

Оптимизация добротности LC нагрузок КВЧ диапазона

П.С. Будяков, А.И. Серебряков, Н.В. Бутырлагин, И.В. Пахомов

Введение

До недавнего времени полупроводниковые устройства диапазона крайне высоких частот (КВЧ) проектировались исключительно с использованием технологических процессов на основе полупроводниковых материалов группы A_3B_5 , что существенно препятствовало их широкому применению в аппаратуре промышленного и бытового назначения ввиду относительно высокой стоимости при массовом производстве, а также ограничивало дальнейшую микроминиатюризацию существующих систем [1].

На данный момент, многие приемопередающие тракты выполняются в СВЧ диапазоне [2-3], который, однако, сильно перегружен из-за постоянного увеличения мобильных устройств и повышения скорости передачи данных, а возможности его спектрального уплотнения уже практически исчерпаны [4]. Выходом из сложившейся ситуации может быть переход в более высокий диапазон частот.

Перспективными в плане построения КВЧ монолитных интегральных схем (МИС) класса «система на кристалле» являются технологические процессы БиКМОП с SiGe гетеробиполярными транзисторами и глубоко субмикронные КМОП технологические процессы уровня 180 нм и ниже, которые позволяют обеспечить наиболее высокие качественные показатели КВЧ МИС смешанного типа благодаря использованию в аналоговой и цифровой части оптимизированной под конкретное применение элементной базы.

Последние достижения в развитии технологических процессов на основе кремния способствовали появлению опытных образцов КВЧ МИС для следующих применений:

- системы сверхскоростной беспроводной связи;

- автомобильные радары;
- радиометрические системы обеспечения безопасности и противодействия терроризму.

Исследования по проблемам построения экономически выгодных КВЧ монолитных интегральных схем на основе кремниевых технологий активно проводятся зарубежными научными центрами и промышленными компаниями по всему миру [5-8]. Актуальной задачей таких исследований является разработка и исследование пассивных элементов базовых функциональных узлов диапазона КВЧ на основе SiGe БиКМОП технологического процесса.

Целью настоящей работы является рассмотрение LC нагрузок в коллекторных цепях дифференциальных каскадов, которые часто используются в смесителях, усилителях и генераторах, а так же оптимизация их добротности.

LC нагрузки КВЧ диапазона

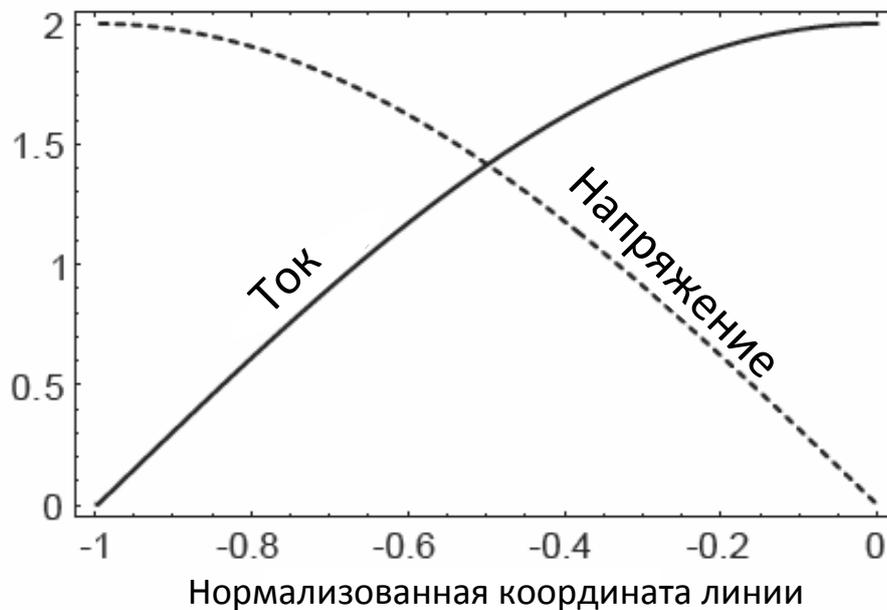
Во многих КВЧ МИС смесителей и усилителей используются дифференциальный выход, нагруженный на сопротивление R_n , от значения которого зависит коэффициент передачи схемы (смесители Гильберта и их модификации, дифференциальные усилители, генераторы и т.д.) [9-11]. Современные МИС по SiGe техпроцессам имеют напряжения питания 3,3 - 5 В, что существенно ограничивает диапазон значений R_n в сторону уменьшения. В этом случае для увеличения коэффициента передачи и выделения полезной составляющей сигнала в КВЧ диапазоне зачастую используют короткозамкнутые четвертьволновые отрезки линий передачи. Добротность таких линий является одной из важных параметров в таких задачах.

Дифференциальная линия, закороченная на одном из концов, на резонансной частоте работает в режиме стоячей волны. На рис. 1а изображена такая линия, а на рис. 1б графики токов и напряжений в

зависимости от нормированной координаты линии. Из рисунка можно сделать вывод, что левая часть такой линии имеет емкостной характер, а правая индуктивный. На короткозамкнутом конце линии напряжение находится на минимальном уровне, а ток на максимальном, поэтому потери происходят в основном из за последовательного сопротивления микрополосковой линии. С другой стороны линии, наоборот, ток минимален, а напряжение – максимально, поэтому потери связаны с паразитной шунтирующей проводимостью между дифференциальными линиями.



а)



б)

Рис.1 – Дифференциальный четвертьволной отрезок линии передачи (а) и графики токов и напряжений в зависимости от координаты линии (б) [12]

Это явление может быть использовано для снижения потерь в линии и соответственно увеличения добротности [12]. Для этого, на короткозамкнутом конце линии необходимо увеличивать ширину линий и

зазор между ними, а на другом конце, наоборот, уменьшать ширину и зазор, как показано на рис. 2. Длина такой линии рассчитывается из формулы (1).

$$\lambda/4 = \frac{c}{f_c \cdot \sqrt{\epsilon_R}} \quad (1)$$

где c – скорость света,

f_c – резонансная частота,

ϵ_R – диэлектрическая проницаемость.

Так, для резонансной частоты 120 ГГц и кремниевой подложке с $\epsilon_R=4,1$, длина линии будет равна около 310 мкм.

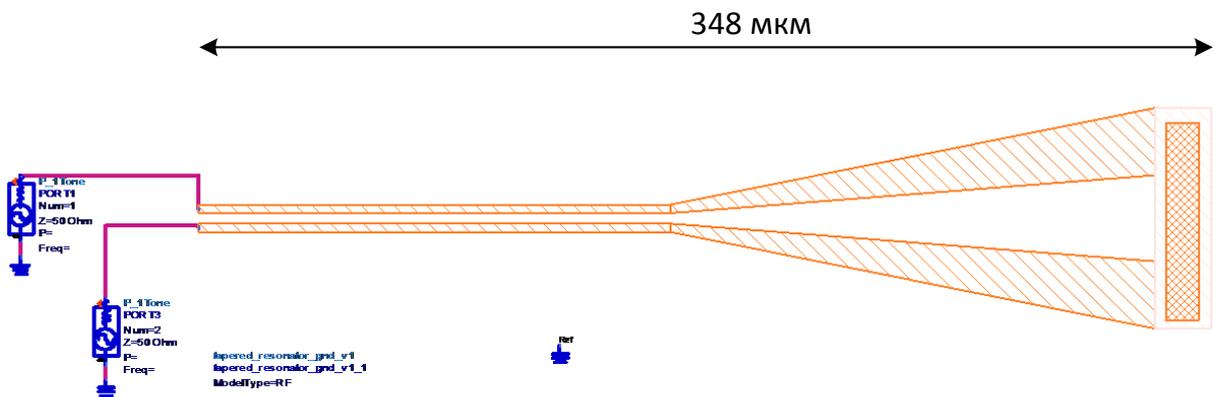
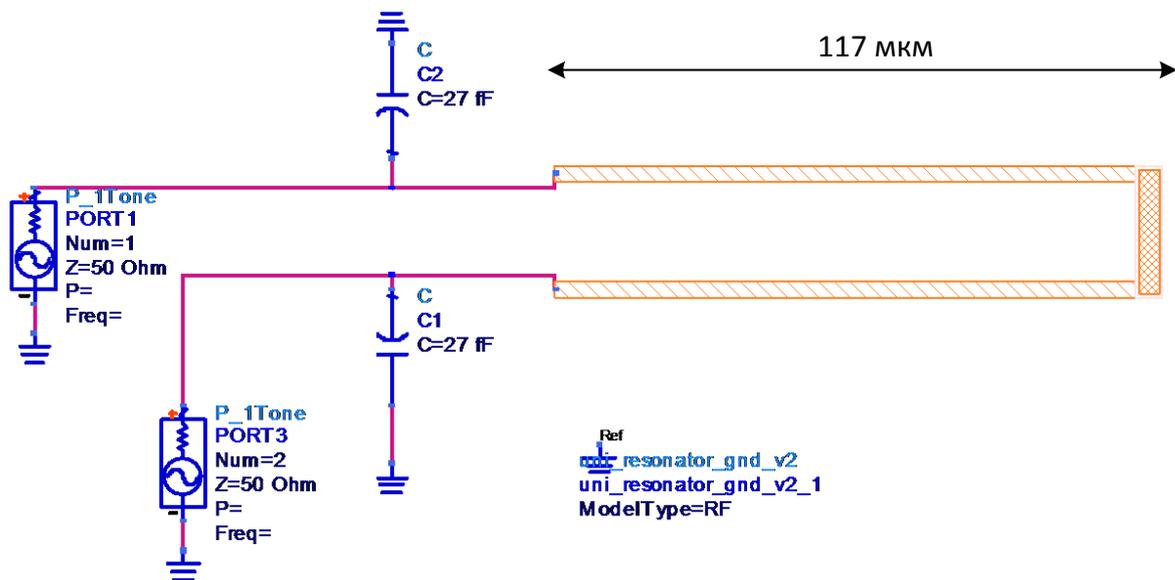
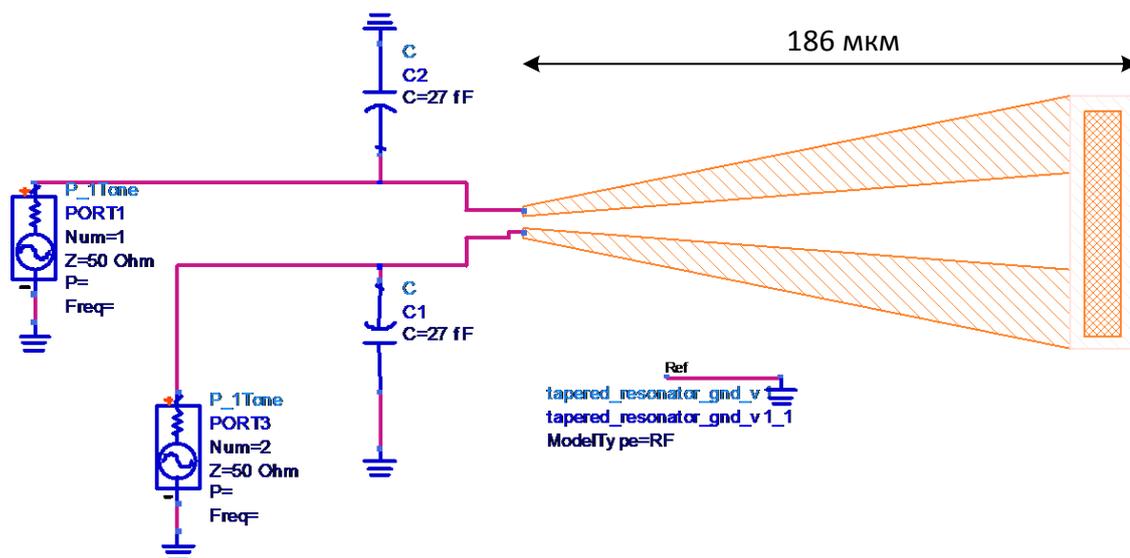


Рис. 2 – Линия передачи с увеличенной добротностью

При проектировании нагрузок, необходимо учитывать выходную коллекторную емкость транзисторов, которая может существенно повлиять на добротность таких линий. Например, выходная паразитная емкость смесителя на основе ячейки Гильберта равна 27 фФ [9]. Таким образом, вместо левой части четвертьволнового отрезка линии передачи, имеющей емкостной характер, может быть использована паразитная выходная емкость транзисторов, рисунок 3. Кроме этого, это существенно сэкономит занимаемую площадь на кристалле.



а)



б)

Рис. 3 – Схема моделирования LC нагрузки без оптимизации (а) и с оптимизацией добротности (б) в САПР Agilent ADS

На рис. 4 показаны результаты электромагнитного моделирования входного сопротивления, выраженного в дБ, от частоты в САПР Agilent ADS с использованием подложки SiGe БикМОП технологического процесса с проектными нормами 0,13 мкм. Как видно, оптимизация формы такой линии позволяет повысить добротность на 24%.

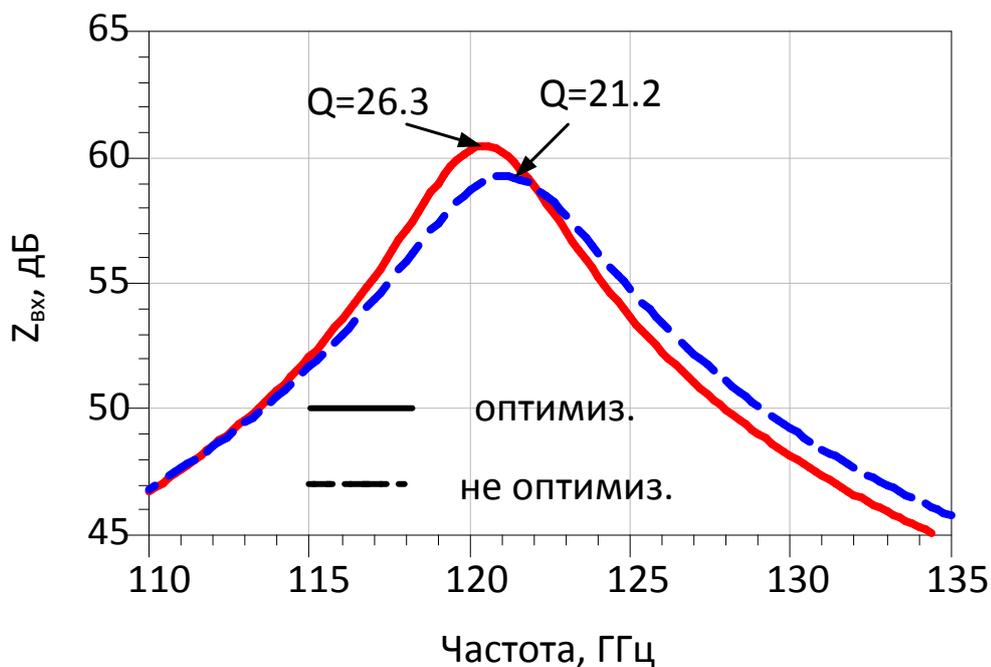


Рис. 4 – Результаты моделирования LC нагрузки в САПР Agilent ADS

Заключение

В работе были рассмотрены варианты LC нагрузок в схемах КВЧ диапазона. Было установлено, что оптимизация формы микрополосковой линии позволяет повысить добротность на 24%.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1797 «Разработка и исследование технологических, топологических и архитектурно-схемотехнических основ проектирования функциональных блоков крайне высокого диапазона частот и их практического использования в высокоскоростных системах связи и телекоммуникации».

Литература:

1. Будяков А.С., Будяков П.С., Прокопенко Н.Н. Сравнительный анализ активных SiGe смесителей миллиметрового диапазона // Проблемы разработки перспективных микро-и нанoeлектронных систем-2012 (МЭС-2012)., 2012. - С. 298–301.

2. Воропай, М.Н., Иванов, С.В. Синтез структуры и реализация широкополосного радиоприемного устройства в диапазоне рабочих частот

0,02... 18,00 ГГц для комплексов радиомониторинга [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2010, №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2010/194> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

3. Пустовалов, А.И. Двухканальное приемное устройство СВЧ диапазона [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2010, №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2010/195> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

4. Pi Z., Khan F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems // IEEE Communications Magazine. - 2011. - Т. 49 . - С. 101–107.

5. Европейский проект SUCCESS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.success-project.eu>

6. Европейский проект DOTFIVE [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dotfive.eu/>

7. Будяков А.С., Котельницкий А.В., Шишкунова Е.В. Состояние и перспективы развития КВЧ интегральных схем класса «система на кристалле» // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2011. С. 104-113. вып. 2 (225).

8. Lacher R. Development Status of Next Generation Automotive Radar in EU [Электронный ресурс]. URL: <http://www.itsforum.gr.jp/Public/J3Schedule/P22/lachner090226.pdf>.

9. Будяков, П.С., Прокопенко, Н.Н., Серебряков, А.И. СФ-блок смесителя КВЧ диапазона для высокоскоростных систем передачи данных // Известия ЮФУ. Технические науки. Вып. «Методы и средства адаптивного управления в электроэнергетике». - № 2 (127). – 2012 г. – С. 88-93

10. Prokopenko N.N., Budyakov P.S., Serebryakov A.I. Architecture of the Microwave Differential Operating Amplifiers with Paraphrase Output // International Conference on Signals and Electronic Systems / под ред. А. Pulka, Т. Golonek. - Gliwice: Ieee, 2010. - С. 165–168

11. Prokopenko N.N., Budyakov P.S., Serebryakov A.I. Analog controlled amplifiers and voltage multipliers based on modified Gilbert cells // Circuits and Systems for Communications (ECCSC), 2010 5th European Conference on. , 2010. - C. 140–144.

12. Marcu C., Niknejad A.M. A 60 GHz high-Q tapered transmission line resonator in 90nm CMOS // 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. : IEEE, 2008. - C. 775–778.