

# Сравнительный анализ активных SiGe смесителей миллиметрового диапазона

А.С. Будяков<sup>2,3</sup>, П.С. Будяков<sup>1</sup>, Н.Н. Прокопенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Проблемная лаборатория перспективных технологий и процессов ЦИПБ РАН и ЮРГУЭС, prokopenko@sssu.ru, budyakovp@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, alexbb@mail.ru

<sup>3</sup> ФГУП «НПП «Пульсар»

**Аннотация** — Рассматриваются особенности построения активных смесителей диапазона КВЧ на основе ячейки Гильберта и архитектуры с субгармонической накачкой. Сравнение проводится путем компьютерного моделирования с применением моделей элементов технологического процесса 0,13 мкм SiGe БиКМОП с граничной частотой n-p-n транзисторов 250 ГГц. Приведены результаты моделирования пассивных интегральных элементов диапазона КВЧ – симметрирующих устройств на 60 ГГц и 120 ГГц, направленного ответвителя на 60 ГГц.

**Ключевые слова** — смеситель частоты; монолитная интегральная схема; КВЧ; SiGe; миллиметровый диапазон частот.

## I. ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени полупроводниковые устройства диапазона крайне высоких частот (КВЧ) строились 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.

Стремительное развитие технологических процессов на основе кремния уже сегодня позволяет говорить о возможности и перспективах производства относительно недорогих высоко интегрированных систем на кристалле, использующих диапазон КВЧ. 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.

Сегодня технологические процессы БиКМОП с SiGe гетеробиполярными транзисторами позволяют обеспечить наиболее высокие качественные показатели КВЧ МИС смешанного типа благодаря использованию в аналоговой и цифровой части оптимизирован-

ных под конкретное применение интегральных элементов.

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 [1-4]. Актуальной задачей таких исследований является разработка и исследование схемотехники базовых функциональных узлов диапазона КВЧ на основе SiGe БиКМОП технологического процесса.

## II. ОБЗОР АКТИВНЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ ДИАПАЗОНА КВЧ

Смесители диапазона КВЧ широко применяются в приемопередатчиках для преобразования частоты. В передатчике смеситель применяется для преобразования сигнала промежуточной частоты (ПЧ) вверх на частоту радиочастотного (РЧ) сигнала с последующим усилением в усилителе мощности (УМ) и передачей в антенну. В этом случае для смесителя наиболее важными являются такие параметры, как выходная мощность и линейность.

Поскольку обеспечение мощного сигнала в КВЧ МИС на основе кремниевых технологий является относительно сложной задачей, то наибольшее применение нашли активные смесители частоты, благодаря меньшим требованиям к мощности гетеродина и положительному коэффициенту преобразования входного сигнала. Наибольшее распространение в SiGe КВЧ МИС нашла схема активного смесителя на основе ячейки Гильберта [5-8].

Сравнение параметров активных двойных балансных смесителей диапазона КВЧ

Ссылка на публикацию	[6], 2010	[11], 2005	[13], 2007
Архитектура	Гильберт	с многоярусным расположением гетеродина	с верхним расположением гетеродина
Технологический процесс	0,25 мкм SiGe	0,25 мкм SiGe	0,12 мкм SiGe
Центральная частота рабочего диапазона, ГГц	60	122,5	50
Входная мощность P1дБ, дБм	-5,6	-	-16,5
Коэффициент преобразования, дБ	2,2	23	9
Мощность гетеродина, дБм	4	3	6
Потребляемая мощность, мВт	33	150	23
Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	0,283	0,75	0,32

Среди двойных балансных субгармонических активных смесителей можно выделить три типа. Смеситель с многоярусным расположением гетеродина (three-level stacked-LO) [9-12], а также смесители с верхним (top-LO-configuration) [9,13] и нижним (bottom-LO-configuration) расположением гетеродина [9,14]. В соответствии с [9] наибольшие значения изоляции 2Г-ПЧ и наименьшая мощность гетеродина достигаются в схеме с многоярусным расположением гетеродина. Схемы с верхним и нижним расположением гетеродина могут работать при меньшем значении напряжения источника питания, но обеспечивают менее высокие значения изоляции.

В данной работе рассматривались смесители с многоярусной архитектурой, которым свойственна более высокая изоляция между входами.

В таблице 1 приведены основные параметры активных смесителей в диапазоне КВЧ. Из таблицы 1 можно сделать вывод, что номинальная мощность гетеродина субгармонического смесителя с многоярусным расположением гетеродина [11] меньше, чем у смесителя на основе ячейки Гильберта [6] при том, что его рабочая частота в два раза выше. Актуальной задачей является сравнение указанных типов смесителей при одинаковом значении рабочей частоты.

### III. СМЕСИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ЯЧЕЙКИ ГИЛЬБЕРТА

#### A. Схемотехника смесителя

На рис.1 показана схема смесителя диапазона КВЧ на основе ячейки Гильберта.

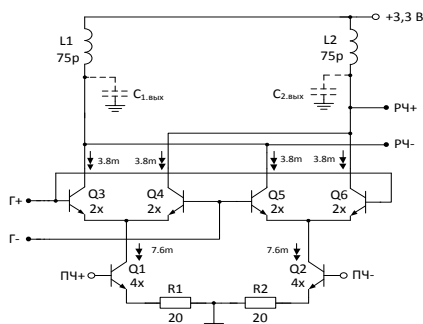


Рис. 1. Схема смесителя на основе ячейки Гильберта

В качестве нагрузки использованы сосредоточенные индуктивности L1-L2, которые образуют LC кон-

тур с выходными паразитными ёмкостями транзисторов Q3-Q6. Изменением номиналов резисторов R1, R2 схемы рис. 1 и значения индуктивной нагрузки L1, L2 коэффициент преобразования и линейность смесителя могут быть оптимизированы. Ток нижней дифференциальной пары оптимизируется для достижения максимальной граничной частоты транзисторов при заданной площади эмиттеров (его значение равно 7,6 мА для каждого транзистора Q1 и Q2 по рис. 1). Входное напряжение, соответствующее точке компрессии на 1 дБ и коэффициент преобразования можно оценить по следующим формулам [6]:

$$v_{1dB} = \frac{2\sqrt{2}\varphi_m}{5,25} (g_m R_E + 1)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{u_{вых}}{u_{вх}} = -\tanh\left(\frac{u_{Г}}{2\varphi_m}\right) \frac{R_n}{\frac{1}{g_m} + R_E} \quad (2)$$

где  $\varphi_m = 26$  мВ – температурный потенциал;

$g_m$  - крутизна нижней дифференциальной пары на транзисторах Q1, Q2;

$R_E, R_n$  - сопротивления эмиттерных резисторов и нагрузки соответственно.

Из формулы (1) следует, что линейность по входу увеличивается с повышением сопротивления эмиттерных резисторов, но коэффициент преобразования ( $K_{II}$ ) при этом снижается (2), данное обстоятельство следует учитывать при определении требований к параметрам смесителя.

Так по результатам моделирования в САПР Agilent ADS смесителя по рис. 1, при сопротивлении эмиттерных резисторов  $R1=R2=20$  Ом коэффициент преобразования  $K_{II}=2,2$  дБ, а входная точка компрессии на 1 дБ составила минус 6,3 дБм на частоте 120,5 ГГц.

#### B. Пассивное симметрирующее устройство

Для преобразования дифференциального РЧ выхода смесителя в однофазный и однофазного входа гетеродина в дифференциальный на частоте 120 ГГц используется симметрирующее устройство (СУ) Маршанда [15]. СУ Маршанда является широкополосным устройством с небольшим коэффициентом потерь и позволяет преобразовать однофазный сигнал в дифференциальный с помощью связанных  $\lambda/4$  отрезков линий передачи. Для уменьшения размера такой

структуры линии были скручены в меандр. Согласование входа и выхода устройства на 50 и 100 Ом обеспечивается выбором волновых сопротивлений для четной и нечетной моды связанных линий [14]. Схема такого СУ показана на рис. 2.

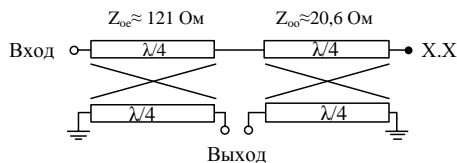


Рис. 2. Топология СУ Маршанда

Электромагнитное (ЭМ) моделирование показало, что СУ имеет вносимое ослабление 1,35 дБ, ошибку симметрирования фазы 4,5 градуса и ошибку симметрирования амплитуды 0,15 дБ в рабочем диапазоне частот от 110 ГГц до 130 ГГц. Размеры СУ в топологии составили 223x101 мкм<sup>2</sup>.

### С. Результаты моделирования

Моделирование выполнялось в САПР Cadence с учетом моделей топологии, которые были получены в САПР ADS Momentum. Все входы и выходы были согласованы с сопротивлением 50 Ом. Коэффициент преобразования ( $K_{П}$ ) достигает максимума при мощности гетеродина 6 дБм. При моделировании выходной точки компрессии частота сигнала на входе ПЧ выбиралась 0,5 ГГц, на входе гетеродина – 120 ГГц. Коэффициент преобразования моделировался при мощности ПЧ сигнала минус 30 дБм и мощности гетеродина 6 дБм.

В табл. 2 представлены параметры смесителя.

Таблица 2

Результаты моделирования смесителя рис. 1

Техпроцесс	0,13 мкм БИКМОП
Диапазон частот, ГГц	113...127
Ток потребления, мА	16,4@3,3В
Коэффициент преобразования, дБ	2,3
Выходная мощность Р1дБ, дБм	-5
Полоса пропускания ПЧ по уровню минус 3 дБ, ГГц	0,5...7,4
Г-РЧ изоляция, дБ	не менее 55
Мощность гетеродина, дБм	6
Тип входа	Г, РЧ – однофаз. ПЧ – дифферен.

## IV. СУБГАРМОНИЧЕСКИЙ СМЕСИТЕЛЬ

### А. Схематехника субгармонического смесителя

Ранее было показано, что смеситель на основе ячейки Гильберта имеет достаточно хорошие параметры по выходной мощности и Г-РЧ изоляции, но у него есть недостаток, заключающийся в высокой частоте и требуемой мощности (6 дБм) сигнала гетеродина. Для того, чтобы облегчить проектирование цепей, связанных с гетеродином, можно использовать субгармонический смеситель, использующий для преобразования вторую гармонику частоты гетеродина.

Из рассмотренных структур субгармонических смесителей была выбрана схема с многоярусным рас-

положением гетеродина. Схема обеспечивает наилучшую изоляцию от порта гетеродина к порту ПЧ, имеет относительно невысокие требования по мощности гетеродина и обеспечивает достаточно высокий коэффициент преобразования [11]. К недостаткам такой схемы относится ее многоярусность, которая требует большее напряжение питания.

На рис. 3а показана схема субгармонического смесителя с многоярусным расположением гетеродина. На базы транзисторов Q7-Q10 подается дифференциальный сигнал гетеродина с начальной фазой 0°/180°, который обозначен как синфазная компонента сигнала ( $\Gamma_I$  и  $\bar{\Gamma}_I$ ). Квадратурная составляющая с начальными фазами 90°/270° ( $\Gamma_Q$  и  $\bar{\Gamma}_Q$ ) подается на базы транзисторов Q3-Q6. На рис. 3б показан один цикл переключения транзисторных пар. Из него можно видеть, что квадратурный и синфазный сигнал после сложения образуют сигнал  $\Gamma_{1-Q}$ , имеющий в два раза меньший период, а значит в два раза большую частоту, чем в исходном сигнале.

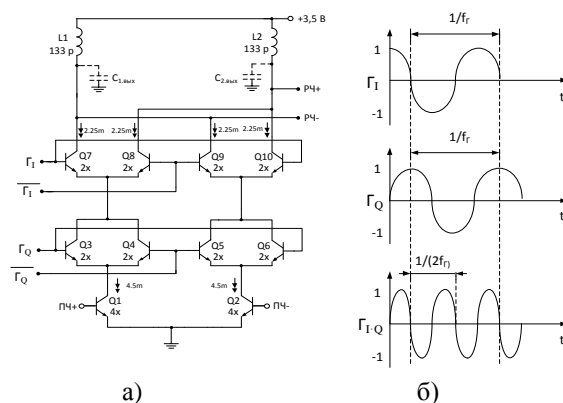


Рис. 3. Схема субгармонического смесителя с многоярусным расположением гетеродина (а) и временные диаграммы поясняющие принцип его работы (б)

Резисторы в цепях эмиттеров транзисторов Q1-Q2 были исключены из схемы для снижения напряжения питания. Нагрузкой смесителя служит LC контур, который образован индуктивностями L1-L2 и паразитными ёмкостями транзисторов Q7-Q10.

### В. СУ и квадратурный направленный ответитель

Для преобразования однофазного сигнала в дифференциальный используются СУ Маршанда [15]. Так как частота гетеродина в субгармоническом смесителе составляет 60 ГГц, то длина отрезков линий передачи СУ была увеличена в 2 раза. Размеры СУ в топологии составили 223x220 мкм<sup>2</sup>.

Для получения квадратурной Q и синфазной I компоненты был использован шлейфный квадратурный направленный ответитель, схема которого показана на рис. 4. На частоте 60 ГГц отрезки линий передачи  $\lambda/4$  занимают значительную площадь на кристалле, поэтому для снижения занимаемой площади были использованы  $\lambda/8$  и  $\lambda/12$  отрезки линий передачи с шунтирующими конденсаторами на концах линий [16]. На рис. 4 показана дифференциальная схема квадратурно-

го направленного ответвителя. Размеры направленного ответвителя в топологии составили  $238 \times 246 \text{ мкм}^2$ .

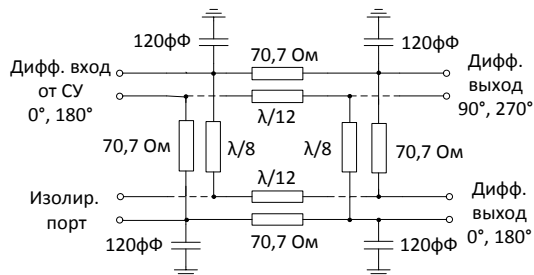


Рис. 4. Схема направленного ответвителя

По результатам ЭМ моделирования топологии направленного ответвителя по схеме рис. 4 в полосе частот 55...65 ГГц вносимое ослабление составляет 4,5...5 дБ, ошибка симметрирования фазы не более 4 градусов, ошибка симметрирования амплитуды не более 0,5 дБ, коэффициент отражения не более минус 11 дБ.

### С. Результаты моделирования

Все входы и выходы были согласованы на сопротивление 50 Ом. Коэффициент преобразования ( $K_p$ ) достигает максимума при мощности гетеродина 4 дБм. При моделировании выходной точки компрессии частота сигнала на входе ПЧ выбиралась 0,5 ГГц, на входе гетеродина – 60 ГГц. Коэффициент преобразования моделировался при мощности ПЧ сигнала минус 30 дБм и мощности гетеродина 4 дБм.

В табл. 3 показаны результаты моделирования субгармонического смесителя рис. 3а.

Таблица 3

Результаты моделирования смесителя рис. 3а

Техпроцесс	0,13 мкм БИКМОП
Частота, ГГц	103...133
Ток потребления, мА	10,2@3,5В
Коэффициент преобразования, дБ	5,2
Выходная мощность P1дБ, дБм	минус 12,4
Полоса пропускания ПЧ по уровню минус 3 дБ, ГГц	0,5...13
Г-РЧ изоляция, дБ	43
Мощность гетеродина, дБм	4
Тип входа	Г, РЧ – однофазные ПЧ – дифферен.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты моделирования смесителей на основе SiGe техпроцесса с минимальной проектной нормой 0,13 мкм с учетом влияния топологии на электродинамическом уровне строгости показывают, что на частоте 120 ГГц применение субгармонического смесителя позволяет снизить мощность гетеродина на 2 дБ в сравнении с архитектурой смесителя на основе ячейки Гильберта. При этом частота гетеродина субгармонического смесителя в два раза меньше, что упрощает построение схем формирования и передачи сигнала гетеродина. Недостатком субгармонического смесителя можно считать более высокое напряжение питания, что затрудняет использование эмиттерных резисторов для повышения входной точки компрессии на 1 дБ.

Частично работа проведена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по гранту № 14.740.11.1079 при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Европейский проект SUCCESS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.success-project.eu> (дата обращения: 09.06.2012).
- [2] Европейский проект DOTFIVE [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dotfive.eu/> (дата обращения: 09.06.2012).
- [3] 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. Вып. 2 (225). С. 104-113.
- [4] Lacher R. Development Status of Next Generation Automotive Radar in EU [Электронный ресурс]. URL: <http://b23.ru/k9ob> (дата обращения: 09.06.2012).
- [5] Mariano A. et al. A low power and high gain double-balanced active mixer with integrated transformer-based Baluns dedicated to 77 GHz automotive radar applications // Proceedings of the 8th IEEE International NEWCAS Conference 2010: IEEE, 2010. С. 81-84.
- [6] Elkhoully M. et al A 60 GHz wideband high output P1dB up-conversion image rejection mixer in 0.25 μm SiGe technology // 2010 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems: IEEE, 2010. С. 49-52.
- [7] Kenneth K.O. W-Band Active Down-Conversion Mixer in Bulk CMOS // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2009. Т. 19. № 2. С. 98-100.
- [8] Chen A.Y.-K. et al An 80 GHz High Gain Double-Balanced Active Up-Conversion Mixer Using 0.18 μm SiGe BiCMOS Technology // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2011. Т. 21.
- [9] T.-H. Wu. GaInP/GaAs HBT Sub-Harmonic Gilbert Mixers Using Stacked-LO and Leveled-LO Topologies // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 2007. Т. 55. С. 880-889.
- [10] Muller A. et al A 122 GHz SiGe active subharmonic mixer // European Gallium Arsenide and Other Semiconductor Application Symposium. 2005. С. 57-60
- [11] Muller A., Thiel M., Iron H. A 122 GHz SiGe active subharmonic mixer // EGAAS 2005. С. 57-60.
- [12] Jen-Yi Su et al Q-Band pHEMT and mHEMT Subharmonic Gilbert Upconversion Mixers // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2009. Т. 19. № 6. С. 392-394.
- [13] Kodkani, R.M. An Integrated 50-GHz SiGe Sub-Harmonic Mixer/Downconverter with a Quadrature Ring VCO // 2007 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. 2007. С. 223-226.
- [14] Mongia R.K. et al RF and Microwave Coupled-Line Circuits – Artech House Publishers. 2 edition, 2007. 549 c.
- [15] Sheng-Che Tseng et al Monolithic Broadband Gilbert Micromixer With an Integrated Marchand Balun Using Standard Silicon IC Process // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Part 2. Vol. 54. Issue 12. С. 4362-4371.
- [16] Haroun I. et al Experimental Analysis of a 60 GHz Compact EC-CPW Branch-Line Coupler for mm-Wave CMOS Radios // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2010. С. 211-213.