

СВЧ КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЕ МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ: ПРЕИМУЩЕСТВА И ДОСТИЖЕНИЯ

В. Немудров, д.т.н., М. Бычков, Л. Ионов, И. Малышев, к.т.н., И. Мухин, к.т.н.,
В. Репин, к.т.н., Р. Шабардин, к.т.н. iimukhin@mri-progress.ru

В 90-х годах прошлого столетия компания IBM (США) проводила исследования технологий легирования области базы биполярного транзистора примесью германия. Их результатом стало появление технологии СВЧ кремний-германиевых (SiGe) монокристаллических интегральных микросхем (МИС), которая в дальнейшем получила широкое развитие во многих ведущих зарубежных полупроводниковых фирмах [1, 2]. О преимуществах SiGe-технологии и современных решениях на ее основе рассказывается в статье.

SiGe гетеропереходный биполярный транзистор (ГБТ) по частоте единичного усиления по току f_T существенно (в несколько раз) превосходит транзистор на основе "классической" биполярной технологии. Например, у SiGe ГБТ фирмы INP Microelectronics (Германия), изготовленных по технологиям 0,25 и 0,13 мкм, частоты f_T составляют, соответственно, 190 и 300 ГГц [3] (f_T транзисторов на базе стандартной биполярной технологии не превышает 20–30 ГГц).

По динамическим характеристикам SiGe-технология выдерживает конкуренцию с доминирующей сегодня GaAs СВЧ-технологией, однако уступает ей по максимальной величине напряжения питания (не более 5–1,8 В в зависимости от частоты f_T для разных типов транзисторов на основе SiGe-технологии 0,25 мкм). Возможность использования базиса БИКМОП добавляет SiGe-технологии очевидное преимущество перед GaAs-технологией. Оно заключается в существенном увеличении степени интеграции аналого-цифровых МИС, в том числе типа "система на кристалле", включающих как СВЧ-аналоговые схемы, в основном на базе SiGe ГБТ, так и быстродействующие цифровые КМОП-блоки (например, процессоры, память и др.). Так, компания IBM в шестом поколении SiGe БИКМОП технологического процесса 9HP объединила SiGe ГБТ с $f_T=300$ ГГц и КМОП-структуры с минимальными размерами 0,09 мкм [4]. Такая технология позволяет

проектировать МИС с оценочной степенью интеграции ~10 тыс. SiGe ГБТ и 10 млн. КМОП-транзисторов.

С начала 2000 годов за рубежом для ряда направлений аппаратуры гражданского и специального назначения характерна тенденция постепенного замещения GaAs СВЧ МИС кремний-германиевыми в диапазоне частот до 70–100 ГГц. Агентством по перспективным исследованиям Министерства обороны США были приняты программы на период 2003–2014 годов по развитию SiGe ГБТ с f_T до 350 ГГц для аналого-цифровых SiGe БИКМОП МИС с частотами ~10 ГГц [5].

В сегменте гражданского применения компания IBM производит SiGe БИКМОП МИС для аппаратуры Wi-Fi, навигации, 4G LTE, оптической связи со скоростью 40 Гбайт/с, мобильных телефонов [4], компания TowerJazz – для Bluetooth, W-CDMA, автомобильных радаров, сотовых телефонов, цифрового телевидения [6], компания STMicroelectronics – для спутниковой связи, приемо-передатчиков локальных сетей связи, цифрового телевидения и др. [7], а компания Infineon – для автомобильных радаров [8].

В [9] приведен обзор комплектов МИС для приемопередающих модулей АФАР гражданского (метео, автомобильные, связные в диапазоне частот 20–77 ГГц) и специального (корабельная космическая связь и др. для X- и K_d-диапазонов частот) применения.

Использование SiGe МИС БИКМОП, в том числе типа "система на кристалле", вместо GaAs МИС на порядок

уменьшает количество модулей для отдельных типов аппаратуры и на 90% снижает стоимость комплекта МИС [10].

Прогноз развития СВЧ МИС за рубежом на 2013–2018 годы [11] показывает, что:

- из 60 поставщиков СВЧ МИС в 2013 году 38% поставляли GaAs МИС, 18% – SiGe МИС; к 2018 году прогнозируется уменьшение на 7% поставщиков GaAs МИС и равное увеличение поставщиков SiGe МИС;
- 13 компаний поставляют одновременно SiGe и GaAs МИС;
- отмечен в 2013 году и прогнозируется до 2018 года ежегодный прирост продаж SiGe-микросхем на уровне 83%.

В 2006 году работы по созданию отечественных SiGe БикМОП-микросхем были начаты в ОАО "НИИМА "Прогресс" – центре проектирования СБИС, а впоследствии также в ОАО "НИИМЭ и Микрон", ОАО "НПП "Пульсар", ЗАО "ПКК "Миландр" и др. На первом этапе освоения методологии проектирования SiGe БикМОП СВЧ-микросхем в диапазоне частот до 2 ГГц микросхемы, разработанные ОАО "НИИМА "Прогресс", изготавливались в компании IHP Microelectronics (Германия) по технологии SGB25V [3]. Сейчас разработки ориентированы в основном на отечественную технологическую базу: компания "НИИМЭ и Микрон" встроила SiGe ГБТ в существующую на предприятии 0,18 мкм КМОП цифровую технологию, при этом характеристики созданной SiGe БикМОП технологии близки по значениям к технологии SGB25V [12].

Сегодня отечественные СВЧ и ВЧ приемопередающие тракты строятся преимущественно на основе универсальных GaAs и SiGe зарубежных микросхем общего применения малой и средней степени интеграции (усилители, смесители, модуляторы/демодуляторы, синтезаторы частот и др.). Эта тенденция, очевидно, сохранится и при планировании работ в рамках импортозамещения. В то же время, при наличии верифицированных схемных решений SiGe типовых узлов

радиотрактов в виде СФ-блоков (в зарубежной терминологии IP-блоков), естественен переход к разработке отечественных многофункциональных специализированных микросхем СВЧ-трактов.

При разработке SiGe МИС компания "НИИМА "Прогресс" ориентировалась на следующие направления СВЧ-аппаратуры: приемопередающие тракты аппаратуры связи, навигации, цифрового телевидения диапазона частот до 6 ГГц; приемопередающие тракты радиолокационной аппаратуры АФАР (диапазон частот до 10–18 ГГц).

В рамках первого направления микросхемы на основе SiGe БикМОП 0,18 мкм технологии предпочтительны при построении высококачественных трактов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) по сравнению с технологией аналогового 0,18 мкм КМОП-процесса (с точки зрения уровня шума, идентичности параметров компонентов, тока потребления при заданном коэффициенте усиления и др.) [13]. В ряде случаев SiGe БикМОП МИС будут использоваться совместно с GaAs и GaN МИС малошумящих усилителей (МШУ), усилителей мощности, ключей и других схем, работающих в режиме высоких уровней сигналов.

Что касается микросхем для модулей АФАР, то есть определенные проблемы построения SiGe БикМОП основных элементов модулей (ключей, фазовращателей, аттенюаторов), работающих при высоких уровнях сигналов. Пока в рамках этого направления доминируют GaAs МИС, предстоит длительная совместная деятельность разработчиков РЭА и МИС по замене GaAs МИС (например, фазовращателей, аттенюаторов) на SiGe БикМОП микросхемы.

Компания "НИИМА "Прогресс" проектирует различные типы SiGe СВЧ-микросхем, которые разделяются на два основных класса (общего применения и специализированные микросхемы высокой степени интеграции), а также СФ-блоки, как самостоятельное направление поддержки и развития перспективных разработок (рис.1). Микросхемы каждого типа имеют несколько

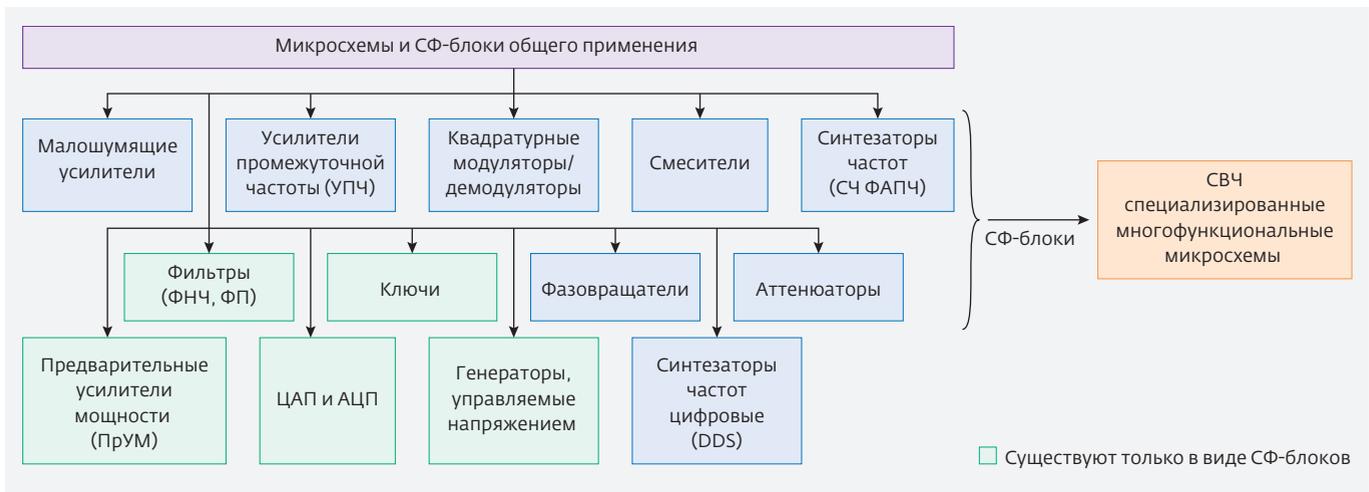


Рис.1. СВЧ SiGe устройства, разрабатываемые в ОАО "НИИМА "Прогресс"

модификаций, которые различаются по функциональной сложности и параметрам. Приведем несколько примеров:

- малошумящие усилители, которые различаются, в первую очередь, диапазоном частот (от 1 до 10 ГГц), уровнем шума (от 1,3 до 3,5 дБ), потребляемым током (от 6 до 30 мА), структурой (например, наличием схемы типа активный балун на входе, возможностью регулировки усиления и др.);
- смесители (СМ) в диапазоне частот 2–12 ГГц, которые различаются уровнем шума, динамическим диапазоном и схемотехническим построением входных и выходных каскадов;
- генераторы, управляемые напряжением (ГУН), для различных диапазонов частот до 12 ГГц с уровнем фазового шума $-85...-96$ дБн/Гц (при отстройке 100 кГц);
- фазовращатели на шесть разрядов, различные по принципу построения (векторные с управлением током смещения от собственного цифроаналогового преобразователя или на основе переключения LC-звеньев фильтров) и диапазону частот (L, S, C, X) [14];
- аттенюаторы активного (с усилением) и пассивного типа для диапазонов частот до 10 ГГц, на пять или шесть разрядов, с шагом 0,5–1 дБ;
- квадратурные модуляторы, которые различаются диапазонами частот (0,8–2,7 ГГц и 0,1–6 ГГц) и токами потребления;
- квадратурные демодуляторы для диапазонов частот 0,8–2,7 ГГц, 0,7–3,8 ГГц и 0,1–6 ГГц, различные по структуре (наличие дополнительных каскадов умножителей, I- и Q-усилителей с регулировкой усиления);
- синтезаторы частот – функционально законченные системы на основе ФАПЧ, различные по структуре

(наличие ГУН, целочисленный или дробный) и диапазону частот до 10 ГГц, включают также отдельные фрагменты синтезаторов, например предварительные делители частоты для диапазона 12–18 ГГц на основе SiGe ГБТ;

- программируемые фильтры нижних частот (ФНЧ) и полосовые фильтры (ПФ), синтезированные заменой индуктивностей пассивных прототипов гираторными эквивалентами на основе преобразователей напряжение-ток; изменение частотных характеристик фильтров выполняется цифро-аналоговым преобразователем, предусмотрена система стабилизации частотных характеристик на основе системы ФАПЧ и дополнительного опорного ФНЧ;
- ключи и переключатели на МОП-транзисторах с частотой до 10 ГГц и динамическим диапазоном до 20 дБм;
- АЦП с тактовой частотой до 1 ГГц и разрядностью 8 бит;
- ЦАП с тактовой частотой до 1,5 ГГц и разрядностью 14 бит.

В настоящее время по указанным на рис.1 направлениям разработано и верифицировано изготовленными экспериментальными образцами примерно 30 типов СФ-блоков, которые при необходимости могут быть представлены в соответствии с нормативным документом предприятия. По предварительной заявке могут быть переданы результаты моделирования и основные характеристики экспериментальных образцов СФ-блоков, а также топологическая документация в базе данных проектирования предприятия-изготовителя.

Компания "НИИМА "Прогресс" разработала и поставляет для проведения исследований в аппаратуре комплект СВЧ SiGe БикМОП микросхем общего

применения, среди них можно выделить наиболее востребованные (полная номенклатура МИС и их характеристики приведены на сайте предприятия www.mri-progress.ru):

- малошумящий усилитель K1366УВ1У (диапазон частот до 2 ГГц, коэффициент шума 1,8 дБ, потребляемый ток 5 мА), который по потребляемой мощности существенно ниже МШУ на полевых транзисторах аналогичного частотного диапазона;
- смеситель 1327ПС1У (0,05–2 ГГц), построенный по "классической" схеме двойного балансного перемножителя, по своим электрическим характеристикам соответствует аналогу AD8342 фирмы Analog Devices;
- усилитель промежуточной частоты 1327УР1У – по характеристике "площадь усиления" (произведение граничной частоты равной 1600 МГц на коэффициент усиления $K_u = 55$ дБ) не имеет аналогов среди отечественных микросхем;
- квадратурный модулятор 1327МА015 и демодулятор 1327МВ015 (зарубежные аналоги, соответственно, ADL5375 и ADL5380 фирмы Analog Devices) в наибольшей степени используют преимущества SiGe-технологии в части идентичности параметров компонентов при обработке I- и Q-сигналов; этот тип микросхем является основой приемо-передающих СВЧ-радиотрактов диапазона частот 100–6000 МГц и вызывает особый интерес у разработчиков РЭА;
- синтезаторы частот на основе системы ФАПЧ K1367ПЛ1У, K1367ПЛ2У, K1367ПЛ3У для диапазонов частот 500–6000 МГц, различные по структуре (соответственно целочисленный, дробный, целочисленный с внутренним ГУН);
- фазовращатель 1338ХК6У, предназначенный для использования в частотном диапазоне до 1,6 ГГц, построен по векторной схеме сложения ортогональных сигналов с заданной амплитудой, чем обеспечивается высокая точность задания фазы сигнала;
- аттенуатор 1338ХК8У для использования в частотном диапазоне до 2 ГГц, схемотехнически построен с использованием последовательно-параллельных дифференциальных пассивных звеньев делителя; после первого звена аттенюации на 0, 8, 16 или 24 дБ сигнал усиливается, что позволяет обеспечить приемлемый коэффициент шума для малого сигнала, сохраняя возможность работы в широком динамическом диапазоне; МИС включает также схему цифрового управления;
- синтезатор частот прямого преобразования 1367МН015 с частотой преобразования 1,2 ГГц (DDS) [15] (функциональный аналог микросхемы AD9912) содержит: входной буфер, аккумулятор частоты и фазы,

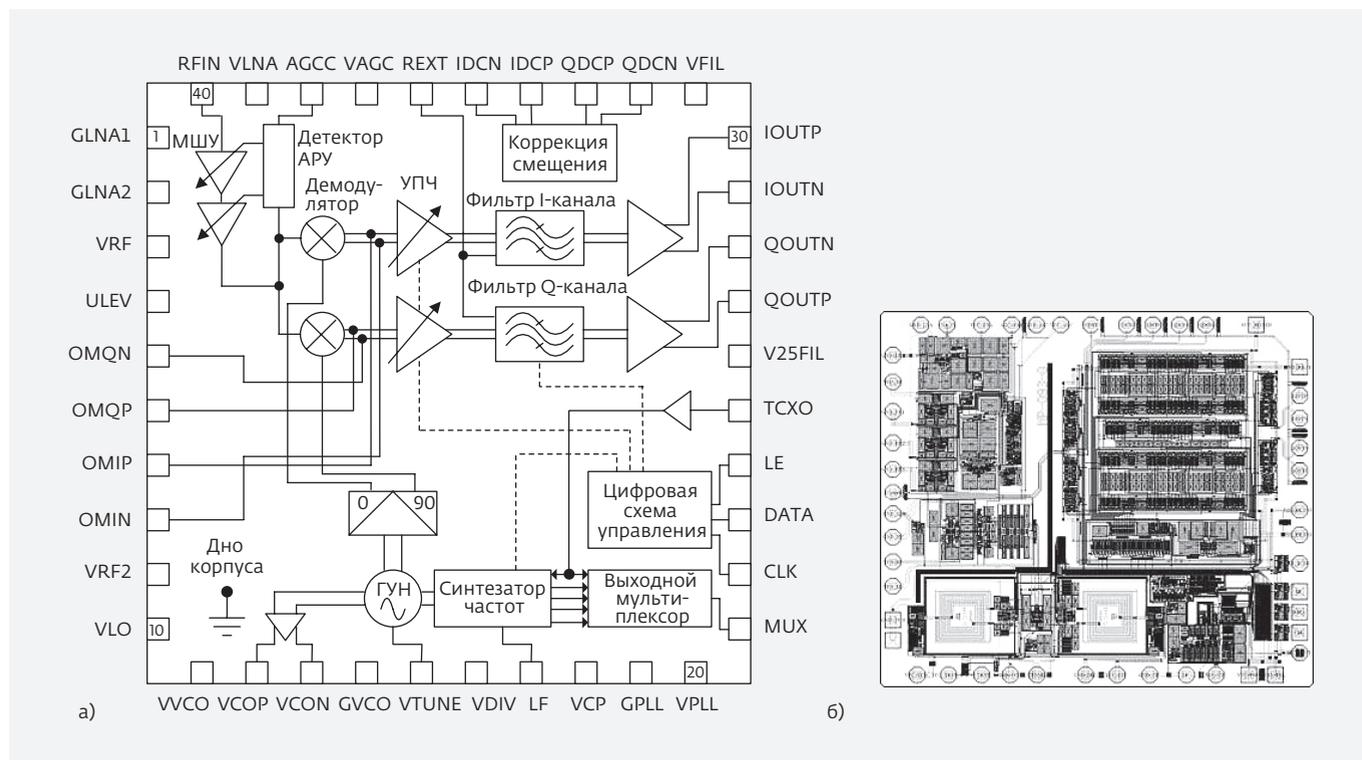


Рис.2. Микросхема аналогового приемника 1328ХБ3У: а – упрощенная структура, б – топология кристалла

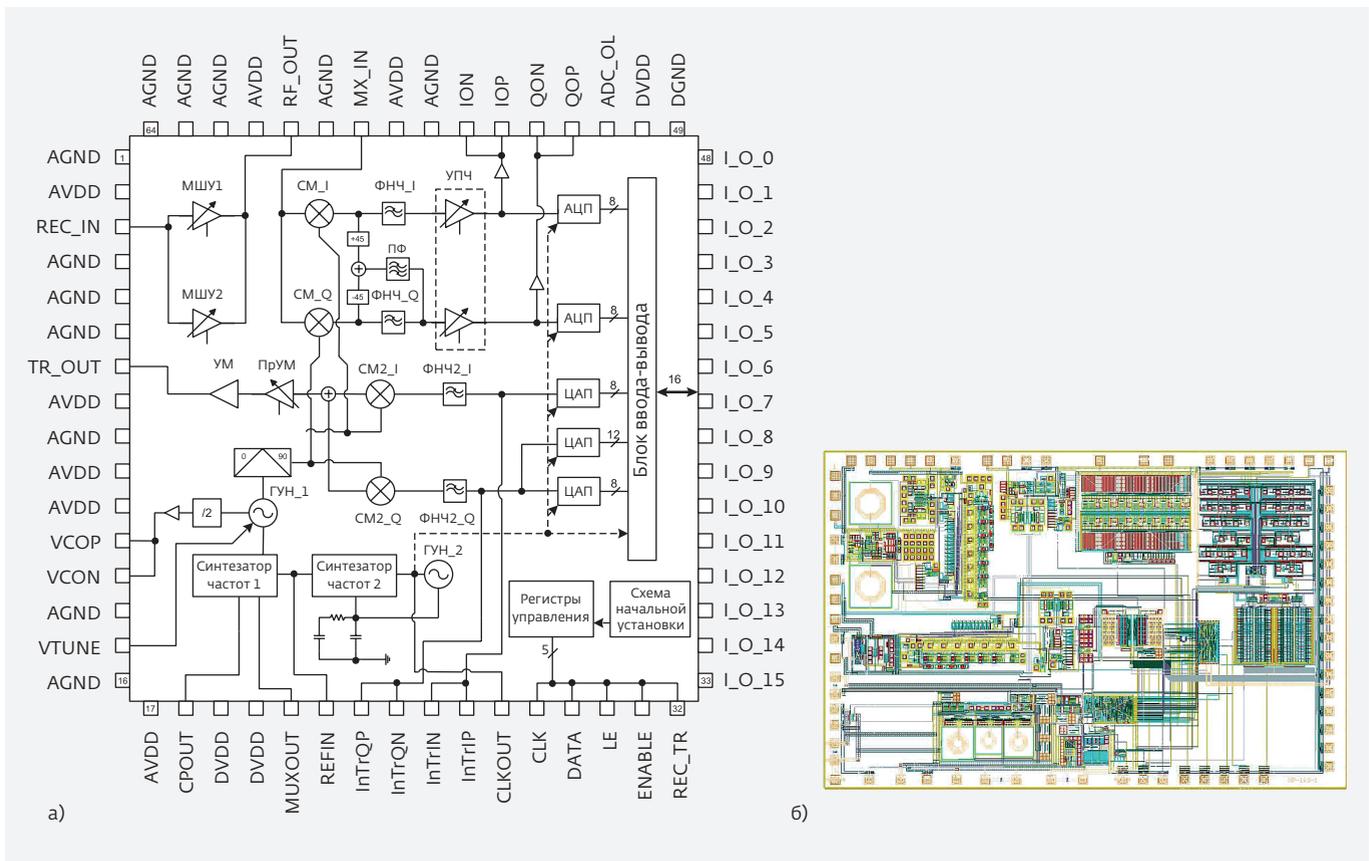


Рис.3. SiGe БиКМОП МИС K5200MX014: а – блок-схема, б – топология кристалла

таблицы коэффициентов преобразования и 12-разрядный ЦАП.

Микросхема аналогового приемника 1328ХБ3У (рис.2) (функциональный аналог MAX2120 фирмы Maxim) – первый отечественный опыт проектирования специализированной аналого-цифровой микросхемы функционально законченного приемного тракта для селектора каналов приемника спутникового цифрового телевидения [16].

Микросхема представляет собой приемный тракт прямого преобразования частот и включает в себя СФ-блоки МШУ, УПЧ с регулировкой усиления, квадратурного демодулятора, ГУН, синтезатора частот, программируемого двухканального ФНЧ I- и Q-сигналов, а также схемы компенсации напряжения смещения нуля по постоянному току и цифровые схемы управления. Размер кристалла SiGe БиКМОП приемника равен $2,5 \times 2,1$ мм², значительную его площадь (30%) занимает СФ-блок ФНЧ. Использование принципа прямого преобразования особенно эффективно в SiGe ГБТ схемотехническом базисе в связи с малым уровнем низкочастотных шумов и высокой согласованностью амплитудных и фазовых характеристик квадратурных каналов. Структура микросхемы (см. рис.2а) является типовой

и наиболее распространенной при построении СВЧ МИС приемных трактов аппаратуры массового производства (телевидения, радиостанций, мобильных телефонов, навигации и др.).

Наличие развитой библиотеки аналоговых и аналого-цифровых СФ-блоков позволяет оперативно проектировать и более функционально сложные МИС. Например, разработанная специализированная МИС K5200MX014 для локальной навигационной системы (рис.3) включает в себя приемные и передающие тракты (основные для обработки навигационных сигналов и дополнительные для передачи служебной информации) на основе СФ-блоков МШУ, квадратурных модуляторов и демодуляторов, УПЧ, синтезаторов частот, 8-разрядных АЦП, 8- и 12-разрядных ЦАП, фильтров нижних частот, предварительного усилителя мощности.

Основные характеристики МИС: диапазон рабочих частот 0,1–2,5 ГГц, коэффициент усиления приемного тракта 88 дБ, диапазон регулировки усиления приемного тракта 82 дБ с шагом 1 дБ, точка компрессии по входу приемного тракта 10 дБм, коэффициент шума приемного тракта 4 дБ, максимальная мощность на выходе передающего тракта 2 дБм при напряжении

питания 3 В и токе потребления в режиме приема/передачи 65/50 мА.

В дальнейшем "НИИМА "Прогресс", как ведущее предприятие в области проектирования SiGe СВЧ МИС, планирует развивать направление SiGe СВЧ МИС общего применения в диапазоне частот до 20–50 ГГц, а также совместно с разработчиками РЭА создавать комплекты SiGe БИКМОП специализированных микросхем диапазона частот до 5–15 ГГц (в частности, для малогабаритной аппаратуры связи, радиолокации, навигации и беспилотных систем). При этом предполагается использовать в основном отечественную производственно-технологическую базу компании "НИИМЭ и Микрон".

ЛИТЕРАТУРА

1. **Raminderpal S. et al.** Silicon Germanium Technology, Modeling and Design. ISBN: 978-0-471-66091-0, March 2004. Wiley-IEEE Press.
2. **Cressler J.D.** SiGe Technology: New Research Directions and Emerging Application Opportunities // IEEE Electron Devices Society Distinguished Lecture, 2009.
3. **Scholz R.F. et al.** IHP BiCMOS technologies for RF and mixed signal applications. – August, 2012. Fourth International Workshop on Analogue and Mixed Signal Integrated Circuits for Space Applications.
4. IBM launches fifth-gen SiGe process, compatible with 90 nm CMOS SEMICONDUCTORTODAY, 5 June 2013. <http://www.semiconductor-today.com/news-items/2013/jun/IBM>.
5. **Zolper J.C.** A DARPA Perspective on the Future of Electronics. 200 // International Conference on Compound Semiconductor Mfg.
6. **Gregoru A. et al.** 0,13µm SiGe BiCMOS Technology Fully Dedicated to mm-Wave Applications // IEEE Journal Solid-State Circuits. September, 2009. № 9. Vol. 44.
7. News Release. TowerJazz Expands its High Speed SiGe, SOI and RF CMOS Design Kits for Use with Agilent Technologies' Advanced Design System 2011 Software Release. http://ir.towerjazz.com/phoenix.zhtml?c=79678&p=irol-newsArticle_print&ID=1614289.
8. Infineon Introduces Single-chip 24 GHz Radar Solutions for Industrial and Commercial Sensor Systems // Infineon New Releases. October, 2012. № 4.
9. **Rebeiz G.** Recent Developments in SiGe and CMOS Phased Arrays for millimeter-Wave Application. ewh.iee.org/r6/phoenix/wad/MeetingSite_files/doc/Rebeiz_Phroenix.April, 2012, IEEE.
10. System-On-Chip Technology Produced Low Cost, Lightweight T/R Modules for Phased Array. <http://www.empf.org/programs/sigeSOS2010.htm>.
11. MMICs: state of the industry in 2013 and future prospects. – SEMICONDUCTOR TODAY, vol 7, Issue 9, November, 2013. www.Semiconductor-today.com.
12. **Красников Г.Я. и др.** Приборно-технический базис отечественной 0,18 мкм SiGe: С БИКМОП технологии // Материалы XIII Научно-технической конференции "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА". – "Пульсар 2014", Дубна. Октябрь, 2014. С. 115–118.
13. **Pawlikiewicz A.H., Hess D.** Choosing RF CMOS or SiGe BiCMOS in mixed-signal Design. www.rfdesign.com, March, 2006.
14. **Мухин И.И., Репин В.В.** Проектирование полупроводниковых БИС активных фазовращателей с использованием SiGe БИКМОП технологии // Изв. Вузов. Электроника. 2012. № 4. С. 54–59.
15. **Ионов Л.П., Мухин И.И., Кузнецов А.И., Свизев Г.А., Жебрун Е.А.** МИС синтезатора частот на основе прямого цифрового преобразования диапазона 1200 МГц // Материалы XIII Научно-технической конференции "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА". – "Пульсар 2014", Дубна. Октябрь, 2014. С. 67–71.
16. **Мальшев И.В., Ионов П.Л., Павлов В.Н., Милёхин В.В., Шабардин Р.С.** Кремний-германиевая СВЧ СБИС селектора каналов приемника спутникового телевидения // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы XII научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, "Пульсар-2013". С. 108–111.