

УДК 621.375

**П.С. Будяков, Н.Н. Прокопенко, А.И. Серебряков****СФ-БЛОК СМЕСИТЕЛЯ КВЧ-ДИАПАЗОНА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

*Рассматривается 120 ГГц СФ-блок смесителя с преобразованием «вверх» на основе ячейки Гильберта по 0,13 мкм SiGe технологии. Для преобразования однофазного сигнала гетеродина в дифференциальный и дифференциального выходного сигнала в однофазный используются симметрирующие устройства (СУ) Маршанда, согласованные по входу и выходу на сопротивление 50 Ом. Выделение выходного полосового сигнала обеспечивается LC-контуром, в котором в качестве индуктивности используется микрополосковая линия передачи, в качестве конденсатора – выходная емкость транзисторов. Коэффициент преобразования смесителя составляет 2,2 дБ, выходная однодецибелльная точка компрессии – 5 дБм при мощности гетеродина 6 дБм. Ток потребления – 16,4 мА при напряжении питания 3,3 В.*

*Смеситель с преобразованием вверх; КВЧ-диапазон; SiGe-технологии.*

**P.S. Budyakov, N.N. Prokopenko, A.I. Serebryakov****MM-WAVE IP-BLOCK OF MIXER FOR HIGH-SPEED DATA TRANSMISSION SYSTEMS**

*Considered 120 GHz up conversion mixer based on Gilbert cell on 0,13 um SiGe technology. For convert a single-ended local oscillator signal to a differential and a differential output signal to a single-ended were used Marshand's baluns. Input and output of baluns match to 50 ohms resistance. For filter the output signal used a bandpass LC circuit, which an inductance is microstrip transmission line, capacitor is the output capacitance of transistors. Conversion gain is 2,2 dB, 1 dB output compression point is – 5 dBm at 6 dBm LO power. The consumption is 16,4 mA at a supply voltage 3,3 V.*

*Up conversion mixer; mm-wave; SiGe technology.*

**Введение.** Достижения в области систем связи привели к повсеместному использованию беспроводных линий в устройствах автоматики и датчиковых системах, что увеличивает объем и скорость передачи данных. В диапазоне крайне высоких частот (КВЧ) существуют полосы, которые при высоких качественных показателях можно использовать для организации высокоскоростных потоков передачи информации, включая трансляцию видеопотоков с нескольких видеокамер наблюдения, организацию с применением датчиковых систем транспортных потоков и т.п. Кроме того, широкая полоса допускает применение самых разнообразных схем скремблирования, помехоустойчивого кодирования, выбор оптимальных для передачи данных методов модуляции и множественного доступа, что обеспечивает возможность передачи информации с требуемой скоростью при относительно низком соотношении сигнал/шум. При уменьшении длины волны существенно снижаются габариты антенных систем. Таким образом, становится возможным полностью интегрировать приемопередатчик вместе с пассивными элементами и антенной на одном кристалле (СФ-блоке). Это открывает большие перспективы для создания высокоэффективных устройств организации беспроводного интерфейса датчиков и систем видеорегистрации.

В КВЧ-диапазоне дискретные компоненты и схемы реализовывались ранее на базе относительно дорогих техпроцессов группы III-V (GaAs и т.д.) [1]. Сегодня достижения в менее дорогих кремниевых (как КМОП, так и SiGe) техпроцессах показывают реальность увеличения предельных частот транзисторов ( $f_T$ ) до 250–300 ГГц при большом уровне интеграции, что позволяет использовать

данные технологии для устройств, работающих в КВЧ-диапазоне. Базовым узлом этих устройств связи является смеситель сигналов, определяющий предельные скорость и объем передачи данных.

В настоящей работе рассматривается смеситель с преобразованием «вверх» на основе ячейки Гильберта по 0,13 мкм SiGe-технологии с  $F_T$ -транзисторов 250 ГГц [2]. Схема включает симметрирующее устройство (СУ) Маршанда для сигнала гетеродина ( $\Gamma$ ) и радиочастотного (РЧ) сигнала и индуктивную нагрузку в коллекторах выходных транзисторов ячейки Гильберта (рис. 1).

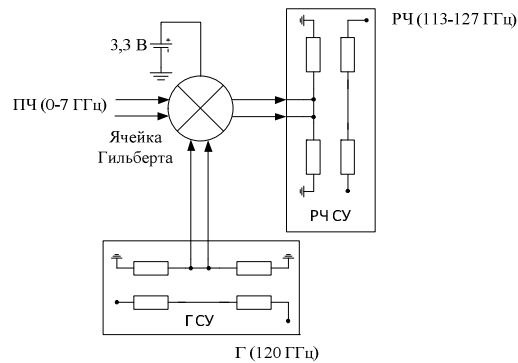


Рис. 1. Структурная схема смесителя

**Особенности смесителя КВЧ-диапазона.** Смеситель проектировался на основе классической ячейки Гильберта (рис. 2). Данная архитектура выполняет функцию перемножения в четырех квадрантах, так как и сигнал гетеродина и РЧ-сигнал дифференциальные и не имеют постоянного напряжения смещения. Когда ячейка Гильберта применяется как смеситель с преобразованием «вверх», нижняя дифференциальная пара используется для подачи на ее базы малого сигнала РЧ, а верхние (переключающие транзисторы) – для сигнала гетеродина. Верхние транзисторы в основном предназначены для направления токов в два нагрузочных резистора. Смесители, реализуемые по данной архитектуре, имеют те же свойства, что и двойные балансные смесители – подавляют сигналы РЧ и гетеродина в выходном порту РЧ. Кроме того, благодаря полностью дифференциальной структуре схема устойчива к синфазным помехам.

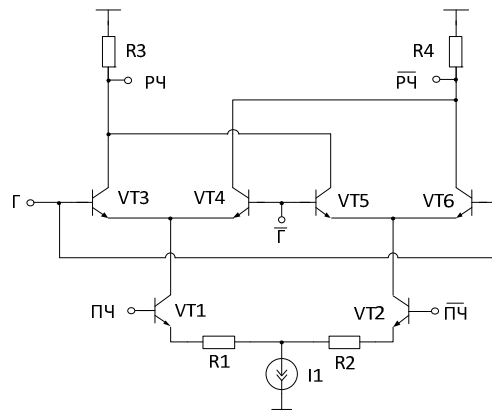


Рис. 2. Классическая схема ячейки Гильберта

Так как ячейка Гильберта (см. рис. 2) является многоярусной структурой, для ее использования при малых напряжениях питания и получения высоких характеристик необходима ее модернизация. Резисторы R3-R4 в коллекторах верхних транзисторов могут быть заменены LC контуром, что кроме сохранения напряжения питания отфильтровывает выходной сигнал и оставляет запас напряжения коллектор-база транзисторов VT3-VT6. Для того чтобы не использовать большие значения индуктивности на резонансной частоте и сохранить площадь кристалла, вместо сосредоточенной емкости здесь используется выходная емкость транзисторов. Для уменьшения напряжения питания можно исключить источник тока П. Для повышения линейности по входу, вводятся резисторы R1-R2 в цепь эмиттеров нижней дифференциальной пары на транзисторах VT1-VT2 (рис. 2).

Так как входной сигнал является полосовым, то не требуется подавлять зеркальную частоту. Выходным же сигналом будет являться напряжение, модулированное входным полосовым сигналом на частоте 120 ГГц.

Постоянные напряжения смещения на входах смесителя задаются с помощью схемы (рис. 3).

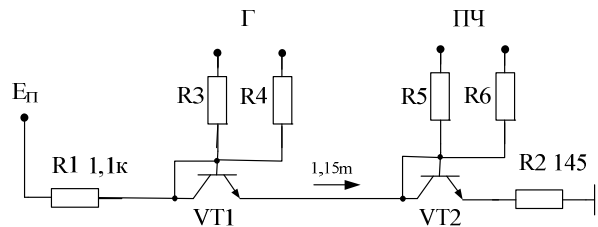


Рис. 3. Схема установления статического режима смесителя

Изменением значения эмиттерных резисторов схемы (см. рис. 2) и значения индуктивной нагрузки коэффициент преобразования и линейность могут быть оптимизированы. Ток нижней дифференциальной пары оптимизируется для достижения максимального  $F_T$ -транзистора (его значение равно 7,6 мА для каждого транзистора VT1 и VT2 (см. рис. 2)). Площади эмиттеров верхних переключающих транзисторов VT3-VT6 необходимо уменьшить в два раза по сравнению с нижними для достижения максимального  $F_T$ -транзистора, так как ток в ветви делится между ними поровну. Однодецибелную точку компрессии, которая определяет линейность по входу, можно рассчитать по следующей формуле [3]:

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

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

$g_m$  – крутизна нижней дифференциальной пары на транзисторах VT1, VT2;

$R_E$  – сопротивление эмиттерных резисторов

Из формулы (1) следует, что однодецибелная точка компрессии увеличивается с увеличением сопротивления эмиттерных резисторов, но коэффициент преобразования при этом падает из-за уменьшения крутизны  $g_m$ .

При величине эмиттерных резисторов  $R1=R2=20$  Ом промоделированный с помощью пакета Agilent ADS коэффициент преобразования равен 2,2 дБ, а входная однодецибелная точка компрессии равна -6,3 дБм на частоте 120,5 ГГц.

**Резонатор.** Вместо сосредоточенной емкости в резонаторе используется выходная емкость транзисторов VT3-VT6 (см. рис. 2), которая как показало моделирование составила 22,4 фФ на каждом выходе. Согласно формуле (2) для резонирования на центральной частоте 120 ГГц необходимо иметь величину индуктивности  $L$ , равную 78,5 пГн:

$$L = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_0^2 \cdot C}, \quad (2)$$

где  $f_0$  – частота резонанса;

$C$  – выходная емкость транзисторов VT3, VT5.

Столь малую индуктивность можно реализовать с помощью отрезка микрополосковой линии на верхнем металле техпроцесса. Электромагнитное (ЭМ) моделирование показало, что длина такой микрополосковой линии должна быть равна 119 мкм при ширине 3 мкм (рис. 4,а). На рис. 4,б показаны результаты 2,5D ЭМ моделирования в программе Momentum.

**Симметрирующее устройство Маршанда.** Для конвертирования дифференциального РЧ выхода смесителя в однофазный и однофазного входа гетеродина в дифференциальный в диапазоне частот 120 ГГц используется симметрирующее устройство (СУ) Маршанда [4].

СУ Маршанда является широкополосным устройством с небольшим коэффициентом потерь. Он конвертирует однофазный сигнал в дифференциальный с помощью связанных четвертьволновых отрезков линий передачи. Для того чтобы уменьшить размер такой структуры, можно скрутить линии в меандр. Согласование входа и выхода устройства на 50 и 100 Ом происходит путем изменения ширины полосковых линий и расстояния между связанными линиями. Топология такого СУ показана на рис. 5. При ЭМ моделировании устройство показало 1,35 дБ потерь, 4,5 градусов разбаланс по фазе и 0,15 дБ разбаланс по амплитуде. Диапазон рабочих частот от 110 ГГц до 130 ГГц.

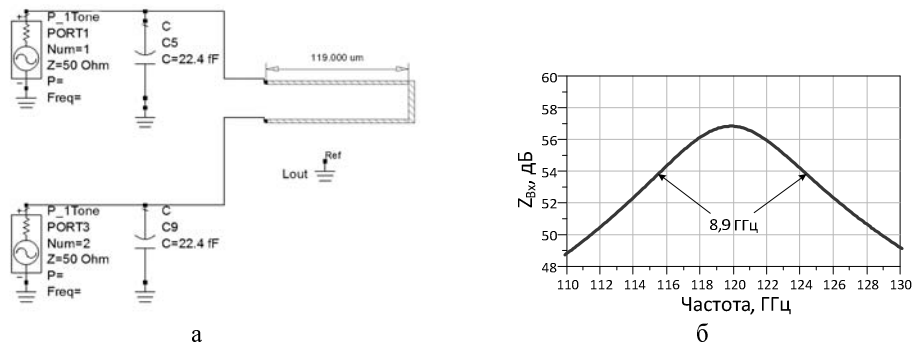


Рис. 4. Схема для моделирования резонатора (а) результаты моделирования входного сопротивления резонатора (б)

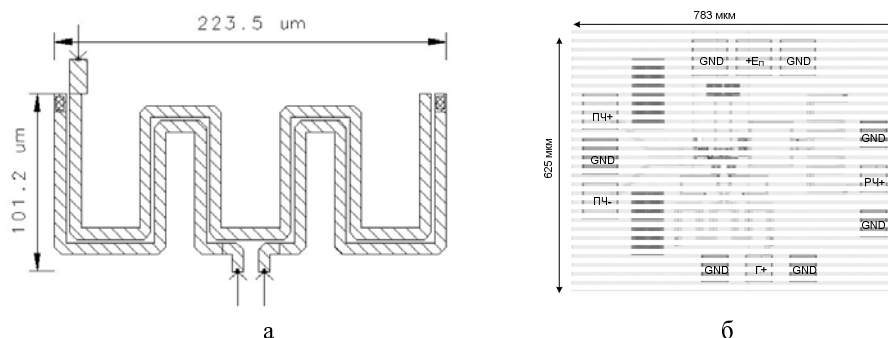


Рис. 5. Топология СУ Маршанда (а) и кристалла с контактными площадками (б) в среде Cadence Layout XL

**Согласование портов.** Для минимизации потерь мощности из-за разницы сопротивлений требуется согласовать выходы и входы на значение 100 Ом, являющееся выходным сопротивлением СУ. Для согласования использовались LC сосредоточенные элементы. На рис. 6 показаны схемы согласования порта гетеродина и РЧ-порта. Схема рис. 6,а – L согласование, схема рис. 6,б – это емкостной трансформатор с выводом из средней точки [5].

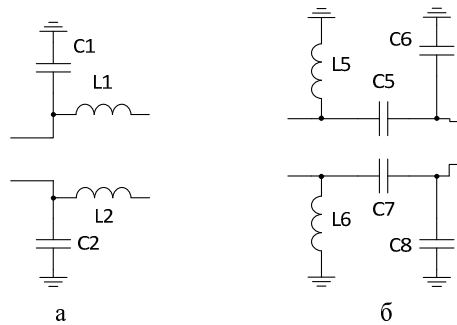


Рис. 6. Схема согласования порта гетеродина (а) и РЧ-порта (б)

**Моделирование и топология.** Схема смесителя с цепями согласования, установления статического режима и СУ показано на рис. 7.

Схема (см. рис. 7) была промоделирована в пакете Agilent ADS и Cadence Virtuoso. ЭМ моделирование полосковых линий передачи выполнялось в среде Momentum, после получения S параметров, данные были импортированы в Cadence. На рис. 5,б показана топология смесителя (рис. 7), спроектированная среде Cadence Layout XL. На топологии обозначены контактные площадки и соответствующие им выводы. Моделирование, с учетом паразитных параметров, показало следующие характеристики. Коэффициент преобразования ( $K_p$ ) достигает максимума при мощности гетеродина  $P_{LO}=6$  дБм.

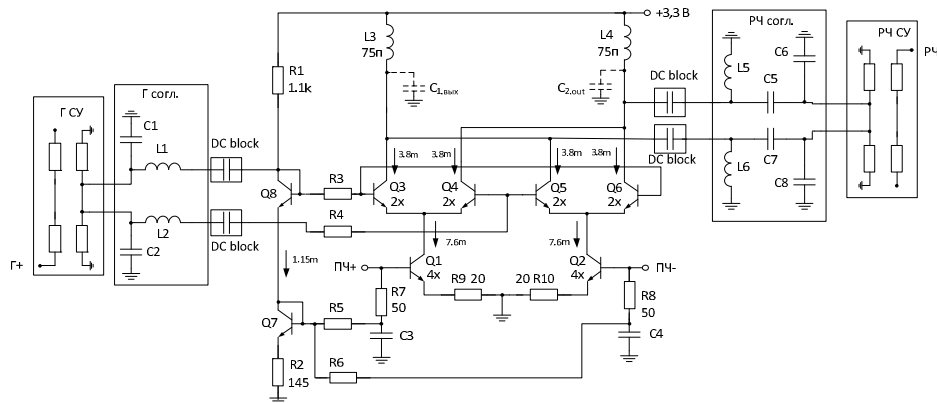


Рис. 7. Схема смесителя Гильберта с цепями согласования

С увеличением частоты  $K_p$  уменьшается, частота среза  $-3$  дБ равна 7,4 ГГц. Выходная точка компрессии, точка, где усиление снижается на 1 дБ, равна  $-5,1$  дБм. Мощность насыщения равна 0 дБм. Изоляции между гетеродином и входным портом равна  $>78$  дБ, изоляция между гетеродином и выходным портом  $>55$  дБ.

В табл. 1 представлены характеристики смесителя.

Таблица 1

Результаты моделирования в САПР Agilent ADS

Техпроцесс	0,13 мкм БиКМОП USB/LSB
Диапазон частот (ГГц)	113–127
Ток потребления (мА)	16.4@3.3В (54.1мВт)
Коэффициент преобразования (дБ)	2.2/2.3
Выходная 1дБ точка компрессии (дБм)	–5.1/-5
Входная 1дБ точка компрессии (дБм)	–6.3
Полоса пропускания ПЧ по уровню минус 3 дБ (ГГц)	0.5–7.4
Г-РЧ изоляция (дБ)	>55
Мощность гетеродина (дБм)	6
Тип входа	Г, РЧ – недифференциальные ПЧ – дифференциальный

**Заключение.** Разработан СФ-блок смесителя с преобразованием «вверх» на основе ячейки Гильберта с рабочей частотой 120 ГГц по SiGe технологии с проектной нормой 0,13 мкм. Результаты моделирования показали, что смеситель имеет высокие параметры и может использоваться в радиопередатчиках миллиметрового диапазона для устройств автоматики нового поколения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вишневецкий В., Фролов С., Шахнович И.* Миллиметровый диапазон как промышленная реальность // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 3. – С. 70-79.
2. IHP – Innovations for High Performance Microelectronics: SiGe:C BiCMOS technologies [Электронный ресурс] (<http://www.ihp-ffo.de/12.0.html>). Проверено 08.12.2011.
3. *Elkhouly M.* “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 (SiRF) / New Orleans, LA, 2010. – С. 49-52.
4. *Sheng-Che Tseng.* Monolithic Broadband Gilbert Micromixer With an Integrated Marchand Balun Using Standard Silicon IC Process // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2006. – Vol. 54, Issue 12, Part 2. – С. 4362-4371.
5. *Thomas H. Lee.* The design of CMOS radio – frequency integrated circuits // Н Thomas. – P. 86-113.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Крутччинский.

**Будяков Петр Сергеевич** – Проблемная лаборатория перспективных технологий и процессов Центра исследования проблем безопасности Российской академии наук и Южно-Российского государственного университета экономики сервиса; e-mail: [budyakovp@gmail.com](mailto:budyakovp@gmail.com); 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147; тел.: +79185056136; лаборант-исследователь.

**Прокopenko Николай Николаевич** – e-mail: [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru); тел.: +78636222037; ректор ЮРГУЭС; кафедра информационных систем и радиотехники; заведующий кафедрой.

**Серебряков Александр Игоревич** – e-mail: [sashaag@mail.ru](mailto:sashaag@mail.ru); тел.: +79034346279; научный сотрудник.

**Budyakov Peter Sergeevich** – Laboratory of perspective technologies and processes of the Center of researches of problems of safety of Russian Academy of Science and South Russia State University of Economics and Service; e-mail: [budyakovp@gmail.com](mailto:budyakovp@gmail.com); 147, Shevchenko street, Shakhty, 346500, Russia; phone: +79185056136; research-laborant.

**Prokopenko Nikolay Nikolaevich** – e-mail: [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru); phone: +78636222037; Rector of the SRSUES, the department of information systems and radioengineering; head of department.

**Serebryakov Alexander Igorevich** – e-mail: [sashaag@mail.ru](mailto:sashaag@mail.ru); phone: +79034346279; scientist.