

ВНЕДРЕНИЕ SiGe-ТЕХНОЛОГИИ УСПЕХИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.Тимошенко¹, д.т.н., профессор

УДК 621.3.049.77
БАК 05.27.00

Промышленное внедрение и быстрое продвижение на рынок SiGe-технологии обусловлено в первую очередь развитием систем беспроводной связи, СВЧ-техники и высокоскоростных контрольно-измерительных приборов. Сегодня биполярные транзисторы с гетеропереходной базой, легированной германием, или гетеропереходные биполярные транзисторы (ГБТ), успешно конкурируют как с кремниевыми, так и с GaAs-транзисторами. Возможность объединения быстродействующих SiGe-приборов с КМОП-схемами открывает перспективу создания микропроцессоров с рекордной тактовой частотой и сверхширокополосных систем-на-кристалле. Рассмотрим основные свойства гетеропереходных биполярных транзисторов, примеры СВЧ-микросхем, созданных на базе кремний-германиевых ГБТ, а также перспективы развития SiGe-технологии.

Технология гетеропереходных биполярных транзисторов с кремний-германиевой базой (ГБТ) (в англоязычной литературе Heterojunction Bipolar Transistor – HBT) начала промышленно развиваться во второй половине 90-х годов прошлого века. Быстрое уменьшение как горизонтальных, так и вертикальных размеров транзисторов обеспечило доминирование SiGe-ГБТ на рынке интегральных СВЧ-микросхем для беспроводных и оптоволоконных систем связи. Современные промышленно освоенные технологии гетеропереходных транзисторов позволяют достичь минимальных размеров эмиттерного контакта на уровне от 90 до 130 нм при толщине базы транзисторов 20–30 нм.

Повышенный интерес к SiGe-технологии обусловлен также возможностью создания высокочастотных интегральных схем для контрольно-измерительного оборудования, что позволило расширить полосу пропускания этих приборов до 100 ГГц. Большой интерес представляет разработанный компанией IBM процессор на базе SiGe с тактовой частотой более 350 ГГц. Уже сейчас SiGe-чипы применяются в системах глобального позиционирования GPS, ГЛОНАСС, Galileo. Применение данной технологии перспективно в развитии радарных систем X- и V-диапазонов, а также сверхскоростного Интернета со скоростью передачи более 1 Гбит/с.

Значительный интерес представляет использование SiGe-ГБТ и КМОП-схем в едином технологическом процессе, что обеспечивает высокую степень интеграции и рекордные частотные характеристики схем.

¹ Национальный исследовательский университет "МИЭТ",
valeri04@hotmail.com.

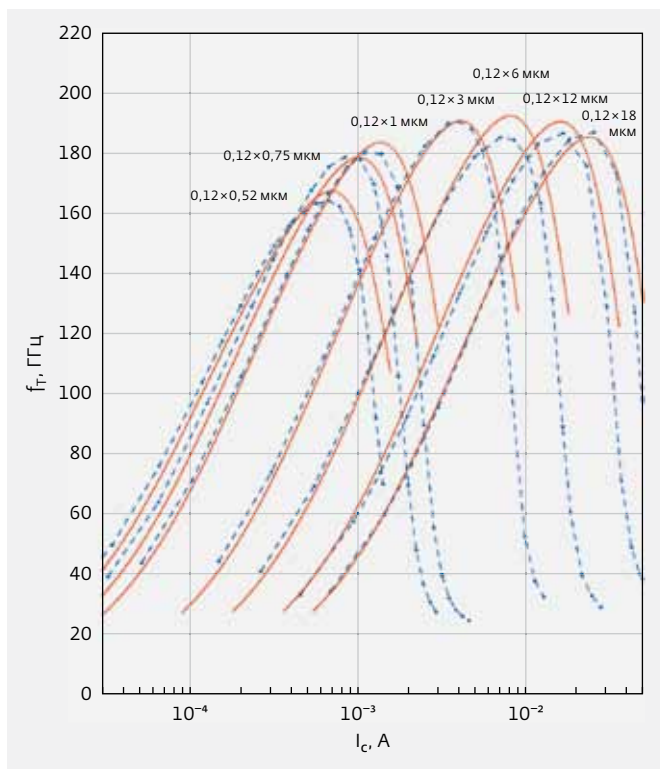


Рис.1. Зависимость верхней граничной частоты ГБТ компании IBM от тока эмиттера для разных размеров эмиттера [1]

Рассмотрим основные свойства и особенности гетеропереходных транзисторов с кремний-германиевой базой.

Главное преимущество ГБТ – экстремально высокое быстродействие. Верхняя граничная частота промышленно освоенных транзисторов достигает 300 ГГц (рис.1). Это обеспечивается встроенным полем в базе, малым временем пролета, а также малой постоянной времени заряда база-эмиттерного перехода. Выигрыш в быстродействии по сравнению с обычными кремниевыми биполярными транзисторами только за счет разницы в ширине запрещенной зоны составляет более чем в два раза [2]:

$$\frac{\tau_{b, SiGe}}{\tau_{b, Si}} = \frac{2(\bar{D}_{nb})_{Si}}{(\bar{D}_{nb})_{SiGe}} \frac{kT}{\Delta E_{g, Ge}} \left(1 - \frac{kT}{\Delta E_{g, Ge}} [1 - \exp(-\Delta E_{g, Ge}/kT)] \right) = 0,5 \dots 1, \quad (1)$$

где \bar{D}_{nb} – коэффициент диффузии носителей в базе, $\Delta E_{g, Ge}$ – изменение ширины запрещенной зоны за счет введения Ge, $kT = 4,11 \cdot 10^{-21}$ Дж, τ_b – время пролета через базу.

Проблема высокой плотности коллекторного тока решается путем выбора его оптимального значения, не превышающего пиковое, а также применения конструктивно-технологических решений, позволяющих

оптимально распределить токи и не допустить разрушение конструкции ГБТ.

Одновременно с высоким быстродействием может быть достигнут высокий коэффициент усиления за счет разницы в ширине запрещенной зоны эмиттера и базы. Выигрыш в коэффициенте усиления β_{SiGe} по сравнению с обычным интегральным биполярным транзистором может составлять от 3 до 10 раз [2]:

$$\frac{\beta_{SiGe}}{\beta_{Si}} = \frac{(\bar{D}_{nb})_{SiGe} (N_c N_v)_{SiGe} (\Delta E_{g, Ge}/kT) e^{-\Delta E_{g, Ge}/kT}}{(\bar{D}_{nb})_{Si} (N_c N_v)_{Si} (1 - e^{-\Delta E_{g, Ge}/kT})} = 3 \dots 10, \quad (2)$$

где N_v, N_c – эффективная плотность поверхностных состояний, соответственно, в валентной зоне и в зоне проводимости.

Существенным достоинством гетеропереходных транзисторов является высокое значение напряжения Эрли в рабочем диапазоне коллекторных напряжений (рис.2). Большая концентрация примеси в базе (порядка $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) приводит к тому, что основные части области пространственного заряда коллекторного и эмиттерного переходов расположены соответственно в области коллектора и эмиттера, следовательно, толщина базы слабо зависит от напряжений коллектор-база и эмиттер-база. В этом случае напряжение Эрли (V_A) для транзисторов может достигать 100 В, что в два-четыре раза больше, чем у обычного интегрального кремниевого транзистора [2]:

$$\frac{V_{A, SiGe}}{V_{A, Si}} \Big|_{V_{be}} = \exp(\Delta E_{g, Ge} s/kT) \frac{1 - \exp(-\Delta E_{g, Ge}/kT)}{\Delta E_{g, Ge}/kT} = 2 \dots 4. \quad (3)$$

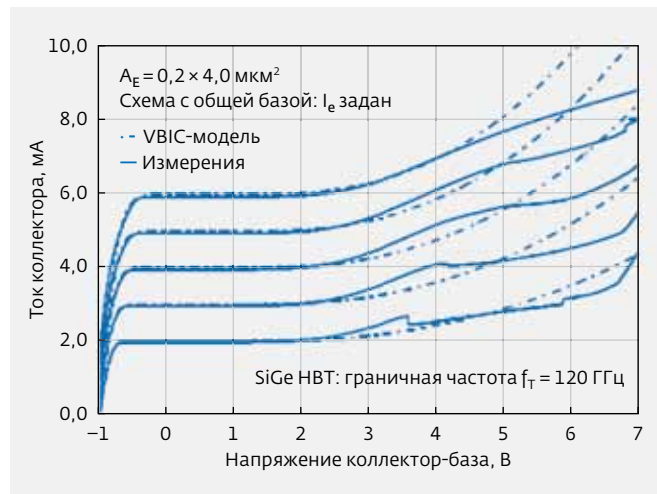


Рис.2. ВАХ ГБТ компании Jazz-Tower Semiconductor

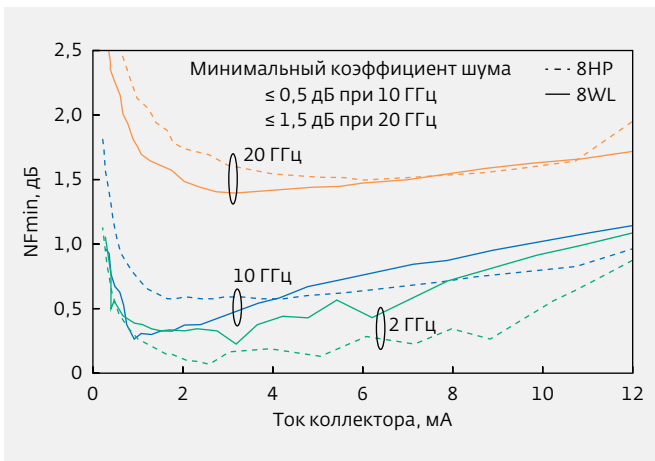


Рис.3. Шумовые характеристики ГБТ компании IBM

Следствием высокого напряжения Эрли является возможность дополнительного повышения коэффициента усиления транзистора при сохранении высокого напряжения прокола базы.

Цена, которую приходится платить за высокие быстродействие и коэффициент усиления, – меньшие, чем у обычных интегральных транзисторов, пробивные напряжения коллектор-эмиттер и обратные напряжения база-эмиттер, составляющие соответственно 3,5 и 1,3 В, что является следствием высокой напряженности электрического поля в тонкой базе.

Гетеропереходный транзистор обладает замечательными шумовыми характеристиками в СВЧ-диапазоне (рис.3) [5]. Это следствие сниженного сопротивления базы и высокого коэффициента усиления по току. Величина собственного фактора шума NF_{min} зависит от плотности эмиттерного тока, режима работы транзистора и технологического процесса:

Гетеропереходные биполярные прп-транзисторы ведущих компаний

Параметр	Компания		
	Jazz-Tower Semiconductor	IBM	ST Microelectronics
Размер эмиттера (ширина/длина), мкм	0,18/0,76-10,16	0,13/0,8-10	0,3/0,8-10
Коэффициент усиления по току, отн. ед.	290	250	300
Напряжение пробоя перехода эмиттер-база, В	2,4	2,35	4-5
Напряжение пробоя коллектор-база, В	6	6,5	10-12
Напряжение пробоя коллектор-эмиттер (схема ОЭ, управление током базы), В	2	1,8	4
Граничная частота передачи эмиттерного тока, ГГц	163	200	90
Максимальная частота передачи по мощности, ГГц	148	100	95

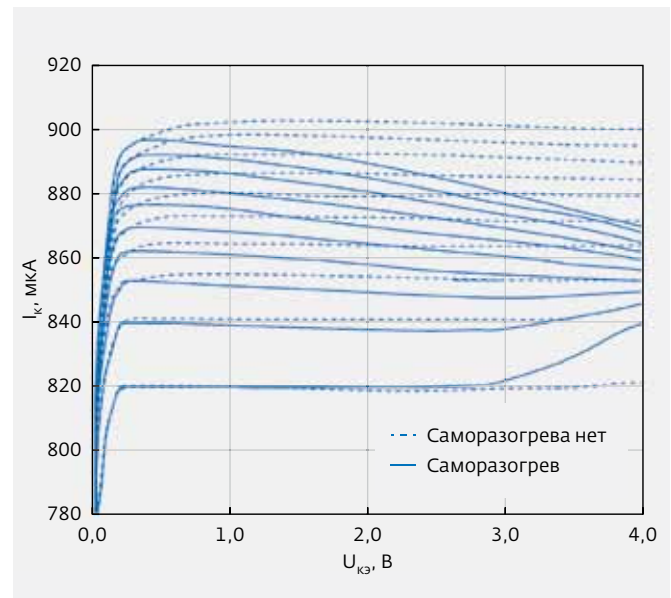


Рис.4. Эффект саморазогрева ГБТ

$$NF_{opt} = 1 + \frac{1}{\beta} + \sqrt{\frac{2g_m R_n + 2R_n (\omega C_i)^2}{\beta g_m} \left(1 - \frac{1}{2g_m R_n}\right)}, \quad (4)$$

$$NF_{min} = 1 + \frac{1}{\beta} + \sqrt{2g_m r_b \left(\frac{1}{\beta} + \left(\frac{f}{f_T}\right)^2\right)}, \quad (5)$$

где β – коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером, g_m – передаточная проводимость транзистора $R_n = (r_b + r_e)$, r_b, r_e – сопротивление тела базы и эмиттера соответственно, $C_i = C_{eb} + C_{kb}$, C_{eb}, C_{kb} – емкость перехода эмиттер-база и коллектор-база, соответственно, f_T – верхняя граничная частота в схеме с общим эмиттером.

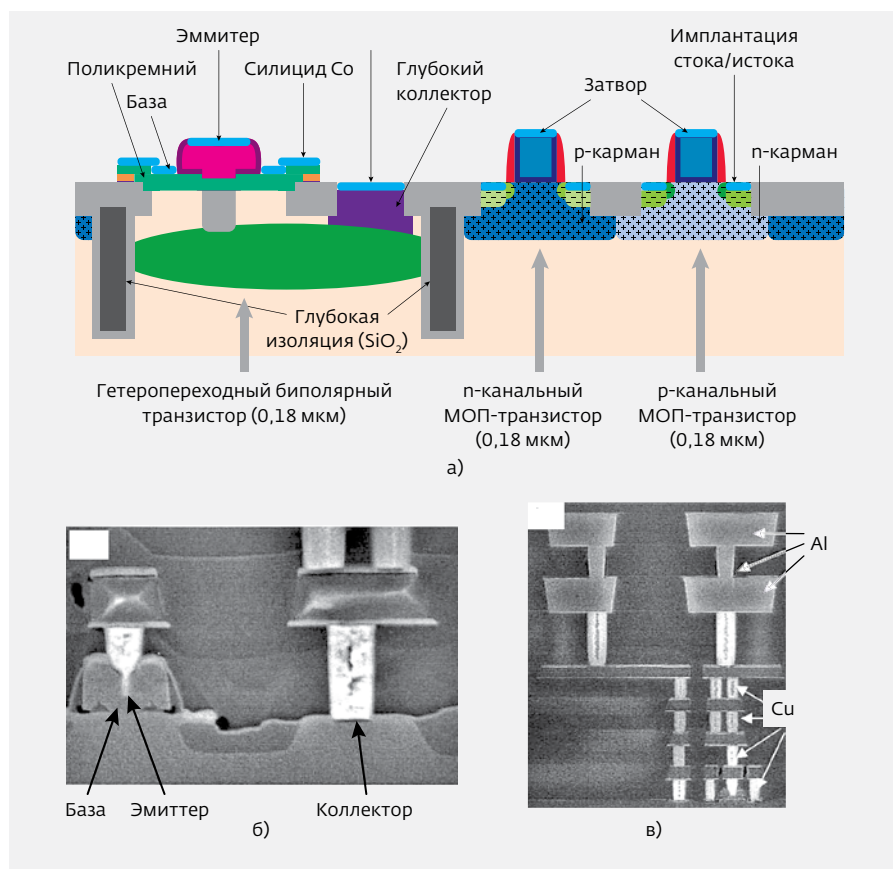


Рис.5. Интегрирование ГБТ и КМОП-транзисторов по технологии компании IBM: а) структурная схема, б) сечение ГБТ, в) структура 6-слойной металлизации

Как уже отмечалось, ГБТ работают при высоких плотностях эмиттерного тока. Следствием этого является эффект саморазогрева транзисторов, что приводит к деградации его характеристик (рис.4) [2]. Данный эффект компенсируется введением теплового сопротивления транзистора, зависящего от его геометрии и тока, протекающего через прибор. Проблема электротермической связи решается путем выбора конструкции и топологии транзистора, а проблема низкочастотной стабильности – соответствующего подбора нагрузочных элементов.

Кроме электротермической обратной связи, высокой плотности коллекторного тока и относительно низких пробивных напряжений ГБТ (порядка 2 В), к проблемам, требующим решения при внедрении SiGe-технологии, относится зависимость статических и динамических характеристик ГБТ от разброса параметров технологического процесса.

Тем не менее, высокие характеристики SiGe-ГБТ и возможность их интегрирования с КМОП-схемами позволяют рассматривать данную технологию как перспективную для создания систем-на-кристалле (СНК) СВЧ-

диапазона. Использование ГБТ позволит расширить частотный диапазон СНК до нескольких десятков ГГц. Примером интегрирования ГБТ с КМОП-транзисторами может служить технология третьего поколения компании IBM (рис.5) [3, 4]. Недавно компания запустила БИК-МОП-технология пятого поколения 9НР, совместимую с 90-нм КМОП-процессом, которая отличается пониженной потребляемой мощностью.

Компании Jazz-Tower Semiconductor, IBM и ST Microelectronics являются мировыми лидерами в промышленном освоении гетеропереходных SiGe ИС (см. табл.) [5, 6, 7]. На технологической базе ГБТ компаний Jazz-Tower Semiconductor и IBM спроектирован широкий набор интегральных схем СВЧ-диапазона.

Примером устройства, созданного на основе технологического процесса компании IBM, является СВЧ усилитель-ограничитель для высокоскоростных (до 100 Гбит/с) оптоволоконных каналов передачи данных [8]. Один из способов передачи информации по этим

каналам – мультиплексирование и передача потока данных с последующим их демultipлексированием. СВЧ усилители-ограничители, наряду с мультиплексорами/демultipлексорами играют решающую роль в этом процессе, так как служат входными/выходными блоками системы. Особенность данного устройства заключается в использовании оптимизированного усилителя Черри-Купера. Применение оригинальных мето-

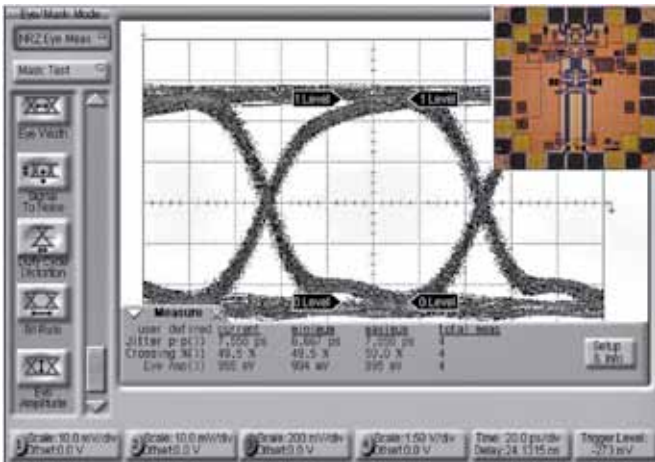


Рис.6. Глазковая диаграмма выходного сигнала усилителя-ограничителя для скорости передачи 12,5 Гбит/с (во врезке кристалл усилителя-ограничителя)

дов и принципов проектирования позволило получить джиттер не более 7,5 пс при полосе пропускания 12 ГГц и размахе выходного сигнала 995 мВ (рис.6). На базе усилителей-ограничителей разработан набор преобразователей кодов NRZ в коды RZ и NRZM.

Передача СВЧ-сигналов по кабельным линиям связана со значительным затуханием высокочастотной составляющей сигнала, что приводит к потере информации. Например, затухание сигнала при прохождении через кабель (тип RG-6, длина 100 м) на частоте 6 ГГц

достигает 50 дБ. При повышении частоты затухание растет. Для решения задачи адаптивного восстановления СВЧ-сигналов предназначены СВЧ-эквалайзеры. Кроме восстановления сигнала эти устройства позволяют повысить мощность передаваемого сигнала. Примером такого устройства служит микросхема дифференциального эквалайзера с усилителем мощности на базе SiGe-ГБТ (рис.7) [9].

На основе SiGe-ГБТ и КМОП-схем можно создать полноценную СВЧ СнК. Интегральная схема сверхширокополосного радиотрансивера, выполненная на основе SiGe-ГБТ, предназначена для работы в диапазоне частот 3–6 ГГц (рис.8, 9) [10]. Устройство содержит цепь самотестирования, которая позволяет соединить выход передатчика и вход приемника и проверить прохождение сигнала. Сигнал из антенны на вход приемника поступает от малошумящего усилителя (рис.10), усиление которого можно запрограммировать в диапазоне 4–24 дБ с помощью последовательно-параллельного интерфейса. Усилитель с автоматической регулировкой усиления до 50 дБ передает сигнал на аналого-цифровой преобразователь, после которого оцифрованный сигнал демультиплексируется на 16 каналов. Тактовая частота работы АЦП составляет 10,8 ГГц. Тактовый сигнал формируется с помощью схемы ФАПЧ (ФАПЧ1 на рис.8). На выходе демультиплексора формируются 16 дифференциальных сигналов данных и тактовый LVDS-сигнал.

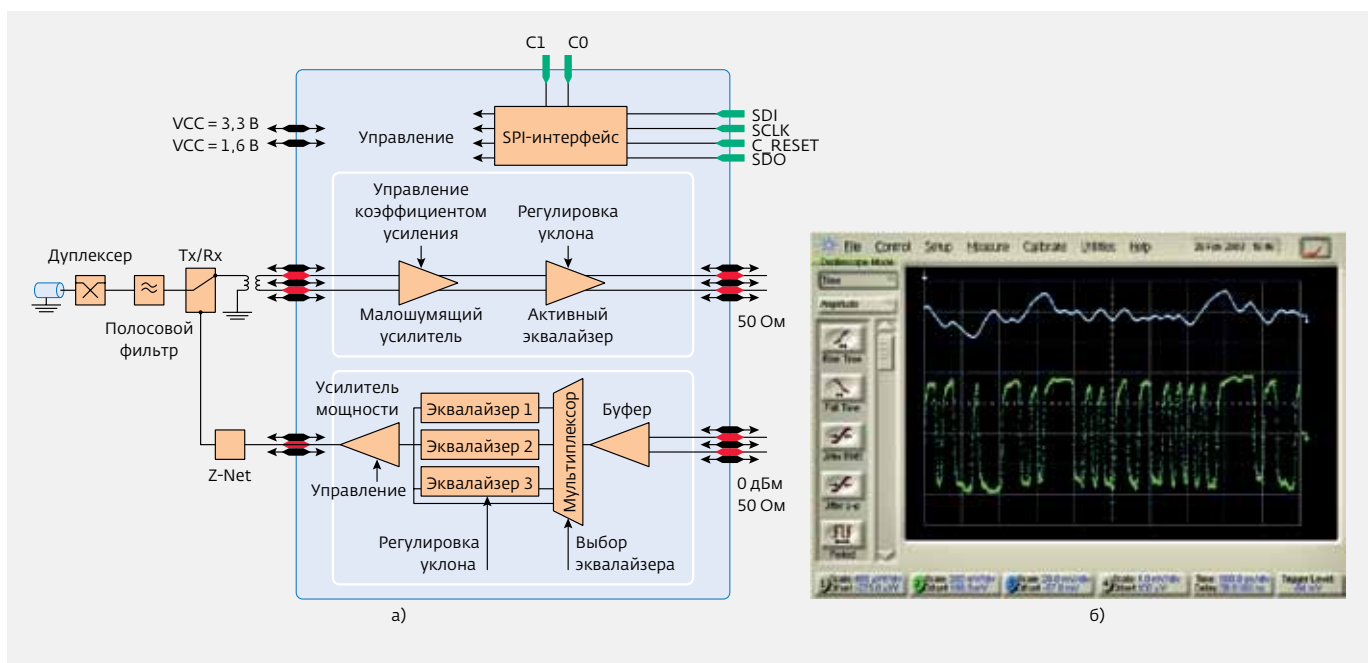


Рис.7. Дифференциальный эквалайзер с усилителем мощности в цепи передатчика: а) структурная схема, б) осциллограммы 6-ГГц сигналов на входе кабеля (вверху) и выходе эквалайзера (внизу)

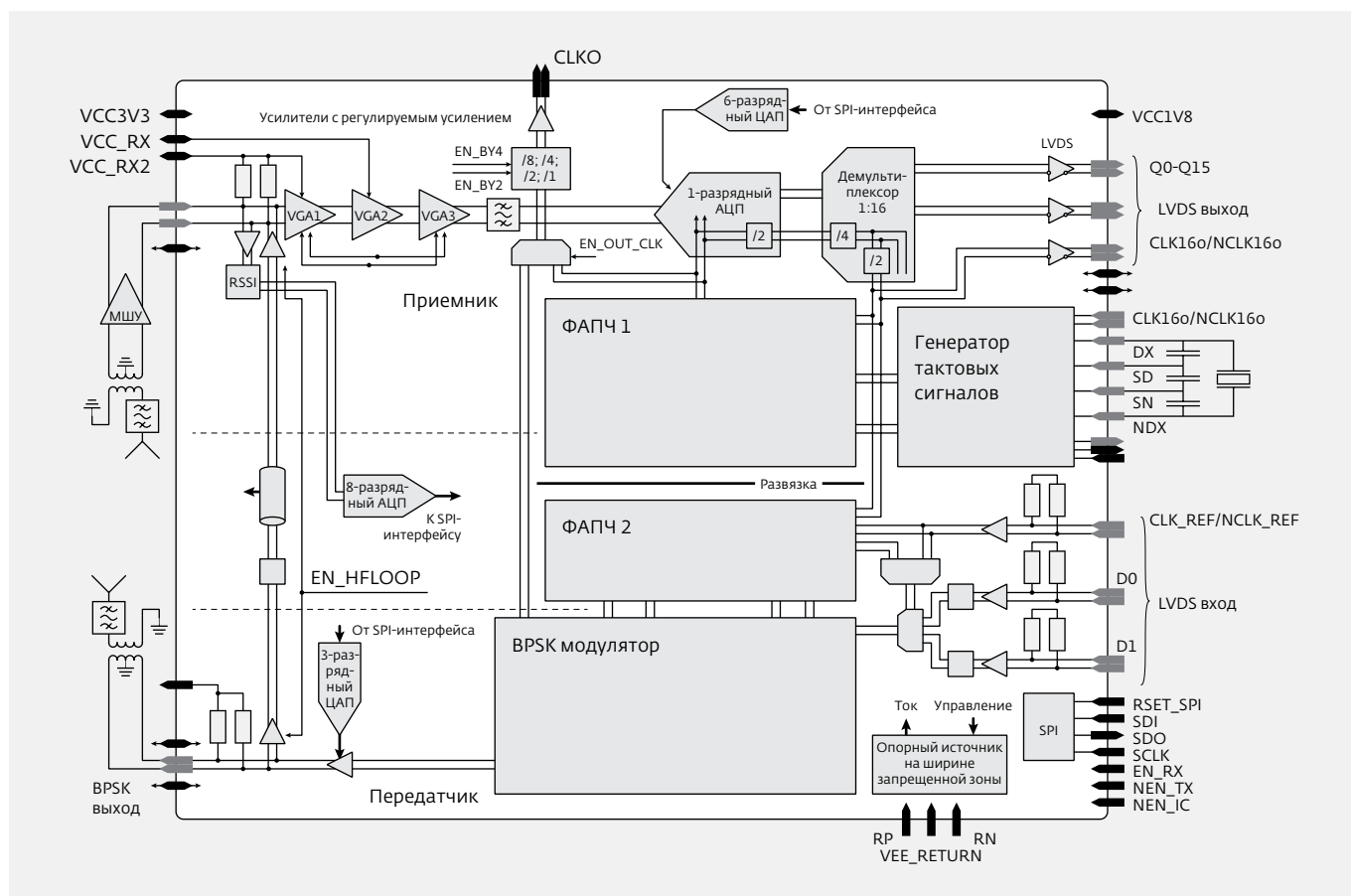


Рис.8. Структурная схема радиотрансивера

На вход передатчика из цифрового решающего устройства также поступают два потока LVDS-сигналов данных с частотой 675 МГц, которые мультиплексируются в один поток со скоростью передачи 1,35 ГГц и передаются на BPSK-модулятор. Синхронизация данных мультиплексора, регистра и BPSK-модулятора выполняется с помощью ФАПЧ2 (см. рис.8).

Маломощный усилитель (см. рис.10) характеризуется низким уровнем шума, приведенного ко входу усилителя, величина которого составляет менее 2 дБ в полосе от 3 до 6 ГГц [11]. Чувствительность приемника транзистера составляет не менее -70 дБм. Джиттер синтезатора частот приемника и передатчика не превышает 2 пс. Приемопередатчик может работать совместно с СВЧ-эквалайзером (см. рис.7) и усилителем мощности.

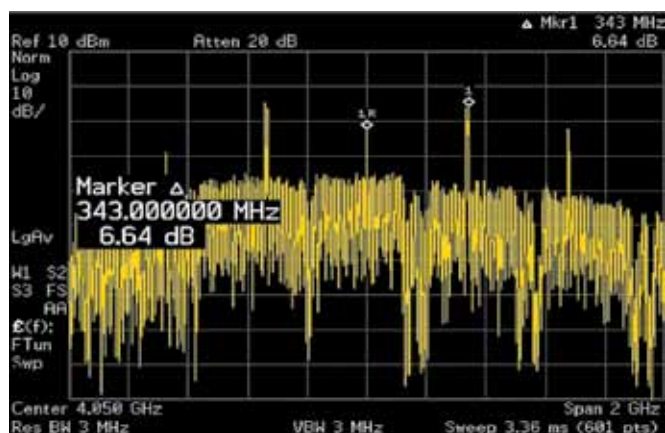
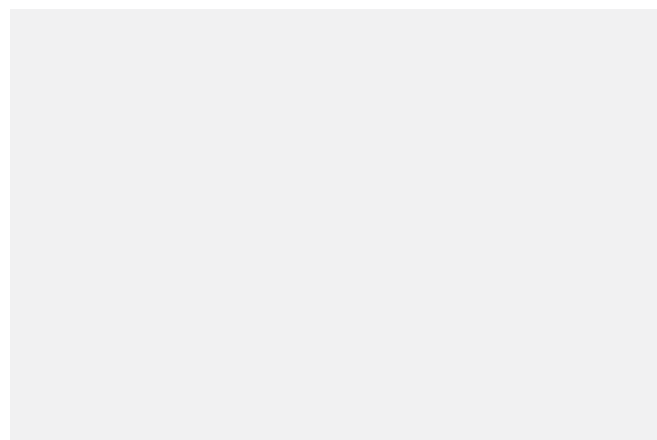


Рис.9. Спектр выходного сигнала радиотрансивера



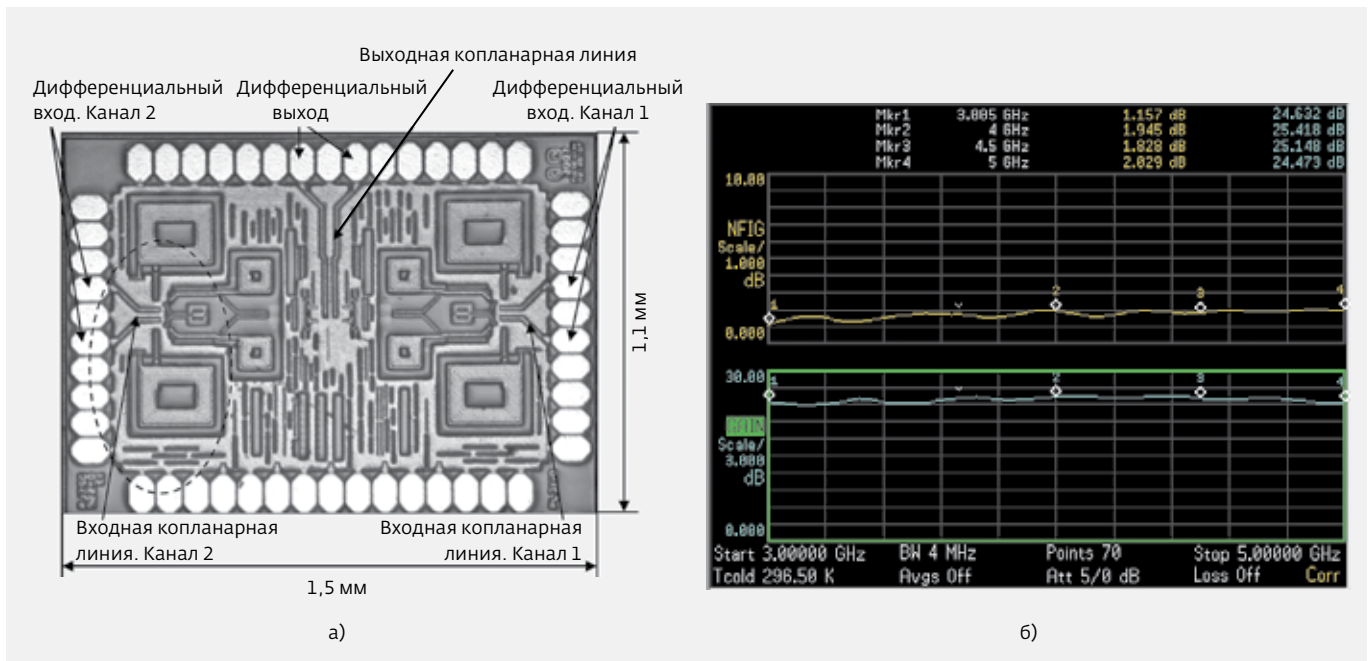


Рис.10. Малошумящий усилитель на основе ГБТ: а) топология кристалла, б) коэффициент шума (вверху), коэффициент усиления (внизу)

* * *

Совместимая с КМОП-процессом гетеропереходная технология кремний-германиевых транзисторов, которая освоена рядом компаний, позволяет создавать интегральные СВЧ-схемы, работающие в диапазоне частот до 20 ГГц. Развитие данной технологической базы связано, с одной стороны, с уменьшением размеров транзисторов в вертикальной плоскости, что позволит достичь граничной частоты 400–500 ГГц, а с другой стороны, – с уменьшением потерь при передаче сигналов по линиям связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fukun Tang.** Electronics Development for pSec Time-of-Flight Detectors. – <http://psec.uchicago.edu/library/doclib/documents/34>
2. **Cressler J.** Silicon Heterostructure Handbook. Materials, Fabrication, Devices, Circuits and Applications of SiGe and Si Strained-Layer Epitaxy. – Taylor & Francis, London, New York, 2006, 12227 p.
3. **Тимошенко В.П.** Состояние и перспективы развития технологии кремниевых гетеропереходных биполярных транзисторов для СВЧ-применений // Известия высших учебных заведений, Электроника № 5. 2006.
4. **Racanelli M., Kempf P.** SiGe BiCMOS Technology for Communication Systems, International conference on Solid State Devices and Materials, Naqoja, September, 2002.
5. **Voinigescu S., Popescu P. et al.** Circuits and Technologies for Highly Integrated Optical Networking ICs at 10 Gb/s to 40 Gb/s. – <http://www.eecg.toronto.edu/~sorinv/papers/cicc2001.pdf>
6. **Joseph J., Harnme D.L., Jagannathan B., Coolbaugh D. et al.** Status and Direction of Communication Technology – SiGe BiCMOS and RFCMOS. – Proceedings of the IEEE. Vol. 93. 2005. № 9. P. 1539–1558.
7. **Preisler E., Lanzerotti L., Hurwitz P., Racanelli M.** Demonstration of a 270 GHz f_T SiGe-C HBT Within a Manufacturing Proven 0.18 BiCMOS Process Without the Use of a Raised Extrinsic Base. – 2008 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting 13–15 Oct. 2008 Monterey. P. 125–128.
8. **Тимошенко В.П., Новожилов В.Е.** Высокоскоростное преобразование кода NRZ в код RZ. – Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России № 2/2007, с. 73–80.
9. **Тимошенко В.П.** An Integrated Equalizer of the Gigahertz Range Based on Heterojunction Bipolar Transistors. – ISSN 1063–7397, Russian Microelectronics, 2011, Vol. 40, № 7, pp. 446–452.
10. **Тимошенко В.П.** Сверхширокополосный трансивер гигагерцового диапазона на SiGe транзисторах. – Известия высших учебных заведений Электроника № 3 (83). 2010. С. 20–26.
11. **Тимошенко В.П.** Сверхширокополосный от 3 ГГц до 5 ГГц двухканальный малошумящий усилитель на гетеропереходных биполярных транзисторах: Материалы международной конференции RLCNC 2008. Радиолокация навигация связь. – Воронеж, 2008.