунтирующим шлейфом, выполненной на основе экранированной микрополосковой линии передачи [3]. Для увеличения стабильности и линейности усилителя на истоке транзистора М1 добавлена индуктивность L1, создающая отрицательную обратную связь по току. Наличие отрицательной обратной связи, однако, приводит к тому, что уменьшается коэффициент усиления первого каскада. По результатам моделирования

было определено значение индуктивности, при котором одновременно достигаются приемлемые значения коэффициента усиления и точки однодецибелной компрессии. Индуктивность реализована в виде отрезка экранированной микрополосковой линии передачи, а значение индуктивности определяется длиной линии, которая в данном случае составила 80 мкм. Выходная нагрузка первого каскада усилителя представляет собой линию передачи с короткозамкнутым шунтирующим шлейфом и является частью цепи промежуточного согласования. Другая часть используется для преобразования выходного импеданса первого каскада к входному импедансу второго каскада [4]. Для разделения первого и второго каскадов усилителя по постоянному току используется конденсатор С2.

Второй каскад усилителя представляет собой каскодную схему, состоящую из транзисторов М2 и М3. Напряжение смещения и ширины затворов транзисторов выбирались таким образом, чтобы достичь высокого значения коэффициента усиления, не ухудшая при этом коэффициент шума и линейность усилителя. Ширина затвора транзистора М2 была выбрана равной 50 мкм, ширина затвора транзистора М3 - 70 мкм, а рабочее напряжение смещения транзистора М2 составило 0.85 В. Индуктивность L2 между истоком и стоком транзисторов необходима для расширения полосы пропускания усилителя, за счет устранения негативного влияния паразитных емкостей на выходах транзисторов. Индуктивность L2 также выполнена в виде линии передачи, оптимизированная длина которой составила в этом случае 60 мкм. Цепь выходного согласования МШУ также реализована на основе линии передачи с короткозамкнутым шунтирующим шлейфом. Можно показать, что такая двухкаскадная архитектура, состоящая из транзистора, включенного по схеме с общим истоком, и каскода, обладает меньшим коэффициентом шума по сравнению с чисто каскодной архитектурой [3], [5].

Разработка топологии МШУ (Рис. 2) проводилась в среде Cadence Virtuoso XL с использованием технологической библиотеки элементов фабрики TSMC (Тайвань). Контактные площадки входа и выхода усилителя предназначены для подключения СВЧ зондов типа земля-сигнал-земля с характерным расстоянием между выводами 150 мкм. Кроме того, все контактные площадки на микросхеме были оснащены электростатической защитой, основанной на диодах, включенных в противоположных направлениях. Общая площадь, занимаемая блоком на микросхеме, равна 0.314 мм² (без учета контактных площадок).

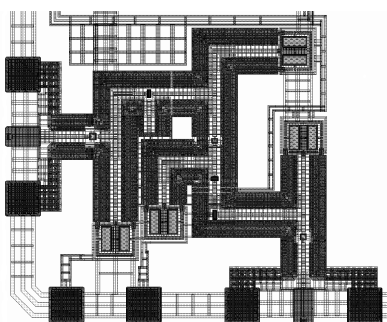


Рисунок 2

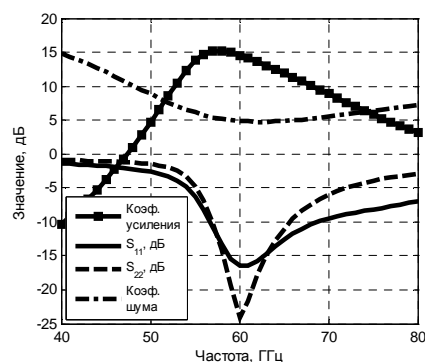
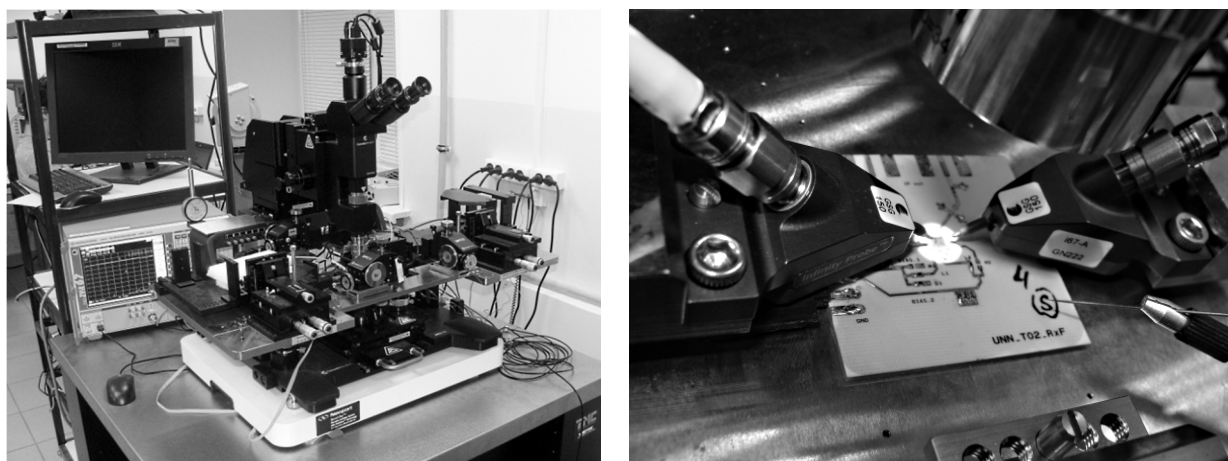


Рисунок 3

Моделирование разработанного блока МШУ проводилось в среде Cadence Spectre RF с использованием результатов предварительного электромагнитного моделирования согласующих элементов и линий передачи.

Результаты проведенного моделирования МШУ представлены на Рис. 3. Коэффициент усиления на частоте 60 ГГц составляет 14.5 дБ, коэффициент шума 4.9 дБ, ширина полосы согласования по входу (по уровню -10 дБ) 56.9-69 ГГц, а полоса согласования по выходу 57-65.5 ГГц. По результатам дополнительных исследований точка компрессии на 1 дБ составила -6.7 дБм. При напряжении питания 1.5 В потребляемая мощность усилителя составляет 25.5 мВт.



(а)

(б)

Рисунок 4. Измерительная установка (а). Разработанная микросхема на тестовой печатной плате в измерительной установке (б)

Измерение характеристик изготовленной на фабрике TSMC микросхемы МШУ проводилось с помощью зондовой станции Cascade Microtech EPS150MMW и векторного анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVA67 (Рис. 4а). Для повышения точности измерений предварительно проводилась калибровка контактных площадок с применением расположенного на микросхеме калибровочного набора типа TRL (Thru – прохождение между портами, Reflect – коэффициент отражения открытых портов, Line – прохождение через отрезок линии передачи длиной $\lambda/4$). Для облегчения подключения к микросхеме управляющих напряжений, напряжения питания, а также нулевого потенциала использовалась тестовая печатная плата, при этом контактные площадки микросхемы соединялись с платой с помощью проволочного соединения (Рис. 4б).

По результатам измерений коэффициент усиления составил 10.5 дБ на частоте 60 ГГц. Ширина полосы согласования по входу (по уровню -10 дБ) 56.6- 67 ГГц, а полосы согласования по выходу 50-67 ГГц. Предположительно, причина различия результатов моделирования и измерений заключается во влиянии паразитных элементов в некоторых областях топологии, которые представляют собой нежелательное индуктивное или емкостное взаимодействие между различными участками схемы усилителя.

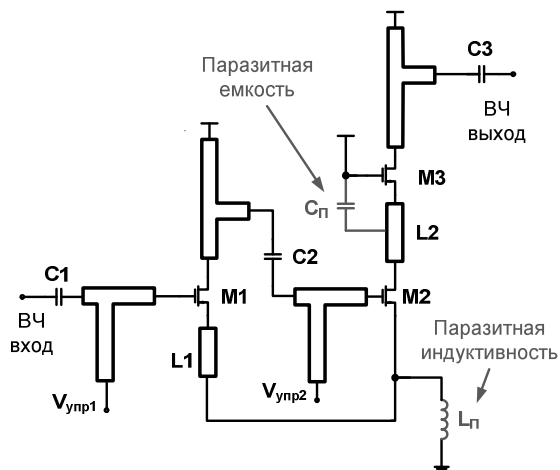


Рисунок 5

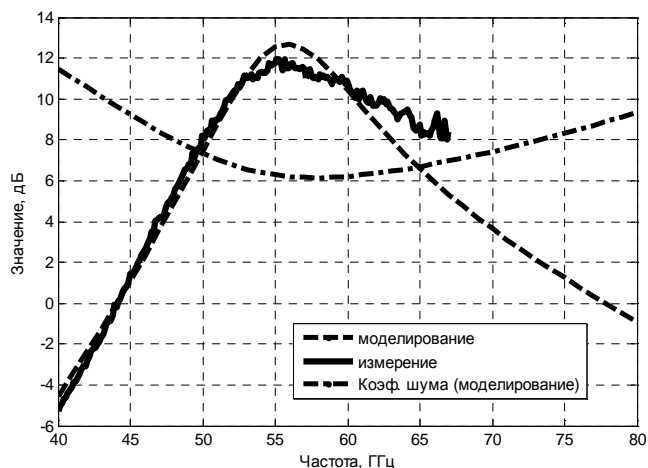


Рисунок 6

После проведения дополнительного анализа схемы и топологии были выявлены критичные места в топологии, которые требуют модификации, а также проведено моделирование блока МШУ с учетом паразитных элементов. Наибольшее влияние оказывает емкостная связь между затвором и истоком транзистора М3, а также паразитная индуктивность между заземлением микросхемы и заземлением тестовой печатной платы (Рис. 5). Результаты моделирования схемы с учетом паразитных элементов в сравнении с результатами измерений показаны на Рис. 6 и Рис. 7. Видно достаточно хорошее соответствие. Для достижения расчетных характеристик необходима небольшая доработка топологии усилителя с целью устранения или компенсации указанных паразитных элементов. В частности, эти элементы могут быть устранены за счет небольшого увеличения площади, занимаемой топологией МШУ на микросхеме.

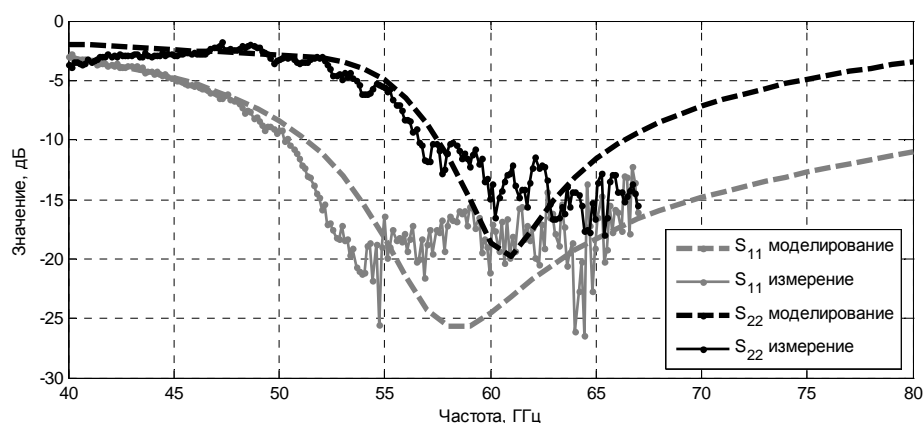


Рисунок 7

В результате данной работы были спроектированы схема и топология микросхемы МШУ диапазона 57 – 64 ГГц на основе технологии КМОП 90 нм. Проведено моделирование работы блока с использованием результатов предварительного электромагнитного моделирования отдельных распределенных элементов схемы. Тестовый образец разработанной микросхемы был изготовлен на фабрике TSMC (Тайвань). В результате измерения основных характеристик блока, была выявлена

некоторая деградация коэффициента усиления по сравнению с результатами первоначального моделирования. Причиной уменьшения коэффициента усиления являются паразитные элементы, наличие которых подтверждается моделированием. Разработанная микросхема МШУ может быть использована в качестве первого блока приемника миллиметрового диапазона длин волн.

Библиографический список

1. IEEE Std 802.11ad™-2012, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band", 28 December 2012.
2. Yao, T.; Gordon, M.Q.; Tang, K.K.W.; Yau, K.H.K.; Ming-Ta Y.; 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. Тихонов С.А., Мавричев А.В., Артеменко А.А., Мальцев А.А. "Каскодный малошумящий усилитель диапазона 60 ГГц, выполненный по технологии КМОП 90 нм," Доклады II Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. 3-6 июня 2013 г., 5 стр.
4. Cetian W.; Yang H.; Zhang H.; Kai K.; Tang, Z., "A 60 GHz LNA with 4.7 dB NF and 18 dB gain using interstage impedance matching technique in 90 nm CMOS," IEEE ICMTCE, Beijing, pp. 270-273, May 2011.
5. Malignaggi A.; Hamidian A.; Shu R.; Kamal A.M.; Boeck G., "Analytical Study and Performance Comparison of Mm-Wave CMOS LNAs," EuMIC, Nuremberg, pp. 260 – 263, 6 – 8 Oct. 2013