

СВЧ функциональные блоки приемопередатчиков систем связи 5-го поколения

Н.А. Усачев, Д.И. Сотсков, И.А. Селищев, Н.М. Жидков, В.Н. Котов, В.В. Елесин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Аннотация: представлены результаты проектирования и экспериментальных исследований функциональных блоков генератора, управляемого напряжением, и понижающего смесителя, изготовленных по SiGe БиКМОП технологии 0,42/0,25 мкм и предназначенных для построения СВЧ приемопередающих СБИС К-диапазона.

Ключевые слова: СВЧ, кремний-германий, система на кристалле, доверенная электроника

1. Введение

Создание систем связи пятого поколения (5G) делает актуальной задачу оперативной разработки приемопередающих СБИС, сочетающих СВЧ тракт приемника, передатчика и гетеродина, тракт цифровой обработки и управления, а в ряде случаев микропроцессорное ядро и память [1, 2]. Создание подобных СВЧ приемопередающих СБИС невозможно без использования верифицированных в результате исследований функциональных блоков (ФБ) [2]. ФБ генератора, управляемого напряжением (ГУН) и понижающего смесителя (СМ) необходимы для построения гетеродинного и приемного трактов соответственно. Следует отметить, что верифицированные ФБ ГУН и СМ, предназначенные для построения приемопередающих СБИС систем связи 5-го поколения К-диапазона доверенного назначения (в т.ч. радиационно-стойкие), как правило, недоступны отечественным разработчикам, что делает актуальной задачу по их созданию. В настоящей работе представлены результаты проектирования и экспериментальных исследований ФБ ГУН с диапазоном выходных частот 20,8-24,6 ГГц и уровнем выходной мощности не менее 5,7 дБм и ФБ СМ с диапазоном частот по входу 25,5-26,5 ГГц, выходу промежуточной частоты 1-2 ГГц и коэффициентом преобразования не менее 5,5 дБ. Рассматриваемые ФБ выполнены по коммерческой SiGe БиКМОП технологии с проектными нормами 0,42/0,25 мкм и граничной частотой гетероструктурных биполярных транзисторов (ГБТ) равной 80 ГГц [2, 3].

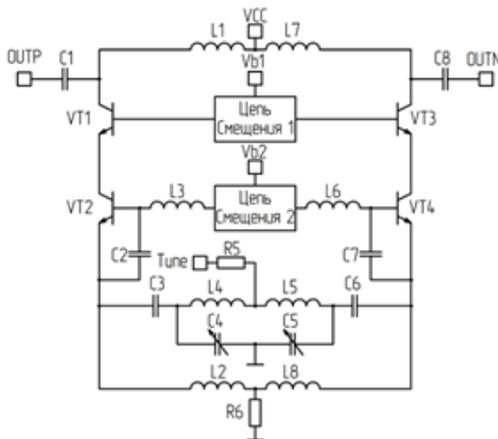
2. Описание функциональных блоков СМ и ГУН

ФБ ГУН, электрическая схема которого показана на рисунке 1,а, реализован по классической дифференциальной схеме Колпитца в касковом включении. Резонансный контур выполнен на основе индуктивностей L3 (L6), конденсаторов C2 (C7) и варикапов C4 (C5). Конденсаторы C3 (C6) применяются в качестве разделительных и не оказывают существенного влияния на значение резонансной частоты. Варикапы C4 (C5) выполнены на основе МОП-структур. Внешний вид топологии ФБ ГУН показан на рисунке 1,б.

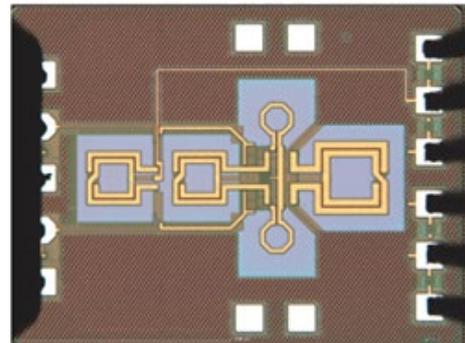
ФБ СМ, структурная схема которого показана на рисунке 2,а, состоит из смесительного ядра, буферных усилителей (БУ), полифазного фильтра (ППФ), схем смещения и защиты от электростатического разряда (ЭСР). Смесительное ядро состоит из двух классических ячеек Гильберта, обеспечивающих преобразование частоты синфазных (I) и квадратурных (Q) компонент сигнала. Входы радиочастотного сигнала и сигнала гетеродина также выполнены по

дифференциальной схеме построения. Формирование квадратурного сигнала (0° , 90° , 180° и 270°) гетеродина осуществляется посредством пассивного ППФ, потери в котором компенсируются с помощью БУ.

ФБ СМ и ГУН изготовлены по технологии SiGe БиКМОП 0,42/0,25 мкм (SGB25V) с граничной частотой ГБТ равной 80 ГГц и пятью слоями металлизации. В состав технологической библиотеки входят ГБТ трех типов ($F_t=80$ ГГц ($U_{кэ}=2,4$ В), 50 ГГц ($U_{кэ}=4$ В), и 30 ГГц ($U_{кэ}=7$ В)), цифровые и радиочастотные (в т.ч. с изолированным телом) МОП-транзисторы с напряжением питания 2,5 В, варикапы на основе МОП-структур [3].

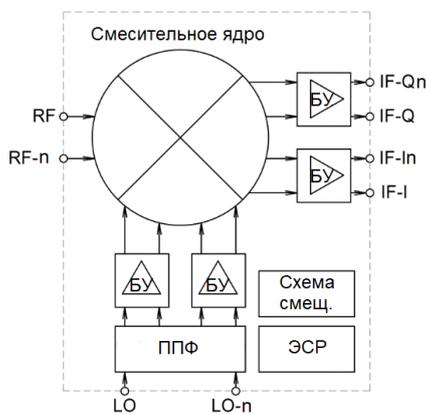


а

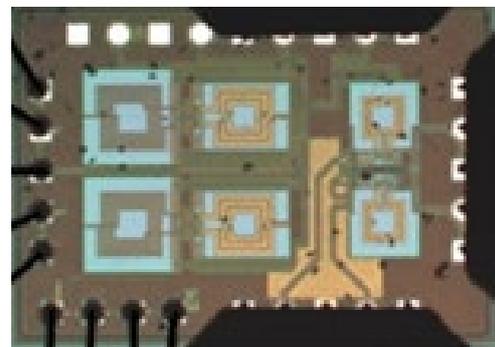


б

Рисунок 1. Функциональный блок генератора, управляемого напряжением, К-диапазона: электрическая схема (а), внешний вид топологии с установленными зондами (б)



а



б

Рисунок 2. Функциональный блок понижающего смесителя К-диапазона: структурная схема (а), внешний вид топологии с установленными зондами (б)

3. Результаты экспериментальных исследований

Исследования ФБ ГУН и СМ проводились с применением автоматизированного комплекса на основе зондовой станции Cascade Summit 12000 с возможностью измерения параметров изделий в диапазоне частот до 110 ГГц, включающего в своем составе векторный анализатор цепей, анализатор спектра (сигналов) с опцией измерения фазовых шумов, цифровой осциллограф, СВЧ генераторы, генераторы сигналов произвольной формы, программируемые источники питания [2, 4]. В результате исследований установлено, что диапазон частот выходного сигнала ($\Delta F_{вх}$) ФБ

ГУН составляет 20,8...24,6 ГГц при изменении управляющего напряжения ($\Delta U_{упр}$) от 0 до 4 В, значение мощности выходного сигнала ($P_{вых}$) составляет не менее 5,7 дБм, а потребляемая мощность ($P_{потр}$) не превышает 116 мВт при напряжении питания ($U_{пит}$) 3,3 В. Зависимости частоты и мощности выходного сигнала ФБ ГУН от значения $U_{упр}$ показаны на рисунке 3 соответственно.

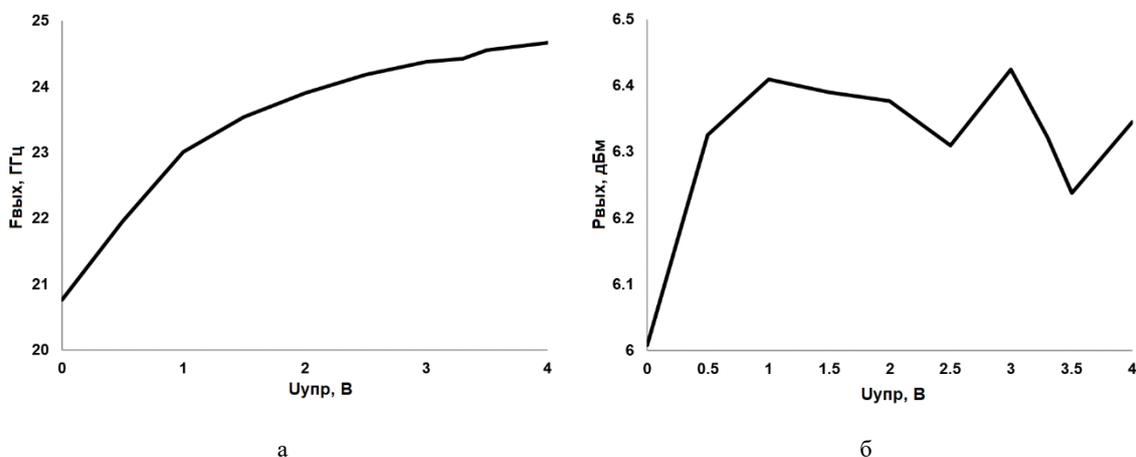


Рисунок 3. Зависимости частоты (а) и мощности (б) выходного сигнала функционального блока генератора, управляемого напряжением, К-диапазона

В результате исследований ФБ СМ установлено, что в диапазоне частот входного радиочастотного сигнала ($F_{вх}$) 25,5-26,5 ГГц и диапазоне частот выходного сигнала промежуточной частоты ($F_{вых}$) от 1 до 2 ГГц значение коэффициента преобразования составляет не менее 5,7 дБ, верхней границы линейности по входу не менее минус 4 дБм, а $P_{потр}$ не превышает 235 мВт при $U_{пит}$ 3,3 В.

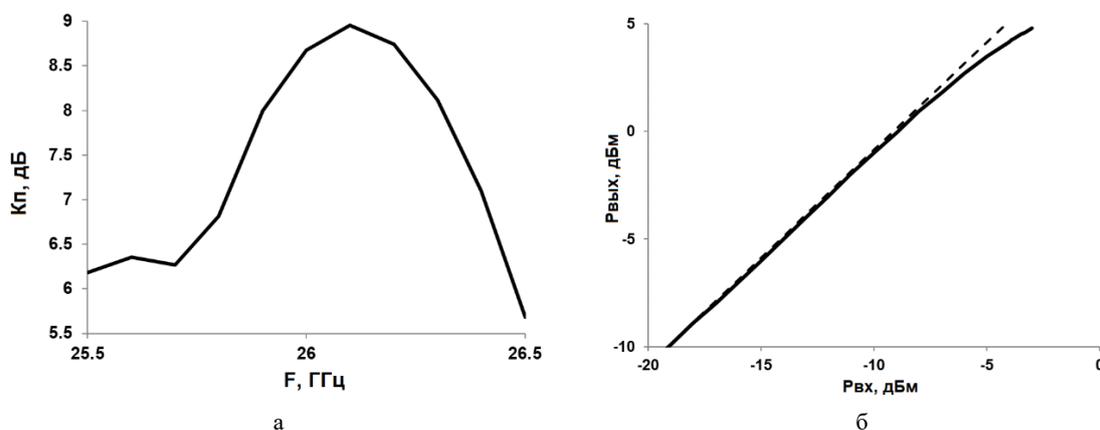


Рисунок 4. Зависимости частоты (а) и мощности (б) выходного сигнала функционального блока генератора, управляемого напряжением, К-диапазона

Сравнение представленных ФБ ГУН и СМ с ближайшими аналогами, выполненными по технологическим процессам с схожими характеристиками, проводилось с использованием комплексных показателей качества (FOM), определяемых с помощью выражений (1)- (3) соответственно [5], [6]:

$$FOM (ГУН) = L(fm) - 20 \log \left(\frac{f_c}{fm} \right) + 10 \log \left(\frac{P_{потр}}{1 \text{ мВт}} \right), \quad (1)$$

$$f_c = \frac{F_B + F_H}{2}, \quad (2)$$

$$FOM (CM) = K_{п} + R_{лин} - 10 \log \left(\frac{P_{потр}}{1 \text{ мВт}} \right). \quad (3)$$

Результаты сравнительного анализа, обобщенные в таблицах 1 и 2 соответственно, показывают что представленные ФБ находятся на уровне аналогов по значению FOM, а по ряду параметров (выходная мощность (ГУН), потребляемая мощность (СМ)) превосходят их.

Таблица 1. Параметры функционального блока генератора, управляемого напряжением

Наименование параметра	$\Delta F_{вых}, \text{ ГГц}$	$F_n, \text{ ГГц}$	$F_v, \text{ ГГц}$	$R_{вых}, \text{ дБм}$	$L(f_m), \text{ дБн/Гц}$	$R_{потр}, \text{ мВт}$	FOM, дБн/Гц
Данная работа	20, 8-24,6	20,8	24,6	>6	-95 (1 МГц)	116	-162
[7]	24,8-28,9	24,8	28,9	-14,7	-84 (1 МГц)	129	-152

Таблица 2. Параметры функционального блока понижающего смесителя

Наименование параметра	$F_{вх}, \text{ ГГц}$	$F_{вых}, \text{ ГГц}$	$K_{п}, \text{ дБ}$	$R_{лин}, \text{ дБм}$	$R_{потр}, \text{ мВт}$	FOM, дБм
Данная работа	25,5-26,5	1,0-2,0	5,5	-4	235	-22
[8]	28	2,0	3,0	-8	742	-34

3. Заключение

Представлены функциональные блоки генератора, управляемого напряжением, с выходными частотами 20,8-24,6 ГГц, и понижающего смесителя с диапазоном входных и выходных частот 25,5-26,5 ГГц и 1-2 ГГц соответственно, изготовленные по SiGe БиКМОП технологическому процессу 0,42/0,25 мкм. Функциональные блоки предназначены для построения приемопередающих СБИС систем связи пятого поколения К-диапазона.

Список литературы

1. K. Kibaroglu, M. Sayginer, G. M. Rebeiz, A 28 GHz Transceiver Chip for 5G Beamforming Data Links in SiGe BiCMOS // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). –2017. –P.74-77.
2. Елесин В. В. и др. Базовая технология проектирования широкой номенклатуры изделий СВЧ диапазона вида "система-на-кристалле" и "система в корпусе", ориентированной на отечественные кремниевые и арсенид-галлиевые контрактные производства: достижения, проблемы и ближайшие задачи // Межд. конф. «Микроэлектроника 2019». Сб. тез. – 2019. – С. 28-31.
3. Sotskov D. I. et al. Displacement Damage Effects Mitigation Approach for Heterojunction Bipolar Transistor Frequency Synthesizers // IEEE Transactions on Nuclear Science. –2020. –Vol. 67. –No. 11, –P. 2396-2404.
4. Kalashnikov O. A. et al. System-on-chip: Specifics of radiation behavior and estimation of radiation hardness. // Russian Microelectron. –2016. –Vol. 45. – No. 1. –P. 33–40.
5. Sato T., Okada K., Matsuzawa A. A New Figure of Merit of LC Oscillators Considering Frequency Tuning Range // 2011 IEEE 9th Int. Conf. on ASIC. –2011. –P.1-4.
6. K. Komoni, S. Sonkusale “Modeling, Simulation and Implementation of a Passive Mixer in 130nm CMOS Technology and Scaling Issues for Future Technologies”, IEEE MWSCAS–2008, –2008, –P. 410-413.
7. Hackl S. et al. A 28-GHz Monolithic Integrated Quadrature Oscillator in SiGe Bipolar Technology // IEEE Journal of Solid-State Circuits. –2003. –Vol. 38. –No. 1. –P. 135-137.
8. S. Hackl, et al. 28 GHz active I/Q mixer with integrated QVCO in SiGe bipolar technology // 28th European Solid-State Circuits Conference. –2002. –P. 159-162.