

Разработка монолитных интегральных схем приемного тракта на основе гетеропереходных транзисторов для диапазона частот 57 – 64 ГГц

Д.А. Копцев, В.А. Дмитриев

ОАО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», dkoptsev@mikron.ru

Аннотация — Рассмотрены схемы построения приемных трактов устройств, работающих в диапазоне 57 – 64 ГГц. Представлены 2 блока приемника для 60 ГГц WLAN приложений: малошумящий усилитель и понижающий смеситель с асимметричными входами и выходами. Устройства спроектированы по технологии SiGe:C БиКМОП 0.25 мкм, содержащей при гетеропереходные транзисторы, характеризуемые $f_T = 190$ ГГц, $f_{MAX} = 190$ ГГц. МШУ построен по 4-х каскадной архитектуре, коэффициент усиления в полосе частот не менее 21 дБ, коэффициент шума не более 7.1 дБ. Напряжение питания 1.5 В, потребляемый ток не превышает 12,5 мА. Для согласования импедансов использовались интегральные копланарные линии (Coplanar waveguides, CPW), расчет которых проводился с помощью планарного электромагнитного 3D моделирования. Понижающий смеситель построен на основе ячейки Гильберта с встроенными симметрирующими преобразователями. Смеситель характеризуется коэффициентом преобразования 15.3 дБ, коэффициентом шума 16,1 дБ. В состав микросхемы смесителя также входит усилитель промежуточной частоты и режекторный фильтр, представляющий собой CPW линию длиной $\lambda/4$. Потребляемый ток 52 мА при напряжении питания 2 В. Площади кристаллов МШУ и смесителя составляют 0,42 и 0,6 мм², соответственно, включая контактные площадки.

Ключевые слова — малошумящий усилитель, смеситель, SiGe, интегральный копланарный волновод, БиКМОП, приемный тракт.

I. ВВЕДЕНИЕ

Диапазон частот 57 – 64 ГГц является чрезвычайно привлекательным для высокоскоростной (> 1 Гб/с) сверхширокополосной передачи данных. Устройства 60 ГГц диапазона – это, в основном, потребительская электроника: роутеры, точки доступа, приемопередатчики в ноутбуках, смартфонах, телевизорах, системах «умного дома» и т.д.

Одной из важнейших характеристик потребительской электроники является цена конечного продукта, что создает серьезные сложности для использования дорогих GaAs и InP технологий. Для современных КМОП технологий с проектными нормами 45 нм и ниже значение граничной частоты лежит в районе 200 ГГц, что позволяет создавать приборы с рабочей частотой 60 ГГц. Однако такие

технологии характеризуются достаточно низким напряжением питания [1], что делает проблематичным построение усилителей мощности с требуемыми параметрами.

SiGe гетеробиполярные транзисторы и СВЧ ИС на их основе в настоящее время обладают лучшими частотными характеристиками среди кремниевых приборов. При этом сопоставимые с КМОП технологией граничные частоты достигаются при двух- или трехкратных больших проектных нормах и меньшей стоимости за единицу площади. С учетом того, что в СВЧ схемах значительную часть площади занимают пассивные элементы, увеличение топологических норм практически не увеличивает площадь устройства, благодаря чему использование SiGe технологии является экономически эффективным решением для производства перспективных схем приемо-передатчиков 60 ГГц диапазона [2, 3].

II. АРХИТЕКТУРА ПРИЕМНОГО ТРАКТА

Наиболее широко используемой архитектурой в беспроводных системах является супергетеродинная (рис. 1) [4]. Полосовой ВЧ фильтр, предшествующий малошумящему усилителю, уменьшает внеполосные сигналы, а также уровень помех по зеркальному каналу. Затем весь спектр преобразуется вниз по частоте на фиксированную промежуточную частоту с использованием перестраиваемого гетеродина. Данная структура характеризуется возможностью получения ультравысокой скорости передачи данных и хорошей помехозащищенностью.



Рис. 1. Супергетеродинная структура приемного тракта

В литературе используются различные значения ПЧ для устройств данного диапазона, предлагаются значения 5, 9 и 12 ГГц. В данной работе выбрано значение ПЧ 5 ГГц, преимуществом этого значения является совместимость со стандартом 802.02a.

III. РАЗРАБОТАННЫЕ СФ БЛОКИ ПРИЕМНОГО ТРАКТА

A. Технологический процесс

Для разработки СФ блоков использовалась 0.25 мкм кремниво-германиевая технология фирмы INP. В этой технологии имеются как высокоскоростные гетеропереходные биполярные транзисторы, так и высокоскоростные МОП-транзисторы. Биполярные транзисторы характеризуются $f_T = 190$ ГГц, $f_{MAX} = 190$ ГГц, пробивное напряжение коллектор-эмиттер составляет 1.9 Вольта.

Металлизация состоит из 3 тонких нижних слоев и 2 толстых верхних слоев, которые позволяют создавать высокодобротные интегральные ёмкости и индуктивности. Технология содержит также 4 вида резисторов.

B. Малошумящий усилитель

МШУ является одним из важнейших элементов схемы приемного тракта, именно его характеристики в большей степени определяют коэффициент шума приемного тракта, а, следовательно, и чувствительность приемника в целом.

Разработанный малошумящий усилитель (рис. 2) построен по 4-х каскадной схеме с общим эмиттером [5]. 1-й каскад оптимизирован для минимизации коэффициента шума и коэффициента отражения по входу S11, 2-4 каскады оптимизированы для достижения максимального коэффициента усиления.

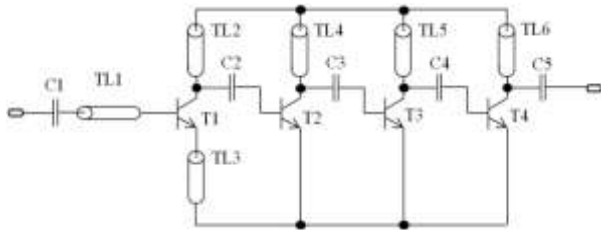


Рис. 2. Электрическая схема 4-х каскадного МШУ

Для согласования импедансов использовались интегральные заземленные копланарные волноводы (Grounded CPW). Вход и выход МШУ согласованы на 50 Ом. Параметры S_{11} и S_{22} в диапазоне частот 57 – 64 ГГц имеют значения не хуже -10,5 дБ и -9 дБ, соответственно. Структура копланарного волновода условно показана на рис. 3. Ширина сигнальных линий 11 мкм, расстояние до боковых экранов – 10 мкм, волновое сопротивление линий по результатам электромагнитного моделирования составляет 50 Ом.

Транзистор T1 имеет площадь эмиттера 0,7 мкм², ток потребления 1-го каскада 2 мА. Рабочая точка этого каскада выбрана для обеспечения минимального коэффициента шума. Транзисторы T2, T3 и T4 имеют площади по 0,35 мкм², токи потребления соответствующих каскадов не превышает 3,5 мА. Общая потребляемая мощность малошумящего усилителя составляет 18,75 мВт от источника питания 1.5 В.

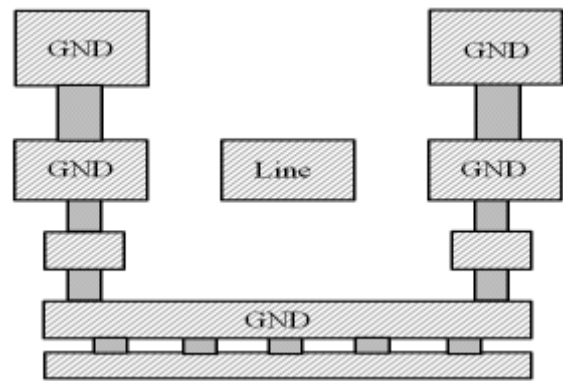


Рис. 3. Структура согласующих CPW линий

C. Понижающий смеситель

В основе микросхемы смесителя лежит дифференциальная ячейка Гильберта (рис. 4). Из-за технической сложности подачи дифференциального сигнала с частотой 60 ГГц в состав микросхемы смесителя введены симметрирующие преобразователи. Также микросхема содержит режекторный фильтр и усилитель промежуточной частоты (рис. 5) [6]. Режекторный фильтр реализован заземленной CPW линией передачи, имеющей длину $\lambda/4$, где λ – длина волны, соответствующая несущей частоте.

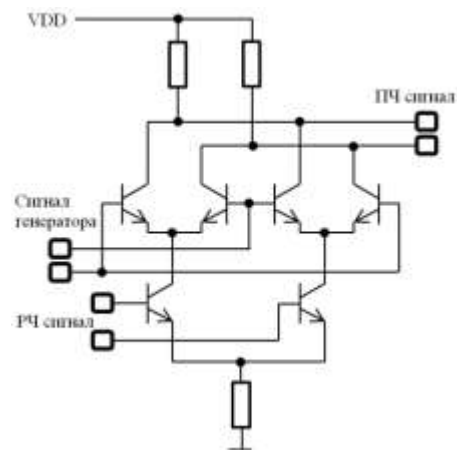


Рис. 4. Дифференциальная ячейка Гильберта

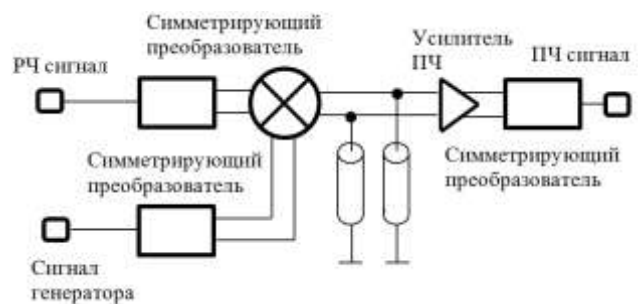


Рис. 5. Структурна микросхемы понижающего смесителя

Структура CPW линий в составе режекторного фильтра приведена на рис. 6. Фильтр представляет собой линию передачи, выполненную в двух верхних слоях металла. Входы и выходы смесителя согласованы на 50 Ом. Потребляемый ток 52 мА при напряжении питания 2 В. На рис. 7 приведены электрические схемы симметрирующих преобразователей.

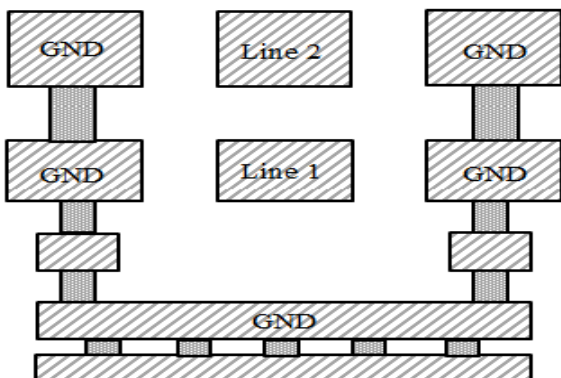


Рис. 6. Структура микрополосового режекторного фильтра

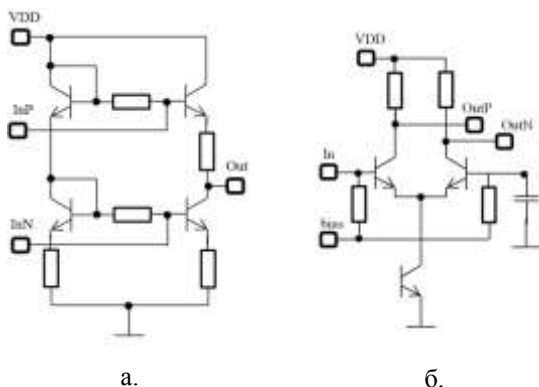


Рис. 7. Упрощенные электрические схемы преобразователя дифференциального сигнала в несимметричный (а) и преобразователя несимметричного сигнала в дифференциальный (б)

Д. Топологическое проектирование

При проектировании устройств миллиметрового диапазона важно учитывать, что любые топологические элементы, такие как межсоединения, переходные отверстия и контактные площадки, оказывают значительное влияние на характеристики устройства, а в ряде случаев и на работоспособность устройства в целом. В связи с этим для каждого топологического элемента необходимо проводить электромагнитное 3D моделирование и полученные результаты использовать при проектировании схемы. Таким образом, процесс топологического проектирования должен осуществляться параллельно схемотехническому проектированию.

В работе схемотехническое проектирование осуществлялось в САПР Cadence Virtuoso, электромагнитное моделирование проводилось с помощью симулятора Agilent GoldenGate Momentum.

Разработанные кристаллы МШУ (рис. 8а) и понижающего смесителя (рис. 8б) имеют площади 0,42 и 0,6 мм², соответственно, включая контактные площадки.

Для снижения паразитной ёмкости контактных площадок они выполнены только в верхнем слое металла, имеют 8-ми угольную конструкцию и минимально возможный по технологии диаметр. Для укрепления контактной площадки в предпоследнем слое металлизации выполнено кольцо под площадкой. Для экранирования схемы в нижнем и верхнем слоях металла в свободных местах расположены заземленные металлические экраны.

В табл. 1 и табл. 2 приведены основные параметры разработанных устройств на частоте 60 ГГц, полученные в результате моделирования. На рис. 9 и рис. 10 приведены графики основных параметров разработанных устройств в диапазоне частот 57-64 ГГц.

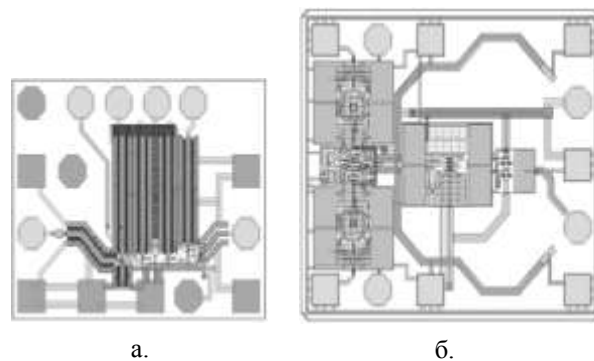


Рис. 8. Топология разработанных кристаллов МШУ (а) и понижающего смесителя (б)

Таблица 1

Параметры МШУ

Параметр	Разработанный МШУ	[5]	[7]	[8]
Коэфф. усиления, дБ	21-25	20	18	18
Коэфф. шума, дБ	6,9-7,1	6	6,8	6,7
S11, дБ	-10,5	-15	-	-6
S22, дБ	-9	-9	-	-12
Потреб. мощность, мВт	18,8	36,3	66	27
P1dB по входу, дБм	-24,9	-	-30,1	-18
Площадь кристалла, мм ²	0,42	0,4	0,8	0,45

Таблица 2

Параметры понижающего смесителя

Параметр	Разработанный смеситель	[6]	[7]	[9]
Коэфф. преобразования, дБ	15.9-16,5	10.7	10.5	1.7
Коэфф. шума, дБ	16-16,1	нд	14	13
LO-RF изоляция, дБ	28	28	нд	30
LO-IF изоляция, дБ	55	30	нд	40
Потреб. мощность, мВт	104	37	20.5	75,9
Площадь кристалла, мм ²	0,6	1,04	0.8	нд

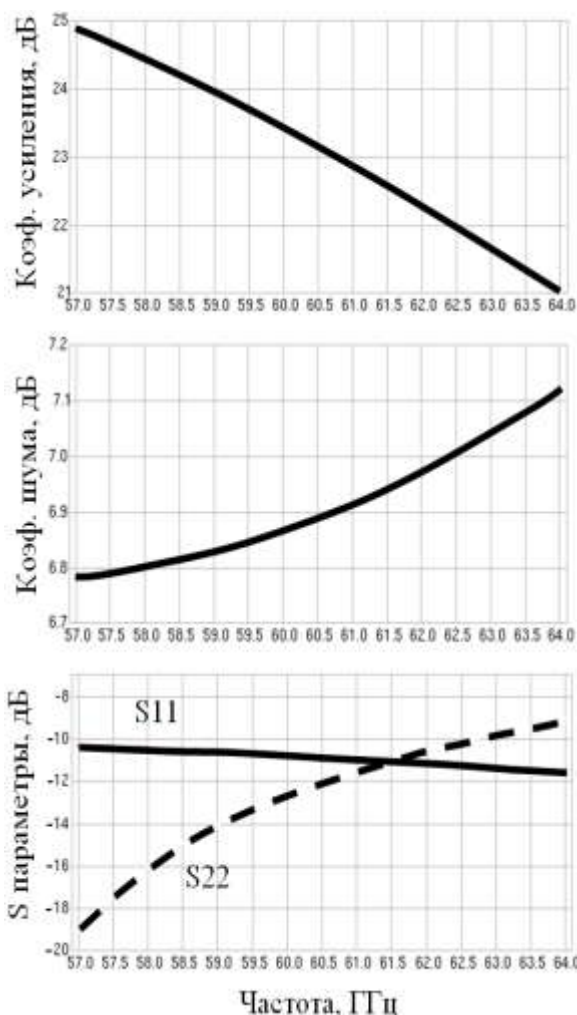


Рис. 9. Параметры МШУ

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены схемы построения маломощного усилителя и понижающего смесителя по технологии SiGe для применения в устройствах, работающих в

диапазоне частот 57-64 ГГц. Проведен анализ использования интегральных микрополосковых линий, выполненных в верхних слоях металлизации, для согласования импедансов. Анализ результатов показал, что для рассматриваемого частотного диапазона использование данного типа согласующих элементов достаточно эффективно. Разработаны топологии интегральных микросхем для изготовления опытных образцов по технологии фирмы ИНР.

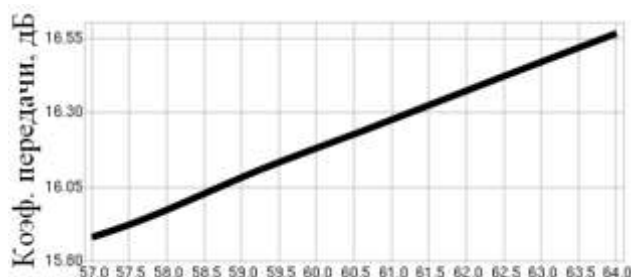


Рис. 10. Коэффициент передачи смесителя

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках НИР для Минобрнауки по государственному контракту №14.427.11.0006 от 03 октября 2013 года в рамках ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов. М.: Техносфера, 2011. 800 с.
- [2] Shelepin N., Dmitriev V., Knoll D., Seletskiy V., Egorova T., Barth R., Fisher G.G., Grabolla T., Tillack B. / Low-Cost, High-Voltage SiGe:C HBTs for a 0.18 um BiCMOS Process // Proceedings of the 2012 Bipolar/BiCMOS circuits and technology meeting, 2012. P. 153-156.
- [3] Ali M. Niknejad. Hossein Hashemim, mm-Wave Silicon Technology 60 GHz and Beyond. Springer, University of California, Berkeley. 2008. 315 с.
- [4] Edited by R. Kraemer and M. Katz. Short-range wireless communications: emerging technologies and applications. John Wiley & Sons Ltd. 2009. 350 с.
- [5] Woorim Shin, Mehmet Uzunkov and Gabriel M. Robeiz, Ultra Low Power 60 GHz ASK SiGe Receiver with 3-6 GBPS Capabilities // Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. 2009. P. 1-4.
- [6] Sang-Heung Lee, Ja-Yol Lee, and Haechon Kim. A Fully Integrated 60 GHz SiGe BiCMOS Mixer // Microwave Integrated Circuit Conference. 2008. P. 410-413.
- [7] Yaoming Sun, Frank Herzel, Li Wang, Johannes Borngräber, Wolfgang Winkler, Rolf Kraemer. An Integrated 60 GHz Receiver Front-End in SiGe:C BiCMOS // Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. 2006.
- [8] Van-Hoang Do, Subramanian V., Boeck, G. 60 GHz SiGe LNA // Electronics Circuits and Systems. 2007. P. 1209-1212.
- [9] Nouri N., Nezhad-Ahamdi M.R., Mirabbasi S. A double-balanced CMOS mixer with on-chip balun for 60-GHz receivers // NEWCAS Conference. 2010. P. 321-324.